

Sécurité incendie

Évaluation des flux thermiques sur les façades des bâtiments de l'Ecole Nationale Supérieure Mari- time à Marseille

ADRESSE DE L'AFFAIRE

38 AVENUE DU CORAIL - 13008 MARSEILLE

OBJET DU DOCUMENT

RAPPORT FINAL

REDACTEURS

A. COLLIN, U. MATTEI, E. BLANCHARD

DATE : 15 DECEMBRE 2021

REVISION : B



C			
B	15/12/2021	LISI	Révision des bâtiments sur le site de l'ENSM
A	31/08/2021	LISI	1ère diffusion
INDICE	DATE	EMETTEUR	MODIFICATION

Sommaire

1. - CONTEXTE ET OBJET DE L'ETUDE	4
2. - RAPPEL DES OBJECTIFS DE SECURITE ET DES CRITERES DE PERFORMANCE ASSOCIES	5
3. - LE SITE DE L'ENSM ET SON ENVIRONNEMENT PROCHE	6
4. - RAPPEL DES HYPOTHESES PRINCIPALES DE L'ETUDE	8
4.1. - L'environnement de l'ENSM : la prise en compte du relief.....	8
4.2. - Le front de flamme : la source de l'agression thermique	8
4.3. - Les cibles : les bâtiments sur le site de l'ENSM.....	8
5. - RAPPEL DES SCENARIOS D'ETUDE RETENUS	10
5.1. - Front de flamme.....	10
5.2. - Distance et longueur du front de flammes.....	10
5.3. - Synthèse des scénarios d'étude.....	12
6. - RESULTATS	13
6.1. - Front de flamme au-delà de la limite de propriété.....	13
6.2. - Front de flamme au sein de la propriété.....	13
6.2.1. - Le long du canal de Marseille	13
6.2.2. - Le long de la route dans la propriété	15
7. - SYNTHESES DES RESULTATS ET REPONSE AUX QUESTIONS DE L'ETUDE	17
ANNEXES 	18

Sécurité incendie

OBJET DU DOCUMENT RAPPORT FINAL

NOTE LIMINAIRE

Ce travail est réalisé en collaboration avec le Laboratoire Énergies Mécanique Théorique et Appliquée (LEMTA) de l'université de Lorraine.

DOCUMENTS DE REFERENCE

Les données relatives au projet sont tirées des documents suivants :

- [1] Plans, coupes et élévation des bâtiments, datant du 25 juin 1964
- [2] « Évaluation des flux thermiques sur les façades des bâtiments de l'Ecole Nationale Supérieure Maritime à Marseille – Note de définition des hypothèses et scénarios d'étude », Document LISI, Révision B, daté du 20 juillet 2021

Autres références exploitées :

- [3] « Plan de prévention des risques d'incendie de forêt – Commune de Marseille – Rapport de présentation », Approuvé par arrêté préfectoral du 22 mai 2018, Préfet des Bouches-du-Rhône.
- [4] « Plan de prévention des risques d'incendie de forêt – Commune de Marseille – Règlement », Approuvé par arrêté préfectoral du 22 mai 2018, Préfet des Bouches-du-Rhône
- [5] Arrêté du 29 septembre 2005 du Ministère de l'écologie et du développement durable, 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
- [6] "Principles of fire behavior", James Quintiere, 1997
- [7] NF EN 1993-1-2 Eurocode 3 Calcul des structures en acier - Partie 1-2 : règles générales - Calcul du comportement au feu, novembre 2005
- [8] NF EN 1992-1-2 Eurocode 2 : Calcul des structures en béton - Partie 1-2 : règles générales - Calcul du comportement au feu, octobre 2005

1. - CONTEXTE ET OBJET DE L'ETUDE

Le règlement du plan de prévention des risques d'incendie de forêt (PPRIF) est applicable sur la commune de Marseille par l'arrêté préfectoral du 22 mai 2018. Ce PPRIF établit les zones exposées aux risques en tenant compte de la nature et de l'intensité du risque encouru.

Suivant le PPRIF, l'École Nationale Supérieure Maritime de Marseille (ENSM) se situe en zone bleue, dans des secteurs dits B1, B2 et B3. Une zone bleue est une zone dans laquelle les moyens de défense permettent de limiter le risque ou peuvent être mis en œuvre dans des conditions techniques et économiques raisonnables. Le secteur renvoie à un niveau de risque et à des prescriptions associées.

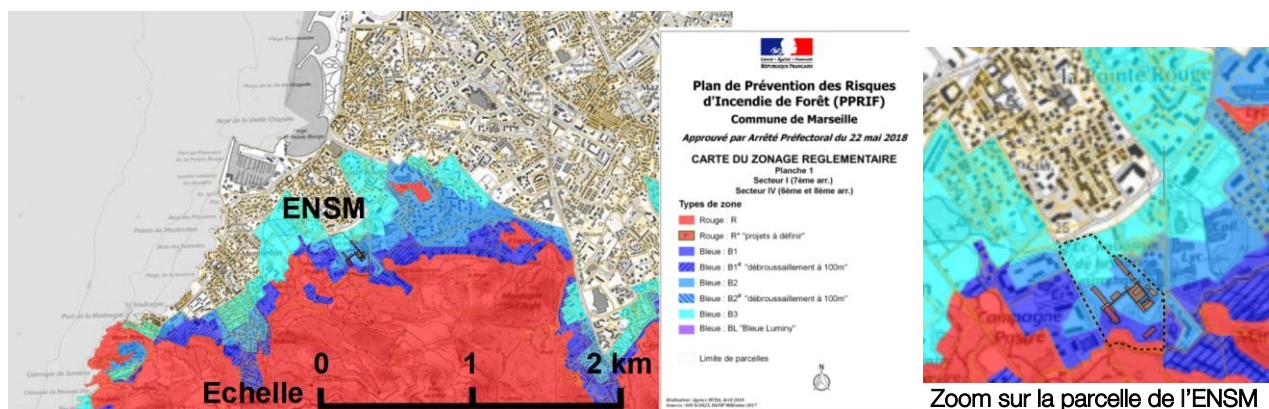


Figure 1 : Emplacement de l'ENSM sur la carte du zonage réglementaire du PPRIF [3]

L'ENSM comprend plusieurs bâtiments sur son site. Une grande partie est considérée comme « sensible » par le PPRIF (catégorie d'ERP supérieure à la 3^{ème} ou ICPE). En application du règlement applicable sur la commune de Marseille, l'ENSM est tenue d'effectuer les travaux permettant de réduire la vulnérabilité de ses installations. À cette fin, le PPRIF offre la possibilité de réaliser une étude de réduction de la vulnérabilité définissant les mesures les plus adaptées à l'activité qui garantissent de protéger la vie des personnes et réduire les dommages aux biens.

La présente étude consiste à établir la vulnérabilité des bâtiments existants de l'ENSM vis-à-vis du risque incendie de forêt. Il s'agit, par cette étude, d'évaluer les actions thermiques sur les façades des bâtiments et à apporter une réponse à la question suivante :

Le rayonnement thermique d'un feu de forêt est-il susceptible d'étendre le feu à l'intérieur des bâtiments de l'école par la ruine d'éléments en façades des bâtiments, notamment des baies vitrées ?

Le présent rapport décrit la méthodologie développée pour répondre à cette question. Il rappelle les données de l'étude, précise les objectifs de performance à atteindre, les décline en critères, pose les hypothèses de l'étude et définit les scénarios de feu. Ces éléments étaient présentés dans la note du LISI du 20 juillet 2021 (réf. [2]).

En complément des éléments figurant déjà dans la référence [2], le présent rapport analyse les résultats en termes de flux thermique rayonné sur les façades des bâtiments de l'école. Il permet ainsi de conclure quant à la vulnérabilité de l'école vis-à-vis du risque incendie de forêt.

2. - RAPPEL DES OBJECTIFS DE SECURITE ET DES CRITERES DE PERFORMANCE ASSOCIES

L'annexe 1 du règlement PPRIF fixe l'objectif de sécurité à atteindre. Les mesures ont pour objet la non pénétration de l'incendie à l'intérieur du bâtiment et la sauvegarde des personnes réfugiées (confinement) pendant une durée d'exposition de 30 minutes. Quel que soit le mode constructif du bâtiment, il doit répondre à cet objectif de mise en sécurité des personnes :

- Pour les parties opaques des parois verticales extérieures, l'objectif est le non-perçement (article A1.1),
- Pour les ouvertures des parois verticales extérieures, l'objectif est la pénétration du feu dans le bâtiment par les ouvertures et donc la non-ruine des baies vitrées dénuées de dispositifs d'occultation (article A1.2).

