



Bâtiment –IRIS – Hall B
84, Rue Charles Michels
93200 Saint-Denis
Tél. : 01.42.43.16.66
Email: contact@fluidyn.com
Site Web: <http://www.fluidyn.com>

SIMULATION DES FLUX THERMIQUES RADIATIFS LORS DE SCENARIO D'INCENDIE COVERED ENVIRONNEMENT

RAPPORT FINAL

Client	COVERED Environnement
Représentant	Isabelle LE ROUX
Adresse	325 Combe Jaillet 26230 ROUSSAS

Référence FLUIDYN	0421053
Nombre de pages	12

Version	Date	Pages modifiées	Rédaction	Vérification
0	05/05/2021	--	Liying CHEN	Malo LEGUELLEC

TABLE DES MATIERES

I.	CONTEXTE	3
II.	SOLUTION PROPOSEE PAR FLUIDYN	4
II.1.	<i>Outil logiciel utilisé.....</i>	<i>4</i>
II.2.	<i>Déroulement de l'étude</i>	<i>4</i>
III.	REGLEMENTATION ET SEUILS D'EFFETS THERMIQUES.....	5
IV.	METHODE DE CALCUL DE RAYONNEMENT THERMIQUE	6
IV.1.	<i>Principes de la modélisation</i>	<i>6</i>
IV.2.	<i>Méthodologie numérique</i>	<i>6</i>
V.	LOCALISATION DU SCENARIO.....	9
VI.	EFFETS THERMIQUES DE L'INCENDIE DU STOCK SUR LA PLATEFORME BOIS.....	10
VI.1.	<i>Définition du scénario.....</i>	<i>10</i>
VI.2.	<i>Géométrie et nature de l'incendie</i>	<i>10</i>
VI.3.	<i>Modélisation de l'incendie.....</i>	<i>10</i>
VI.4.	<i>Zones d'effets de flux thermiques.....</i>	<i>10</i>
VI.5.	<i>Effet domino et Flux thermique maximum en dehors des limites de propriété</i>	<i>11</i>
VII.	CONCLUSION.....	12

I. CONTEXTE

FLUIDYN France est consulté pour la réalisation de la modélisation des flux thermiques en cas d'incendie des andains de bois bruts et de broyats.

L'étude doit analyser les effets thermiques d'un incendie sur la plateforme concernant les trois îlots de stockage suivants:

- Îlot 1 : Bois en vrac 900 m² sur une hauteur de stockage de 5m
- Îlot 2 : Bois broyé 280m² sur une hauteur de stockage de 5m
- Îlot 3 : Bois broyé 280m² sur une hauteur de stockage de 5m

