Espace Technologique
Bâtiment Apollo
Route de l'Orme des Merisiers
F-91193 Saint-Aubin
Tél : 33 (0)1 60 13 83 80

RAPPORT D'ÉTUDE

Référence : 15-001004-FCA/OZB
Affaire : RO-15-000312

ANALYSE DU COMPORTEMENT AU FEU DE LA STRUCTURE D'UN ENTREPÔT TYPE 1510 SELON L'ARRETE ENREGISTREMENT DU 15 AVRIL 2010

BÂTIMENT TONNERRE (60)

Client demandeur	LA BROSSE ET DUPONT
Référence et date de commande	Bon pour accord sur offre réf 15-000154-OZB reçu le 20/02/15
Projet	Bâtiment TONNERRE (60)

Date : 09 Juillet 2015
Indice de révision : A
Nombre de pages : 31

Auteurs :
Othmane ZOUHAIRI BERNOUSSI
François CAYLA

SUIVI DES MODIFICATIONS

Indice de révision	Date	Modifications
A	09/07/15	Version initiale

La reproduction de ce document n'est autorisée que sous sa forme intégrale

SOMMAIRE

1. INTRODUCTION 4
2. DOCUMENTS DE REFERENCE 4
2.1 Documents remis par le client 4
2.2 Documents réglementaires 4
2.3 Logiciels 4
2.4 Autres 5
3. PRESENTATION DE LA STRUCTURE ETUDIEE 5
4. METHODOLOGIE 6
4.1 Vérification des exigences sous feu normalisé 6
4.2 Vérification des exigences sur le mode de ruine de la structure 7
4.2.1 Scénarios de feu étudiés 7
4.2.2 Étude du mode de ruine de la structure 7
4.3 Hypothèses générales 8
4.3.1 Calculs de transfert thermique 8
4.3.2 Conditions d'appui des modèles 8
4.3.3 Matériaux 8
4.3.4 Charges mécaniques 8
4.3.5 Combinaison de charges 8
5. CALCULS DE DEVELOPPEMENT DE FEU 9
5.1 Méthodologie pour les calculs de développement de feu 9
5.1.1 Feu localisé 9
5.1.2 Feu généralisé 9
5.2 Résultats – températures des gaz 11
6. ÉTUDE DU COMPORTEMENT AU FEU DE LA STRUCTURE METALLIQUE 12
6.1 Vérification des exigences sous feu normalisé R15 12
6.1.1 Étude du degré de stabilité au feu de la structure 12
6.1.2 Étude du degré de stabilité au feu R15 des pannes 14
6.2 Vérification des exigences sur le mode de ruine 14
6.2.1 Calculs d'échauffement 15
6.2.2 Comportement mécanique du portique – Combinaison avec charge de neige 17
6.2.2.1 Scénario 1 17
6.2.2.2 Scénario 2 19
6.2.3 Comportement mécanique du portique – Combinaison avec charge de vent 20
6.2.3.1 Scénario 1 20
6.2.3.2 Scénario 2 23
7. ÉTUDE DE PRECONISATIONS PAR RAPPORT A LA RUINE VERS L'EXTÉRIEUR DE LA STRUCTURE 25
8. CONCLUSIONS 27
ANNEXE A COURBES DE TEMPERATURE DES GAZ 28

1. INTRODUCTION

Dans le cadre de la mise en conformité du bâtiment Tonnerre situé sur la commune HERMES, la société La Brosse et Dupont a consulté EFECTIS France afin de réaliser une étude du comportement au feu d'un entrepôt de stockage classé sous la rubrique 1510 de la nomenclature ICPE.

Cet entrepôt relève du régime de l'enregistrement, à ce titre il doit respecter les exigences de l'arrêté du 15 avril 2010 (rubrique 1510).

Conformément à l'article 2.2.6 de l'arrêté du 15 avril 2010 [4], il s'agit de vérifier les exigences suivantes :

- Exigences prescriptives sous feu normalisé : stabilité R 15 de la structure porteuse du bâtiment,
- Exigences portant sur le mode de ruine de la structure : non ruine de la structure vers l'extérieur, non ruine en chaîne de la structure.

