



**Conseil économique
et social**

Distr.
GÉNÉRALE

ECE/TRANS/WP.15/AC.2/2008/7
6 novembre 2007

FRANÇAIS
Original: ANGLAIS

COMMISSION ÉCONOMIQUE POUR L'EUROPE

COMITÉ DES TRANSPORTS INTÉRIEURS

Groupe de travail des transports
de marchandises dangereuses

Réunion commune d'experts sur le Règlement
annexé à l'Accord européen relatif au transport
international des marchandises dangereuses par
voies de navigation intérieures (ADN)*

Douzième session
Genève, 21-25 janvier 2008
Point 4 c) de l'ordre du jour provisoire

PROPOSITIONS D'AMENDEMENT AU RÈGLEMENT ANNEXÉ À L'ADN**

Propositions diverses d'amendement

Variantes de construction (bateaux-citernes)

Communication de la Commission centrale
pour la navigation du Rhin (CCNR)***

1. La CCNR propose d'inclure dans le Règlement annexé à l'ADN de nouvelles dispositions devant permettre des variantes de construction pour les bateaux-citernes (par exemple, pour les citernes à cargaison de grande contenance, des intervalles différents entre les parois latérales et les citernes à cargaison), ainsi que des dispositions concernant les procédures à appliquer dans ces cas.

* Cette réunion est organisée conjointement par la Commission économique pour l'Europe et la Commission centrale pour la navigation du Rhin (CCNR).

** Diffusées en langue allemande par la CCNR sous la cote CCNR/ZKR/ADN/WP.15/AC.2/2008/5.

*** Conformément au programme de travail du Comité des transports intérieurs pour la période 2006-2010 (ECE/TRANS/166/Add.1, programme d'activité 02.7 b)).

2. Les propositions visant à modifier la partie 9 du Règlement sont énoncées ci-après.

9.3.1.11.1 a)

9.3.2.11.1 a)

9.3.3.11.1 a)

9.3.1.11.2 a)

9.3.1.11.7 Ajouter au début du paragraphe la phrase suivante: «Sauf variantes de construction autorisées conformément à la section 9.3.4.».

Ajouter la nouvelle section 9.3.4, libellée comme suit:

«9.3.4 Variantes de construction

La contenance maximale admissible d'une citerne à cargaison, déterminée conformément aux 9.3.1.11.1, 9.3.2.11.1 et 9.3.3.11.1, peut être dépassée et les intervalles minimaux conformes aux 9.3.1.11.2 a) et 9.3.2.11.7 peuvent être non respectés à condition que les dispositions de la présente section soient satisfaites. La contenance d'une citerne à cargaison ne doit pas dépasser 1 000 m³.

Lorsqu'un bateau est construit en accord avec la présente section, une société de classification agréée doit déterminer comment les calculs faits conformément aux étapes 1 à 13 du 9.3.4.3 ont été utilisés et doit présenter ses conclusions pour approbation à l'autorité compétente. L'autorité compétente peut demander un complément de calculs et de preuves.

L'autorité compétente doit inclure cette variante de construction dans le certificat d'agrément conformément à la section 8.6.1.

9.3.4.1 Généralités

Les bateaux-citernes équipés de citernes à cargaison, dont la contenance dépasse la contenance maximale autorisée selon les 9.3.1.11.1, 9.3.2.11.1 ou 9.3.3.11.1, sont admissibles du point de vue de la sécurité à condition que les citernes à cargaison soient suffisamment protégées contre les collisions au moyen d'une structure latérale résistant à l'écrasement.

Les bateaux-citernes, dont la distance entre les parois latérales et les citernes à cargaison ne sont pas conformes aux dispositions des 9.3.1.11.2 a) ou 9.3.2.11.7, sont admissibles du point de vue de la sécurité à condition que les citernes à cargaison soient suffisamment protégées contre les collisions au moyen d'une structure latérale résistant à l'écrasement.

Il peut être démontré que la protection est suffisante en comparant le risque associé à une conception conventionnelle (conception de référence), qui respecte selon l'avis d'une société de classification agréée le Règlement ADN et les prescriptions minimales de construction, avec le risque associé à une conception résistant

à l'écrasement (nouvelle conception), caractérisée soit par des citernes à cargaison agrandies soit par des distances réduites entre les parois latérales et les citernes à cargaison. Lorsque le risque associé à la conception résistant à l'écrasement est égal ou inférieur à celui associé à la conception conventionnelle, l'équivalence ou la supériorité de la sécurité est prouvée.

Dans les sous-sections suivantes, il est expliqué comment doivent être prouvées l'équivalence ou la supériorité de la sécurité.

9.3.4.2 Démarche

Les principaux paramètres sont la probabilité de rupture d'une citerne à la suite d'une collision, et l'aire autour du bateau affectée par l'écoulement subséquent de la cargaison.

La formule suivante est employée pour décrire le risque

$$R = P C$$

où R est le risque [en m²],
 P est la probabilité de rupture de la citerne [],
 C est l'effet produit par la rupture de la citerne [en m²].

La probabilité P de rupture de la citerne dépend de la distribution de probabilité de l'énergie de collision apportée par les bateaux susceptibles d'entrer en collision avec le bateau-citerne, et de la capacité du bateau percuté à absorber, sans rupture de citerne, cette énergie de collision disponible.

L'effet physique C dû à la fuite de la cargaison consécutive à la rupture de la citerne est mesuré par l'aire affectée autour du bateau.

La formule permet de conclure qu'une augmentation de l'aire affectée par l'écoulement de la cargaison peut être compensée par une diminution de la probabilité d'écoulement. Une diminution de cette probabilité peut être obtenue au moyen d'une structure latérale résistant à l'écrasement.

Dans les sous-sections suivantes, il est montré comment calculer les probabilités de rupture des citernes, comment prévoir la capacité d'absorption de l'énergie de collision d'une structure latérale d'un bateau et comment déterminer l'augmentation des effets dus à la fuite de la cargaison des citernes à cargaison agrandies.

9.3.4.3 Méthode de calcul

La méthode de calcul doit en règle générale consister en 13 étapes élémentaires. Pour les étapes suivantes, il est utile de se reporter au tableau dans la figure 1 qui montre comment calculer la probabilité pondérée de rupture d'une citerne.

