Etudes de flux thermiques

réalisées par l'APAVE pour le dossier de demande d'autorisation pour la centrale TSM 17.

Les rétentions sous les citernes sont compartimentées. Il y a une cuvette de rétention par citerne.

La cuvette de rétention pour cuve de fioul lourd/fioul domestique : surface rectangulaire de 16mx4m.

Modélisation des conséquences de la concrétisation des dangers du site

Méthodologie

Quelques rappels

La combustion se déroule suivant plusieurs phases :

- Décompositions primaire et secondaire : se déroulent en phase liquide ou solide. Les matériaux se dégradent respectivement par oxydation, et par pyrolyse. Si le produit qui brûle est un liquide, les fortes températures de la surface libre vont conduire à la vaporisation du combustible. Ces décompositions vont générer des produits gazeux contenant des hydrocarbures ainsi que des espèces chimiques stables.
- Combustion en phase gazeuse : ces produits de décomposition vont traverser la zone de flamme soit pour l'alimenter (produits organiques), soit sans subir de dégradation (produits inertes).
- Pour les solides, on peut citer une troisième étape dite phase de « post-combustion » : des points d'incandescence peuvent persister. On remarque l'émission, même après la disparition des flammes, de gaz de distillation inflammables. C'est alors qu'apparaissent les risques d'effondrement et de corrosion des éléments métalliques en particulier.

Les risques apparaissant au cours de l'incendie et après l'incendie sont la montée rapide de la température dégagée, la formation de gaz toxiques, le dégagement de fumées asphyxiantes et irritantes et de suies responsables d'une perte de visibilité.

Les conséquences d'un incendie en un point situé à proximité du feu sont estimées à partir du flux thermique généré par le rayonnement des flammes en ce point.

Le flux rayonné par la flamme est directement lié à la chaleur de combustion du matériau en feu et correspond à la fraction de la chaleur dégagée par la flamme sous forme radiative.

Initialement, le combustible se décompose à une vitesse qui est spécifique de sa composition et de sa nature.

Les produits issus de cette dégradation vont brûler en dégageant de l'énergie sous forme thermique.

L'intensité du feu sera donc fonction du pouvoir calorifique du matériau.

Enfin, seule une fraction de cette énergie va participer significativement, par rayonnement, à d'éventuelles conséquences sur les biens et personnes situées dans un certain périmètre autour du feu.

D'autre part, au moins deux aspects liés aux conditions de l'incendie et de l'environnement vont participer à l'atténuation du flux thermique initialement émis par la flamme : le facteur de forme et le taux d'atténuation atmosphérique.

La méthode de calcul utilisée est celle du TNO (Yellow book, Methods for the calculation of physical effects, CPR 14 E, Committee for the Prevention of Disasters, 1997).

Flux radiatif

Les flammes d'un incendie et les combustibles portés à haute température sont la source d'un flux radiatif qui peut être formalisé selon :

$$\Phi = E \cdot F \cdot \tau_a$$

avec ϕ : Flux radiatif reçu par la cible en kW/m^2,

E : Flux source émis par le mur de flammes ou émittance en kW/m^2,

F : Facteur de forme traduisant les positions relatives de la source et de la cible, qui dépend à la fois de la distance de l'observateur au foyer et des dimensions du mur de flammes,

τ_a : Transmissivité atmosphérique, facteur d'atténuation représentant l'absorption de flux par la vapeur d'eau contenue dans l'air.

Emittance brute

L'émittance brute, qui est l'énergie par unité de surface et par unité de temps rayonnée par la flamme peut être estimée grâce à la formule suivante :

$$E_{brute} = \eta \cdot \frac{\ddot{m} \cdot \Delta H_c}{\left(1 + 4 \cdot \frac{H_f}{D_{eq}}\right)}$$

avec E_{brute} : Emittance brute en kW/m^2,

η : Fraction radiative (sans unité) : par défaut, on prend 0,35 (hypothèse APAVE)

$\ddot{m}$: Taux de combustion surfacique en $kg/m^2.s$,

ΔH_c : Enthalpie de combustion en kJ/kg,

H_f : Hauteur de flamme en m,

D_{eq} : Diamètre équivalent de la cuvette en m.

