



Note d'accompagnement du modèle permettant
d'évaluer les effets thermiques liés au
phénomène de pressurisation lente de bac
atmosphérique à toit fixe de liquides
inflammables pris dans un incendie extérieur

Décembre 2008

Préambule :

En 2006 et 2007, le Groupe de Travail « Liquides Inflammables » avait identifié l'occurrence possible d'un phénomène de pressurisation lente¹ d'un bac atmosphérique à toit fixe de liquides inflammables pris dans un incendie extérieur l'enveloppant sans être en mesure de proposer un modèle pour en évaluer les conséquences. Il avait alors été décidé, à titre conservatoire, de considérer les formules des distances d'effets du Boil-over pour dimensionner les effets de ce phénomène lorsque les mesures de prévention appropriées ne sont pas mises en place.

Dans le cadre des travaux du Groupe de Travail « Raffinage », les représentants de la profession ont indiqué être en mesure de faire une proposition pour modéliser les effets thermiques de la boule de feu produite par ce phénomène. Un groupe de réflexion restreint composé de représentants de la profession pétrolière, d'experts et de représentants de l'administration a été créé à l'automne 2008 pour examiner les éléments techniques nouveaux susceptibles d'aboutir à un modèle simple d'utilisation, raisonnablement majorant dans son ensemble et reproductible. Ce modèle a fait l'objet d'un consensus des différents membres du groupe de travail en séance plénière.

En complément, l'administration a soulevé l'intérêt d'encadrer l'utilisation de l'outil de calcul associé à ce modèle par la présente note d'accompagnement afin qu'il soit correctement exploité. Cette note a pour objectif de préciser les limites d'utilisation du modèle compte tenu de l'importance de certains facteurs tels que le différentiel entre la pression de rupture de la liaison robe/toit du bac et celle de la liaison robe/fond ou certaines propriétés du produit stocké.

1. Règles générales :

De manière générale, conformément à la circulaire du 23 juillet 2007², si l'utilisateur n'est pas en mesure d'appliquer le modèle, c'est-à-dire qu'il n'est pas en mesure de justifier les éléments attendus (détaillés ci-dessous), les distances d'effets liées au phénomène de pressurisation de bac peuvent être évaluées par le biais des formules des distances d'effets du Boil-over³, sauf à ce que l'utilisateur fournisse une autre évaluation des effets assise sur des hypothèses dont il doit démontrer et justifier la pertinence. Le cas échéant, cette option pourrait faire l'objet d'une tierce expertise.

<p>Avertissement : les hypothèses formulées dans ce document ne se substituent pas aux choix d'hypothèses potentiellement laissés à l'utilisateur. Celui-ci doit dans tous les cas justifier ses choix selon les principes introduits au travers de la présente note.</p>
--

Le modèle ne s'applique que si l'utilisateur a préalablement vérifié que la liaison robe/toit céderait avant la liaison robe/fond.

¹ Le modèle ne traite pas de la durée du phénomène. Ce dernier est qualifié de lent pour éviter toute analogie avec le phénomène plus rapide d'explosion de bac atmosphérique décrit dans la circulaire du 31 janvier 2007 relative aux études de dangers des dépôts de liquides inflammables.

² Circulaire DPPR/SEI2/AL-07-0257 du 23 juillet 2007 relative à l'évaluation des risques et des distances d'effets autour des dépôts de liquides inflammables et des dépôts de gaz inflammables liquéfiés.

³ La note INERIS du 7 octobre 2008 n°DRA-08-94763-12858A relative à la description d'un modèle de calcul des effets d'un Boil-over classique peut servir de référence à cet effet. Cette note s'inscrit dans le cadre de la révision actuellement en cours du rapport Ω13. Les formules de l'Instruction Technique du 9 novembre 1989 sont aussi acceptables.