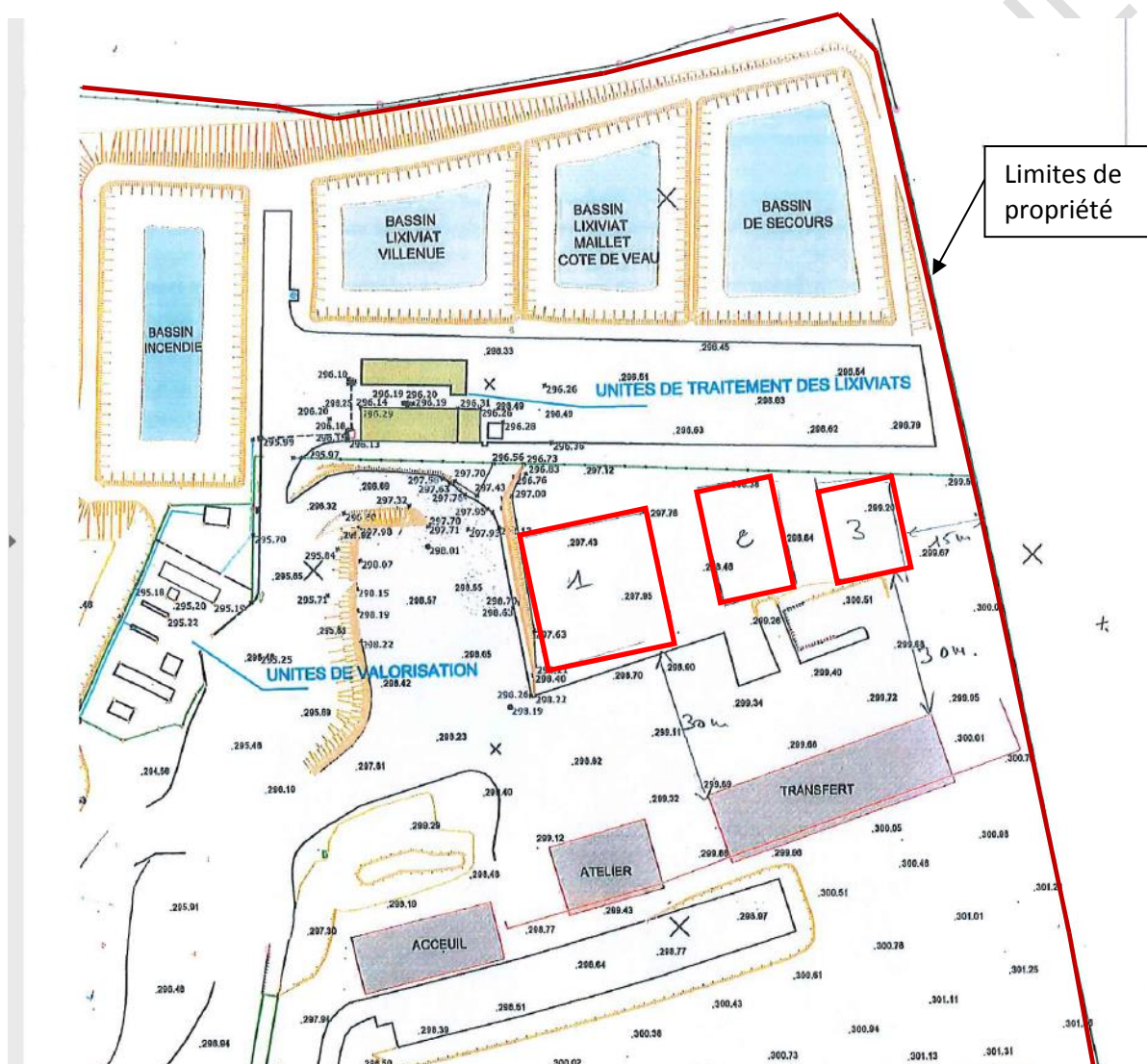


Figure 1: Localisation des îlots sur le plan de masse du site

Les objectifs de la modélisation sont multiples:

- Calculer les distances aux effets thermiques SEI, SEL et SELS pour les seuils réglementaires de l'arrêté PCIG du 29 septembre 2005,
- Analyser le risque d'effet domino sur et hors site en cas d'incendie,
- Vérifier que les zones de flux thermiques critiques ne sortent pas des limites de propriété.

II. SOLUTION PROPOSEE PAR FLUIDYN

II.1. OUTIL LOGICIEL UTILISE

Dans le contexte précité, FLUIDYN propose donc un déroulement d'étude reposant sur l'utilisation de la plateforme logicielle **fluidyn-PANFIRE** pour la simulation des flux thermiques.

fluidyn-PANFIRE calcule dans les 3 directions de l'espace les flux thermiques engendrés par l'incendie de matériaux entreposés. En effet, l'utilisation des modèles analytiques et empiriques n'est plus possible pour approcher des scénarios présentant des géométries complexes incluant éventuellement des éléments coupe-feu et de nombreux produits de stockage différents, et nécessitant des visualisations des résultats dans l'espace.

Il propose plusieurs modèles et corrélations pour calculer les flux thermiques, afin de pouvoir s'adapter à tous les types de scénarios proposés : feux solides en racks ou en vrac, feux de nappes en cuvette de rétention, feux à l'intérieur de bâtiments...

fluidyn-PANFIRE tient également compte de l'effet d'ombre des murs coupe-feu, des rideaux d'eau et de la topographie.

En utilisant les paramètres des différents combustibles en présence, le logiciel est capable de prédire les caractéristiques géométriques et la puissance radiative de la flamme. Le logiciel utilise ensuite un modèle de type flamme solide qui modélise les effets thermiques rayonnés en distribuant plusieurs points sources le long de la flamme modélisée. Dans le modèle, il est supposé que chacun des points participe pour une part égale à la radiation totale.

Le flux reçu par une cible dépend ensuite du facteur de vue des différents points source par la cible. Le logiciel tient compte de l'effet d'écran généré par un obstacle situé entre la flamme et la cible. Il permet ainsi de calculer le rayonnement reçu par la cible en tenant compte de l'écran.