L'émittance brute ne prend pas en compte l'obscurcissement des flammes par les suies.

Taux de combustion surfacique

Ce paramètre peut être évalué selon la corrélation de Burgess selon :

$$\ddot{m} = 10^{-3} \cdot \frac{\Delta H_c}{\Delta H_v + c_p \cdot \left(T_{eb} - T_{amb}\right)}$$

avec $\ddot{m}$: Taux de combustion surfacique en kg/m²/s,
ΔH_c : Enthalpie de combustion en kJ/kg,
ΔH_v : Enthalpie de vaporisation en kJ/kg,
c_p : Chaleur spécifique du liquide à T_{amb} en kJ/kg.K,
T_{eb} : Température d'ébullition en K,
T_{amb} : Température ambiante en K.

Diamètre équivalent

Pour un feu de cuvette ou de bâtiment non circulaire, le diamètre équivalent, D_{eq}, peut être estimé par la formule suivante :

$$D_{eq} = \frac{4.A_{nappe}}{P}$$

avec D_{eq} : diamètre équivalent en m ;
A_{nappe} : surface de la nappe (surface de la cuvette, du foyer) en m² ;
P : périmètre du foyer en m.

Il sera pris comme hypothèse que l'incendie occupe toute la surface de la cuvette de rétention.

Hauteur de flamme

Dans le cas d'un feu de liquide inflammable, la hauteur de flamme peut être approchée par la corrélation de Thomas :

$$H_f = 42 \times D_{eq} \times \left[\frac{\ddot{m}}{\rho_{air} \times \sqrt{g \cdot D_{eq}}}\right]^{0.61}$$

avec H_f : Hauteur de flamme en m,
D_{eq} : Diamètre équivalent de la cuvette en m.
$\ddot{m}$: Taux de combustion surfacique en kg/m²/s,
g : Accélération de la pesanteur, prise égale à 9,81 m/s²,
ρ_{air} : Masse volumique de l'air, prise égale à 1,61 kg/m³.

NB : Dans la formule de Thomas, on assimile le diamètre de la cuvette au diamètre de la flamme. Cette hypothèse reste valable pour une cuvette dont la longueur L n'excède pas 2 fois la largeur l. Dans le cas où la cuvette est trop allongée (L> 2 × l), la hauteur de flamme sera calculée avec L = 2 × l.

La corrélation de Thomas est d'un usage répandu pour les calculs des feux de nappes.

Emittance nette

Dans un incendie, une part de l'énergie rayonnée par les flammes est en réalité absorbée par les fumées, puis réémise selon une émittance de 20 kW/m^2 (Yellow Book, 1997, Chapitre 6.5.4.4 page 6.68).
L'émittance nette peut donc être calculée par la formule suivante :

$$E_{nette} = [\ E_{brute} \cdot (1-\xi) + E_{fumées} \cdot \xi\ ]\tau_a$$

avec E_{nette} : Emittance nette en kW/m²,
E_{brute} : Emittance brute calculée précédemment en kW/m²,
$E_{fumées}$: Emittance des fumées (20 kW/m²),
ξ : Fraction de la surface de flamme couverte par les fumées (sans unité),
τ_a : Transmissivité atmosphérique

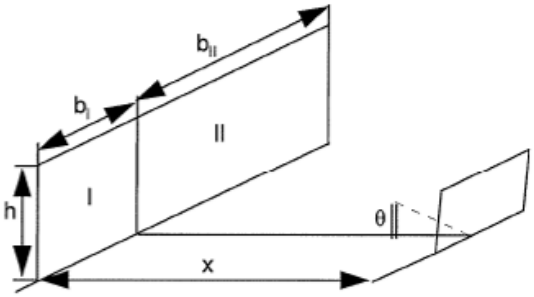
Pour la fraction de la surface de flamme couverte par les fumées, on prend :

- 20 % pour les produits émettant peu de fumées comme l'éthanol (hypothèse APAVE).

Facteur de forme

L'évaluation des facteurs de forme est réalisée pour un mur de flamme assimilé à un radiateur plan, et un observateur de faibles dimensions.