2. Typologie des bacs concernés :

Le modèle s'applique uniquement aux **bacs atmosphériques à toit fixe** (avec ou sans écran interne) contenant des liquides inflammables et ne s'applique pas aux réservoirs de stockage de gaz inflammables liquéfiés (cigares, sphères...). Ainsi, l'ensemble des bacs atmosphériques à toit fixe, quelles que soient leurs dimensions ou leurs spécificités, sont concernés par le phénomène de pressurisation tel qu'il est décrit dans la circulaire du 23 juillet 2007.

Pour rappel, un ballon, réservoir ou bac qualifié en tant qu'équipement sous pression n'est pas, par définition, une capacité travaillant à pression atmosphérique.

2.1 Eléments d'information générale :

Les bacs à toit conique avec une faible pente résistent généralement très peu à la pression (Nota : les bacs à toit totalement plat n'existent pas). Plus le diamètre est grand, plus la pression de rupture est faible. Plus la pente est grande, plus la pression de rupture augmente. Les bacs à toit conique à forte pente, voire à toit sphérique, résistent donc mieux à la pression. Cependant, même si la pente s'avère être un indice relativement fiable, ce seul paramètre ne saurait représenter les variations de comportement pouvant exister pour l'ensemble des bacs de diamètre et pente équivalents construits avec une qualité de tôle différente, un mode de supportage différent, etc.

Les bacs de petites dimensions présentent généralement des pressions de rupture à la liaison robe/toit notablement plus élevées que les bacs de grandes dimensions⁴, principalement du fait de la spécificité de la conception de leur toit (en fonction de leur diamètre, les bacs peuvent disposer de différents modes de supportage : charpente auto-portée interne (voire externe), piliers...).

2.2 Cas particuliers :

L'utilisateur peut être amené à rencontrer le cas de bacs spécifiques où il convient d'être prudent avant application du modèle. Deux cas sont cités ici de manière non exhaustive :

- Certains bacs sont construits pour résister à des pressions plus élevées tout en étant qualifiés de bac atmosphérique, notamment dans l'industrie chimique, dans le cadre de l'inertage du ciel gazeux ou d'applications particulières.
- La soudure de la liaison robe/toit ne constitue pas toujours le point faible. Les simulations numériques montrent que dans certains cas la tôle de la virole ou du toit, en fonction de son état, de son épaisseur ou de sa température, peut aussi constituer un point de fragilisation.

En outre, la réalisation du meulage de la soudure de la liaison robe/toit ne peut à elle seule garantir une réduction suffisante de la pression de rupture : l'opération doit faire l'objet au préalable d'un dimensionnement précis de l'épaisseur maximale requise pour ladite soudure. L'utilisateur doit par ailleurs justifier que cette opération a permis d'atteindre l'objectif fixé par les calculs.

⁴ A titre indicatif, certains experts considèrent que la limite entre les « petits bacs » et les « gros bacs » se situe à un diamètre compris entre 16 et 20 mètres.

3. Détermination de la pression de rupture de la liaison robe/toit du bac :

Plusieurs cas peuvent se présenter :

- ⇒ Cas n°1 : la pression de rupture est connue. Il suffit d'introduire directement le paramètre dans l'outil de calcul (cf. onglet « Calculs distances d'effets »). L'utilisateur doit néanmoins fournir une note de calcul la justifiant.
- ⇒ Cas n°2 : seule la pression de design est connue, inférieure ou égale à 25 mbar et justifiée par une note de calcul correctement argumentée. Dès lors, la pression de rupture de la liaison robe/toit est majorée par la valeur de 250 mbar (cf. annexe 1 de la circulaire du 23 juillet 2007⁵).
- ⇒ Cas n°3 : en l'absence d'information sur la pression de design exacte, cette donnée peut être approchée en fonction de la forme du toit en appliquant la règle suivante :

- Si le rapport F / r est inférieur ou égal à $1/5$, la pression de design retenue est inférieure ou égale à 25 mbar. La pression de rupture de la liaison robe/toit peut alors se définir comme au cas n°2.