Étape 1

En sus de la (nouvelle) conception, caractérisée par des citernes à cargaison agrandies ou une distance réduite entre la paroi latérale et la citerne à cargaison et par une structure latérale résistant à l'écrasement, mettre au point une conception (conception de référence) avec les mêmes dimensions principales. Cette conception de référence doit satisfaire aux prescriptions énoncées dans les sections 9.3.1 (type G), 9.3.2 (type C) ou 9.3.3 (type N) et être conforme aux prescriptions minimales concernant les échantillons, telles qu'elles ont été établies par une société de classification agréée.

Les étapes 2 à 10 doivent être exécutées tant pour la conception de référence que pour la conception résistant à l'écrasement.

Étape 2

Déterminer les emplacements caractéristiques pertinents de collision ($i = 1$ à n).

Dans la figure 1 est représenté le cas général où il y a "n" emplacements caractéristiques de collision.

Ce nombre d'emplacements de collision dépend de l'aménagement structurel de la structure du bateau. Le choix des emplacements de collision doit être approuvé par une société de classification agréée.

Emplacements de collision dans le sens vertical

Bateau-citerne de type C et bateau-citerne de type N

Les emplacements de collision dans le sens vertical sont définis par les différences de tirant d'eau entre les bateaux percutants et percutés. En se fondant sur le tirant d'eau sur ballast et sur le tirant d'eau nominal tant des bateaux percutants que des bateaux percutés, les emplacements de collision dans le sens vertical sont définis comme suit (fig. 2):

T_{1max} est le tirant d'eau nominal du bateau percutant et T_{1min} est son tirant d'eau sur ballast, tandis que T_{2max} est le tirant d'eau nominal du bateau percuté et T_{2min} son tirant d'eau sur ballast. L'aire entre $T1 = T_{1min}$, $T1 = T_{1max}$ et $T2 = T_{2min}$, $T2 = T_{2max}$ est une mesure de l'étendue des possibilités de collision. Dans cet exemple, il y a trois emplacements de collision dans le sens vertical qui sont représentés par les trois surfaces ΔT_1 , ΔT_2 , ΔT_3 (fig. 2).

Le point P_1 correspond au cas où le bord inférieur de la partie verticale de l'étrave d'une barge de poussage ou de l'étrave en forme de V d'un bateau heurte un bateau au niveau du pont (voir le 9.3.4.4.6 pour les formes des étraves de bateau). Dans la figure 2, la surface triangulaire, située sous la diagonale P_1 correspond aux cas des "collisions au-dessus du pont".

Le point P_2 correspond au cas où le bord supérieur de l'étrave d'une barge de poussage ou de l'étrave en forme de V d'un bateau heurte le bord supérieur de la tôle de cisaillement. Dans la figure 2, la surface, comprise entre la diagonale P_1 et la diagonale P_2 , correspond aux cas des "collisions au niveau du pont".

La surface située au-dessus de la diagonale P_2 correspond aux cas des "collisions sous le pont".

Voir aussi la figure 3 qui illustre ces emplacements caractéristiques de collision dans le sens vertical.

Des facteurs de pondération utiles sont obtenus pour les différents cas de collision en divisant les aires respectives par l'aire totale correspondant à l'ensemble des cas de collision.

En ce qui concerne la masse tant du bateau percutant que du bateau percuté, il convient de choisir les valeurs les plus grandes pour les différents tirants d'eau, c'est-à-dire le point le plus haut sur chacune des diagonales.

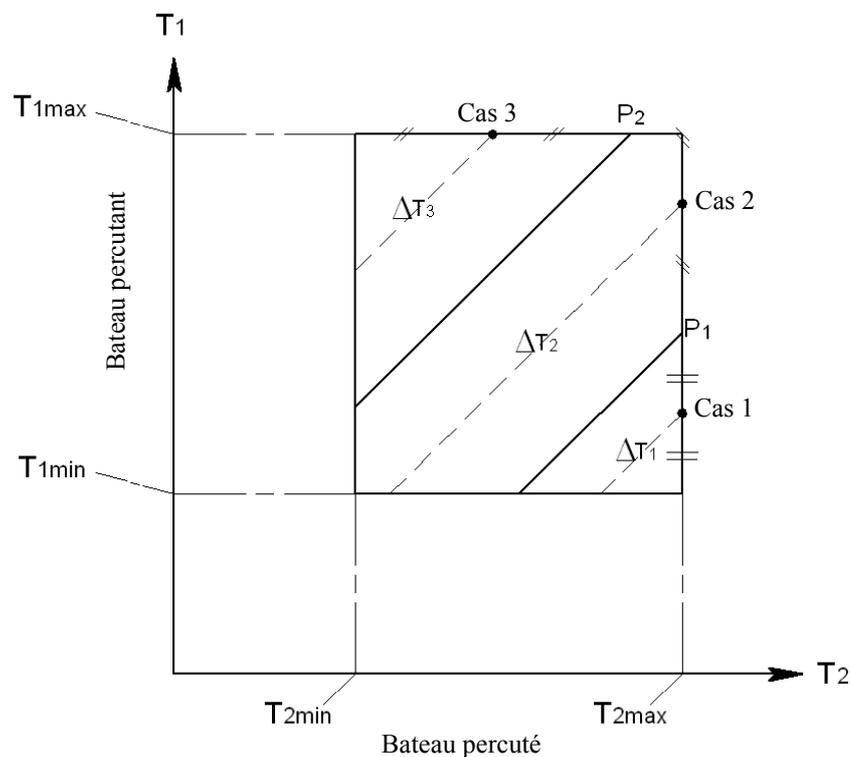


Figure 2. Définition des emplacements de collision dans le sens vertical

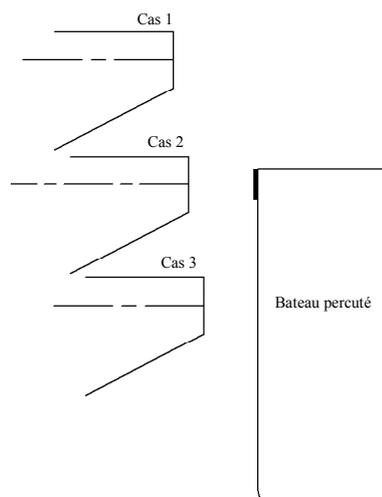


Figure 3. Exemple d’emplacements de collision dans le sens vertical

Bateaux-citernes de type C et de type N

En fonction de l’aménagement structurel du bateau, la société de classification peut exiger des emplacements de collision supplémentaires.