Pour un foyer dont les caractéristiques géométriques sont représentées sur la figure ci-contre, le facteur de transmission géométrique est déterminé par la résolution de l'équation :



$$F_v = \frac{1}{2\pi} \cdot \left\{ h_r \cdot A \cdot \tan^{-1}(A) + \left(\frac{B}{h_r}\right) \cdot \tan^{-1}(B) \right\}$$

$$F_h = \frac{1}{2\pi} \cdot \left\{ \tan^{-1}\left(\frac{1}{x_r}\right) - A \cdot x_r \cdot \tan^{-1}(A) \right\}$$

avec : $h_r = \frac{h}{b}$

$x_r = \frac{x}{b}$

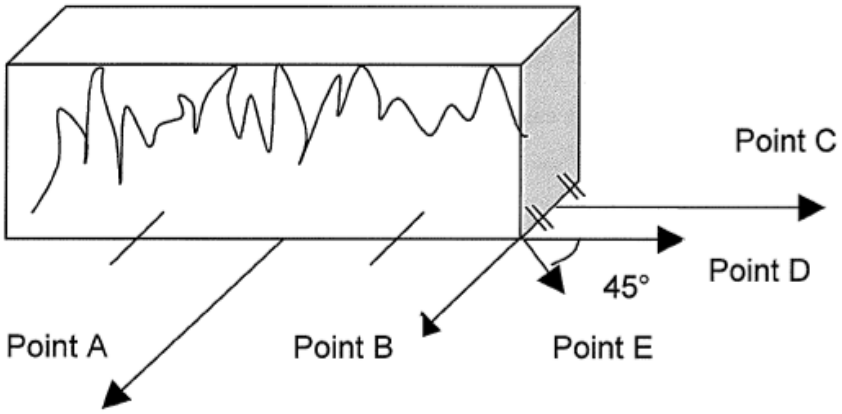
$A = \frac{1}{\sqrt{h_r^2 + x_r^2}}$

$B = \frac{h_r}{\sqrt{1 + x_r^2}}$

On prend :

$$F_{max} = \sqrt{F_h^2 + F_v^2}$$

De manière à affiner la connaissance des zones affectées par le rayonnement thermique, les facteurs de forme ont été évalués en 5 points (extrapolés à 16 par symétrie). Ces points sont représentés sur la figure ci-dessous.



Prise en compte des protections passives

Dans le cas des scénarios pour lesquels des murs coupe-feu existent, ces structures sont considérées comme faisant écran au rayonnement thermique. La méthodologie utilisée est le principe d'additivité des flux thermiques (*« An introduction to fire dynamics »*, Dougal Drysdale, 2nd édition, 1998, WILEY).

Facteur de transmissivité atmosphérique

Le facteur de transmissivité atmosphérique traduit le fait que les radiations émises sont en partie absorbées par l'air présent entre la surface radiante et la cible. Ce facteur vaut (1 – le facteur d'absorption), dont la valeur dépend des propriétés absorbantes des particules de l'air en relation au spectre d'émission du feu. A une température donnée, cette atténuation est fonction de la distance de la cible à la flamme et de l'humidité relative de l'air. Pour la plupart des régions françaises, le taux moyen d'humidité relative de l'air est d'environ 70 %.

La formule de calcul du facteur de transmissivité atmosphérique retenue est préconisée par Brzustowski et Sommer :

$$\tau = 0{,}79 \cdot \left(\frac{100}{d}\right)^{1/16} \cdot \left(\frac{30{,}5}{HR}\right)^{1/16}$$

avec τ : Facteur de transmissivité atmosphérique (sans unité),
HR : Taux d'humidité relative de l'air ambiant (%),
d : Distance séparant la cible de la surface en feu (m).

Logiciel de calcul utilisé

Le logiciel de calcul utilisé est le logiciel FLUTHERM dans sa version 3.0 qui a été développé par le Groupe APAVE au niveau national.

Ce logiciel, qui utilise la méthodologie décrite ci-dessus, permet de calculer les effets thermiques pour les feux de nappe et les feux d'entrepôts.

Il faut rappeler que ce logiciel donne des valeurs par calculs. Néanmoins, on peut trouver des incertitudes relatives, car le logiciel ne prend pas en compte tous les phénomènes physiques, notamment la conduction.