II.2. DEROULEMENT DE L'ETUDE

Pour répondre aux attentes de cette étude, la démarche générique suivante est mise en place:

- Choix des scénarios, positionnement des zones d'incendie et hypothèses de modélisation,
- Prise en compte des différents éléments du site (murs coupe-feu, bâtiments, etc.),
- Calcul des paramètres de l'incendie (hauteur de flamme, pouvoir émissif radiatif de la flamme...),
- Construction des modèles numériques de terrain et élaboration des maillages 3D pour le calcul des flux thermiques,
- Calcul des flux nets rayonnés dans l'environnement de l'incendie,
- Visualisation des résultats et analyses des zones d'effets thermiques.

III. REGLEMENTATION ET SEUILS D'EFFETS THERMIQUES

Les résultats auxquels nous nous intéressons sont les distances pour lesquelles les flux thermiques classiques 8, 5 et 3 kW/m² sont observés. Les critères pour l'estimation des zones de danger « flux thermique » sont les suivants :

- **Le flux de 3 kW/m²** correspond au seuil réglementaire des effets irréversibles (distance des brûlures du 1^{er} degré pour une exposition de 60 s). La zone correspond à l'éloignement minimum des établissements recevant du public, des immeubles de grande hauteur, des voies à grande circulation et des voies ferrées ouvertes au transport de voyageur.
- **Le flux de 5 kW/m²** correspond au seuil réglementaire des effets létaux (distance du risque léthal pour une exposition de 60 s). La zone correspond à l'éloignement minimum des constructions à usage d'habitation, des immeubles habités ou occupés par des tiers et des voies de circulation autres que celles nécessaires à la desserte ou à l'exploitation du site.
- **Le flux de 8 kW/m²** correspond au seuil limite des effets dominos sur les structures (valeur en deçà de laquelle la propagation du feu à une structure est considérée comme improbable) et au seuil réglementaire des effets létaux significatifs.

IV. METHODE DE CALCUL DE RAYONNEMENT THERMIQUE

IV.1. PRINCIPES DE LA MODELISATION

Dans les scénarios accidentels à retenir dans le cadre d'une démarche d'étude de danger, les études maximalistes de flux thermiques d'un incendie doivent permettre de calculer le rayonnement thermique reçu à une distance donnée de la source en feu.

Le but est donc de connaître la distance qui correspond à un flux donné (seuils réglementaires à 3, 5 et 8 kW/m²) ou inversement de connaître celui-ci pour une distance imposée.

Dans le cadre d'une modélisation majorante, on considère pour chaque scénario un développement rapide de la montée en puissance de l'incendie sur l'ensemble de la zone en feu considérée (embrasement généralisé).

En outre, tous les moyens de protections incendie actifs (sprinkler, rideaux d'eau...) sont considérés comme inopérants. Les moyens d'intervention internes et externes sont également négligés.

IV.2. METHODOLOGIE NUMERIQUE

Il convient de rappeler avant toute présentation plus détaillée qu'à l'heure actuelle, les outils méthodologiques utilisés pour la modélisation des effets thermiques dans cette étude s'appuient sur les données publiées et sur l'état de l'art.

La méthodologie de modélisation des flux rayonnés vers l'environnement retenue pour l'étude assimile la flamme à une surface à pouvoir émissif uniforme (modèle de la flamme solide). La géométrie de la flamme est calculée sur la base de formulations analytiques disponibles dans la littérature (corrélations basées sur des analyses dimensionnelles et des résultats expérimentaux).

Le modèle de la flamme solide nécessite la définition d'un certain nombre de paramètres, nécessaires pour estimer la densité de flux thermique radiatif reçu par une cible à partir du rayonnement émis par la flamme.

Ce chapitre présente les modèles et les lois générales de calculs utilisés pour la modélisation.

Pour le calcul du flux rayonné, on distingue 3 étapes :

- Calcul de la géométrie de la flamme,
- Caractérisation de la puissance surfacique du feu,
- Détermination du flux net rayonné par intégration des atténuations du flux thermique radiatif émis par la flamme dues au facteur de forme (angle solide sous lequel la cible voit la flamme) et à l'absorption de l'air ambiant.