Bateau-citerne de type G

Habituellement, il ne doit être tenu compte que des collisions à mi-hauteur de la citerne. Toutefois, la société de classification peut exiger des emplacements de collision supplémentaires.

Emplacements de collision dans le sens de la longueur

Bateaux-citernes de type C et de type N

Habituellement, au moins trois emplacements caractéristiques de collision dans le sens de la longueur sont présents:

- Emplacement 1 au droit d’une cloison
- Emplacement 2 entre couples
- Emplacement 3 au droit d’un couple

Bateau-citerne de type G

Habituellement, au moins trois emplacements caractéristiques de collision sont présents:

- Emplacement 1 à une extrémité de citerne à cargaison
- Emplacement 2 entre couples
- Emplacement 3 au droit d’un couple

Nombre d'emplacements de collision

Bateaux-citernes de type C et de type N

La combinaison des emplacements de collision dans l'exemple cité donne $3 \times 3 = 9$ emplacements de collision.

Bateau-citerne de type G

La combinaison des emplacements de collision dans l'exemple cité donne $1 \times 3 = 3$ cas.

Emplacements supplémentaires pour le bateau-citerne de type G

Deux emplacements supplémentaires doivent être pris en compte, à savoir un heurt au niveau du berceau de la citerne et un heurt au niveau des systèmes antiflottement. Ces emplacements doivent être approuvés par la société de classification agréée.

Étape 3

Déterminer pour chaque emplacement caractéristique de collision un facteur de pondération rendant compte de la probabilité relative qu'un tel emplacement caractéristique soit heurté. Dans la figure 1, ces facteurs sont nommés $w_{floc}(i)$ (col. J). Le choix doit être soumis pour approbation à une société de classification agréée.

Le facteur de pondération pour chaque emplacement est le produit du facteur associé à l'emplacement dans le sens vertical par le facteur associé à l'emplacement dans le sens horizontal.

Emplacements de collision dans le sens vertical

Bateaux-citernes de type C et de type N

Les facteurs de pondération pour les divers emplacements de collision dans le sens vertical sont égaux aux rapports entre les aires partielles et l'aire totale, comme indiqué dans la figure 1. Pour le cas de collision 1, le facteur de pondération est égal au rapport entre l'aire du triangle délimité par P_1 , le tirant d'eau maximal du bateau percuté (T_{2max}) et le tirant d'eau minimal du bateau percutant (T_{1min}), et l'aire du rectangle entre les tirants d'eau minimal et maximal des bateaux percutants et percutés.

Bateau-citerne de type G

Le facteur de pondération est égal à 1, puisqu'il n'y a qu'un seul emplacement de collision.

Emplacements de collision dans le sens de la longueur

Bateaux-citernes de type C et de type N

Les facteurs de pondération pour les emplacements de collision dans le sens de la longueur sont égaux aux rapports entre les longueurs caractéristiques associées aux emplacements caractéristiques de collision et la longueur de la citerne.

Les longueurs caractéristiques sont définies ci-après:

- Collision au droit d'une cloison: $0,2 \times$ l'espacement entre porques vers l'arrière et/ou vers l'avant d'une cloison, sans dépasser 450 mm;
- Collision au droit d'un couple: $0,2 \times$ l'espacement entre porques vers l'arrière et/ou vers l'avant d'un couple, sans dépasser 450 mm;
- Collision entre couples: longueur de la citerne diminuée de la longueur associée aux "collisions au droit d'une cloison" et de la longueur associée aux "collisions au droit d'un couple".

Bateau-citerne de type G

Les facteurs de pondération pour les emplacements de collision dans le sens de la longueur sont égaux aux rapports entre les longueurs caractéristiques associées aux emplacements caractéristiques de collision et la longueur de la citerne.

Les longueurs caractéristiques sont définies ci-après:

- Collision à une extrémité de citerne: distance entre la cloison transverse et le début de la partie cylindrique de la citerne;
- Collision au droit d'un couple: $0,2 \times$ l'espacement entre porques vers l'arrière et/ou vers l'avant d'un couple, sans dépasser 450 mm;
- Collision entre couples: longueur de la citerne diminuée de la longueur associée aux "collisions à une extrémité de citerne" et de la longueur associée aux "collisions au droit d'un couple".

Étape 4

Calculer la capacité d'absorption de l'énergie pour chaque emplacement de collision. La capacité d'absorption de l'énergie est définie comme l'énergie interne plus l'énergie de glissement absorbée par le bateau percuté au cours de la pénétration par une étrave percutante, jusqu'à une pénétration où la citerne à cargaison présente un début de rupture. Ces énergies doivent être calculées à l'aide de calculs explicites par éléments finis, conformément au 9.3.4.4.1.

Ces calculs doivent être faits pour deux scénarios de collision différents:

Le scénario I impliquant une étrave de barge de poussage qui pénètre le bateau percuté.

Le scénario II impliquant une étrave de bateau en forme de V qui pénètre le bateau percuté.

Les formes des étraves sont définies au 9.3.4.4.6.

Dans la figure 1, ces énergies sont nommées E_{loci} et sont indiquées dans la colonne D.

Tableau 1. Facteurs de réduction de la vitesse pour le scénario I ou le scénario II

		Causes				
		Erreur de communication et mauvaise visibilité	Erreur technique	Erreur humaine		
		0,50	0,20	0,30		
Scénarios les plus défavorables	I	Étrave de barge de poussage, heurtant à un angle de 55°	0,80	0,66	0,50	1,00
	II	Étrave de bateau en forme de V, heurtant à un angle de 90°	0,20	0,30		1,00

Étape 5

Calculer, pour chaque capacité d'absorption de l'énergie de collision $E_{loc(i)}$, la probabilité associée de dépassement, à savoir la probabilité de rupture de la citerne.

À ces fins, la formule pour les fonctions de densité de probabilité cumulative (CPDF) ci-dessous sera employée. Les coefficients appropriés seront choisis dans le tableau pour la masse effective du bateau percuté.

$$P_{x\%} = C_1 E^3_{loc(i)} + C_2 E^2_{loc(i)} + C_3 E_{loc(i)} + C_4$$

où: $P_{x\%}$ est la probabilité de rupture de la citerne,

C_{1-4} est le coefficient indiqué dans le tableau,

$E_{loc(i)}$ est la capacité d'absorption de l'énergie.