L'étude s'attache à évaluer l'extension du feu à l'intérieur du bâtiment sous l'effet du rayonnement thermique. Elle exclut le mode d'extension du feu associé au transport de particules incandescentes en avant du front de flammes (brandons). On pose en effet que les baies (fenêtres) sont fermées et que les éventuelles ouvertures en toiture sont fermées. Dans ce cas, le mode d'extension par rayonnement devient le premier mode. Bien sûr, en cas de percement des parois opaques et de ruine du vitrage, des brandons pourraient pénétrer dans le bâtiment et étendre le feu.

Des critères sont définis pour établir si les objectifs de sécurité sont atteints. Ils permettent de caractériser le risque de percement des parois opaques et de ruine des baies vitrées.

Concernant les baies vitrées, l'Arrêté du 29 septembre 2005 (réf. [5]) précise une valeur de référence relative au seuil des destructions de vitres significatives : 5 kW/m^2 . Le risque de ruine de ces baies est évalué à partir de cette valeur conservative instantanée.

Concernant les parois opaques, les critères de percement de ces parois qu'elles soient en bois, métalliques ou en béton, sont nécessairement plus élevés que le critère de ruine des baies vitrées susmentionné. En l'occurrence,

- Pour le bois, on peut faire le lien entre le percement et l'allumage du feu (apparition d'une flamme). Lorsqu'un morceau de bois est soumis à un flux thermique, le seuil d'allumage des matériaux cellulosiques est évalué à 12 kW/m^2 [6].
- Pour l'acier, on peut faire le lien avec le comportement au feu des structures exposées. Des critères de tenue au feu figurent dans l'Eurocode 3 suivant la classe des profils métalliques [7]. L'Eurocode 3 précise deux températures critiques limites (à partir de laquelle la ruine est susceptible de se produire) pour les éléments métalliques : 350°C pour les éléments de section de classe 4 et 500°C pour les éléments de section de classe 1, 2 ou 3. L'émittance d'un corps noir correspondante est de $8,5$ à 20 kW/m^2 .
- Pour le béton, de la même manière, on peut faire le lien avec le comportement au feu des structures exposées en retenant une température critique limite (à partir de laquelle la ruine est susceptible de se produire) de 500°C [8]. L'émittance d'un corps noir correspondante est 20 kW/m^2 .

3. - LE SITE DE L'ENSM ET SON ENVIRONNEMENT PROCHE

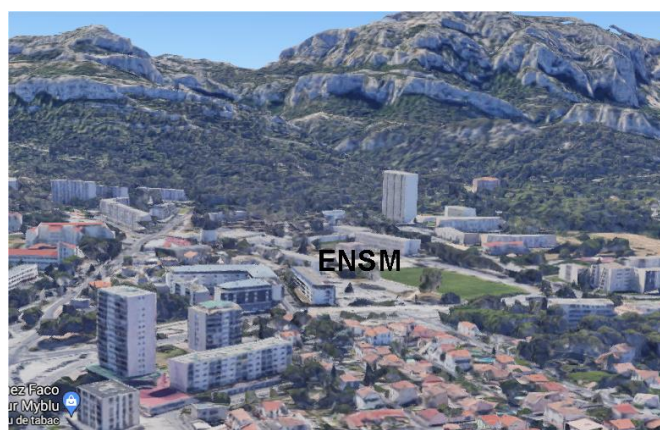
L'ENSM se situe dans le quartier de la Pointe Rouge à Marseille.

Son environnement est urbanisé sur une grande partie de son pourtour : du SUD-EST au SUD-OUEST en passant par le NORD (cf. Figure 2-a). Sur ce pourtour, l'ENSM est entourée de bâtiments d'habitation collectifs (notamment 3 et 4^e familles au SUD-EST et SUD-OUEST) et d'ERP comprenant des jardins et des espaces verts, elle est séparée de ces bâtiments par des voies de circulation (Traverses Prat et Parangon).

L'ENSM se trouve en lisière de forêt sur son flanc SUD. Elle se situe au pied du massif de Marseilleveyre dont le pic le plus proche culmine à plus de 200 mètres.



a- Environnement urbain



b-Topographie du massif

Figure 2 : Environnement du site de l'ENSM

L'ENSM comprend 16 bâtiments dont des ERP et deux ICPE :

- Les bâtiments A à K sont des ERP de 3^{ème} catégorie de types L, N, R et S.
- Le bâtiment L1 est la loge et comprend un logement de fonction. Il s'agit d'un ERP de 5^{ème} catégorie de type O.
- Le bâtiment N est le bâtiment le plus proche du massif. Il est situé à l'EST de la parcelle, à 36 m de la limite de propriété qui longe le canal de Marseille. Il s'agit d'un ERP de 5^{ème} catégorie de type O (avec locaux à sommeil : habitations stagiaires et logements de fonction).
- Le bâtiment L2 est un espace de stockage, non accessible au public. Le bâtiment P est un garage.
- Le bâtiment M est la chaufferie. Il s'agit d'une ICPE soumise à la rubrique 2910 sous le régime de la déclaration.
- Le bâtiment H et le bâtiment circulaire à l'EST du site abritent la tour de refroidissement. Il s'agit d'une ICPE soumise à la rubrique 2921 sous le régime de la déclaration.

Les bâtiments, objets d'étude, sont les bâtiments A – B – C – D – F – G – H – I – J – K – L1 – L2 – M – N – P ainsi que le bâtiment circulaire à l'EST du site (cf. Figure 3).

Parmi les bâtiments, objets d'étude, ceux considérés comme « sensibles » par le PPRIF sont les bâtiments A – B – C – D – F – G – H – I – J – K (la catégorie étant supérieure à la 3^{ème}) ainsi que le bâtiment M (ICPE) et le bâtiment circulaire à l'EST du site. Les bâtiments L1 – L2 – N – P ne sont pas sensibles au sens du PPRIF.

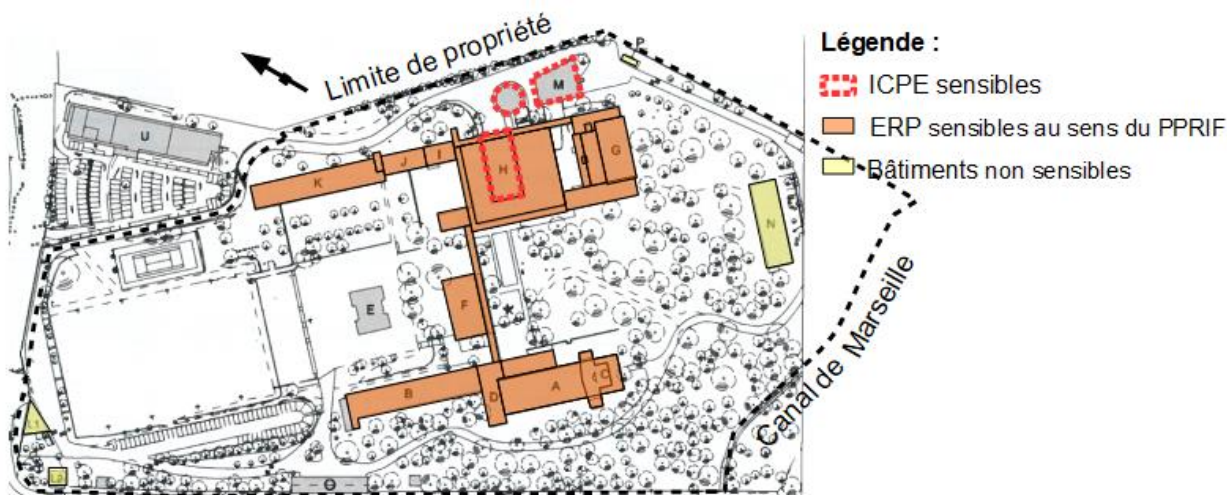


Figure 3 : Bâtiments sur le site de l'ENSM

Le PPRIF établit le type de végétation sur le site de l'ENSM et autour du site. Il s'agit de Pin d'Alep dense au partie SUD et sur une partie du site de l'ENSM. Le reste du site de l'ENSM est peuplé de Pin d'Alep clair.