Nota : F : flèche du toit du bac (hauteur mesurée entre le point de fixation du toit à la robe et la partie haute du toit),
 r : rayon du bac.

- Si le rapport F / r est supérieur à $1/5$ (la pression de design est alors supposée supérieure à 25 mbar) ou si un calcul précis de la pression de rupture de la liaison robe/toit est requis (par exemple, dans le cas où le recours à la valeur de 250 mbar ne serait pas envisagé), il est possible d'utiliser la formule de calcul de la pression de rupture, à partir des données du bac, issue du CODRES 2007⁶ :

$$P_{rt} = \alpha 1 \times R_{m \text{ sup}} \times (\tan \theta)^{\alpha 2} \times \left(\frac{e_{cr}}{D}\right)^{\alpha 3} \times \left(\frac{e_p}{D}\right)^{\alpha 4} \times \left(\frac{e_n}{D}\right)^{\alpha 5} \times \text{Charp}$$

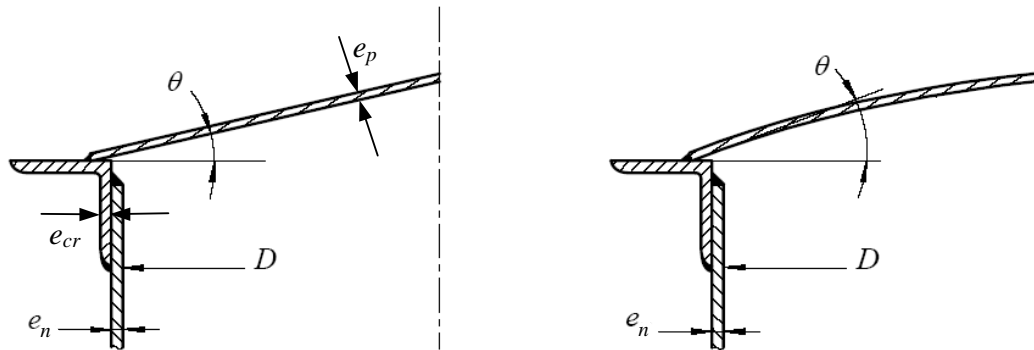
Avec		Prt ⇒ pression rupture robe-toit (mBar)	
$\alpha 1 = 56500$		D ⇒ Diamètre du bac (m)	
$\alpha 2 = 0,259$		Tan (θ) ⇒ pente du toit conique ou tangente au toit hémisphérique	
$\alpha 3 = 1,115$		Rm sup ⇒ Résistance à la traction robe-toit (Mpa)	
$\alpha 4 = -0,113$		e_n ⇒ épaisseur tôle virole haute (mm)	
$\alpha 5 = 0,481$		e_{cr} ⇒ épaisseur de la cornière de rive (mm)	
charp = 1	pour un toit autoporté	e_p ⇒ épaisseur de la tôle de toit (mm)	
	1,1 pour un toit supporté par une charpente		

⁵ Annexe intitulée « Les Boil-over et autres phénomènes générant des boules de feu concernant les bacs des dépôts de liquides inflammables ».

⁶ Code de Construction des Réservoirs de Stockage Cylindriques Verticaux. Ce document est diffusé par le Syndicat National de la Chaudronnerie, de la Tôlerie et de la Tuyauterie industrielle.

Notes :

- Figures illustrant les caractéristiques géométriques du bac à renseigner pour l'évaluation de P_{rt} (d'autres types de montages sont proposés, pour information, en annexe 1) :



- Lorsque les différents éléments participant à la liaison robe/toit (virole haute, cornière de rive et toit) ont des caractéristiques mécaniques différentes, la valeur de $R_{m\ sup}$ à retenir pour le calcul de P_{rt} servant à dimensionner les effets d'une pressurisation de bac est la valeur la plus élevée.