La masse effective est égale au déplacement maximal du bateau multiplié par un facteur 1,4. Les deux scénarios de collision (tableau 1) doivent être examinés.

Dans le cas du scénario I (étrave de barge de poussage à 55°), il doit être tenu compte de trois courbes CPDF:

CPDF 50 % (vitesse = 0,5 V_{max});

CPDF 66 % (vitesse = 2/3 V_{max});

CPDF 100 % (vitesse = V_{max}).

Dans le cas du scénario II (étrave en forme de V à 90°), il doit être tenu compte de deux courbes CPDF:

CPDF 30 % (vitesse = 0,3 V_{max});

CPDF 100 % (vitesse = V_{max}).

Dans la figure 1 (col. F), ces probabilités sont nommées $P50\%$, $P66\%$, $P100\%$ et $P30\%$, $P100\%$, respectivement.

Tableau 2. Coefficients pour les courbes CPDF

Masse effective Bateau percuté Tonnes	Vitesse = 1 x V_{max}				Intervalle
	Coefficients				
	C_1	C_2	C_3	C_4	
14 000	4,106E-05	-2,507E-03	9,727E-03	9,983E-01	4<E<39
12 000	4,609E-05	-2,761E-03	1,215E-02	9,926E-01	4<E<36
10 000	5,327E-05	-3,125E-03	1,569E-02	9,839E-01	4<E<33
8 000	6,458E-05	-3,691E-03	2,108E-02	9,715E-01	4<E<31
6 000	7,902E-05	-4,431E-03	2,719E-02	9,590E-01	4<E<27
4 500	8,823E-05	-5,152E-03	3,285E-02	9,482E-01	4<E<24
3 000	2,144E-05	-4,607E-03	2,921E-02	9,555E-01	2<E<19
1 500	-2,071E-03	2,704E-02	-1,245E-01	1,169E+00	2<E<12

Masse effective Bateau percuté Tonnes	Vitesse = $\frac{2}{3} \times V_{\max}$				Intervalle
	Coefficients				
	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	
14 000	4,638E-04	1,254E-02	2,041E-02	1,000E+00	2<E<17
12 000	5,377E-04	-1,427E-02	2,897E-02	9,908E-01	2<E<17
10 000	6,262E-04	-1,631E-02	3,849E-02	9,805E-01	2<E<15
8 000	7,363E-04	-1,861E-02	4,646E-02	9,729E-01	2<E<13
6 000	9,115E-04	-2,269E-02	6,285E-02	9,573E-01	2<E<12
4 500	1,071E-03	-2,705E-02	7,738E-02	9,455E-01	1<E<11
3 000	-1,709E-05	-1,952E-02	5,123E-02	9,682E-01	1<E<8
1 500	-2,479E-02	1,500E-01	-3,218E-01	1,204E+00	1<E<5

Masse effective Bateau percuté Tonnes	Vitesse = $0,5 \times V_{\max}$				Intervalle
	Coefficients				
	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	
14 000	2,621E-03	-3,978E-02	3,363E-02	1,000E+00	1<E<10
12 000	2,947E-03	-4,404E-02	4,759E-02	9,932E-01	1<E<9
10 000	3,317E-03	-4,873E-02	5,843E-02	9,878E-01	2<E<8
8 000	3,963E-03	-5,723E-02	7,945E-02	9,739E-01	2<E<7
6 000	5,349E-03	-7,407E-02	1,186E-01	9,517E-01	1<E<6
4 500	6,303E-03	-8,713E-02	1,393E-01	9,440E-01	1<E<6
3 000	2,628E-03	-8,504E-02	1,447E-01	9,408E-01	1<E<5
1 500	-1,566E-01	5,419E-01	-6,348E-01	1,209E+00	1<E<3

Masse effective Bateau percuté Tonnes	Vitesse = $0,3 \times V_{\max}$				Intervalle
	Coefficients				
	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	
14 000	5,628E-02	-3,081E-01	1,036E-01	9,991E-01	1<E<3
12 000	5,997E-02	-3,212E-01	1,029E-01	1,002E+00	1<E<3
10 000	7,477E-02	-3,949E-01	1,875E-01	9,816E-01	1<E<3
8 000	1,021E-02	-5,143E-01	2,983E-01	9,593E-01	1<E<2
6 000	9,145E-02	-4,814E-01	2,421E-01	9,694E-01	1<E<2
4 500	1,180E-01	-6,267E-01	3,542E-01	9,521E-01	1<E<2
3 000	7,902E-02	-7,546E-01	5,079E-01	9,218E-01	1<E<2
1 500	-1,031E+00	2,214E-01	1,891E-01	9,554E-01	0,5<E<1

L'intervalle de validité de la formule est indiqué dans la colonne 6,

en dessous de cet intervalle: $P_{x\%} = 1$,

au-dessus de cet intervalle: $P_{x\%} = 0$.

Étape 6

Calculer les probabilités pondérées de rupture de la citerne en multipliant chacune des probabilités de rupture $P(\#\#)\%$ (fig. 1, col. F) par les facteurs de pondération indiqués dans le tableau 3.

Tableau 3. Facteurs de pondération pour chacune des vitesses caractéristiques de collision

			<i>Facteur de pondération</i>
Scénario I	CPDF 50 %	wf50 %	0,2
	CPDF 66 %	wf66 %	0,5
	CPDF 100 %	wf100 %	0,3
Scénario II	CPDF 30 %	wf30 %	0,7
	CPDF 100 %	wf100 %	0,3

Dans la figure 1 (col. H), ces probabilités sont nommées $Pw50\%$, $Pw66\%$, etc.

Étape 7

Additionner toutes les probabilités $Pw(\#\#)\%$ (fig. 1, col. H) pour chaque emplacement de collision considéré. On obtient ainsi les probabilités résultantes $Ploc(i)$ (fig. 1, col. I).

Étape 8

Multiplier les probabilités de rupture de la citerne pour chaque emplacement de collision par les facteurs de pondération $wfloc(i)$ (fig. 1, col. J) associés aux emplacements de collision. Ajouter toutes les probabilités pondérées tant pour le scénario I que pour le scénario II. On obtient ainsi les probabilités de rupture pondérées pour les deux scénarios de collision.