▪ Diamètre équivalent de la surface en feu :

$$D_{eq} = \frac{4 \times S}{2 \times (L + l)}$$

- où
- | | | |
|----------|--|-------------------|
| D_{eq} | : diamètre équivalent | [m] |
| S | : surface au sol ou de la cuvette de rétention | [m ²] |
| L | : longueur de la zone de feu | [m] |
| l | : largeur de la zone de feu | [m] |

Le diamètre équivalent, calculé de cette manière, peut ne pas être représentatif des

caractéristiques du feu dans le cas de stockages allongés (Longueur/largeur>2). Pour cette configuration, le diamètre équivalent du feu est égal à la plus petite largeur.

▪ Hauteur de flamme :

fluidyn-PANFIRE possède plusieurs formulations permettant le calcul de la hauteur de flamme. Dans le cadre de cette étude, la formulation de Thomas a été retenue. Cette corrélation se base principalement sur le taux de combustion des espèces et le diamètre hydraulique des stockages en feu.

▪ Flux thermique net reçu:

Le flux thermique net, c'est-à-dire effectivement reçu par une cible à une distance donnée du foyer, compte tenu des différentes atténuations subies s'écrit :

$$\Phi_{reçu} = \Phi_0 \times F \times \tau$$

(Flux à la cible = Puissance radiative à la flamme * Facteur de vue * Atténuation atmosphérique)

▪ Absorption atmosphérique :

Deux composants de l'air ambiant sont susceptibles d'absorber une partie du rayonnement émis : le CO₂ et la vapeur d'eau.

On détermine donc l'absorption atmosphérique du flux rayonné par une relation de la forme (Corrélation de Bagster):

$$\tau = 2.02 * (PV * x)^{-0.09}$$

où τ : coefficient d'absorption dans l'atmosphère [-]
 PV : pression partielle de la vapeur d'eau dans l'air [Pa]
 x : distance du point d'observation au front de flamme [m]

▪ Facteur de forme :

Un autre phénomène d'atténuation du flux rayonné tient à l'angle de vue de la flamme au point d'observation (cible) et de la forme de celui-ci.

La référence suivante a été utilisée pour le calcul des facteurs de forme F :

A.B. Shapiro "FACET – A Radiation View Factor Computer Code for Axisymmetric, 2D Planar, and 3D Geometries with Shadowing", Report UCID61987, Lawrence Livermore Laboratory, August 1983.

▪ Emission de la flamme

La puissance émissive d'une flamme correspond à la puissance rayonnée par unité de surface de la flamme en kW/m².

Quatre zones distinctes constituent la partie visible de la flamme

- Une zone claire, brillante et émissive au bas de la flamme,
- Une zone intermédiaire,
- Une zone particulièrement masquée par les suies,

- Une zone de fumées en partie haute, dans laquelle on observe périodiquement des « bouffées de flammes »

Les pouvoirs émissifs moyens des flammes sur chaque stockage de combustibles sont calculés d'après la formule suivante :

$$\Phi_o = \Phi_{\max} \times (1 - \zeta) + \Phi_{\text{soot}} \times \zeta$$

$$\Phi_{\max} = m'' \cdot FR \cdot S \cdot \Delta H_c / S_f$$

Φ_{\max} : pouvoir émissif d'une flamme sans fumées noires

Φ_{soot} : pouvoir émissif des fumées (valeur de 20000 W/m²)

ζ : Pourcentage de la flamme couvert par des fumées noires (valeur de 80% retenue)

FR: fraction radiative (valeur comprise entre 0.1 de 0.4) (-)

ΔH_c : Chaleur de combustion moyenne du stockage (J/kg)

S_f : Surface de flamme

m'' : Débit massique moyen (pondéré selon les fraction massique des produits combustibles) de combustion par unité de surface en feu (kg/m²/s)

▪ Interactions entre le bâtiment et les flammes

Par rapport à un feu en extérieur (solide ou liquide), un incendie de bâtiment est généralement fortement sous ventilé. La puissance du foyer dépend alors essentiellement des conditions aérauliques pour l'apport d'air frais et l'évacuation des fumées, plus ou moins indépendamment de la nature et de la quantité de combustibles en feu. La ventilation d'un incendie d'entrepôt dépend essentiellement des dispositions constructives du bâtiment.