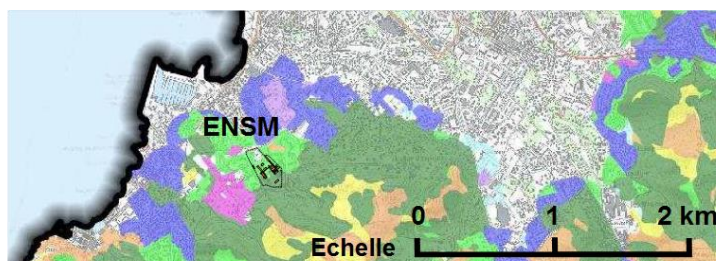


Figure 4 : Carte détaillée du type de combustible [3]



Le PPRIF établit que le vent provient du NORD / NORD-OUEST pour une vitesse de 8 m/s (soit 28,8 km/h). Le vent est donc favorable à la protection du site de l'ENSM vis-à-vis du feu de forêt qui arriverait nécessairement, compte tenu de l'environnement urbain et du relief, depuis la direction SUD-EST.

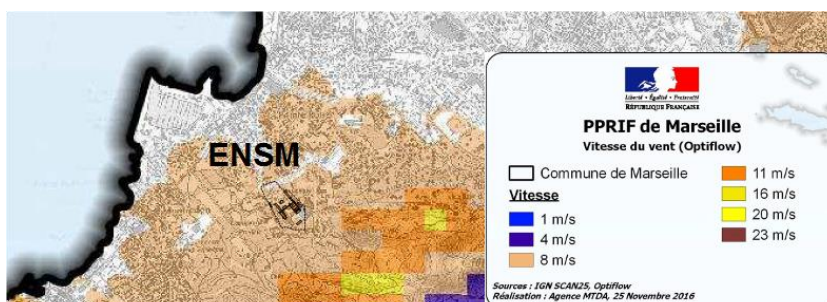
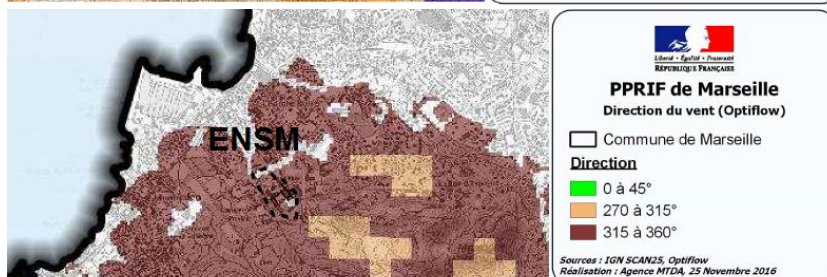


Figure 5 : Cartes des orientations et des vitesses de vent [3]



4. - RAPPEL DES HYPOTHESES PRINCIPALES DE L'ETUDE

4.1. - L'ENVIRONNEMENT DE L'ENSM : LA PRISE EN COMPTE DU RELIEF

L'ENSM et son environnement sont représentés sur une superficie d'environ 1 km². La topographie est représentée dans le modèle numérique, avec un pas de 25 m pour prendre en compte la pente et le relief. Les données sont extraites des bases de données de l'IGN (Institut Géographique National) BD-Topo.

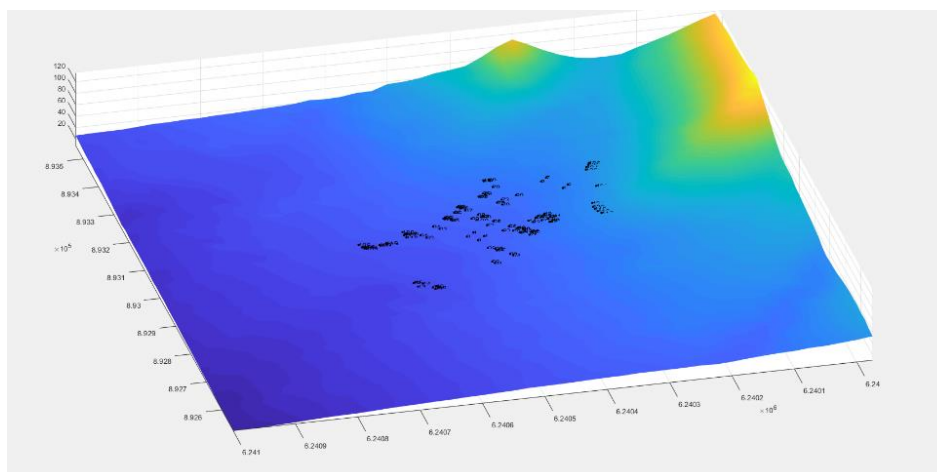


Figure 6 : Modèle numérique de la topographie environnant l'ENSM (les indications en noir correspondent à la position des bâtiments)

4.2. - LE FRONT DE FLAMME : LA SOURCE DE L'AGRESSION THERMIQUE

L'étude s'attache à évaluer le risque de l'extension du feu à l'intérieur du bâtiment sous l'effet du rayonnement thermique. Elle exclut le mode d'extension du feu associé au transport de particules incandescentes en avant du front de flammes (brandons).

Les calculs effectués dans le cadre de cette étude ont pour ambition de dégager des ordres de grandeur des actions thermiques radiatives sur les éléments en façades (opaques et vitrés). En effet, déterminer plus finement ces actions thermiques reste aujourd'hui hors de portée : il est aujourd'hui seulement possible de caractériser très approximativement et avec une grande incertitude le front de flammes et par conséquent ses effets thermiques sur un bâtiment. Pour s'en convaincre nous reprenons en annexe le chapitre 4 du PPRIF.

Chaque scénario constitue une situation figée dans le temps (pour des calculs de flux de chaleur relatifs à une situation donnée), ce qui évite tout besoin de prendre en compte la notion de propagation ou de dynamique de l'incendie pour ces calculs.

Le front de flamme est positionné sur le modèle numérique suivant les hypothèses des scénarios, en respectant la pente et le relief à ces positions.

La direction de propagation, la hauteur de flamme, l'inclinaison de la flamme et l'émittance (puissance surfacique) du front de flammes définissent les dimensions et la géométrie du front de flammes. Ces caractéristiques sont définies dans le scénario de feu en exploitant les informations figurant dans le PPRIF.

4.3. - LES CIBLES : LES BATIMENTS SUR LE SITE DE L'ENSM

Les cibles sur lesquelles on quantifie les flux thermiques reçus sont les façades des bâtiments de l'ENSM. Ces bâtiments sont donc représentés dans le modèle numérique à leur position sur le site et les façades s'élèvent à leur hauteur actuelle (cf. Figure 7). Pour cela, les plans transmis par l'école ont été exploités.

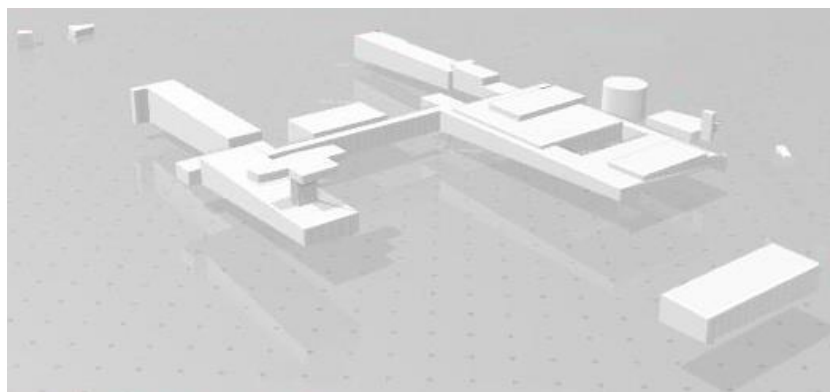


Figure 7 : Représentation des bâtiments dans le modèle numérique

Une façade ou une partie d'une façade est représentée de façon simplifiée par des rectangles verticaux avec des mailles élémentaires de 50 cm (cf. Figure 8). Cette discrétisation en maille élémentaire permettra *in fine* d'établir les cartes de flux reçus moyennées par façade et aussi localement sur chaque façade.

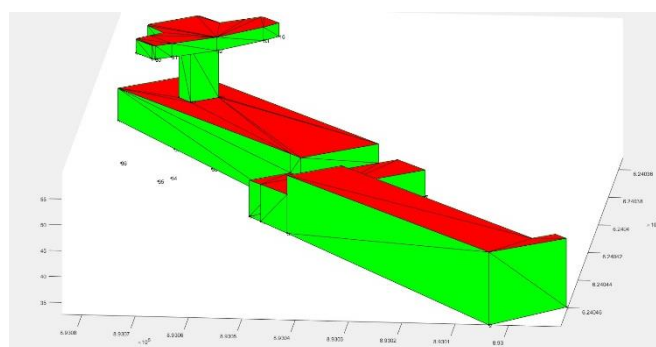


Figure 8 : Représentation des façades des bâtiments A à D dans le modèle numérique

L'écrantage n'est pas pris en compte. Cette hypothèse est conservative. Elle conduit à surestimer la densité de flux reçue. Autrement formulé, une première façade qui fait écran au rayonnement sur une seconde n'est pas prise en compte. La seconde façade reçoit une densité de flux comme si la première façade n'existait pas.