Le présent rapport concerne l'étude du bâtiment de stockage Tonnerre de l'entrepôt situé à HERMES (60).

2. DOCUMENTS DE REFERENCE

2.1 DOCUMENTS REMIS PAR LE CLIENT

[1] Plans :
   a. Hermes plan bâtiment Tonnerre.pdf
   b. 002 façades coupes 04.pdf
   c. Bât tonnerre 1 C.pdf
   d. Bât tonnerre 1 E.pdf
   e. Bât tonnerre 1 et 2 E.pdf
   f. Bât tonnerre 2 D.pdf

2.2 DOCUMENTS REGLEMENTAIRES

[2] Eurocode 0 – Eurocodes structuraux – Base des calculs de structure de Mars 2003

[3] Eurocode 3 Partie 1-2 : « Calcul des structures en acier - Partie 1-2 : Règles générales - Calcul du comportement au feu », NF EN 1993-1-2 et Annexe Nationale

[4] Arrêté du 15 Avril 2010 relatif aux prescriptions générales applicables aux entrepôts couverts relevant du régime de l'enregistrement au titre de la rubrique n°1510

[5] Fire Safety Engineering, Requirements Governing Algebraic Formulas: Fire Plumes. ISO TC 92/SC 4. July 2004

[6] Fire Safety Engineering, Requirements Governing Algebraic Formulas: Ceiling Jet Flows. ISO TC 92/SC & 4/WG9 N19 Rev6. July 2004

2.3 LOGICIELS

[7] LENAS – Logiciel de simulation du comportement mécanique des structures métalliques soumises à un incendie – Article de la Revue de la Construction Métallique n°3 (1999) et Rapport de validation et de justification n°INC-98/171-GF/IM

[8] NIST Special Publication 1018-5. Fire Dynamics Simulator (Version 5). Technical Reference Guide. Volume 1: Mathematical Model. Kevin McGrattan, Simo Hostikka, Jason Floyd, Howard Baum, Ronald Rehm, William Mell, Randall McDermott, In cooperation with VTT Technical Research Centre of Finland.

[9] NIST Special Publication 1019-5. Fire Dynamics Simulator (Version 5). User's Guide. Kevin McGrattan, Simo Hostikka, Jason Floyd, In cooperation with VTT Technical Research Centre of Finland.

[10] User's Guide for Smokeview (Version 4). A Tool for Visualizing Fire Dynamics Simulation Data. Glenn P. Forney, Kevin B. McGrattan.

2.4 AUTRES

[11] Document CTICM réf : SRI-09/17C – CR/MSS/PB – ossatures en acier – méthode de justification d'une stabilité au feu de ¼ d'heure (R15)

[12] Le plan de prévention des risques technologiques (PPRT) – Complément technique, Effet thermique - Juillet 2008

[13] Rapport d'expertise sur site EFR-14-B3511.pdf

3. PRESENTATION DE LA STRUCTURE ETUDIEE

La Figure 3-1 montre la configuration de l'entrepôt. Le bâtiment Tonnerre est actuellement constitué d'une seule cellule, il sera par la suite divisé en deux cellules par un mur séparatif coupe-feu 2h.

La surface totale du bâtiment est de 14 000 m². Le bâtiment fait 130 m de long par 100 m de large. Le mur coupe-feu 2h qui sera mis en place est parallèle au sens porteur des portiques. L'étude est réalisée en prenant en compte le mur coupe-feu séparant le bâtiment en deux cellules.