Étape 9

Ajouter les probabilités pondérées $Pwloc(i)$ tant pour le scénario I que pour le scénario II. On obtient ainsi $PscenI$ et $PscenII$ (fig. 1, col. L).

Étape 10

Calculer la probabilité finale de rupture de la citerne au moyen de la formule ci-dessous (fig. 1, col. O):

$$P_w = 0,8 P_{scenI} + 0,2 P_{scenII}$$

Étape 11

P_w pour la nouvelle conception est nommé P_n .

P_w pour la structure de référence est nommé P_r .

Étape 12

Calculer l'augmentation de l'effet, en cas de rupture de la citerne, due aux citernes à cargaison agrandies.

Pour les citernes à cargaison, de contenance comprise entre 380 m³ et 1 000 m³, contenant des matières liquides ou gazeuses inflammables, toxiques et acides, on supposera que l'effet augmente linéairement avec la contenance de la citerne (facteur de proportionnalité = 1).

La formule suivante sera employée:

$$\frac{C_n}{C_r} = \frac{V}{V_r}$$

où: C_n est l'effet associé à la nouvelle conception, caractérisée par des citernes à cargaison agrandies,

C_r est l'effet associé à la conception de référence, caractérisée par des citernes à cargaison de 380 m³,

V est la contenance maximale de la citerne à cargaison agrandie,

V_r est la contenance maximale de la citerne à cargaison du bateau de référence.

Cette formule a été conçue pour les cargaisons caractéristiques énumérées dans le tableau ci-après.

Tableau 4. Cargaisons caractéristiques

	Numéro ONU	Description
Benzène	1114	Liquide inflammable Groupe d'emballage II Dangereux pour la santé
Acrylonitrile stabilisé (ACN)	1093	Liquide inflammable Groupe d'emballage I Toxique, stabilisé
Hexanes	1208	Liquide inflammable Groupe d'emballage II
Nonanes	1920	Liquide inflammable Groupe d'emballage III
Ammoniac anhydre	1005	Gaz toxique et corrosif Liquéfié, sous pression
Propane	1978	Gaz inflammable Liquéfié, sous pression

Si l'on prévoit que l'aire affectée par l'écoulement d'une cargaison particulière aura un facteur de proportionnalité plus grand que 1, comme supposé dans l'étape 12, le calcul de l'étendue de l'aire affectée doit se faire séparément. Et c'est avec l'aire affectée ainsi calculée que doit se faire la comparaison décrite dans l'étape 13.

Étape 13

Comparer le rapport des probabilités $\frac{Pr}{Pn}$ et le rapport des effets $\frac{Cn}{Cr}$.

Lorsque $\frac{Cn}{Cr} \leq \frac{Pr}{Pn}$, la nouvelle conception satisfait aux prescriptions.

9.3.4.4 Calcul de la capacité d'absorption de l'énergie

Le calcul de la capacité d'absorption de l'énergie de collision doit se faire à l'aide d'une analyse par éléments finis. Cette analyse sera effectuée en employant un code agréé d'éléments finis (par exemple, LS-DYNA, PAM-CRASH, ABAQUS, etc.), qui permette de traiter tant les effets géométriques que les effets non linéaires sur les matériaux. Le code devra aussi permettre de simuler la rupture de manière réaliste.

Le programme effectivement employé et le niveau de détail des calculs doivent être approuvés par une société de classification agréée.

9.3.4.4.1 *Modèles aux éléments finis*

Avant tout, il faut mettre au point deux modèles aux éléments finis, l'un pour la structure résistant à l'écrasement, l'autre pour la structure de référence. Il faut, pour l'essentiel, tenir compte dans ces modèles de toutes les déformations plastiques qui pourraient se produire dans les cas de collision considérés. En principe, la longueur totale de la zone de cargaison doit être modélisée. Aux deux extrémités de cette zone, les degrés de liberté de translation doivent être limités. Puisque dans la plupart des situations de collision, la courbure globale des sections de bateau est négligeable pour ce qui concerne l'évaluation de l'énergie de déformation plastique, il suffit de ne tenir compte que de la moitié des sections du bateau. Dans ce cas, les déplacements transversaux au niveau de la ligne médiane doivent être contraints. Après avoir mis au point un modèle aux éléments finis, un calcul pour une collision d'essai doit être effectué pour assurer qu'aucune déformation plastique ne se produit au voisinage des bords où des limites ont été imposées. Si ce n'est pas le cas, la zone modélisée doit être augmentée.

D'une manière générale, les zones structurelles impliquées dans les collisions doivent être assez finement modélisées, tandis que les autres parties peuvent être modélisées plus grossièrement. La densité des mailles élémentaires doit permettre de décrire raisonnablement les déformations locales de plissement et de mettre en évidence de manière réaliste la rupture des éléments, en fonction d'un critère de rupture approprié. L'expérience acquise lors de tels calculs montre que la dimension maximale de l'élément est généralement inférieure à 200 mm dans les zones de collision. Le format de l'élément du bordé doit être tel que le rapport entre la hauteur et la largeur soit de 1/3 au moins. La dimension L de l'élément du bordé est définie comme étant la plus grande des longueurs des deux côtés de l'élément: $L = \max \{L_1, L_2\}$. Le rapport entre la longueur et l'épaisseur de l'élément doit être plus grand que 5. D'autres valeurs doivent être examinées conjointement avec une société de classification reconnue. Habituellement, les structures en plaque, telles que le bordé, la coque intérieure (réservoir de citerne en cas de bateaux-citernes destinés au gaz), les couples ainsi que les serres, peuvent être modélisées comme des éléments de bordé, tandis que les renforts peuvent être représentés comme des éléments de barrot. Dans les zones de collision, il doit être tenu compte des ouvertures et des trous d'homme.

La méthode de "pénalité nœud sur segment" doit être employée:

- Contact_automatic_single_surface LS-DYNA,
- Auto-impact PAM-CRASH,
- Types de contact semblables autres programmes à éléments finis.