5. - RAPPEL DES SCENARIOS D'ETUDE RETENUS

5.1. - FRONT DE FLAMME

La direction de propagation, la hauteur de flamme, l'inclinaison de flamme et l'émittance du front de flamme définissent les dimensions et la géométrie du front de flamme. Pour définir ces grandeurs, les données relatives au type de végétation, à la vitesse des vents et leurs directions sont extraites pour la zone d'étude du PPRIF [3] :

- Pour le type de végétation, on retient deux végétations de Pin d'Alep dense et de Pin d'Alep clair.
- Pour le vent, on ne retient que des scénarios sans vent. Le relief (l'ENSM est au pied du massif et notamment d'un pic) et le vent dans la direction opposée à l'ENSM depuis le massif vont à l'encontre d'une propagation descendante du feu vers l'ENSM, la vitesse du feu est considérablement ralentie, les transferts thermiques par rayonnement et convection sont diminués.

La hauteur du front de flammes est calculée à partir de l'hypothèse d'un panneau radiant assimilé à un corps noir, selon l'expression suivante :

$$I^{ray} = 2\sigma T^4 H_f \text{ avec :}$$

I^{ray} l'intensité rayonnée exprimée en W/m, T la température du corps noir posée égale à 1200 K (température moyenne de flamme), σ la constante de Maxwell-Boltzmann égale à $5,670 \times 10^{-8} \text{ W.m}^{-2} \text{ K}^{-4}$ et H_f la hauteur du front de flammes exprimée en m.

Remarque : Le facteur 2 indique que la flamme émet du rayonnement selon les deux côtés du panneau rayonnant.

I^{ray} est calculée selon la formule de corrélation donnée par le PPRIF (page 58 de la réf. [3]) :

$$I^{ray} = I_{ref}^{ray} (0,031 v + 0,024) (0,1\varphi + 3,7) \text{ avec :}$$

I_{ref}^{ray} l'intensité rayonnée de référence égale à 1/3 de l'intensité de référence définie par le PPRIF pour les différents types de combustibles (pin d'Alep clair ou dense), v la vitesse du vent exprimée en m/s et φ la pente corrigée exprimée en ° entre la direction du vent et la direction de la plus grande pente, prise ici à 0°.

Type de combustible	Intensité pour un terrain plat et un vent de 8 m/s
Pin d'Alep clair	2720 kW/m
Pin d'Alep dense	9065 kW/m

Tableau 1 : Intensités de référence pour la végétation sur le site de l'ENSM et aux abords de l'ENSM

En application des données et de la formule du PPRIF, le Tableau 2 donne la hauteur du front de flammes retenue pour le calcul du flux rayonné sur les façades des bâtiments pour les deux types de combustible. Ces hauteurs permettent la conservation de l'énergie pour l'intensité de référence calculée et une température de flamme de 1200 K (correspondant à une émittance de 117,5 kW/m²).

Type de combustible	Hauteur de flamme
Pin d'Alep clair	0,3 m
Pin d'Alep dense	1,2 m

Tableau 2 : Hauteur du front de flammes en mètres

5.2. - DISTANCE ET LONGUEUR DU FRONT DE FLAMMES

Les scénarios mettent en jeu des fronts de flamme à l'intérieur et au-delà de la limite de propriété, sur le massif donc au SUD-EST de l'ENSM.

Au sein de la propriété, le front de flamme est placé en limite de propriété et sur une barrière naturelle :

- Le long du canal de Marseille en limite de propriété, à 36 m au plus près d'un bâtiment (bâtiment N),
- Le long de la route dans la propriété (à 8 m au plus près d'un bâtiment).

Pour ces deux positions, le front de flamme s'étire entre les deux voies de circulation, Traverse Prat et Traverse Parangon, au-delà desquelles des propriétés avec jardin commencent.

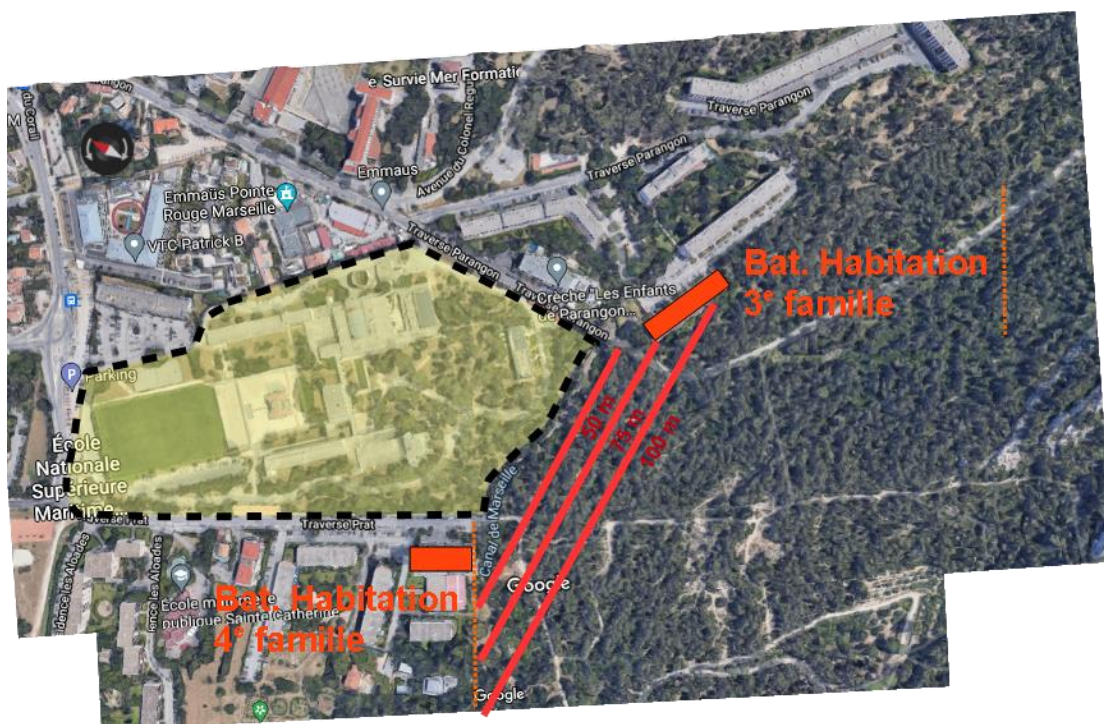


Figure 10 : Positions et dimensions des trois fronts de flammes au-delà de la limite de propriété

5.3. - SYNTHESE DES SCENARIOS D'ETUDE

Au total, 10 scénarios de feu sont retenus. Leurs caractéristiques sont résumées dans le tableau suivant.

Scénario	Type de combustible	Vent	Position du front de flamme
1	Pin d'Alep clair	Pas de vent	À 50 m du bâtiment N
2	Pin d'Alep dense		
3	Pin d'Alep clair		À 75 m du bâtiment N
4	Pin d'Alep dense		
5	Pin d'Alep clair		À 100 m du bâtiment N
6	Pin d'Alep dense		
7	Pin d'Alep clair		Le long du canal de Marseille à 36 m au plus près du bâtiment N
8	Pin d'Alep dense		
9	Pin d'Alep clair		Le long de la route au sein de la propriété
10	Pin d'Alep dense		

6. - RESULTATS

6.1. - FRONT DE FLAMME AU-DELA DE LA LIMITE DE PROPRIETE

Le front de flamme est placé à trois distances au-delà de la limite de propriété, à 50, 75 et 100 m du bâtiment N (bâtiment le plus proche du massif). La longueur du front de flamme est définie à partir de l'environnement urbain.

La figure suivante illustre le format des résultats du logiciel développé par le LEMTA. Elle donne les résultats fournis par le logiciel pour le scénario 2. Ce scénario est celui le plus contraignant parmi les scénarios 1 à 6. En effet, il met en jeu la hauteur du front de flammes la plus grande à la distance la plus proche. L'échelle varie de 0 kW/m² (bleu) à 0,8 kW/m² (rouge).