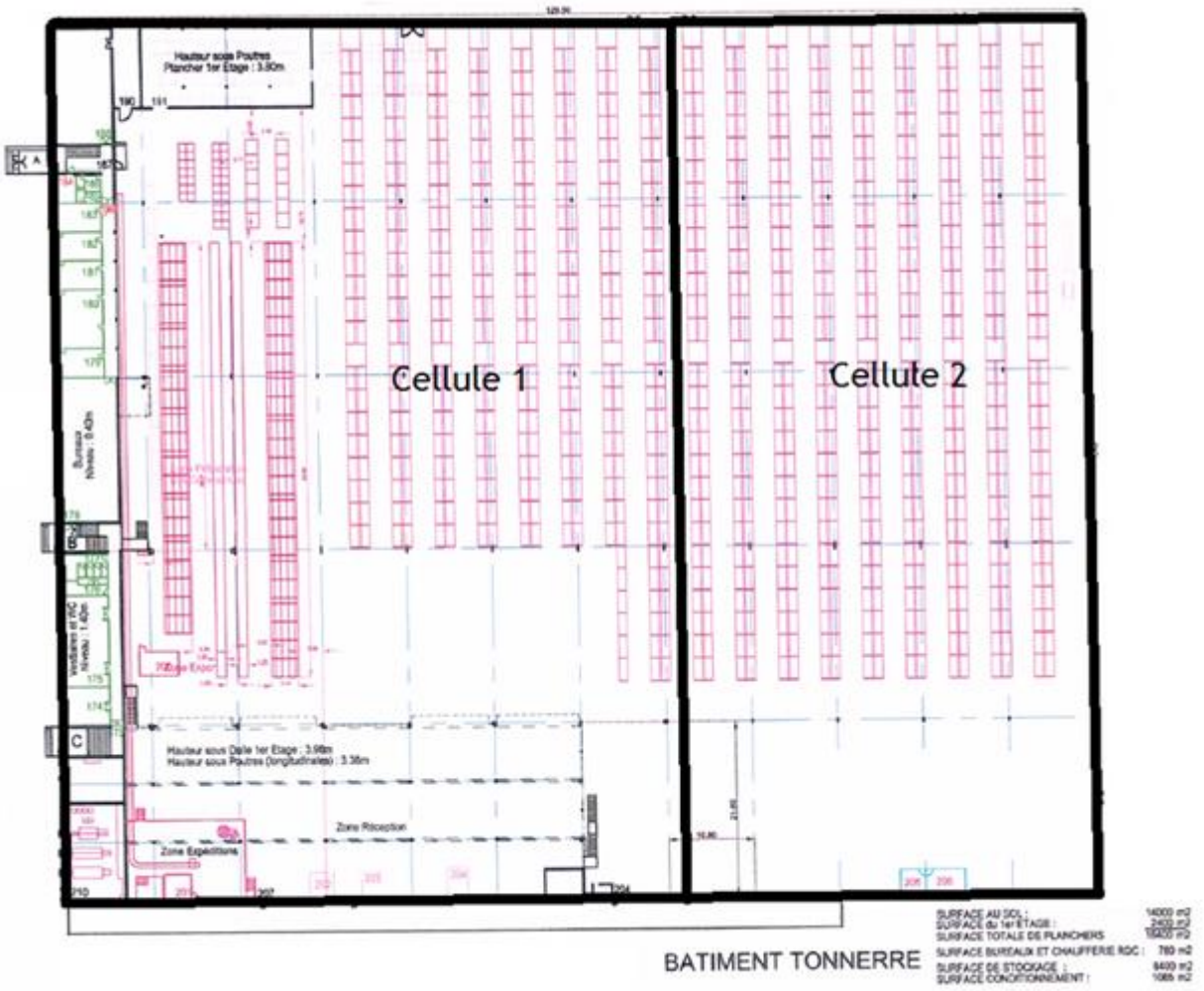


Figure 3-1 : Repérage des cellules 1 et 2 du bâtiment Tonnerre

La Figure 3-2 montre une coupe du portique étudié de la cellule 1 de stockage :

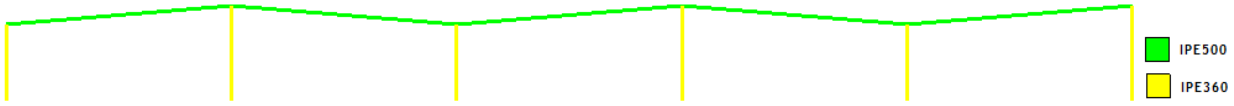


Figure 3-2 : Description d'un portique de la cellule de stockage

Les relevés réalisés sur site ont montré que les poteaux sont des profilés de type IPE360 et les poutres de type IPE500.