Seuils réglementaires

En cas d'inflammation d'un gaz ou d'un liquide inflammable, le flux thermique correspond à la chaleur rayonnée sur le voisinage.

Celle-ci s'exprime en kilowatt par m^2 (kW/m^2) et correspond aux effets thermiques attendus sur les personnes et les installations.

L'arrêté du 29 septembre 2005 *relatif à l'évaluation et à la prise en compte de la probabilité d'occurrence, de la cinétique, de l'intensité des effets et de la gravité des conséquences des accidents potentiels dans les études de dangers des installations classées soumises à autorisation* fixe deux types de valeurs de référence pour les installations classées :

Effets sur l'homme

Flux thermiques	Effets sur les hommes
3 kW/m²	Effets irréversibles sur l'homme (*zone des dangers significatifs pour la vie humaine*)
5 kW/m²	Effets létaux sur l'homme (*zone des dangers graves pour la vie humaine*)
8 kW/m²	Effets létaux significatifs sur l'homme (*zone des dangers très graves pour la vie humaine*)

Effets sur les structures

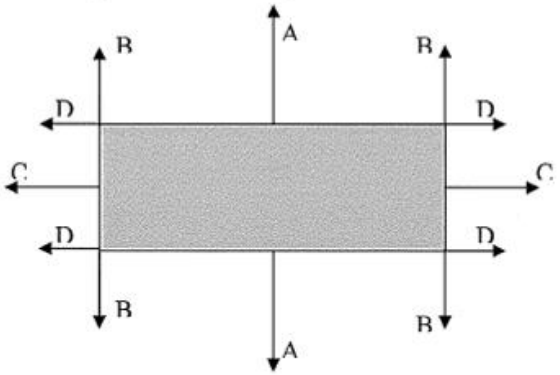
Flux thermiques	Effets sur les structures
5 kW/m²	Destructions des vitres significatives
8 kW/m²	Effets dominos (seuil à partir duquel les effets domino doivent être examinés) Dégâts graves sur les structures
16 kW/m²	Seuil d'exposition prolongée des structures Dégâts très graves sur les structures, hors structures béton
20 kW/m²	Tenue du béton pendant plusieurs heures Dégâts très graves sur les structures béton
200 kW/m²	Ruine du béton en quelques dizaines de minutes

Les données d'entrée et les valeurs calculées par FLUTHERM s'appuient sur les caractéristiques du fioul lourd principalement :

- Le fioul lourd représente 40 m3 pour 15 m3 de fioul domestique) :
- Le fioul lourd présente des caractéristiques de combustion proche du fioul domestique, il n'existe pas de données bibliographiques distinguant les caractéristiques de combustion des deux produits.

