



**Conseil Economique
et Social**

Distr.
GENERALE

TRANS/WP.15/AC.1/2001/3
16 février 2001

Original : FRANÇAIS

COMMISSION ECONOMIQUE POUR L'EUROPE

COMITE DES TRANSPORTS INTERIEURS

Groupe de travail des transports
de marchandises dangereuses

Réunion commune de la Commission de sécurité
du RID et du Groupe de travail des transports
de marchandises dangereuses
(Berne, 28 mai au 1^{er} juin 2001)

CHAPITRE 6.8

FORMULE D'ÉPAISSEUR MINIMALE ÉQUIVALENTE ADÉQUATE DES PAROIS DES CONTENEURS-CITERNES

Transmis par le Gouvernement de l'Allemagne */

Le secrétariat a reçu de l'Office central des transports internationaux ferroviaires (OCTI) la proposition reproduite ci-après.

*/ Diffusé par l'Office central des transports internationaux ferroviaires (OCTI) sous la cote OCTI/RID/GT-III/2001/3.

INTRODUCTION

Cette question – remplacement de la formule d'équivalence reconnue comme insuffisante (formule de la racine cubique), qui est contenue dans les actuels Appendices B.1a et B.1b de l'ADR, marginaux 21x 127 (3) et (4), respectivement dans les actuels Appendices X et XI du RID, marginaux 1.2.8.3. et 1.2.8.4, par une formule d'équivalence adéquate de compromis répondant aux lois de la mécanique – a été examinée en détail lors de plusieurs sessions du Groupe de travail des transports de marchandises dangereuses (WP.15) et lors des réunions de groupes de travail et de groupe ad hoc convoquées par le WP.15. Un résumé des discussions et de leurs résultats a été présenté par l'Allemagne lors de la 66^e session du WP.15. L'intérêt manifesté jusqu'alors ayant été différent selon les participants au cours des différentes réunions, l'Allemagne a soumis une proposition dans le document TRANS/WP.15/1999/49 qui a été discutée en détail lors de la 67^e session. L'on n'est cependant pas parvenu à un résultat de vote représentatif, notamment en raison de la justification complexe et détaillée de la proposition. C'est la raison pour laquelle le WP.15 a décidé de convoquer à nouveau un groupe de travail « citernes » auquel devaient collaborer des experts de pays intéressés. La réunion de ce groupe de travail a eu lieu à Berlin les 11 et 12 janvier 2000. Le rapport de cette réunion figure dans le document TRANS/WP.15/1999/51.

Après une discussion approfondie et détaillée, les participants sont parvenus à un large consensus de remplacer l'actuelle formule de la racine cubique par la formule d'équivalence adéquate (de compromis) proposée (voir document TRANS/WP.15/1999/49), l'actuelle justification circonstanciée et détaillée devant cependant être ramenée à la mesure absolument nécessaire afin de permettre une décision sur la proposition lors de la 68^e session du WP.15. Pour suivre la recommandation du groupe de travail, un document modifié a été rédigé par l'Allemagne qui contient la teneur identique de la proposition proprement dite, mais qui cependant contient une justification modifiée à la lumière de la discussion du groupe de travail (voir document TRANS/WP.15/2000/10). Le document modifié a à nouveau été examiné de manière détaillée lors de la 68^e session du WP.15 par un groupe de travail ad hoc composé d'experts et soumis au WP.15 à titre de recommandation d'approbation.