4. METHODOLOGIE

La méthodologie de l'étude permettant de vérifier les exigences prescriptives concernant la stabilité au feu sous incendie conventionnel R15 de la cellule de stockage est décrite dans le §4.1.

Les exigences portant sur le mode de ruine de la structure seront vérifiées par une étude sous feu réel, dont la méthodologie est décrite au §4.2.2.

4.1 VERIFICATION DES EXIGENCES SOUS FEU NORMALISE

Il s'agit dans cette partie de vérifier les exigences prescriptives concernant la stabilité au feu sous incendie conventionnel R15 de la cellule de stockage. Le logiciel LENAS [7] permettra d'analyser le comportement au feu de la structure par l'intermédiaire de calculs aux éléments finis. L'intérêt de cette approche réside dans la prise en compte de la configuration réelle des éléments, notamment en termes de chargement mécanique et de dimensions (section, portée). Le modèle de résolution du logiciel inclut les non-linéarités géométriques (grands déplacements, effet du second ordre) et détecte également les phénomènes d'instabilité.

L'action thermique utilisée est le feu normalisé (feu conventionnel – norme ISO 834) qui est la courbe de référence en matière de résistance au feu. Elle est notamment utilisée dans les laboratoires d'essais en résistance au feu pour évaluer les performances au feu des produits et éléments de construction.

Cette courbe obéit à l'équation analytique suivante :

$T = T_0 + 345 \, Log_{10} (8t+1)$

Où t : temps (min)

T : température à l'instant t (°C)

T_0 : température ambiante initiale (°C)

Elle est illustrée par la Figure 4-1 :

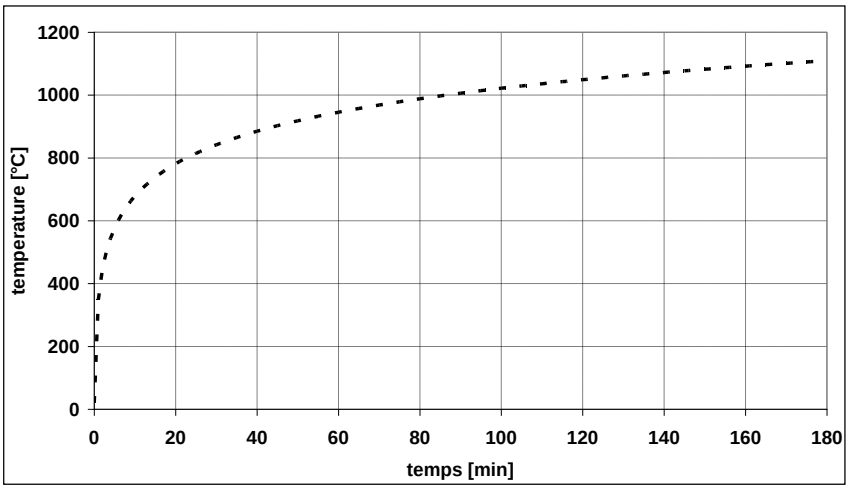


Figure 4-1 : Courbe de l'incendie conventionnel (selon norme ISO 834)

Il s'agit ici d'effectuer un calcul mécanique, appliqué à un modèle numérique filaire 2D qui intègre l'ensemble des contraintes d'appuis, de chargement sous incendie et d'échauffement des sections au cours du temps. Le code de résolution numérique du logiciel LENAS [7] intègre les lois de comportement mécanique de l'acier définies dans l'Eurocode 3 partie 1-2 [3].