9.3.4.4.2 *Propriétés des matériaux*

Puisque le calcul d'une collision implique un comportement structurel extrême avec des effets tant géométriques que non linéaires sur les matériaux, l'introduction des propriétés des matériaux, jusqu'à la résistance à la traction, a une incidence importante sur la valeur de la capacité d'absorption de l'énergie de collision. Il est généralement recommandé d'employer la vraie relation résistance-contrainte, qui peut être obtenue comme suit lors d'un essai de traction:

$$\sigma = C \cdot \varepsilon^n$$

où

$$n = \ln(1 + A_g)$$

et

$$C = R_m \cdot \left(\frac{e}{n}\right)^n$$

A_g est la contrainte uniforme maximale liée à la contrainte de traction R_m . Les deux valeurs peuvent être mesurées lors d'un essai de traction. e est la constante d'Euler (logarithmes naturels). Mais, dans de nombreux cas, seule la contrainte de traction R_m est disponible.

Dans ces cas, on peut utiliser, pour l'acier de construction du bateau dont la résistance maximale R_{eH} est de 355 N/mm², l'approximation suivante afin d'obtenir la valeur correcte de A_g à partir d'une valeur connue de R_m ([MPa]):

$$A_g = \frac{1}{0,24 + 0,01395 \cdot R_m}$$

Souvent, les propriétés des matériaux déterminées lors des essais de traction ne sont pas disponibles au début des calculs. Si tel est le cas, les valeurs minimales de A_g et R_m , définies dans les règles, doivent être employées. Pour l'acier dont la limite de résistance est supérieure à 355 N/mm² ou pour des matériaux autres que l'acier, les propriétés doivent être examinées conjointement avec une société de classification agréée.

9.3.4.4.3 *Critères de rupture*

Comme susmentionné, la mesure la plus importante en ce qui concerne l'équivalence énergétique des différentes conceptions structurelles est celle de l'énergie critique de rupture du réservoir de la citerne du bateau percuté. Dans une analyse par éléments finis, cette situation critique est représentée par la première rupture d'un élément fini, qui subit à ce moment une très forte contrainte plastique.

Habituellement, on définit la première rupture d'un élément dans une analyse par éléments finis par la donnée d'une valeur de la contrainte de rupture. Si la valeur de la contrainte calculée, telle que la contrainte effective plastique, la contrainte principale ou, pour un élément du bordé, la contrainte dans le sens de l'épaisseur de cet élément, dépasse la valeur définie pour la contrainte de rupture, l'élément doit être supprimé du modèle aux éléments finis et l'énergie de déformation de cet élément ne variera plus au cours des étapes de calcul suivantes.

En se fondant sur les mesures d'épaisseur au voisinage des fissures, on recommande d'employer la définition suivante pour la contrainte de rupture:

$$\varepsilon_f(l_e) = \varepsilon_g + \varepsilon_e \cdot \frac{t}{l_e}$$

où ε_g est la contrainte uniforme et ε_e la striction, tandis que t et l_e sont l'épaisseur de la plaque et la longueur d'un élément individuel, respectivement.

Les valeurs de la contrainte uniforme et de la striction, obtenues à partir des mesures de l'épaisseur de l'acier utilisé dans la construction navale avec une valeur maximale pour R_{eH} de 355 N/mm², dépendent des états de contrainte calculés. Elles sont données ci-après:

États de contrainte	1-D	2-D
ε_g	0,079	0,056
ε_e	0,76	0,54
Type d'élément	barrot, treillis	bordé, plaque

Des valeurs pour ε_g et ε_e beaucoup plus réalistes peuvent être obtenues en effectuant des mesures supplémentaires de l'épaisseur dans des cas d'avaries prototypes et lors d'expériences.

D'autres critères de rupture peuvent être employés s'il existe des preuves suffisantes de leur pertinence.

Cas du bateau-citerne de type G

Le critère de rupture pour la citerne à gaz elle-même est fondé sur une contrainte équivalente. On supposera généralement une contrainte de 0,15 pour la rupture. On ne doit pas tenir compte de la contrainte plastique équivalente associée à la compression.

9.3.4.4 Détermination de la capacité d'absorption de l'énergie

La capacité d'absorption de l'énergie est la somme de l'énergie interne, à savoir l'énergie associée à la déformation des éléments structurels, et de l'énergie de frottement.

Le coefficient de frottement sera calculé au moyen de la formule suivante:

$$\mu_c = FD + (FS - FD) \cdot e^{-DC|v_{rel}|}$$

où FD = 0,1

FS = 0,3

DC = 0,01

$|v_{rel}|$ est la vitesse de frottement relative.

Une courbe de la force de pénétration calculée doit être fournie à la société de classification agréée.

Cas du bateau-citerne de type G

La capacité d'absorption de l'énergie d'un bateau-citerne de type G doit inclure l'énergie absorbée lors de la compression de la vapeur dans la citerne.

La formule suivante sera utilisée pour calculer cette énergie:

$$E = \frac{p_1 \cdot v_1 - p_0 \cdot v_0}{1 - \gamma}$$

où:

γ c_p/c_v (1,4)

c_p est la chaleur spécifique à pression constante [J/(kgK)]

c_v est la chaleur spécifique à volume constant [J/(kgK)]

p_0 est la pression au début de la compression [Pa]

p_1 est la pression à la fin de la compression [Pa]

v_0 est le volume au début de la compression [m³]

v_1 est le volume à la fin de la compression [m³]

9.3.4.4.5 Définitions de bateau percutant et d'étrave percutante

Il faut employer deux formes d'étrave percutantes lors du calcul des capacités d'absorption de l'énergie de collision:

- Forme d'étrave I: étrave de barge de poussage (*voir le 9.3.4.4.6 pour les détails et les dimensions*),
- Forme d'étrave II: étrave en forme de V sans bulbe (*voir le 9.3.4.4.6 pour les détails et les dimensions*).

Parce que dans la plupart des cas de collision l'étrave percutante ne présente que de petites déformations comparées à celles de la structure latérale du bateau percuté, une étrave percutante sera généralement définie comme étant rigide. Dans certaines situations seulement, lorsque le bateau percuté a une structure latérale très solide comparée à celle de l'étrave percutante et que le comportement structurel du bateau percuté est influencé par la déformation plastique de l'étrave percutante, on considérera celle-ci comme étant déformable. Dans ce cas, la structure de l'étrave percutante devrait aussi être modélisée et la société de classification agréée devrait être consultée avant que soient entamés les calculs.

