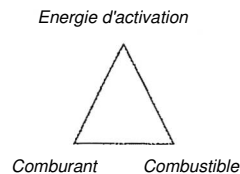

MODELISATION DES FLUX
THERMIQUES EN CAS D'INCENDIE DU STOCKAGE

CALCUL DES FLUX THERMIQUES EN CAS D'INCENDIE DU HANGAR DE STOCKAGE

A.1. NATURE DU RISQUE

L'incendie est un phénomène d'oxydation exothermique. Son mécanisme se caractérise par ce qu'on appelle « le triangle du feu ».



- Combustible : corps qui a la particularité de brûler (carton, plastique...),
- Comburant : corps qui en présence d'un combustible permet puis entretient la combustion, le plus souvent l'oxygène de l'air mais aussi les peroxydes...
- L'énergie d'activation : quantité de chaleur nécessaire pour démarrer la combustion, allumage, sources d'ignition.

Certaines caractéristiques des produits sont à prendre en compte telles que :

- La température d'auto-inflammation : température minimale à laquelle un mélange inflammable s'enflamme spontanément,
- Le pouvoir calorifique : la quantité de chaleur qui peut être dégagée par la combustion complète de l'unité de masse (si combustion liquide ou solide) ou de volume (si combustible gazeux).

Le feu suit une courbe d'évolution :

- Initialisation : plusieurs éléments combustibles sont amenés à leur point d'inflammation,
- Propagation : fonction de la nature des combustibles, de l'alimentation en air et de la géométrie du local,
- Combustion continue : tout le local est impliqué,
- Décroissement : épuisement du combustible.

La propagation du feu intervient selon plusieurs modes :

- Conduction : transfert à l'intérieur des matériaux (ex. des conduites métalliques),
- Convection : transfert par mouvements de gaz ou de vapeurs (ex. des gaines techniques, d'un étage à l'autre),
- Rayonnement : infrarouges,
- Brandons et flammèches.

A.2. FAITS GÉNÉRATEURS

Les faits générateurs d'un incendie susceptible d'intervenir sur les installations reposent sur la conjonction nécessaire d'un mélange inflammable et d'un point chaud.

A.2.1. MÉLANGE INFLAMMABLE

Le mélange inflammable se compose d'un combustible et d'un comburant. Leurs sources respectives présentes sur le site sont ci-après détaillées.

A.2.1.1. COMBUSTIBLES

A.2.1.1.1 Matériaux de construction

Sur le site, parmi les matériaux de construction présents, les pannes en bois du hangar de stockage se présentent comme des combustibles.

A.2.1.1.2 Fumier

En raison de ses caractéristiques, le fumier dans les bâtiments d'élevage se présente comme un combustible, très lent (litière sèche et déjections humides).

A.2.1.1.3 Stockage miscanthus

Le stockage de miscanthus offre un volume d'environ 141 m³ au sein d'un hangar couvert, localisé sur le site d'exploitation.

A.2.1.1.4. Aliment stocké en silo

En raison de sa composition, l'aliment stocké en silo se présente comme un combustible, très lent.

A.2.1.2. COMBURANTS

Le seul comburant omniprésent sur le site est l'oxygène de l'air.

A.2.2. POINT CHAUD

La présence d'un point chaud sur le site peut être liée à plusieurs sources.

A.2.2.1. Foudre

D'origine naturelle, la foudre peut constituer un point chaud.

A.2.2.2. MALVEILLANCE

Les tiers les plus proches sont situés à moins de 100 mètres du hangar de stockage.

Bien que le site ne représente pas une cible de haute importance stratégique, la malveillance ne peut être écartée. Un point chaud pourrait être généré par feu nu.

A.2.2.3. NÉGLIGENCE

L'intervention humaine sur le site peut être source de point chaud, par pure négligence.

Les sources de négligence peuvent être variées, à titre d'exemple :

- La cigarette en des lieux inappropriés,
- Les tâches de nettoyage-désinfection nécessitent l'emploi de produits potentiellement incompatibles (solution acide/solution basique). Un mélange accidentel de tels produits peut être à l'origine d'une réaction exothermique conduisant à l'incendie,
- Le non-respect des mesures d'entretien et de vérification des organes sensibles de process (installations électriques, équipements sous pression).

A.2.2.4. ETINCELLE ÉLECTRIQUE

L'origine de l'étincelle électrique peut être variée :

- Installation électrique défectueuse : tous les bâtiments sont alimentés en électricité pour les besoins de production et usages divers,
- Décharge d'électricité statique.