4.2 VERIFICATION DES EXIGENCES SUR LE MODE DE RUINE DE LA STRUCTURE

Il s'agit de vérifier les exigences portant sur le mode de ruine de la structure :

- Exigence 1 : Non ruine de la structure vers l'extérieur ;
- Exigence 2 : Non ruine en chaîne de la structure ;

Pour cela, une approche d'ingénierie incendie sera considérée. Ainsi, dans un premier temps, des scénarios de feu seront définis. Sur la base de ces scénarios d'incendie, le mode de ruine de la structure sera étudié.

4.2.1 SCENARIOS DE FEU ETUDIES

Lorsque l'on prend en compte la cinétique d'incendie, le débit calorifique d'un feu se définit en fonction du temps à l'aide d'un paramètre α, le coefficient de cinétique, tel que $Q=(t/\alpha)^2$ avec t le temps en seconde et α en $s/MW^{0,5}$.
On a ainsi plusieurs valeurs caractéristiques normalisées du coefficient de cinétique pour les cas de développements de feu à cinétique lente ($\alpha=600\ s/MW^{0,5}$), moyenne ($\alpha=300\ s/MW^{0,5}$), rapide ($\alpha=150\ s/MW^{0,5}$) et très rapide ($\alpha=75\ s/MW^{0,5}$).
Un état stationnaire du débit calorifique est pris en compte retranscrivant le contrôle de l'incendie par l'apport en oxygène.

Dans le cadre de cette étude, on considère que le feu s'initie au niveau du sol et se propage au reste de l'entrepôt. La source d'ignition peut se trouver en tout point de l'entrepôt.

Compte tenu du mode de stockage en racks et des produits présents pouvant être aussi bien de type plastique que cellulosique, une cinétique de feu de type rapide est utilisée pour le feu localisé. La généralisation de l'incendie se fait suivant une cinétique très-rapide (« flash-over »).

C'est la cellule 2 qui est modélisée du fait de sa plus petite volumétrie créant ainsi des conditions de confinement plus importantes et donc des contraintes thermiques plus pénalisantes. On considérera que la porte de quais ainsi que les portes menant vers l'extérieur de la cellule sont ouvertes. Des ouvertures supplémentaires seront rajoutées pour représenter les apports d'air neuf dans l'entrepôt et permettre au feu de se développer pleinement :

- les exutoires sont considérés ouverts à partir de 15 minutes de feu ou bien lorsque la température moyenne située en-dessous atteint 300°C (température de fusion enveloppe pour les polymères) ;
- le bardage après 30 minutes afin de favoriser la combustion et donc d'avoir un niveau de température sécuritaire.

Pour le calcul des contraintes thermiques, on considèrera une position du foyer située dans l'angle opposé à la porte sectionnelle.

4.2.2 ÉTUDE DU MODE DE RUINE DE LA STRUCTURE

L'étude du mode de ruine de la structure fait appel aux méthodes de calculs avancés de l'Eurocode 3 Partie 1-2 + AN [3].Le mode de ruine sera étudié à l'aide du code « Large Elasto-plastic Numerical Analysis of Structures-Member in Transient State » (LENAS) [7]. Ce code, basé sur la méthode des éléments finis des structures à barres, intègre les lois de comportement au feu définies dans l'Eurocode 3 partie 1-2 + AN [3]. Le modèle de résolution du logiciel inclut les non-linéarités géométriques (grands déplacements, effet du second ordre) et détecte également les phénomènes d'instabilité.

4.3 HYPOTHESES GENERALES

4.3.1 CALCULS DE TRANSFERT THERMIQUE

Les hypothèses prises en compte pour le calcul de transfert thermique des éléments de la structure métallique étudiée sont :

- La température est supposée uniforme dans la section (conductivité thermique élevée de l'acier) ;
- Les poutres et les poteaux sont exposés sur leurs 4 faces ;
- Les propriétés thermiques de l'acier sont conformes à l'Eurocode 3 partie 1-2 [3] ;
- L'échauffement sous feu conventionnel de la structure métallique est obtenu par application des modèles de calculs simplifiés proposés dans l'Eurocode 3 partie 1-2 [3] ;
- L'échauffement sous feu réel de la structure métallique est obtenu par application des modèles de calculs avancés proposés dans l'Eurocode 3 partie 1-2 [3] ;
- Les coefficients d'échanges sont conformes à l'Eurocode 3 partie 1-2 [3].