9.3.4.4.6 *Définition des cas de collision*

Pour les calculs par éléments finis de l'écrasement lors d'une collision, on fera les hypothèses suivantes:

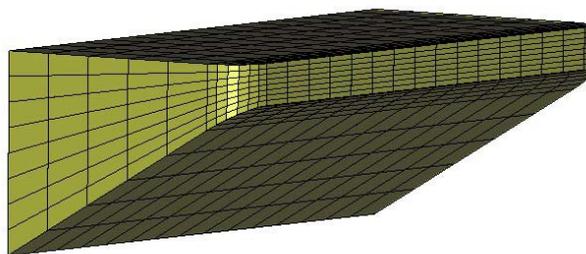
- a) Dans le cas d'une collision avec une étrave en forme de V, l'angle de collision est égal à 90° , tandis que dans le cas d'une étrave de barge de poussage, l'angle de collision est égal à 55° ;
- b) Le bateau percuté a une vitesse nulle, tandis que le bateau percutant pénètre avec une vitesse constante de 10 m/s.

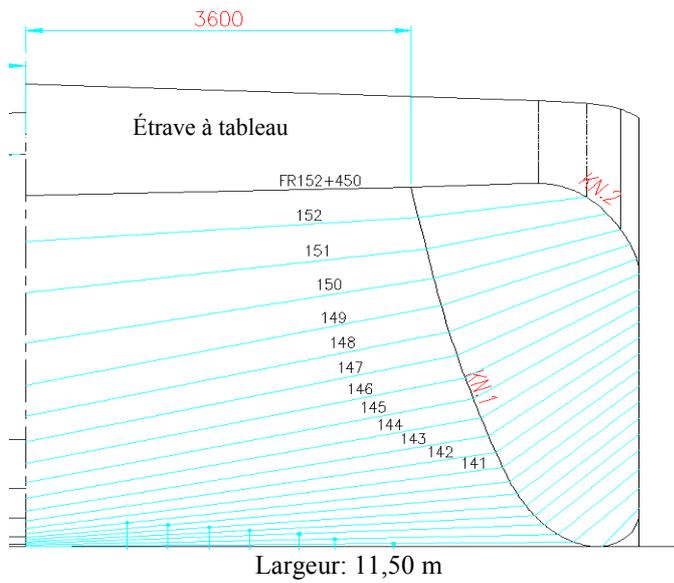
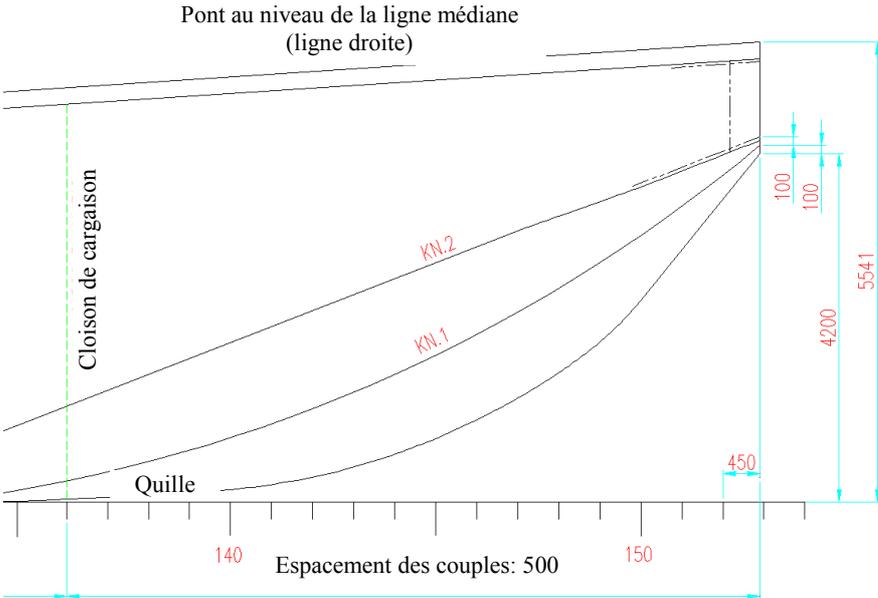
L'énergie de déformation, absorbée par le bateau percuté, dépend de l'emplacement de la collision. Se reporter à l'étape 2 de la présente sous-section où sont décrits les emplacements dont il faut tenir compte.

La vitesse de collision de 10 m/s est une vitesse théorique qui n'est à employer que dans l'analyse par éléments finis.

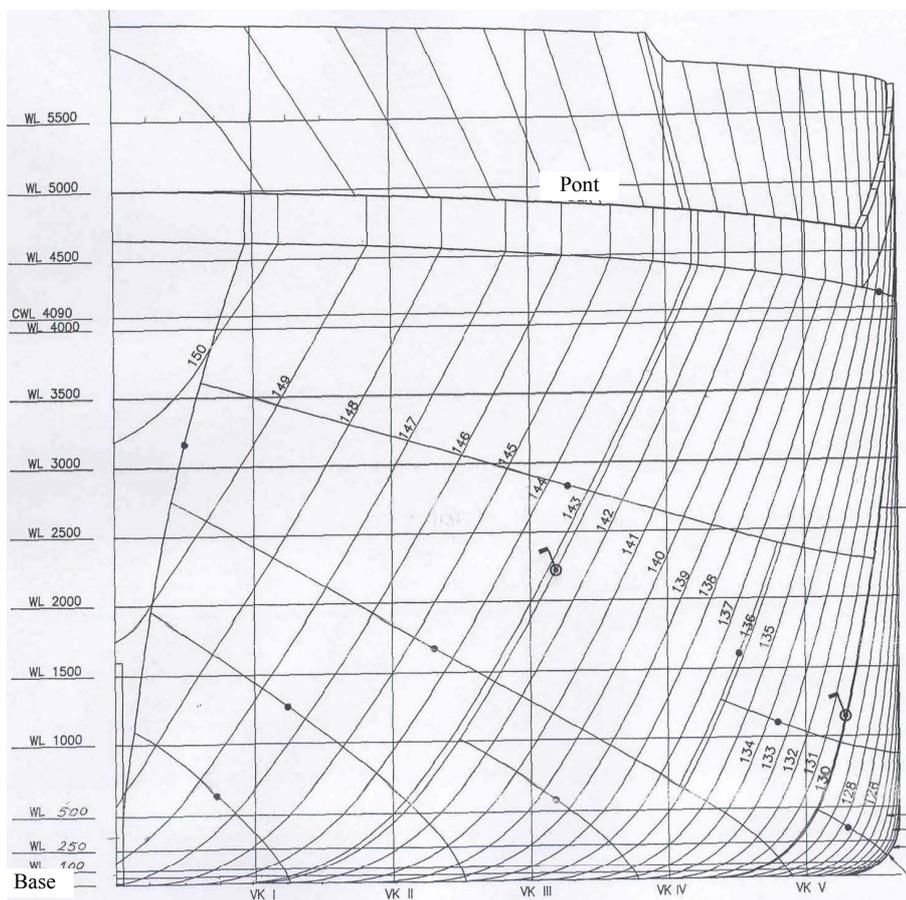
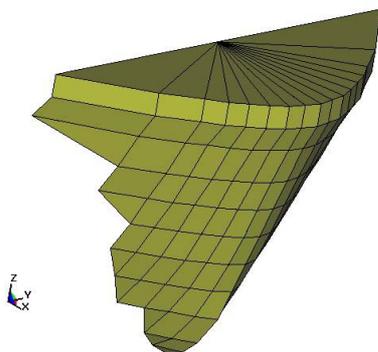
9.3.4.4.7 *Dessins*