Cette recommandation a été suivie par le WP.15 par décision majoritaire. Pour des raisons de compétence cette décision ne pouvait se référer qu'aux exigences pour les véhicules-citernes, citernes démontables et véhicules-batterie – ainsi qu'à l'actuel Appendice B.1a de l'ADR -, étant donné que les règles pour l'Appendice B.1b (conteneurs-citernes) qui sont harmonisées avec les prescriptions de l'Appendice X du RID doivent être discutées au sein de la Réunion commune et décidées par elle. La proposition allemande a ainsi été adaptée à l'ADR restructuré et entre temps remaniée rédactionnellement et, dans l'ADR reformaté, elle complètera, respectivement remplacera dans la colonne de gauche les prescriptions correspondantes pour les véhicules-citernes. Du point de vue matériel, en ce qui concerne la formule d'équivalence adéquate (de compromis) dans l'optique des prescriptions pour les conteneurs-citernes, il ne résulte aucune modification par rapport aux prescriptions pour les véhicules-citernes adoptées par le WP.15. C'est pourquoi il est maintenant proposé de reprendre également cette formule d'équivalence adéquate (de compromis) dans les prescriptions du RID/ADR pour les conteneurs-citernes.

Proposition

1. Remplacer l'actuelle formule du « nouveau » 6.8.2.1.18 par :

$$e_1 = \frac{464 \cdot e_0}{\sqrt[3]{(Rm_1 \cdot A_1)^2}}$$

2. Remplacer l'actuelle formule de la note de base de page 4/3 du « nouveau » 6.8.2.1.18 par :

$$e_1 = e_0 \sqrt[3]{\left(\frac{Rm_0 \cdot A_0}{Rm_1 \cdot A_1}\right)^2}$$

3. Compléter la colonne de droite dans le « nouveau » 6.8.2.1.19 conformément au INF.24 soumis à la réunion commune RID/ADR du 13 au 24 mars 2000 par un 3^e sous-alinéa comme suit :

“L'épaisseur des parois, des fonds et des couvercles des citernes qui sont munies d'une protection contre l'endommagement au sens du 6.8.2.1.20, doit au moins correspondre aux valeurs qui sont indiquées dans le tableau suivant.”

4. Le tableau figurant à la fin du “nouveau” 6.8.2.1.19 selon INF.24 soumis à la Réunion commune RID/ADR du 13 au 24 mars 2000 s'applique aux 2 colonnes (ainsi sur toute la largeur).
5. Compléter le “nouveau” 6.8.2.1.16 par une dernière phrase comme suit :

“Ces valeurs minimales ne peuvent cependant pas être dépassées lorsque la formule du 6.8.2.1.18 est appliquée.

6. Les mesures transitoires doivent être adaptées de façon à ce que les citernes construites jusqu'à maintenant puissent encore être utilisées.

Justification

En fonction

- du diamètre de la citerne,
- du fait que l'on prévoit une protection contre l'endommagement par tamponnage latéral ou renversement,
- de la marchandise dangereuse à transporter (marchandises dangereuses pulvérulentes ou granulaires, respectivement liquides ou gazeuses),

les épaisseurs de paroi des citernes à prévoir selon 6.8.2.1.18 et 19 seront soumises à certaines exigences minimales en relation avec le choix d'un matériau métallique déterminé (acier doux, respectivement acier doux de référence).

Les exigences d'épaisseur minimale de paroi de 3 mm, 4 mm, 5 mm, respectivement 6 mm contenues dans les marginaux cités doivent ainsi être comprises comme des critères combinés matériau/épaisseur de paroi. Même lorsqu'un autre métal que l'acier doux de référence doit être utilisé, l'exigence de base pertinente (par exemple 6 mm d'épaisseur de paroi par rapport à l'acier doux de référence) doit être remplie en fonction de son type et de sa grandeur. C'est pourquoi l'épaisseur de paroi d'une citerne, qui est composée d'un autre métal que l'acier doux de référence, doit être déterminée par rapport aux propriétés significatives du matériau et à l'acier doux de référence, sur la base de l'épaisseur de base de paroi à prévoir (par exemple 6 mm).