- Cette formule permettant d'évaluer la pression de rupture à la liaison robe/toit est applicable sous réserve que la conception et la géométrie du bac soient conformes aux règles de la Partie C de la Division 1 du CODRES 2007, notamment pour les six éléments suivants :

- Epaisseur du fond.
- Epaisseur et dimensions de la bordure annulaire.
- Epaisseurs de robe.
- Pente du toit.
- Epaisseur du toit.
- Cornière de rive.

Le CODRES 2007 dans son intégralité s'applique aux bacs à fond plat construits à partir de 2008. Pour les bacs anciens à fond plat, l'exploitant a la possibilité d'appliquer les règles du CODRES 2007 pour évaluer la pression de rupture de la liaison robe/toit, quel que soit le code de construction employé initialement ou l'année de construction du bac, sous réserve qu'il justifie que les conditions mentionnées ci-dessus sont respectées et que le toit du bac repose sur sa structure de supportage (charpente auto-portée, piliers, etc.) sans y être soudé.

- Enfin, n'entrent pas dans le champ d'application du CODRES 2007 :

- Les bacs à fond non plat (type de réservoirs généralement rencontrés dans le secteur de la chimie).
- Les réservoirs en inox car ce matériau possède des propriétés de déformation plastique à la rupture supérieures à celles de l'acier noir

employé pour la construction des bacs « classiques » et que, de fait, il est utilisé avec des épaisseurs de tôle plus faibles. Compte-tenu de l'influence différente de ces deux paramètres, des travaux complémentaires seraient nécessaires pour définir des règles spécifiques pour les bacs en inox.

- Les bacs rivetés car leurs propriétés mécaniques sont mal connues : le principal moyen de pallier ce manque de connaissances en terme de comportement mécanique à une surpression interne serait de recourir à des tests destructifs (mise sous pression).

En annexe 2 figurent quelques spécificités du CODRES 2007.

⇒ Cas n°4 : si l'utilisateur n'est pas en mesure de mettre en œuvre une des trois solutions précédentes, alors, il convient de se reporter à l'application par défaut évoquée en § 1.

4. Nature des produits :

4.1 Règle d'assimilation d'un produit à un corps pur :

S'agissant d'un produit pur, les caractéristiques physico-chimiques insérées dans l'outil de calcul sont suffisantes (cf. onglet « Données produits »).

Des produits plus ou moins complexes de par leur composition peuvent également être approximativement modélisés par des corps purs dont les caractéristiques sont proches, ainsi :

- les **bases essences** sont assimilables à l'**Hexane**,
- les **bases distillats** (gazole, fuel, kérosène) sont assimilables à l'**Isododécane**.

Seules deux assimilations ont été proposées car les corps purs suscités sont représentatifs de la grande majorité des produits pétroliers. Pour permettre à l'utilisateur de modéliser un autre produit, l'outil de calcul a été adapté afin de pouvoir utiliser comme données d'entrée les propriétés intrinsèques qu'il souhaite considérer (cf. onglet « Calculs distances d'effets »).

A ce titre, les paramètres suivants du produit sont à déterminer au préalable :

- Température d'ébullition en K,
- Densité liquide à 288 K en kg/m^3 ,
- Densité gazeuse à 300 K en kg/m^3 ,
- Limite Supérieure d'Inflammabilité (LSI) en % vol.,
- Chaleur spécifique en $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$,
- Chaleur latente de vaporisation en J/kg ,
- Coefficients d'Antoine du produit pur considéré (sans unité).

4.2 Produits susceptibles de ne pas générer de phénomène de pressurisation de bac atmosphérique à toit fixe :

La perte d'intégrité mécanique d'un bac du fait de l'affaiblissement de la paroi métallique non mouillée soumise à un flux thermique important est envisageable et il semble incohérent de considérer le phénomène de pressurisation lente au-delà d'une certaine température. En effet, pour des produits lourds présentant une température moyenne d'ébullition élevée, l'ouverture de l'enveloppe du bac dans sa partie supérieure non mouillée devrait survenir avant d'atteindre la pression de rupture.