A.2.2.5. TRAVAUX AVEC DU FEU

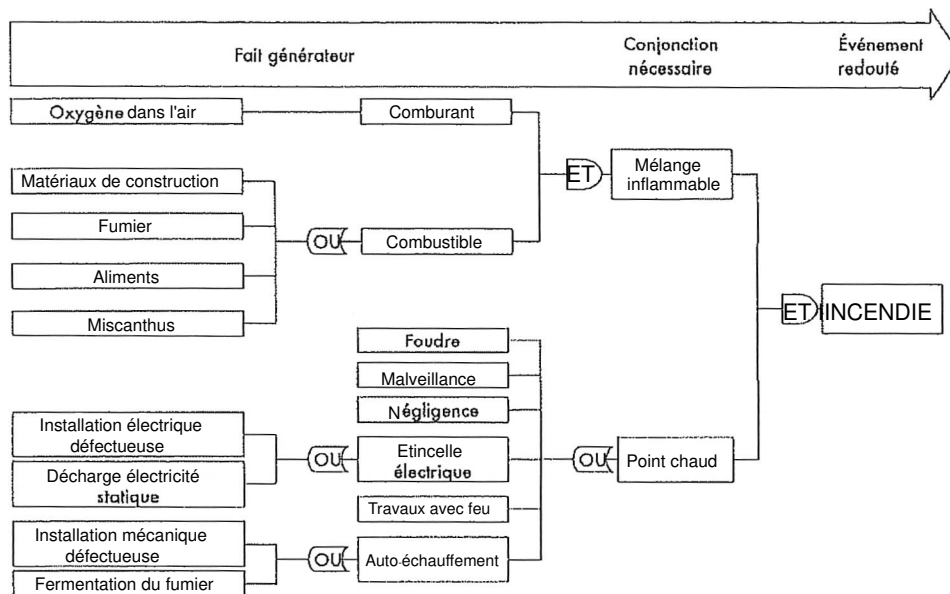
Plusieurs interventions d'entretien ou de mise en place de matériel nécessitent l'emploi de feu (chalumeau, poste à souder). Ces interventions peuvent être réalisées par le personnel habilité de l'établissement mais également par des prestataires extérieurs.

A.2.2.6. AUTO-ÉCHAUFFEMENT

L'auto-échauffement peut avoir comme origine l'installation mécanique défectueuse ou une inflammation au cœur du fumier par fermentation et développement d'un feu sans flamme.

A.3. ARBRE DES CAUSES DE L'INCENDIE

Les faits générateurs d'un incendie susceptible d'intervenir sur les installations reposent sur la conjonction nécessaire d'un mélange inflammable et d'un point chaud.



A.4. SCÉNARIO INCENDIE

A.4.1. CINÉTIQUE DU RISQUE

Le risque incendie sur les installations de l'établissement de la SARL ELEVAGE LEBLOND repose sur les éléments suivants :

- Au sein des bâtiments d'élevage, le combustible recensé est principalement la litière mélangée aux déjections. La cinétique de propagation de l'incendie ne semblerait donc pas particulièrement rapide,
- Au sein du stockage de miscanthus, les matériaux de construction (pannes bois) constituent un combustible, ainsi que le stockage de litière. En raison du volume de combustibles et de la nature des combustibles stockés, ce stockage constitue un stockage de combustibles non négligeable.

Compte tenu de ces éléments, la présente étude développe le scénario incendie suivant :

- Incendie du stockage de miscanthus.

Le scénario a été choisi de façon à aboutir aux effets les plus pénalisants, compte tenu du danger présenté par l'activité et les produits.

A.4.2. SEUILS D'EFFETS DANGEREUX A RETENIR

L'intensité des effets de l'incendie s'apprécie en flux thermique. Le flux thermique présente un danger pour l'homme et les structures. Les effets du flux thermique sont décrits dans le tableau page suivante.