En d'autres termes :

Il faut comparer entre elles les propriétés des parois de citerne pour les citernes qui sont composées de matériaux métalliques différents. Si la paroi de la citerne dont l'épaisseur est à déterminer, et qui est composée d'un autre métal que l'acier doux de référence, présente les mêmes propriétés significatives telles que celles d'une paroi de base de citerne (par exemple avec une épaisseur de 6 mm), qui de son côté est composée d'acier doux de référence, les exigences selon 6.8.2.1.18 et 19 doivent être remplies de manière adéquate.

Ce qu'on entend par propriétés significatives des parois des citernes au sens précité c'est la capacité de déformation respectivement le travail de déformation supportable jusqu'à la défaillance des parois de la citerne sous contrainte mécanique. Ces propriétés peuvent être déterminées, de manière reproductible et comparable, et de manière simple, qu'avec l'essai normalisé de traction uniaxiale.

L'absorption de l'énergie/courbes de déformation (respectivement courbes de déformation/contrainte) lors de l'essai de traction pour certains matériaux métalliques jusqu'à la rupture, permet de déterminer le travail de déformation supportable des échantillons correspondants par le fait que les surfaces sous ces courbes sont déterminées. Les échantillons de différents métaux sont comparables lorsque les mêmes travaux de déformation doivent être appliqués jusqu'à leur rupture lors de l'essai de traction. Des valeurs (de même niveau) pour le travail (requis) de déformation qui est donné par les propriétés des matériaux "résistance à la rupture par traction R_{m0} et allongement à la rupture A_0 " de l'acier doux de référence et par les dimensions des échantillons correspondants, l'on peut alors déterminer, pour les propriétés connues des matériaux "limite minimale de résistance à la rupture par traction R_{m1} " et "allongement minimal à la rupture par traction A_1 ", les dimensions requises du métal choisi, donc à comparer, - par exemple l'épaisseur de paroi requise e_1 - d'une paroi de citerne qui est composée du métal choisi.

En suivant ces principes l'on peut en tirer la formule d'équivalence adéquate (de compromis) proposée de l'épaisseur minimale des parois des citernes. Les précisions y relatives ressortent de l'annexe à cette proposition.

Remarques

La transposition des exigences selon les 6.8.2.1.18 et 19 en appliquant la formule adéquate (de compromis) proposée sur la base de travaux équivalents de déformation supportables jusqu'à la défaillance, conduisent, lors du choix d'un autre métal que l'acier doux de référence

- à des chiffres plus élevés qu'actuellement pour les épaisseurs minimales des parois par exemple en cas d'utilisation d'alliages d'aluminium communs,
- à des chiffres inférieurs qu'actuellement pour les épaisseurs minimales des parois par ex. en cas d'utilisation d'aciers austénitiques.

Avec une augmentation de l'épaisseur de paroi en cas d'utilisation d'alliages d'aluminium communs, l'on obtient une augmentation indésirable de la masse de la tare de citernes qui sont construites avec ces matériaux. En cas d'utilisation d'alliages d'aluminium plus modernes ou plus développés, ce désavantage se laisse cependant à nouveau compenser dans une large mesure, de telle sorte que, même du point de vue purement économique aucune objection sérieuse ne peut être apportée contre l'application de la formule d'équivalence adéquate (de compromis) proposée. Quoiqu'il en soit, que les épaisseurs de paroi devraient devenir plus grandes si l'on utilise des alliages d'aluminium communs, ou que l'on adopterait des épaisseurs de parois de valeurs d'usage courant approximativement équivalentes en cas d'utilisation d'alliages d'aluminium plus développés, l'application de la formule d'équivalence adéquate (de compromis)

serait liée à un accroissement très net du niveau de sécurité des citernes pour marchandises dangereuses composées d'alliages d'aluminium.

Par l'introduction de valeurs inférieures fixes pour les épaisseurs minimales de parois en cas d'utilisation de différents métaux, l'on prévient des développements erronés quant aux problèmes de stabilité, au comportement de fatigue, etc.