4.3.2 CONDITIONS D'APPUI DES MODELES

En l'absence de note de calcul, pour l'ensemble des portiques modélisés on prend comme hypothèse :

- Les pieds de poteaux sont rotulés ;
- Les poutres sont encastrées sur les poteaux ;

4.3.3 MATERIAUX

Compte tenu de l'absence de note de calcul, on considère que les poteaux et poutres ont une nuance d'acier S235.

- Module d'Young : 210 000 MPa ;
- Coefficient de poisson : 0,3 ;
- Limite d'élasticité : 235 MPa ;
- Masse volumique : 7850 kg/m^3.

Les propriétés mentionnées ci-dessus sont valables à température ambiante. L'évolution de ces propriétés en fonction de la température est conforme aux prescriptions de l'Eurocode 3 partie 1-2 [3].

4.3.4 CHARGES MECANIQUES

Aucune note de calcul n'a été fournie par le client. Plusieurs hypothèses ont donc été prises en compte pour cette étude :

- D'après l'échantillon reçu, la toiture a un poids propre égal à 15 kg/m^2
- Le poids propre du bardage métallique en façade est de 10 kg/m^2
- La charge climatique de neige est prise égale à 45 kg/m^2
- La charge climatique de vent est prise égale à 50 kg/m^2

4.3.5 COMBINAISON DE CHARGES

Les combinaisons de charges définies dans l'Eurocode 0 [2] sont pour un bâtiment dont l'altitude est inférieure à 1000 m :

$$G + 0{,}2\ W$$
$$G + 0{,}2\ S$$

Où :

- G est la valeur caractéristique des charges permanentes,
- W est la valeur caractéristique des charges de vent,
- S est la valeur caractéristique des charges de neige.

5. CALCULS DE DEVELOPPEMENT DE FEU

5.1 METHODOLOGIE POUR LES CALCULS DE DEVELOPPEMENT DE FEU

Pour l'étude des températures lors du développement de l'incendie dans cette cellule, il est nécessaire de coupler deux phénomènes afin d'obtenir une représentation du profil de températures : feux localisés puis généralisés à la cellule.

5.1.1 FEU LOCALISE

Dans le cas des feux localisés, on choisit de calculer les températures proches du foyer qui sont susceptibles de solliciter directement les éléments de structures situés à proximité (en particulier les poteaux). On détermine à partir d'un jeu d'équations algébriques et des caractéristiques d'une source de chaleur, la distribution du champ de température dans la zone au voisinage du foyer.

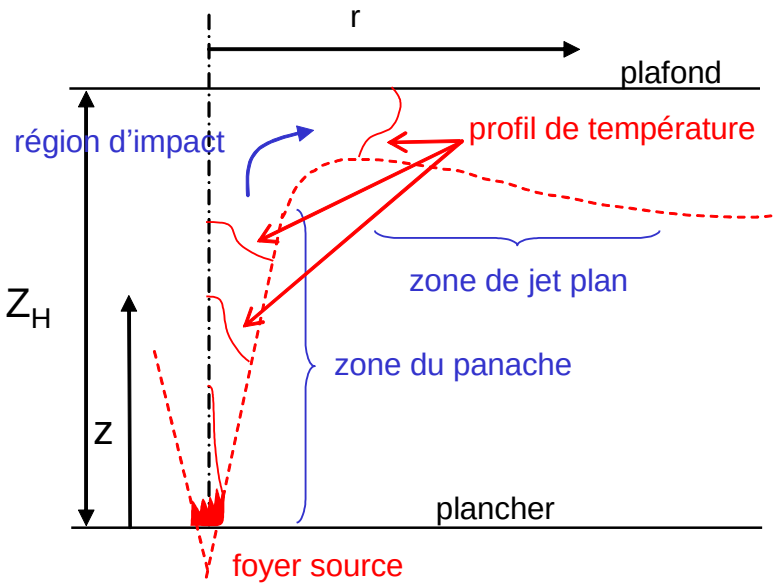


Figure 5-1 : Schématisation du modèle de panache impactant

Les formulations algébriques sont basées sur deux théories :