FLUX (kW/m ²)	CONSEQUENCES
240	Rayonnement d'un feu intense (1150 °C)
200	Ruine du béton par éclatement interne en quelques dizaines de minutes
150	Rayonnement d'un feu moyen (1000 °C)
100	Température de 100°C dans 10 cm de béton pendant 3 heures
92	Rayonnement d'un feu faible
40	Ignition spontanée du bois en 40 s
36	Propagation probable du feu de réservoir d'hydrocarbures (même refroidi à l'eau)
27	Ignition spontanée du bois entre 5 à 15 mn
20	Tenue des ouvrages d'art en béton pendant plusieurs heures – Inflammation possible des vêtements
12	Modification structurelle des fibres de type polyester
10	Modification structurelle de la laine ou du coton
9,5	Seuil de la douleur en 6 s, flux minimal léthal en 30 s
8	Début de la combustion spontanée du bois et des peintures
5	<ul style="list-style-type: none"> - Intervention de personnes protégées avec tenues ignifuges - Bris de vitres sous l'effet thermique - Flux minimal léthal pour 60 s - Intervention rapide pour des personnes protégées (pompiers)
2,9	Flux minimal léthal en 120 s
1,5	Seuil de rayonnement continu pour des personnes non protégées (habillement normal)
1	Rayonnement solaire en zone équatoriale
0,7	Rougisement de la peau, brûlure en cas d'exposition prolongée

A.4.2.1. EFFETS SUR L'HOMME

Les valeurs de référence relatives aux seuils d'effets thermiques sur l'homme à retenir sont :

- Le seuil de 8 kW/m² correspond au seuil de dégâts graves sur les structures, au seuil d'effets létaux significatifs délimitant la zone de dangers très graves pour la vie humaine et obligeant à mettre en place une information optimum du personnel intervenant dans cette zone sur le risque incendie et la conduite à tenir en cas d'accident. Ce seuil permet de déterminer une zone Z1 dans laquelle il convient de limiter toute présence humaine. Aucun poste fixe ne peut être tenu dans cette zone.
- Le seuil de 5 kW/m² correspond à la destruction des vitres des bâtiments. Il engendre rapidement une douleur chez l'homme (en quelques secondes). Il permet donc de déterminer une zone Z2 dans laquelle il convient impérativement de limiter l'implantation de constructions ou d'ouvrages concernant notamment les tiers.
- Le seuil de 3 kW/m² correspond aux flux thermiques pouvant encore générer des effets graves sur l'homme, et détermine la zone Z3 :
 - o Brûlures au premier degré au bout d'environ une minute,
 - o Douleurs en une vingtaine de secondes,
 - o Seuil minimum léthal pour une exposition de 2 minutes.

Dans la zone Z3 définie par ce seuil, même en cas d'exposition prolongée, les bâtiments ne subiraient pas de dommages. Il est donc possible d'autoriser des constructions dans cette zone, à l'exception des établissements recevant du public. (ERP).

A.4.2.2. EFFET SUR LES STRUCTURES

Les valeurs de référence relatives aux seuils d'effets thermiques sur les structures à retenir sont :

- Flux de 200 kW/m² : seuil de ruine du béton en quelques minutes,
- Flux de 20 kW/m² : seuil de tenu pour le béton pendant plusieurs heures et correspondant aux seuils des dégâts très graves sur les structures béton,
- Flux de 16 kW/m² : seuil d'exposition prolongé pour les structures et correspondant aux seuils des dégâts très graves sur les structures, hors structures béton,
- Flux de 8 kW/m² : **seuil des effets domino** et correspondant au seuil de dégâts graves sur les structures,
- Flux de 5 kW/m² : seuil des destructions de vitres significatives.

A.4.3. MODÉLISATION

Dans l'hypothèse de la survenue d'un incendie sur les installations, les paramètres suivants sont à prendre en compte :

- * La vitesse de combustion des produits stockés,
- * Le flux thermique engendré,
- * La combustion s'accompagne d'un dégagement de fumées irritantes, chaudes et toxiques. Les principaux gaz émis

lors de la combustion sont :

- o Le monoxyde de carbone (CO),
- o Le dioxyde de carbone (CO₂),
- o L'acide cyanhydrique (HCN),
- o L'acide chlorhydrique gazeux (HCl),
- o Les hydrocarbures aliphatiques (méthane...) ou aromatiques,
- o D'autres gaz en quantité variable (NOx...).

La fumée est également rendue opaque par la présence de particules solides résiduelles de la combustion.

A.4.3.1. MÉTHODE

L'étude est basée sur la « Méthode pour l'évaluation et la prévention des risques accidentels – Feux de nappe » réalisée par l'INERIS (DRA-006 - document Ω 2 - octobre 2002).

Le calcul est effectué en prenant en compte le modèle d'une flamme solide. Cela signifie que la flamme est assimilée à un volume géométrique simple.