Sont ainsi exclus les produits dont la température de distillation 15% (T15) excède la valeur de la température critique de l'acier fixée à 427°C (soit 700 K et 800°F).

A titre d'exemple, les « familles » suivantes pourraient être concernées :

- Résidus (concernant les unités pétrolières, ce sont les résidus atmosphériques, sous vide et visco-réduits),
- Bitumes.

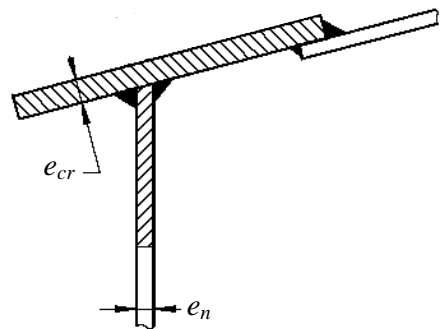
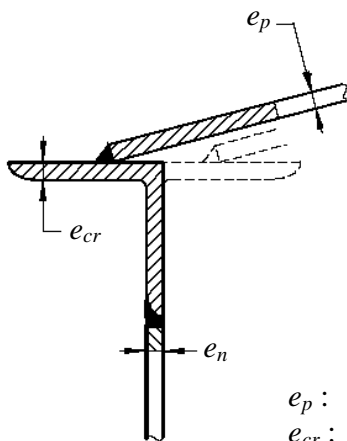
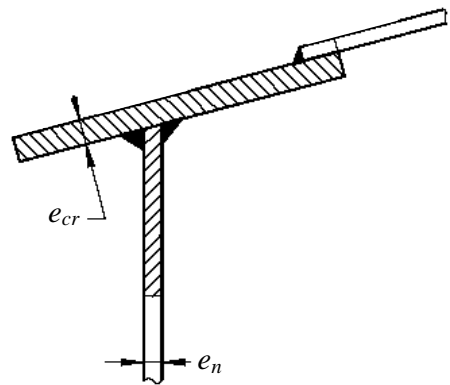
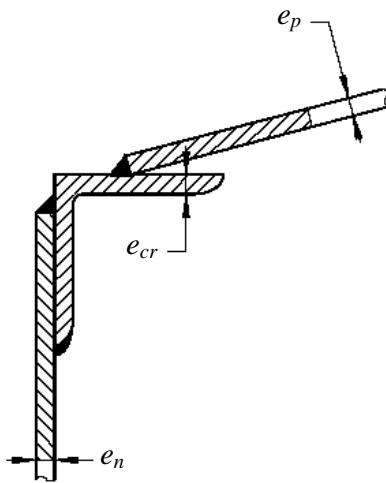
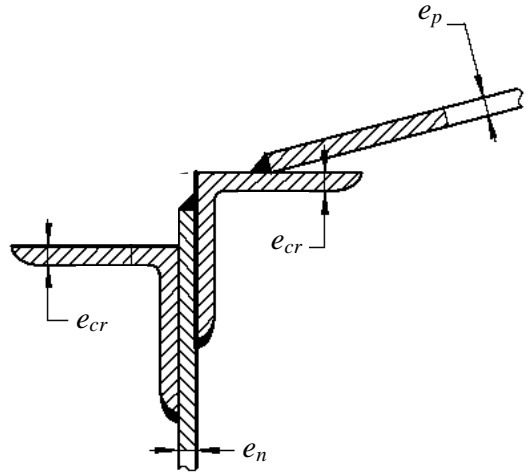
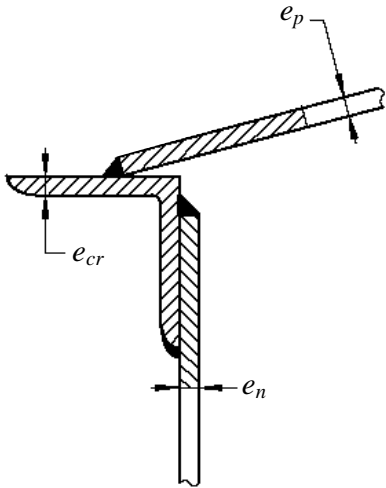
Pour chaque produit proposé à l'exclusion, l'utilisateur doit clairement justifier la représentativité de la température de distillation 15% (T15) compte tenu des caractéristiques locales (par exemple pour les raffineries, en fonction des différents bruts ou mélanges de bruts traités et des paramètres de fonctionnement des unités du site qui en découlent).