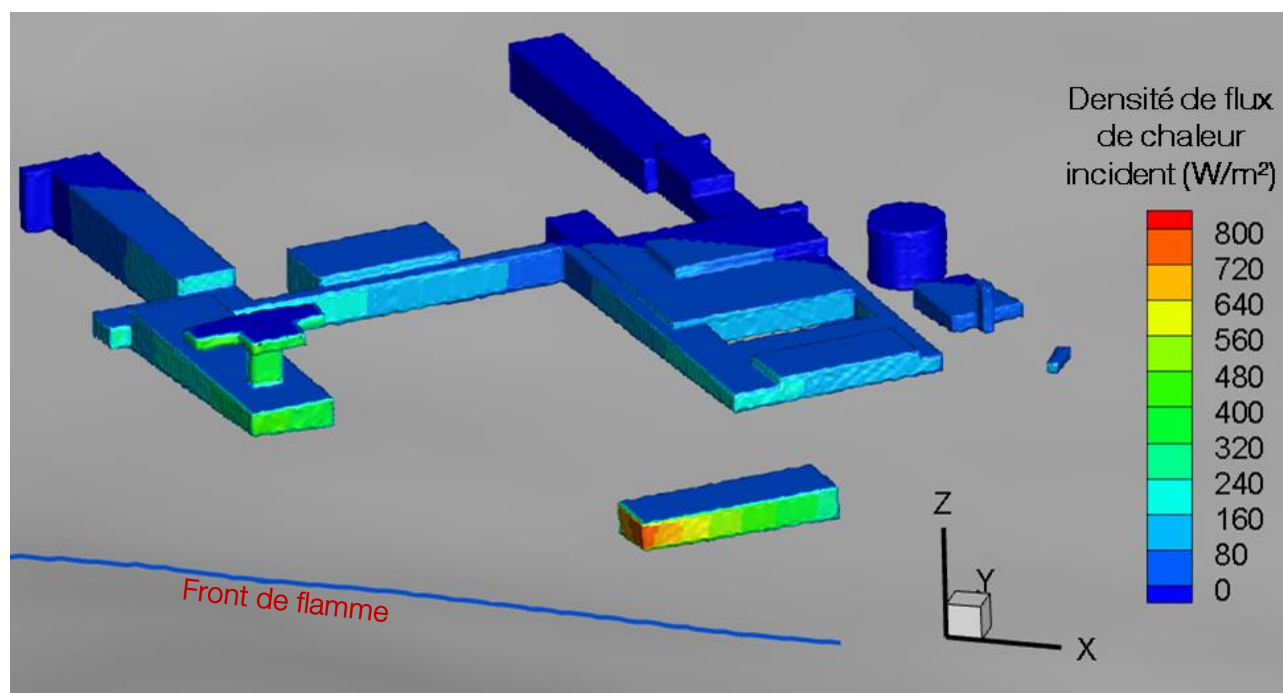


Figure 11 : Scénario 2 – Champ de densité de flux de chaleur incident aux façades

Les résultats montrent que la densité de flux de chaleur incident est plus élevée pour les façades à proximité de la limite de propriété. Il est maximal sur la façade SUD-EST du bâtiment N. À une distance de 50 m correspondant à la profondeur minimale sur laquelle les opérations de débroussaillage sont rendues obligatoires par l'article L134-6 du Code Forestier (distance reprise dans le PPRIF), le flux de chaleur incident reste inférieur à 0,8 kW/m². Il est donc bien inférieur à la valeur seuil de 5 kW/m² correspondant au risque de bris de vitrage. *A fortiori*, pour les autres végétations et les autres distances, le flux de chaleur incident est encore plus faible et donc ne dépasse pas la valeur seuil la plus basse de bris de vitrage.

6.2. - FRONT DE FLAMME AU SEIN DE LA PROPRIETE

Au sein de la propriété, pour rappel, le front de flamme est placé en limite de propriété et sur une barrière naturelle :

- Le long du canal de Marseille en limite de propriété, au plus près à 36 m d'un bâtiment (bâtiment N),
- Le long de la route dans la propriété (à 8 m au plus près d'un bâtiment).

Pour ces deux positions, le front de flamme s'étire entre les deux voies de circulation, Traverse Prat et Traverse Parangon.

6.2.1. - LE LONG DU CANAL DE MARSEILLE

La figure suivante donne les résultats fournis par le logiciel pour le scénario 8. Ce scénario est plus contraignant que le scénario 7. En effet, il met en jeu une plus grande hauteur de front de flammes à la même position (même distance d'éloignement). L'échelle varie de 0 kW/m² (bleu) à 1,4 kW/m² (rouge).

Les résultats montrent que la densité de flux de chaleur incident est maximale sur les deux façades SUD et SUD-EST du bâtiment N et elle reste inférieure à $1,3 \text{ kW/m}^2$. Pour les autres bâtiments, elle est inférieure à $0,55 \text{ kW/m}^2$. Le flux est donc bien inférieur à la valeur seuil de 5 kW/m^2 correspondant au risque de bris de vitrage. *A fortiori*, pour les autres végétations, le flux de chaleur incident est encore plus faible et donc ne dépasse pas la valeur seuil la plus basse de bris de vitrage.

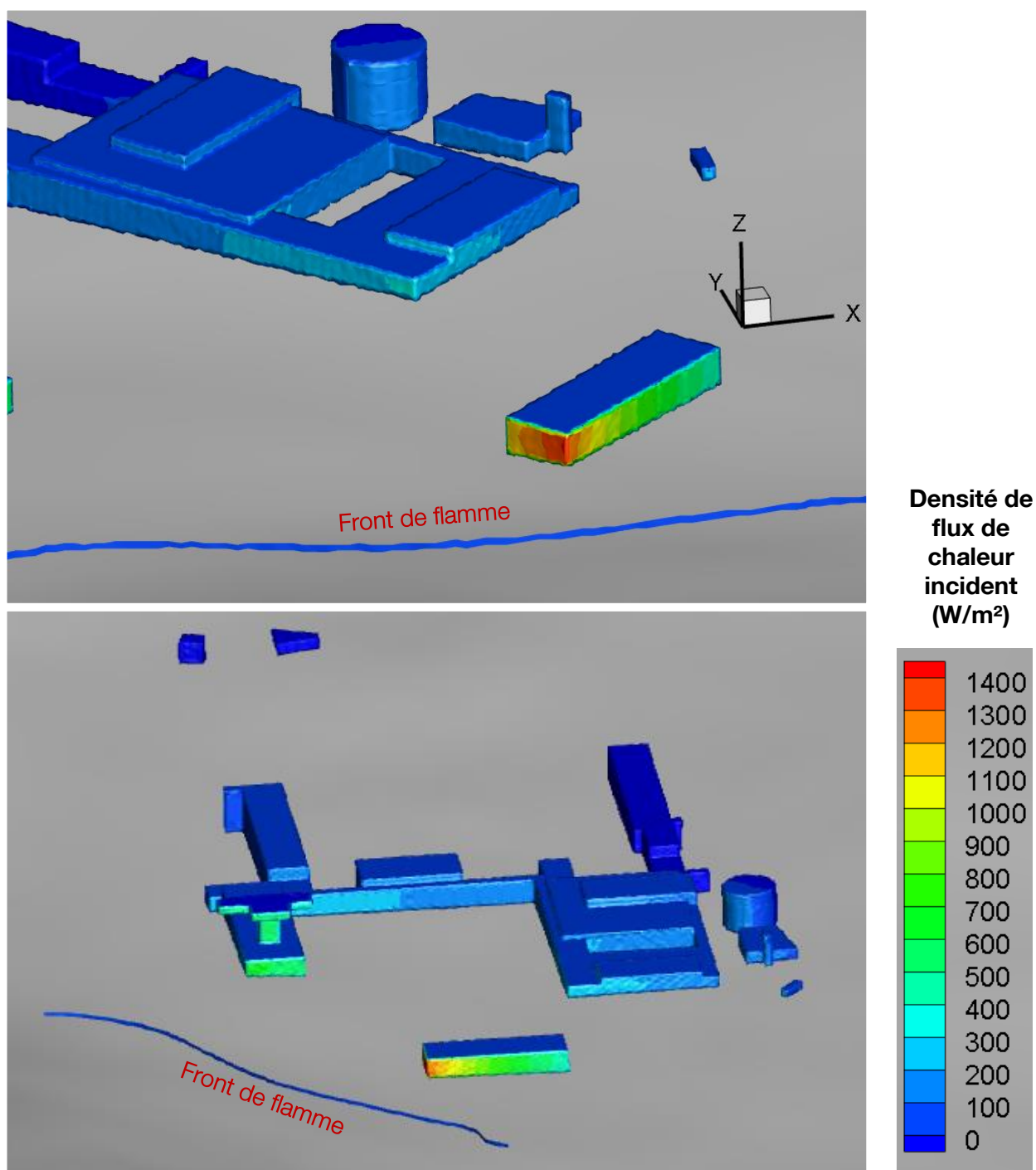


Figure 12 : Scénario 8 – Champ de densité de flux de chaleur incident aux façades

En Annexe 2 - , figure une étude de sensibilité des résultats du scénario 2 (éloignement 50 m, pin d'Alep dense) à la caractérisation du front de flamme.