Les hypothèses suivantes sont posées :

- Les surfaces du volume pris en compte rayonnent uniformément.
- La base du volume géométrique correspond à la base du feu et sa hauteur, à la hauteur pour laquelle la flamme est visible 50% du temps,
- Seule la partie visible par la cible, émet des radiations thermiques vers celle-ci.

A.4.3.1.1 Equation générale

L'équation générale pour calculer le flux thermique reçu par une cible peut être exprimée sous la forme suivante :

$$\phi = \phi_0 \cdot F \cdot \tau$$

avec :

- ϕ : Radiation maximum reçue par une cible en kW/m²
- ϕ_0 : Radiation émise à la surface de la flamme en kW/m² (émittance maximum : 30 kW/m²)
- F** : Facteur de vue
- τ : Facteur de transmissivité atmosphérique

Cette formule intègre à la fois, l'atténuation du flux due à la distance et le facteur de vue, caractérisant la vision de la surface de flamme par rapport à sa cible située au niveau du sol.

Pour le calcul des différents paramètres de l'équation, il convient de déterminer préalablement divers paramètres caractéristiques du feu :

- Estimation de la surface et du diamètre équivalent du foyer de l'incendie,
- Vitesse de combustion,
- Hauteur de flamme,
- Facteur de transmissivité atmosphérique (τ),
- Facteur de vue.

A.4.3.1.2 Diamètre équivalent du foyer

Pour les feux non circulaires dont le ratio longueur / largeur est supérieur à 2, le diamètre équivalent, D_{eq} , peut être estimé en prenant en compte la plus petite des dimensions caractéristiques du local, soit sa largeur.

Dans les autres cas, la formule suivante s'applique :

$$D_{eq} = 4 X \text{ (Surface de la Nappe / Périmètre de la nappe).}$$

A.4.3.1.3 Vitesse de combustion

La vitesse de combustion massique, lors d'un incendie, est directement liée à la nature des matériaux stockés.

A.4.3.1.4 Hauteur de flamme

Dans une situation sous le vent, la hauteur de la flamme peut être calculée par la corrélation de Thomas dont la formule est la suivante :

$$H = 42 \cdot D_{eq} \cdot \left(\frac{M}{\rho_a \cdot \sqrt{g \cdot D_{eq}}} \right)^{0,61}$$

Avec :

- H = Hauteur de flamme en m
- Deq = Diamètre de la flaque en m
- M = Vitesse de combustion massique en kg/m².s
- pa = Densité de l'air ambiant en kg/m³ (1,22 kg/m³)
- g = Accélération de la pesanteur en m/s² (9,81 m/s²)

A.4.3.1.5 Facteur de transmissivité atmosphérique

Ce coefficient permet de prendre en compte l'atténuation de la radiation de la flamme, au long de son parcours jusqu'à la cible. Ce coefficient correspond donc à la fraction de chaleur transmise à l'atmosphère. L'atténuation est relative à la distance de la cible à la flamme et à l'humidité de l'air.

Pour la plupart des régions françaises, le taux moyen d'humidité est d'environ 70%, valeur prise en compte dans les calculs.

Considérant la transmission atmosphérique selon le modèle de Brzurstowski :

$$\tau = 0,79 (100 / x)^{1/8} X (30,5 / r)^{1/8}$$

Avec : r = humidité de l'air = 70 % et x = Distance en mètres entre la flamme et la cible

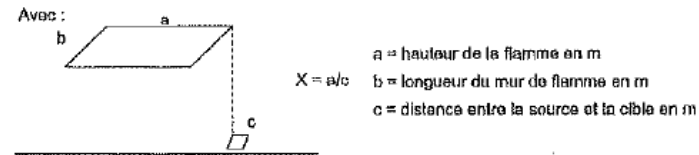
Les valeurs de transmissions atmosphériques seront comprises entre 0 et 1 (1 étant la valeur correspondant au corps noir).

A.4.3.1.6 Facteur de vue

Ce facteur traduit la fraction de l'énergie émise par une surface vers une autre. Dans le cas présent, le feu est assimilé à un parallélépipède.