Quelques précisions sur les paramètres évoqués ci-dessus :

- Par température de distillation 15% (T15), il faut entendre température pour laquelle 15% du produit est présent dans la phase vapeur lors d'une distillation ASTM D86⁷. Cette notion a été choisie en cohérence avec les travaux déjà menés en vue de la caractérisation du phénomène de Boil-over.
- La température de 427°C correspond à la température de perte des propriétés mécaniques de l'acier généralement considérée comme critère de perte d'intégrité mécanique pour les structures faites de cet alliage. Cette valeur apparaît par ailleurs fréquemment dans la littérature anglo-saxonne et dans bon nombre de rapport d'essais de tenue d'équipements industriels au feu (projet Gasafe, tests « jet fire »...).
- La durée d'exposition à la température critique de 427°C n'est pas utilisée car le critère quantitatif souhaité se veut simple, reproductible et conservatoire.

⁷ Cette méthode d'essai par distillation permet de déterminer des caractéristiques de distillation pour les produits pétroliers sous pression atmosphérique et de façon automatique.

Annexe 1
Autres types de conceptions au niveau de la liaison robe/toit
 (Source : CODRES 2007)



e_p : épaisseur de la tôle de toit
 e_{cr} : épaisseur de la cornière de rive
 e_n : épaisseur de la tôle de la virole haute

Annexe 2

Spécificités du code de construction CODRES 2007

Cette annexe a pour seul objectif de donner à l'utilisateur du modèle quelques éléments d'information sur le CODRES 2007. Pour mémoire, d'autres codes de construction peuvent cependant être utilisés mais il est de la responsabilité de l'utilisateur de s'assurer que les données utilisées le sont dans leur domaine de validité.

Le CODRES 2007 propose des règles de calculs permettant d'apprécier le mode de rupture d'un réservoir (cf. division 1, partie C, annexe CA2). Le but est de s'assurer que le bac va s'ouvrir préférentiellement à la liaison robe/toit plutôt qu'à la liaison robe/fond. Ainsi, le code propose deux règles de calcul pour déterminer les pressions de rupture au niveau de chacune de ces deux liaisons (suivant différentes modélisations réalisées sur un échantillon d'environ une centaine de bacs). Au regard des résultats des modélisations, pour la pression de rupture de la liaison robe/toit, la règle de calcul dispose d'un champ d'incertitude raisonnablement conservatoire.

Le calcul de la pression de rupture de la liaison robe/toit selon le CODRES 2007 peut s'appliquer à la majorité des bacs atmosphériques à toit fixe à fond plat, construits avec un acier classique, récents ou anciens, rencontrés dans l'industrie pétrolière ou chimique. Les bacs doivent toutefois être conformes à certaines règles établies pour les six éléments de conception cités en § 3, cas n°3.

Le CODRES 2007 constitue une synthèse et une mise à jour de l'ensemble des données comprises dans les anciens codes de construction. Il intègre désormais (liste non exhaustive) :

- La méthodologie du CODRES 91, proche de celle mentionnée dans la norme API650, pour les calculs de dimensionnement des bacs.
- L'annexe relative à la vérification des seuils de rupture évoquée plus haut.
- Une annexe relative à la tenue au séisme.
- Le dimensionnement des bordures annulaires lorsqu'elles sont requises.
- Des dispositions relatives au calcul de l'ancrage des bacs...

Certains de ces éléments n'existaient pas dans les versions des codes précédents (CODRES 91, CODRES 85, CODRES 81...).