Les conséquences en ce qui concerne les futures épaisseurs minimales de parois qui résultent de l'application de la formule d'équivalence adéquate (de compromis) ressortent des tableaux 1 et 2 ci-joints.

Par l'application de la formule adéquate (de compromis) il s'ensuit une évaluation correcte et satisfaisante des propriétés significatives des différents matériaux de citernes. C'est pourquoi l'exception particulière pour les aciers austénitiques selon 6.8.2.1.16 – les valeurs minimales spécifiées selon des normes sur les matériaux peuvent être dépassées jusqu'à 15 % en cas d'utilisation d'aciers austénitiques – n'est plus possible en appliquant la formule d'équivalence adéquate (de compromis).

Des précisions supplémentaires sur le développement et la déduction de la formule d'équivalence adéquate (de compromis) ressortent partiellement des documents déjà cités TRANS/WP.15/R.433 et INF.32 (62ème session du WP.15), INF.13 (66ème session du WP.15), TRANS/WP.15/1999/48 et -/49 (67ème session du WP.15) ainsi que TRANS/WP.15/2000/4 et -/10 (68ème session du WP.15) et des rapports des sessions citées.

AnnexeÉlaboration d'une formule d'épaisseur minimale équivalente adéquate
des parois
(formule de compromis)

Si, pour l'essai de traction, l'on prend un court échantillon, l'allongement permanent après rupture doit être mesuré sur une éprouvette de section circulaire où la longueur entre repères l est égale à 5 fois le diamètre d ; si des éprouvettes de section rectangulaire sont utilisées - ce qui est tout à fait normal pour déterminer les propriétés de la tôle - la longueur entre repères doit être calculée selon la formule

$$l = 5,65 \cdot \sqrt{F_0} \quad (1),$$

où F_0 est l'aire de la section initiale de l'éprouvette (voir 6.8.2.1.12, note de bas de page 1).

Le volume V de l'éprouvette cylindrique doit être égal à celui de l'éprouvette prismatique. En conséquence (voir fig. 1)

$$V = \frac{\pi}{4} d^2 \cdot l = F_0 \cdot l = b \cdot e \cdot l \quad (2)$$

et

$$d = \sqrt{\frac{4}{\pi}} \cdot \sqrt{b \cdot e}$$

où $l = 5 \cdot d$, ce qui donne

$$l = 5 \cdot \sqrt{\frac{4}{\pi}} \cdot \sqrt{b \cdot e} = 5,65 \cdot \sqrt{b \cdot e} \quad (3)$$

Les caractéristiques de déformation de l'éprouvette (travail/énergie de déformation ou capacité d'absorption d'énergie) peuvent être décrites comme suit :

$$\Delta W = V \cdot \int_0^{\epsilon} \sigma d\epsilon \quad (4)$$

Si le métal a des caractéristiques élastiques-plastiques idéales (voir fig. 2), l'équation (4) peut être transformée comme suit :

$$W = V \cdot R_m \cdot A \quad (5)$$

où V = volume de l'éprouvette

R_m = résistance à la rupture par traction

A = allongement à la rupture par traction

Si l'on choisit un autre métal qui doit être capable de supporter la même quantité de travail de déformation (énergie de déformation) que dans le cas du métal de référence, il y a lieu de transformer l'équation (5) comme suit :

$$W = V \cdot R_m \cdot A = \text{const.}$$

$$W = V_0 \cdot R_{m0} \cdot A_0 = V_1 \cdot R_{m1} \cdot A_1 \quad (6)$$

où

Indice 0 = métal (acier) de référence,

Indice 1 = métal choisi.