Considérant une surface élémentaire verticale, parallèle au mur de flamme, le facteur de vue (F_v) est donné par la formule suivante :

$$F_v = \frac{1}{2\pi} \cdot \left(\frac{X}{\sqrt{1+X^2}} \cdot \text{Arctg} \left(\frac{Y}{\sqrt{1+X^2}} \right) + \frac{Y}{\sqrt{1+Y^2}} \cdot \text{Arctg} \left(\frac{X}{\sqrt{1+Y^2}} \right) \right)$$

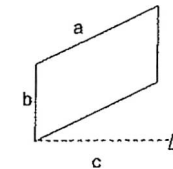


Considérant une surface élémentaire orientée perpendiculairement au plan émetteur, le facteur (F_v) est calculé par la formule suivante :

$$F_b = \frac{1}{2\pi} \cdot \left(\text{Arctg} \left(\frac{1}{Y} \right) - A \cdot Y \cdot \text{Arctg}(A) \right)$$

Avec :

$$X = \frac{a}{b} ; \quad Y = \frac{c}{b} ; \quad A = \frac{1}{\sqrt{X^2 + Y^2}}$$



Le facteur de vue maximum, F_{max} à une distance donnée est alors :

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

A.4.3.2. INTENSITÉ DE L'INCENDIE DU STOCKAGE DE MISCANTHUS

Le stockage de miscanthus est enflammé par une source d'ignition. L'incendie se propage à l'ensemble du stockage.

A.4.3.2.1 Vitesse de combustion

Assez peu de données sont disponibles dans la littérature technique au sujet des vitesses de combustion de matériaux solides. Des vitesses de combustion de matériaux sont données dans un document de description FLUMILOG, rapport final du 04/08/2011 :

Nom	Chaleur de combustion – PCI (MJ/kg)	Vitesse de combustion à l'état non divisé (kg/m ² /s)	Masse volumique (kg/m ³)
bois	18	0,017	550
PE	40	0,015	925
carton	18	0,017	900
PVC	18	0,015	750
PS	40	0,015	20
PUF	25	0,021	30
Caoutchouc	30	0,007	900
Pneu	30	0,035	900
Coton	20	0,0155	95
Synthétique	38	0,0135	90

Tableau 8 : propriétés des produits à l'état non divisé

En l'absence de données techniques connues concernant la vitesse de combustion du miscanthus, celui-ci ne sera pas repris. Toutefois, le PCI du miscanthus est d'environ 18 MJ/kg de matière sèche (source : Prof.Dr.HERMANN HOFBAUER BIOBIB-information university of technology Vienna institute of Chemical Engineering, fuel and environmental technology getreidemarkt 9/159 A-1060 Vienna., 2005). Le miscanthus se rapprochant au plus près du bois ou du carton, on peut donc émettre l'hypothèse d'une vitesse de combustion égale à 0,017 kg/m²/s soit **17 g.m⁻².s⁻¹**.

Dans le cadre de notre étude de simulation, nous considérons un incendie généralisé à l'ensemble du stockage.

A.4.3.2.2 Flux thermiques

A titre indicatif, l'émissivité réelle de la flamme est généralement très inférieure à l'émissivité théorique ou celle observable sur des feux de taille réduite. Les valeurs disponibles dans la littérature technique pour les flux thermiques sont les suivantes (Tewarson & Pion, 1976) :

Matériau	Utilisation	Flux thermiques
Bois de sapin	Charpente	23,8 kW.m ²
Polyéthylène	Matières plastiques	32,6 kW.m ²
Polyester	Matières plastiques	30 kW.m ²

La phase préliminaire (feu couvant) peut durer plusieurs heures. L'incendie atteint (dans le cas d'un début d'incendie non maîtrisé) son régime de puissance maximale environ 1/2 heure après l'embrasement généralisé. L'incendie reste au régime maximal pendant environ une heure. Environ la moitié de la charge calorifique est libérée sur cette durée.

Le flux thermique en surface sera pris égal à 30 kW/m², valeur transposable au feu de matières solides lorsqu'une grande quantité est mise en jeu.

A.4.3.2.3 Données thermiques

L'application des formules de calculs précédemment évoquées, appliquées à l'élevage, entraîne les résultats suivants :

- **Diamètre équivalent : 32,7 mètres,**
- **Hauteur de flammes : 17,4 mètres.**

Les flux thermiques liés à ce scénario ont été calculés et mettent en évidence **les distances atteintes par des flux respectifs de 3 kW/m², 5 kW/m² et 8 kW/m²** :

- **d8kW = 5,1 m (Zone Z1),**
- **d5kW = 14 m (Zone Z2),**
- **d3kW = 23,7 m (Zone Z3).**

Les résultats sont donnés pour un feu ouvert, c'est-à-dire sans tenir compte de la présence des parois et en supposant l'absence de toute intervention. Ils sont, de ce fait, majorants.

Les mesures de prévention mises en œuvre sur le site, présentées dans le dossier, permettent de minimiser le risque incendie.