- Par exemple, une toiture en fibrociment est rapidement détruite au contact des flammes. Dans un tel bâtiment, un incendie n'est donc pas confiné par la toiture, l'alimentation en air frais et surtout l'évacuation des fumées s'en trouvent immédiatement facilitées.
- De même, dans un bâtiment ceinturé de murs coupe-feu, seule la couverture pourra s'abîmer, et contribuer à la ventilation du foyer. L'oxygénation optimale d'un foyer est réalisée avec une alimentation en air frais située en partie basse. De telles dispositions constructives sont par conséquent peu favorables à un foyer de forte intensité, indépendamment du type de combustible.

Les dispositions constructives peuvent aussi contribuer à masquer les flammes sur une partie de leur hauteur.

C'est notamment le cas des murs stables au feu (pare-flamme ou coupe-feu) installés en périphérie. Les murs réputés coupe-feu sont considérés comme faisant office d'écran au rayonnement thermique sur toute leur hauteur, pendant la durée de l'incendie.

V. LOCALISATION DU SCENARIO

La figure suivante représente les trois zones de stockage en feu considérées pour le scénario d'incendie modélisé.

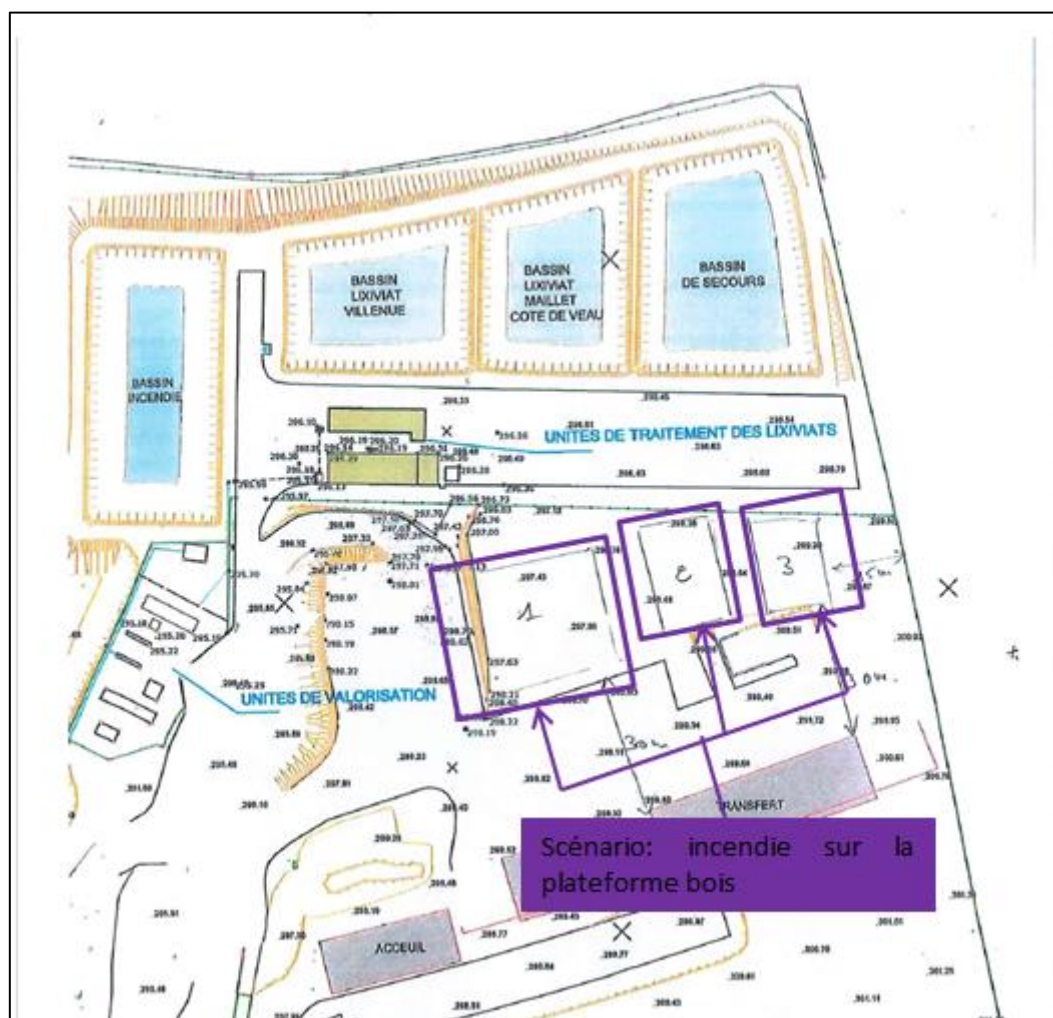


Figure 2: Localisation du scénario sur le plan de masse du site

VI. EFFETS THERMIQUES DE L'INCENDIE DU STOCK SUR LA PLATEFORME BOIS

VI.1. DEFINITION DU SCENARIO

Un départ de feu est envisageable au niveau de la plateforme bois. Les flammes devraient se propager relativement lentement compte tenu de la localisation en extérieure du stockage et de la probable humidité. Un vent fort pourrait toutefois attiser le foyer et accélérer la propagation de proche en proche sur les différents îlots de stockage.