6.2.2. - LE LONG DE LA ROUTE DANS LA PROPRIETE

La Figure 13 donne les résultats fournis par le logiciel pour le scénario 10 pour une végétation de Pin d'Alep dense, la Figure 15 pour le scénario 9 pour une végétation de Pin d'Alep clair.

Les résultats montrent que la densité de flux de chaleur incident est maximale sur les bâtiments A, D et N les plus proches du front de flamme. Sur ces façades les plus exposées (une façade située à l'OUEST sur le bâtiment A, une façade située à l'OUEST sur le bâtiment D et la façade SUD du bâtiment N),

- Pour la végétation de Pin d'Alep dense, le flux de chaleur excède localement 5 kW/m^2 sans excéder $8,5 \text{ kW/m}^2$. Ce flux est donc susceptible d'occasionner un bris de vitrage mais n'est pas suffisant pour conduire à la dégradation du bois en façade notamment.
- Pour la végétation de Pin d'Alep clair, le flux de chaleur reste inférieur à 2 kW/m^2 sur ces façades. Ce flux est donc insuffisant pour engendrer un risque de percement des éléments en façade et conduire à la propagation du feu à l'intérieur des bâtiments.

Sur les autres façades, la densité de flux de chaleur incident reste faible du fait de l'éloignement du front de flamme. Elle reste inférieure à 5 kW/m^2 quelle que soit la végétation (cf. Figure 13).

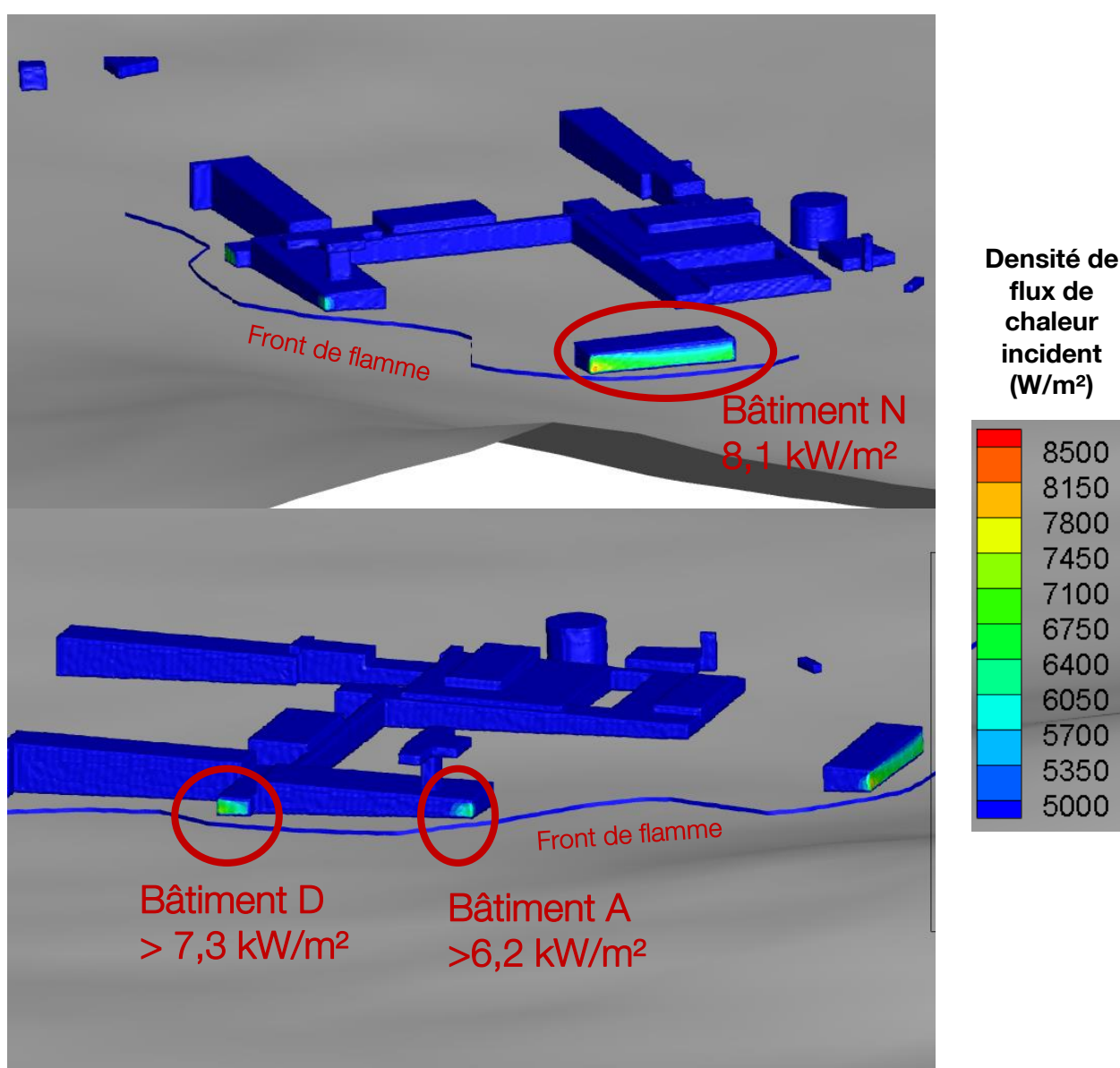
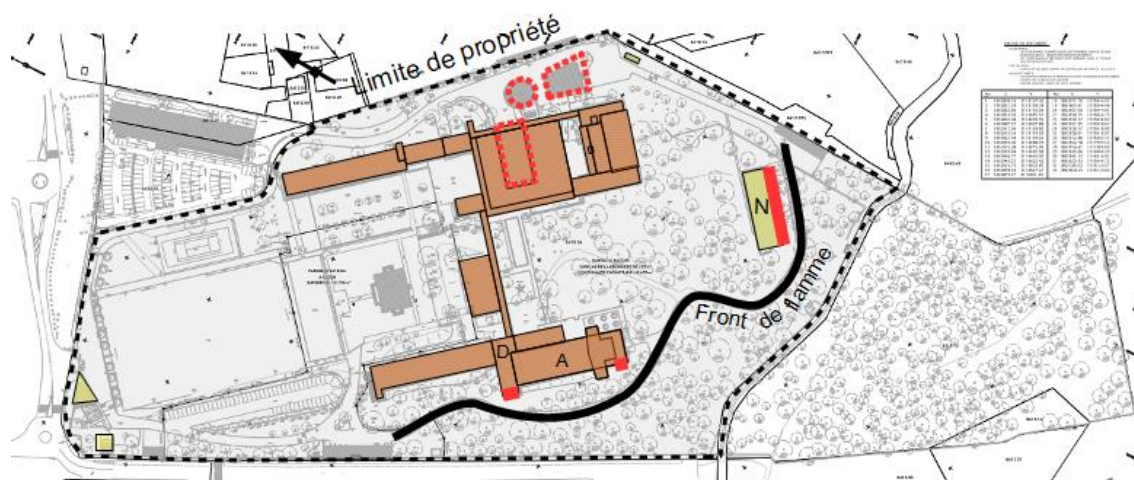


Figure 13 : Scénario 10 – Champ de densité de flux de chaleur incident aux façades



Légende :

- ICPE sensibles
- ERP sensibles au sens du PPRIF
- Bâtiments non sensibles
- Façades présentant un risque de percement (bris du vitrage)