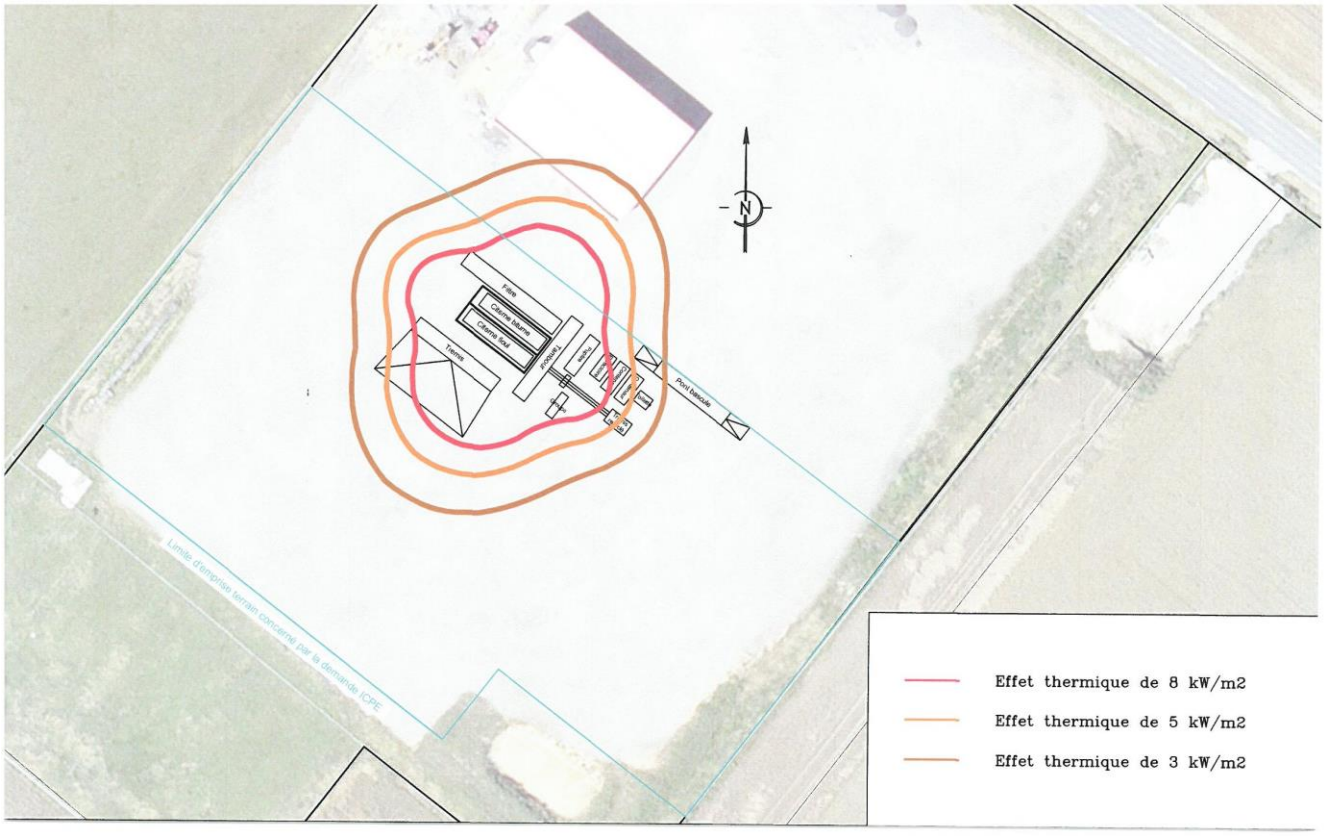
Paramètres		Valeurs utilisées
Données d'entrée		
Longueur de la zone de feu en m		16
Largeur de la zone de feu en m		4
Produit considéré : Fioul lourd et fioul domestique	Enthalpie de combustion en kJ/kg (données de Babrauskas pour le fioul lourd)	39700
	Taux de combustion en kg/m^2/s (données de Babrauskas pour le fioul lourd)	0,035
Fraction radiative		0,35
Valeurs calculées par FLUTHERM		4
Rapport longueur/largeur		4
Diamètre équivalent en m		6,4
Hauteur de flamme en m		7,4
Emittance brute en kW/m^2		86,9
Emittance nette en kW/m^2		73,5
Distances d'effets en m		Voir tableau suivant

Les axes de calcul de flux sont présentés sur la figure ci-dessous :



Les distances pour les différents flux thermiques (données par rapport au front de flamme) sont présentées dans le tableau ci-dessous :

Flux reçu	Effets	Distance par rapport au front de flamme			
		Point A	Point B	Point C	Point D
3 kW/m^2	Effets irréversibles sur l'homme (zone des dangers significatifs pour la vie humaine)	26 m	23 m	12 m	12 m
5 kW/m^2	Effets létaux sur l'homme (zone des dangers graves pour la vie humaine) Destruction des vitres significatives	19 m	16 m	9 m	9 m
8 kW/m^2	Effets létaux significatifs sur l'homme (zone des dangers très graves sur la vie humaine) Effets dominos (seuil à partir duquel les effets dominos doivent être examinés) Dégâts graves sur les structures	14 m	11 m	7 m	6 m
16 kW/m^2	Seuil d'exposition prolongée des structures. Dégâts très graves sur les structures, hors structures béton	9 m	4 m	4 m	2 m
20 kW/m^2	Tenue du béton pendant plusieurs heures Dégâts très graves sur les structures béton	7 m	2 m	3 m	1 m
200 kW/m^2	Ruine de béton en quelques dizaines de minutes	NA	NA	NA	NA

NA : Flux non atteint sur l'axe considéré

Incendie au niveau de la cuvette de rétention de la cuve de fuel