Dans le cadre d'hypothèses pénalisantes, il est considéré un scénario d'incendie généralisé à la totalité des trois îlots de stockage.

Aucune intervention extérieure sur le feu n'est prise en compte dans ce scénario.

VI.2. GEOMETRIE ET NATURE DE L'INCENDIE

Le tableau suivant présente les caractéristiques du scénario d'incendie considéré dans la modélisation.

Tableau 1 : Caractéristiques du scénario

Zone de stockage	Nature des déchets réceptionnés	Géométries de stockage	Quantité totale	Murs coupe-feu
Ilot 1	Bois en vrac	S= 900m ² , H=5m	4500m ³	-
Ilot 2	Bois broyé	S= 280m ² , H=5m	1400m ³	-
Ilot 3	Bois broyé	S= 280m ² , H=5m	1400m ³	-

VI.3. MODELISATION DE L'INCENDIE

La surface en feu correspond à la totalité de la plateforme bois.

Les hauteurs de flamme retenues ont été évaluées par la corrélation de Thomas sur la base d'un taux de combustion du bois de 0.014 kg/m².s.

Les hauteurs de flamme et les puissances émissives radiatives de chacune des zones en feu de la plateforme bois sont présentées dans le tableau suivant.

Tableau 2 : Hauteurs et puissances émissives radiatives de chaque zone en feu du scénario

Zone	Hauteur de flamme (m)	Pouvoir émissif radiatif de la flamme (kW/m ²)
Ilot 1	19.7	23.8
Ilot 2	14.7	23.8
Ilot 3	14.7	23.8

VI.4. ZONES D'EFFETS DE FLUX THERMIQUES

La figure suivante présente les zones soumises à des flux de 3, 5 et 8 kW/m² en cas d'incendie

sans aucune intervention extérieure sur le feu.

La simulation étant tridimensionnelle, nous avons choisi de représenter ici les flux sur un plan horizontal de 1,50 m de haut, soit à hauteur d'homme pour les flux de 3 et 5 et 8 kW/m².