Figure 14 : Scénario 10 – Façades où le flux de chaleur incident dépasse 5 kW/m²

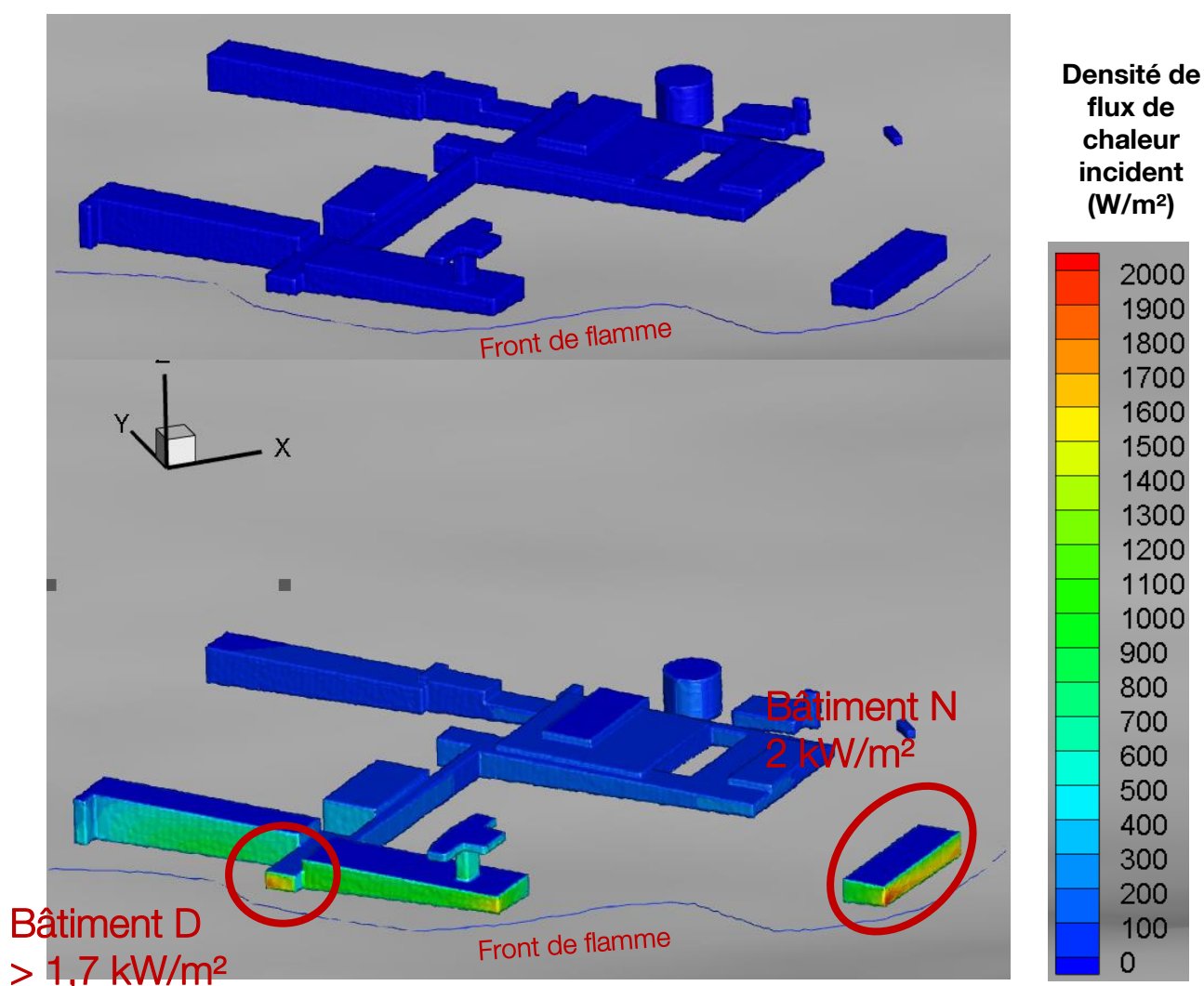


Figure 15 : Scénario 9 – Champ de densité de flux de chaleur incident aux façades

7. - SYNTHESES DES RESULTATS ET REPONSE AUX QUESTIONS DE L'ETUDE

La présente étude concerne l'École Nationale Supérieure Maritime de Marseille (ENSM). Elle consiste à établir la vulnérabilité des bâtiments existants de l'ENSM vis-à-vis du risque incendie de forêt. Il s'agit, par cette étude, d'évaluer les actions thermiques sur les façades des bâtiments et à apporter une réponse à la question suivante :

Le rayonnement thermique d'un feu de forêt est-il susceptible d'étendre le feu à l'intérieur des bâtiments de l'école par la ruine d'éléments en façades des bâtiments, notamment des baies vitrées ?

L'étude établit par le calcul, les ordres de grandeur du flux radiatif incident sur les façades des bâtiments en situation de feu de végétations. Les données relatives à la végétation, au vent, à son orientation sont fournies par le Plan de Prévention des Risques d'Incendie de Forêt (PPRIF) sur la commune de Marseille.

Le risque d'extension du feu par le transport de particules solides enflammées (brandons) n'a pas été pris en compte. Il convient de souligner que ce risque est moins important pour les façades fermées des bâtiments.

Les résultats de l'étude montrent que la plus grande majorité des façades des bâtiments de l'école ne sont pas soumises à une densité de flux radiatif supérieure à la valeur seuil de 5 kW/m² retenue pour caractériser le bris d'un vitrage.

Sc.	Type de combustible	Vent	Position du front de flamme	Résultats
1	Pin d'Alep clair	Pas de vent	À 50 m du bâtiment N	Les critères de percements des façades ne sont jamais atteints
2	Pin d'Alep dense			
3	Pin d'Alep clair		À 75 m du bâtiment N	
4	Pin d'Alep dense			
5	Pin d'Alep clair		À 100 m du bâtiment N	
6	Pin d'Alep dense			
7	Pin d'Alep clair		Le long du canal de Marseille	
8	Pin d'Alep dense		à 36 m au plus près du bâtiment N	
9	Pin d'Alep clair		Le long de la route au sein de la propriété	<p>Le critère de bris de vitrage est atteint localement pour trois façades : une façade située à l'OUEST sur le bâtiment A, une façade située à l'OUEST sur le bâtiment D et la façade SUD du bâtiment N</p> <p>Sur les autres façades, les critères de percements des façades ne sont jamais atteints</p>
10	Pin d'Alep dense			

Plus précisément, l'étude a montré que pour des feux de végétation restant au-delà du canal de Marseille (limite de propriété située au plus près à 36 m d'un bâtiment (bâtiment N)), la densité de flux de chaleur incident aux façades n'est pas suffisante pour occasionner un percement des éléments en façade et notamment le bris d'un vitrage. Seul le front de flamme longeant la route à l'intérieur de la propriété et pour une végétation de Pin d'Alep dense a conduit à dépasser cette valeur seuil de 5 kW/m² localement sur 3 façades de bâtiments.

Les résultats de l'étude montrent donc que le risque d'extension du feu de forêt à l'intérieur des bâtiments de l'école est faible. Compte-tenu de ce risque faible, il apparaît pertinent de s'assurer de la non pénétration du feu à l'intérieur des bâtiments de l'école en respectant les seules opérations de débroussaillage sur une distance de 50 m depuis les bâtiments et donc au-delà de la limite de propriété.

Annexes |

Mécanisme et facteurs de propagation

La propagation d'un feu se décompose en quatre étapes : combustion du matériel végétal avec émission de chaleur, transfert de la chaleur émise vers le combustible en avant du front de flammes, absorption de la chaleur par le végétal en avant du front de flammes, inflammation. Le transport de la chaleur émise par la combustion est assuré par trois processus :

- **La conduction**, correspondant à la transmission de proche en proche de l'énergie à l'intérieur du matériau. Elle ne contribue que très faiblement au transfert de chaleur ;
- **Le rayonnement thermique**, mode de propagation de l'énergie sous forme d'ondes infrarouges : c'est le mode principal de propagation des incendies de forêts ;
- **La convection**, liée aux mouvements d'air chaud, dont l'importance augmente avec le vent et la pente ; ces mouvements peuvent, en outre, contribuer au transport de particules incandescentes en avant du front de flammes ; ce processus est à l'origine du déclenchement de foyers secondaires.

Les feux sont habituellement classés en trois catégories en fonction des conditions climatiques (force du vent) et des caractéristiques de la végétation :

- Les **feux de sol**, qui consomment la matière organique constituant la litière et l'humus. Relativement rares sous nos climats, leur vitesse de propagation est faible ;
- Les **feux de surface** qui brûlent les strates basses de la végétation (partie supérieure de la litière, tapis herbacé, ligneux bas). Ils se propagent en général par rayonnement et affectent la garrigue, les landes et le maquis ;
- Les **feux de cimes**, indépendants ou dépendants des feux de surface, qui libèrent en général de grandes quantités d'énergie et ont une vitesse de propagation très élevée. Ce sont les ligneux hauts qui assurent la propagation "verticale" en direction des cimes.

Ces différents types de feu peuvent se combiner ou se produire simultanément.