Puis les équations (2) et (3) sont introduites dans l'équation (6) comme suit :

$$\begin{aligned} W &= R_{m0} \cdot A_0 \cdot V_0 = R_{m1} \cdot A_1 \cdot V_1 \\ &= R_{m0} \cdot A_0 \cdot b_0 \cdot e_0 \cdot 5,65 \cdot \sqrt{b_0 \cdot e_0} = R_{m1} \cdot A_1 \cdot b_1 \cdot e_1 \cdot 5,65 \cdot \sqrt{b_1 \cdot e_1} \end{aligned}$$

où $b_0 = b_1 = \text{const.}$ (comme dans le cas de réservoirs de citernes réels d'un diamètre donné); le résultat est le suivant :

$$R_{m0} \cdot A_0 \cdot \sqrt{e_0^3} = R_{m1} \cdot A_1 \cdot \sqrt{e_1^3}$$

$$\sqrt{e_1^3} = \sqrt{e_0^3} \frac{R_{m0} \cdot A_0}{R_{m1} \cdot A_1}$$

$$e_1^3 = e_0^3 \left(\frac{R_{m0} \cdot A_0}{R_{m1} \cdot A_1} \right)^2$$

$$e_1 = e_0 \sqrt[3]{\left(\frac{R_{m0} \cdot A_0}{R_{m1} \cdot A_1} \right)^2} \quad (7)$$

Cette dernière équation représente la formule de compromis.

Remarque

Bien que, dans la réalité, les métaux n'aient pas un comportement élastique-plastique idéal, l'équation (5) convient parfaitement, car le rapport d'aire (aire sous une courbe de déformation-contrainte réelle (F_1) divisée par l'aire sous la courbe de déformation élastique-plastique théorique (F_0)) pour chaque métal présente pratiquement toujours la même valeur (0,89 à 0,91). Ainsi, à 2 ou 3 % près, l'épaisseur de parois calculée selon la formule de compromis (équation 7) ne présente que des écarts négligeables par rapport à des valeurs réelles de rapport d'aire. La même remarque peut d'ailleurs être faite à propos de l'application de l'actuelle formule de la racine cubique.

Formule	Matériau	Acier doux de référence	Alliage d'aluminium 1 Mg 4,5 Mn	Alliage d'aluminium 5186 (Pechiney)	Acier austénitique (1.4541)	Acier à grains fins (St E 460)
	Épaisseur des parois					
Formule de la racine cubique	$e_1 = e_0 \sqrt[3]{\frac{R_{m0} \cdot A_0}{R_{m1} \cdot A_1}}$	4,0	5,12	4,6	3,0 (2,9)	4,1
Formule de compromis	$e_1 = e_0 \sqrt[3]{\left(\frac{R_{m0} \cdot A_0}{R_{m1} \cdot A_1}\right)^2}$	4,0	6,6	5,3	(2,2) (3,0)	4,1
Formule de la racine cubique	$e_1 = e_0 \sqrt[3]{\frac{R_{m0} \cdot A_0}{R_{m1} \cdot A_1}}$	6,0	7,7	6,9	4,5 (4,3)	6,1
Formule de compromis	$e_1 = e_0 \sqrt[3]{\left(\frac{R_{m0} \cdot A_0}{R_{m1} \cdot A_1}\right)^2}$	6,0	10,0	7,9	3,4	6,1
<p>Tableau 1 : Épaisseur des parois requise (e_1 [mm]) avec $e_0 = 4$ ou 6 mm en fonction du matériau utilisé pour les citernes, rapportée à l'acier doux de référence ($R_{m0} = 360$ N/mm² et $A_0 = 27$ %)</p>						

Propriété	Matériau	Acier doux de référence	Alliage d'aluminium 1 Mg 4,5 Mn	Alliage d'aluminium 5186 (Pechiney)	Acier austénitique (1.4541)	Acier à grains fins (St E 460)
R_{m0} [N/mm ²]		370 370	-	-	-	-
A_0 [%]		27	-	-	-	-
R_{ml} [N/mm ²]		-	275	275	540	560
A_1 [%]		-	17	24	43	17
$R_{m0} \cdot A_0$		9 990	-	-	-	-
$R_{ml} \cdot A_1$ ($(R_{ml} \cdot A_1) + 15\%$)		-	4 675	6 600	23 220 (26 700)	9 520
Tableau 2 : Propriétés des matériaux fréquemment utilisés pour les citernes						