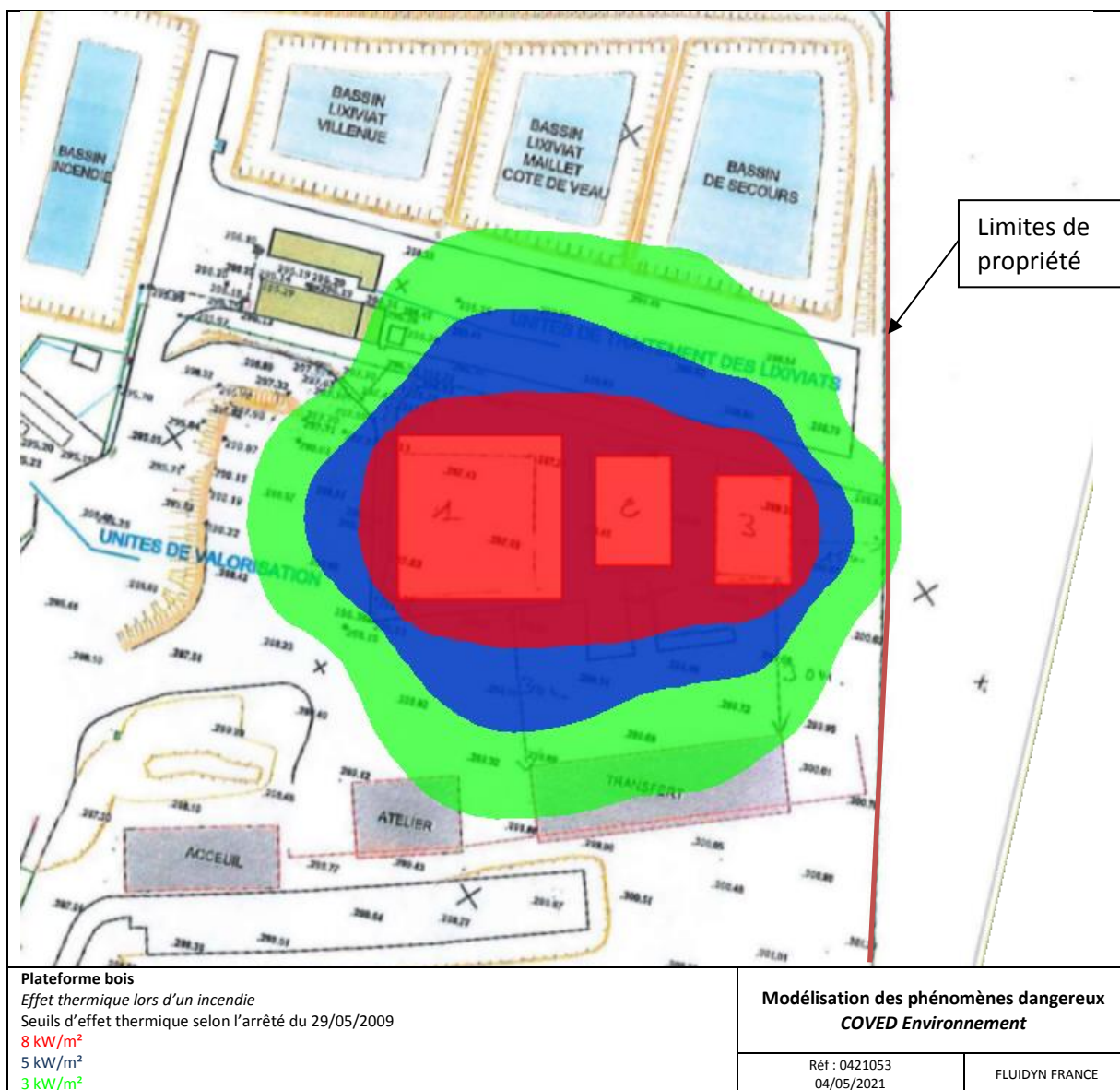


Figure 3: Zones des effets thermiques du scénario

VI.5. EFFET DOMINO ET FLUX THERMIQUE MAXIMUM EN DEHORS DES LIMITES DE PROPRIETE

Tableau 3 : Caractéristiques du scénario

Scénario	Risque d'effet domino sur des équipements du site	Flux thermique maximum au niveau de la limite de propriété
Îlots de bois brut et broyats	Non	3.4kW/m ²

La simulation indique que les flux thermiques de 5 et 8 kW/m² ne sortent pas des limites de propriété du site. Le flux thermique maximum au niveau de la limite de propriété est de 3.4

kW/m² au niveau d'une zone non occupée. La zone de dépassement hors site est non significative.

L'incendie n'est pas en mesure de générer des effets dominos sur des équipements du site.

VII. CONCLUSION

Dans le cadre d'une étude de dangers sur un site de COVED Environnement, une modélisation d'incendie sur une plateforme de stockage de bois et de broyats a été menée.

L'outil logiciel Fluidyn-PANFIRE a été utilisé pour les simulations numériques et l'évaluation des zones d'effets thermiques.

Le calcul des flux thermiques issus du scénario d'incendie retenu montre les zones couvertes par les seuils des flux thermiques correspondants au seuil des effets irréversibles (3 kW/m²), au seuil des effets létaux (5 kW/m²) ainsi que ceux des effets dominos (8 kW/m²). Pour l'analyse des résultats, il faut garder à l'esprit que les modélisations réalisées prennent en compte un feu, au maximum de son intensité, développé sur l'ensemble des stockages incriminés. D'autre part, aucune intervention des services internes et externes de lutte contre les incendies n'est prise en compte. De ce fait, les simulations ont toujours été réalisées dans le souci de se placer dans des situations majorantes.

Les résultats de la modélisation indiquent que :

- **Le scénario modélisé est en mesure de générer des effets irréversibles en dehors des limites de site (flux très légèrement supérieurs à 3 kW/m² dans une zone non occupée);**
- **Le scénario modélisé n'est pas en mesure de générer des effets thermiques létaux en dehors des limites de site (flux supérieurs à 5 kW/m²);**
- **Le scénario modélisé n'est pas en mesure de générer des effets dominos sur des équipements à proximité.**