Les **facteurs naturels** de propagation de ces feux sont :

- La **structure et la composition de la végétation** : la végétation est caractérisée par sa combustibilité en libérant des quantités de chaleur plus ou moins importantes. La **combustibilité** est corrélée à la quantité de biomasse combustible et à sa composition. Elle permet d'évaluer la part du risque liée à la puissance atteinte par le feu. Elle peut être calculée approximativement en multipliant la biomasse végétale combustible par son pouvoir calorifique.

La structure de la forêt est le résultat de sa dynamique naturelle et de l'action de l'homme. Elle peut être décrite à partir des taux de recouvrement des différentes strates de hauteur. Il est important de noter les **continuités**, ou les discontinuités, entre les strates **verticales** qui conditionnent le type de feu et par conséquent sa vitesse, sa puissance et son intensité.

Il est tout aussi important de prendre en compte les coupures dans la **continuité horizontale** de la végétation qui peuvent ralentir le feu et permettre aux moyens de lutte de se positionner pour préparer une attaque du front de feu.

- Le **vent** : le vent joue un rôle majeur dans la propagation du feu. Il agit à plusieurs niveaux, en renouvelant l'oxygène de l'air, en réduisant l'angle entre les flammes et le sol et en favorisant le transport de particules incandescentes en avant du front de flammes.

La vitesse de propagation d'un incendie est étroitement corrélée à la vitesse du vent et conditionne donc l'ampleur de celui-ci.

La direction du vent joue également un rôle important car elle conditionne la forme finale du feu par rapport au point d'éclosion.

- Le **relief** : la pente modifie l'inclinaison relative des flammes par rapport au sol et favorise, lors d'une propagation ascendante, l'efficacité des transferts thermiques par rayonnement et convection. Les feux ascendants brûlent donc plus rapidement sur les pentes fortes. En revanche, un feu descendant voit sa vitesse considérablement ralentie.

Les **facteurs anthropiques** de propagation de ces feux peuvent être de deux natures :

■ Soit, ils **aggravent** la propagation des feux :

L'évolution de l'**occupation du sol** influe notablement sur le risque d'incendie de forêt en raison du développement de l'**interface forêt/habitat** et de l'**absence des zones tampons** que constituaient les espaces cultivés.

Cette évolution résulte de l'extension des villes et villages jusqu'aux abords des zones boisées, et ce d'autant plus que les **surfaces forestières augmentent** (de 30 000 ha en moyenne chaque année au niveau national). L'**accroissement de la population** entraîne également une consommation d'espace. Cette croissance urbaine se fait sous forme de **mitage** (elle résulte de la multiplication des maisons d'habitation, relativement espacées), généralement dans les espaces forestiers.

L'évolution de l'occupation du sol résulte également de l'**abandon des espaces ruraux** qui a pour conséquence la constitution de massifs continus sans coupure pour les incendies. En effet, depuis 1950, la déprise agricole a eu pour conséquence la colonisation des anciennes terres agricoles par des formations végétales très sensibles au feu. Il s'agit notamment de friches, de landes, de garrigues et de maquis. Le cloisonnement des espaces arborés s'est ainsi réduit. L'abandon des terres agricoles a entraîné la jonction des unités boisées autrefois discontinues. En cas de sinistre, le feu ne peut plus venir buter sur les marges forestières.

D'autre part, la forêt subit une **forte demande sociale**. Les activités de loisirs se diversifient et leur pratique est soutenue, ce qui accroît le risque d'incendies.

Enfin, les **prélèvements** de biomasse en forêt sont **très faibles** et les surfaces forestières de moins en moins entretenues, par manque de rentabilité de l'exploitation du pin d'Alep. La masse végétale s'accroît donc sur pied, ce qui augmente l'intensité du feu.

■ Soit, ils **réduisent** la propagation des feux :

Contrairement aux autres risques naturels tels que les inondations ou les avalanches, l'homme a la possibilité d'intervenir **directement** sur l'évolution du phénomène. Il peut agir tout au long de son déroulement, soit en le stoppant, soit en réduisant localement ses effets, par exemple, en évitant qu'il ne vienne menacer des habitations placées dans son champ de propagation.

L'homme a aussi la possibilité d'intervenir **indirectement** sur le phénomène par des actions de prévention qui se déclinent sous différentes formes. Le **débroussaillage**, par exemple, a un effet positif en diminuant la combustibilité.

Annexe 2 - SENSIBILITE DES RESULTATS DU SCENARIO 2

La présente étude de sensibilité a pour ambition d'appréhender une éventuelle révision du PPRIF modifiant la caractérisation du risque incendie de forêt autour de l'école.

La direction de propagation, la hauteur de flamme, l'inclinaison de flamme et l'émittance du front de flamme définissent les dimensions et la géométrie du front de flamme. Pour définir ces grandeurs, les données relatives au type de végétation, à la vitesse des vents et leurs directions sont extraites pour la zone d'étude du PPRIF [3].

Les données figurant dans le PPRIF conduisent à une hauteur de flamme qui apparaît petite, quelle que soit la végétation. Pour cette caractérisation du front de flamme, les résultats montrent que la vulnérabilité des bâtiments de l'école est très faible.

Type de combustible	Intensité pour un terrain plat et un vent de 8 m/s	Emittance de flamme	Hauteur de flamme
Pin d'Alep clair	2720 kW/m	117,5 kW/m ²	0,3 m
Pin d'Alep dense	9065 kW/m		1,2 m

Pour évaluer la sensibilité de ces résultats aux caractéristiques du front de flamme, la densité de flux de chaleur incidente aux façades des bâtiments de l'école est calculée pour plusieurs fronts de flamme listés dans le tableau suivant. Ces fronts de flamme sont placés à 50 m du bâtiment N (cf. Figure 10), la profondeur minimale sur laquelle les opérations de débroussaillage sont rendues obligatoires par l'article L134-6 du Code Forestier (distance reprise dans le PPRIF).

Dans un premier temps, les fronts de flammes conservent l'intensité du front de flamme pour une végétation de type Pin d'Alep dense (scénarios 2#2 et 2#3). La hauteur de flamme est ainsi d'autant plus grande que l'émittance de la flamme est faible. Les résultats figurent dans la dernière colonne du tableau. Ces résultats se limitent à la densité maximale mesurée sur la façade SUD du bâtiment N, la façade la plus exposée pour cette position du front de flamme (cf. chapitre 7. -). Pour ces deux scénarios 2#2 et 2#3, il apparaît que le flux de chaleur incident est quasiment constant à la valeur mesurée pour le scénario 2. Autrement formulé, à intensité de référence constante, la vulnérabilité des bâtiments est inchangée.

Sc.	Intensité de référence pour un terrain plat	Emittance de flamme	Hauteur de flamme	Résultat d'éclairement maximal incident
2	9 065 kW/m (*) / 9 007 kW/m (**)	117,5 kW/m ²	1,2 m	0,803 << 5 kW/m ²
Influence de l'émittance (et de la hauteur de flammes) sur les résultats à puissance radiative constante				
2#2	9 065 kW/m (*) / 9 007 kW/m (**)	23,5 kW/m ²	5,17 m	0,805 kW/m ²
2#3		12,0 kW/m ²	10,00 m	0,778 kW/m ²
Effet de la hauteur des flammes à émittance constante (110 kW/m²)				
2#4	8 258 kW/m (**)	110 kW/m ²	1 m	0,737 << 5 kW/m ²
2#5	16 516 kW/m (**)		2 m	1,470 kW/m ²
2#6	24 775 kW/m (**)		3 m	2,201 kW/m ²
2#7	33 033 kW/m (**)		4 m	2,926 kW/m ²
2#8	41 291 kW/m (**)		5 m	3,646 kW/m ²
2#9	49 550 kW/m (**)		6 m	4,360 kW/m ²
2#10	57 808 kW/m (**)		7 m	5,067 kW/m ² > 5 kW/m ²

(*) Valeur d'intensité de référence pour un vent de 8 m/s

(**) Valeur d'intensité de référence pour un vent nul de 0 m/s

Dans un second temps, les fronts de flammes ne conservent plus l'intensité de référence pour une végétation de type Pin d'Alep dense (scénarios 2#4 à 2#10). Ils sont établis arbitrairement pour des hauteurs de flamme comprises entre 1 et 10 m et pour une émittance de 110 kW/m². La hauteur de flamme de 10 m conduit à multiplier par 6,4 l'intensité de référence d'une végétation Pin d'Alep dense. Ces résultats montrent que le critère pour le bris de vitrage est atteint (> 5kW/m²) à partir du moment où la hauteur des flammes dépasse 7 m, soit environ sept fois les préconisations du PPRIF.