Étrave de barge de poussage



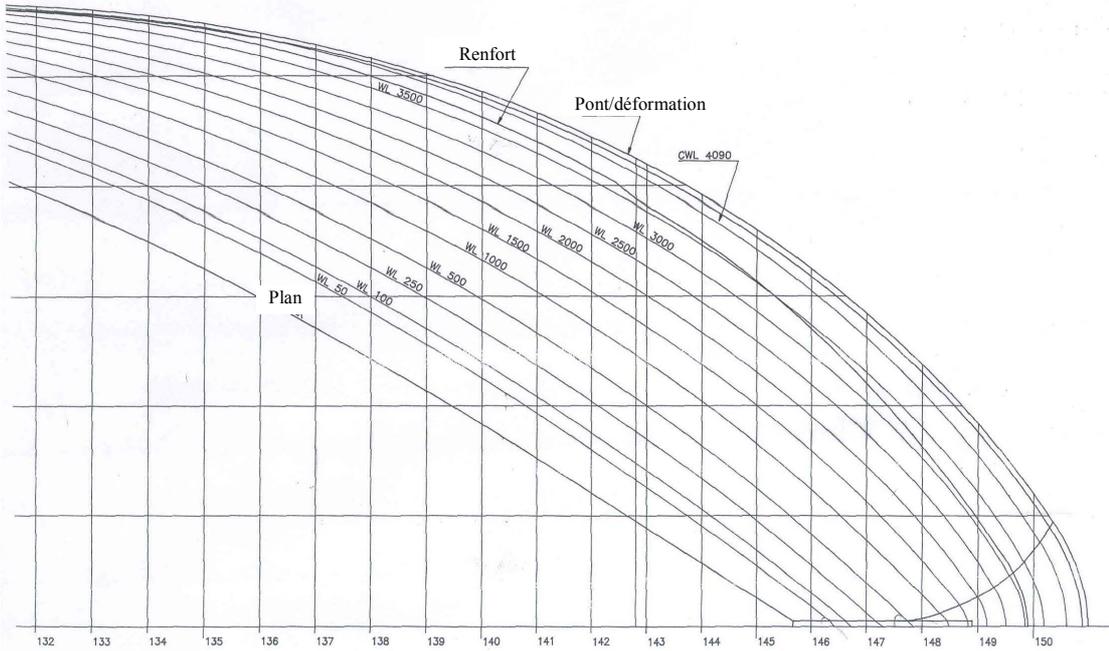
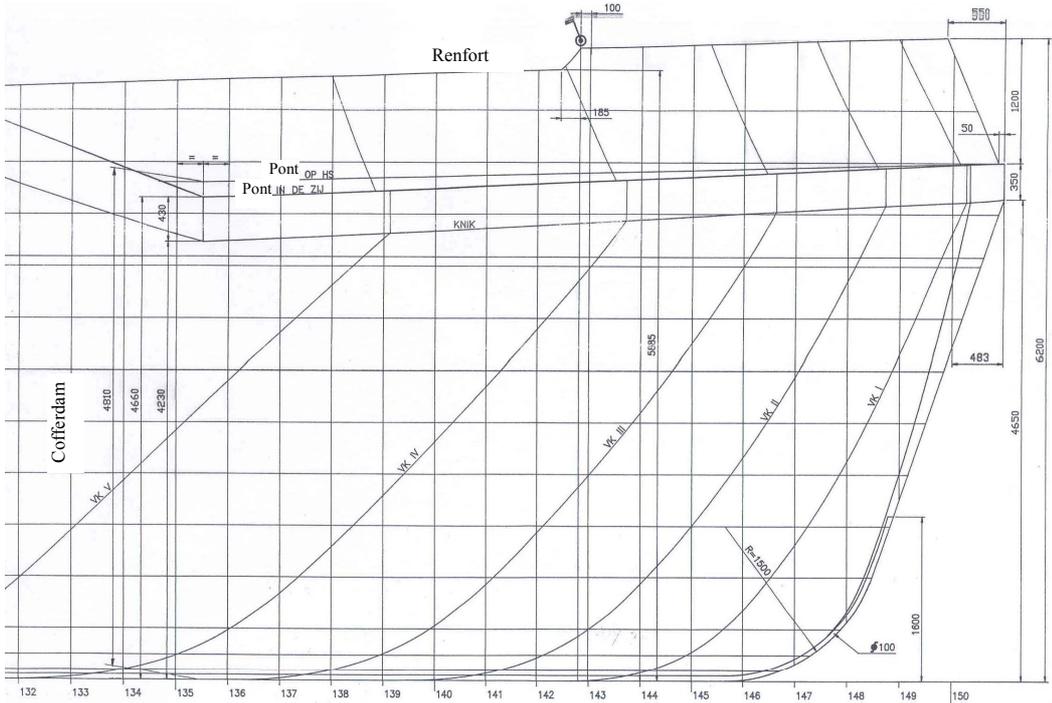


Étrave en forme de V



Largeur: 11,35 m

Espacement des coupes: 500 mm



Espacement des sections: 1 000 mm