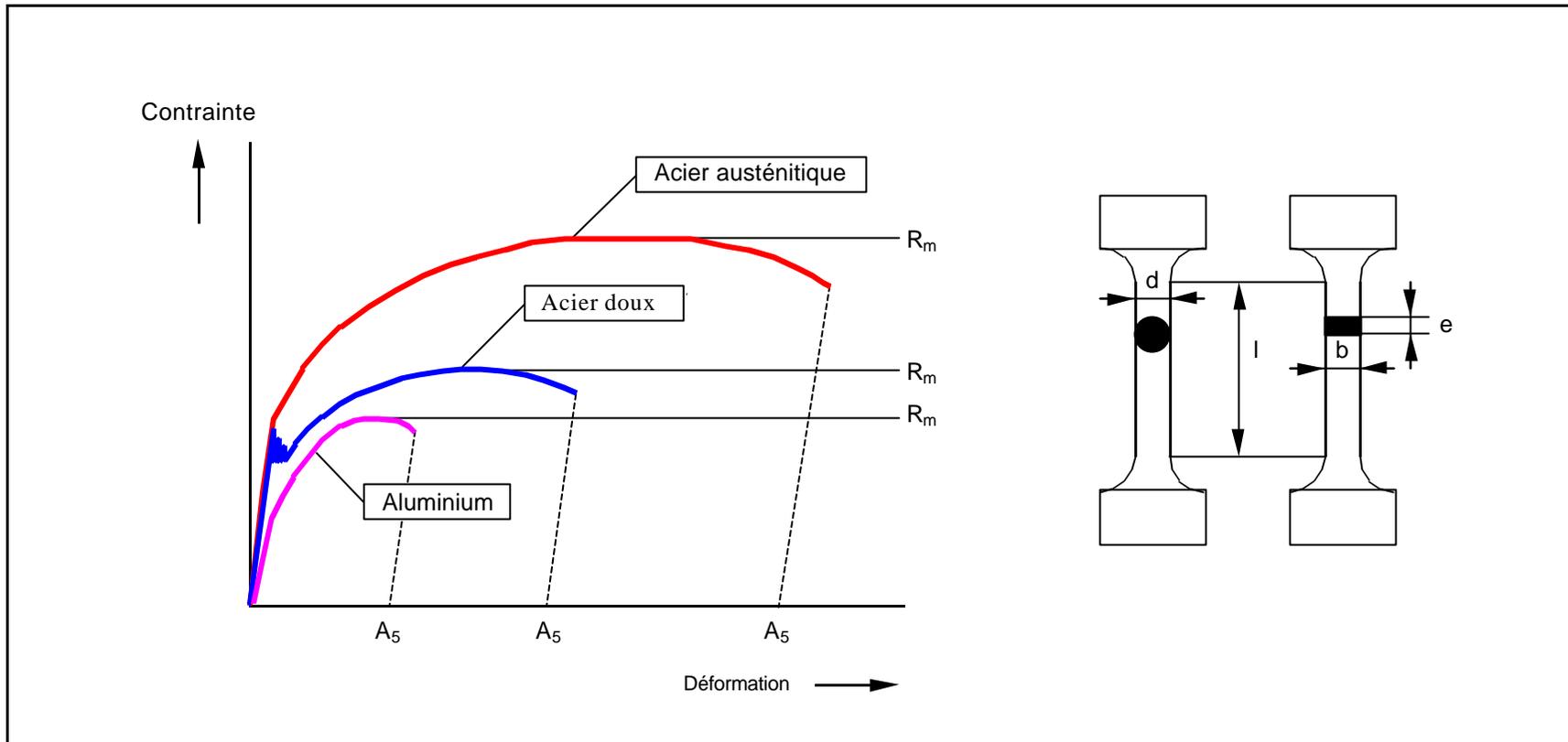
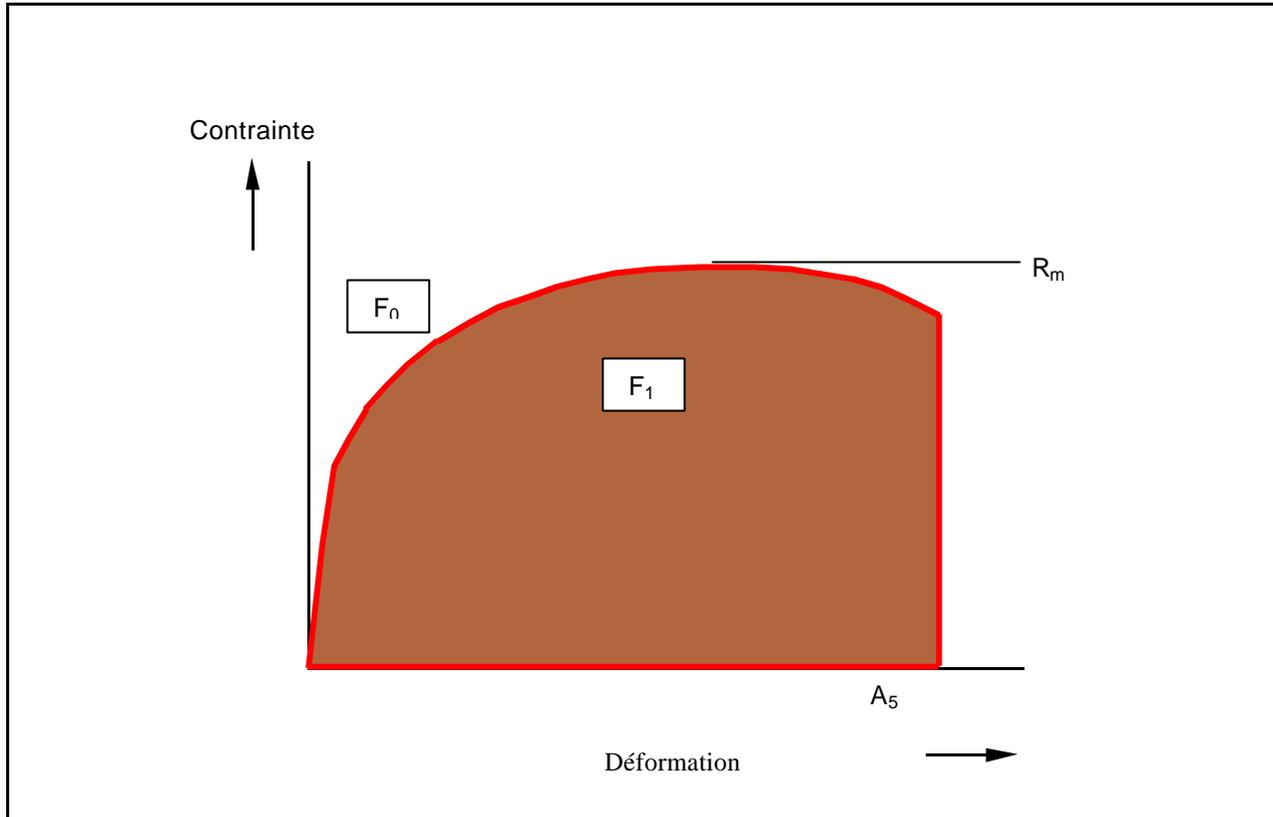


Figure 1: Diagramme de déformation-contrainte des matériaux généralement utilisés pour les citernes



Area F_0 : Travail de déformation (comportement élastique-plastique)
 Area F_1 : Travail de déformation (courbe de déformation-contraainte réelle)

Figure 2 : Courbes de déformation-contraainte théorique et réelle