- Le développement d'un panache axisymétrique soumis aux forces de poussée pour le calcul des températures dans le panache de fumée [5] ;
- Les écoulements de jets chauds impactant et pariétaux pour le calcul du profil de température sous plafond [6].

On calculera ainsi l'évolution de la température pour un foyer de diamètre variable prenant en compte les développements de feu décrit au §4.2.1.

5.1.2 FEU GENERALISE

Dans le cas des feux généralisés, on recherche les effets thermiques sur l'ensemble des structures. Le champ de température dans le bâtiment est estimé à l'aide d'un modèle simplifié.

Une modélisation simplifiée du volume est réalisée en 3D en utilisant le modèle de champs FDS (Fire Dynamic Simulator) [8][9][10]. Il s'agit d'un code de calcul en dynamique des fluides développé par le NIST (National Institute of Standards Technology) utilisé par EFECTIS France depuis de nombreuses années. Il intègre un modèle de combustion par suivi de la fraction de mélange et un modèle à grandes échelles (LES) pour la description des écoulements turbulents. Il a fait l'objet de validations dans le domaine de la sécurité incendie au sein d'EFECTIS France. Ce code permet la modélisation tridimensionnelle des volumes étudiés et prend en compte les conditions d'évacuation des gaz chauds et l'admission d'air frais, et les échanges thermiques au niveau des parois.

La reproduction de ce document n'est autorisée que sous sa forme intégrale

Un maillage avec des mailles de 1 m x 1 m x 1 m est utilisé. Les parois sont considérées comme adiabatiques et le combustible comme essentiellement du plastique avec une énergie de combustion de 26000 kJ/kg. Pour chaque canton une surface équivalente d'exutoire est utilisée sur la base de 2%.

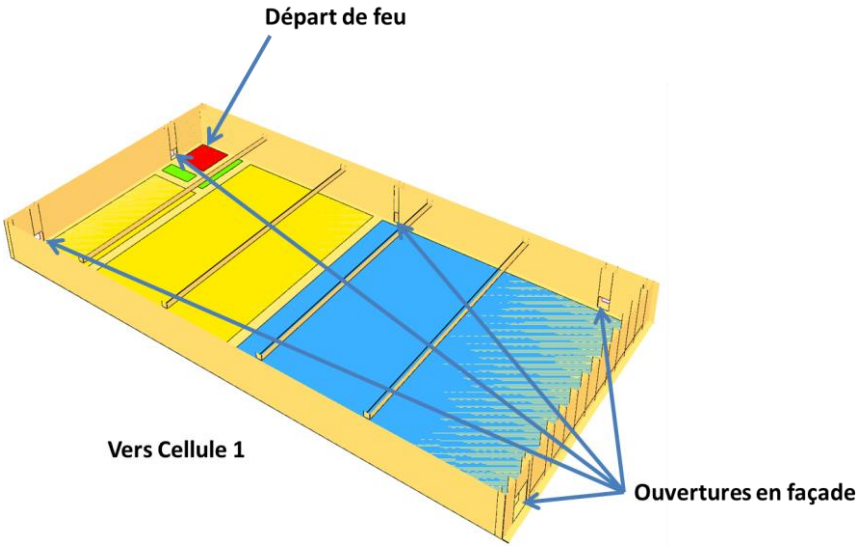


Figure 5-2 : Modélisation FDS simplifié de la cellule

La Figure 5-3 présente l'évolution du débit calorifique global obtenu dans le cadre de l'étude.

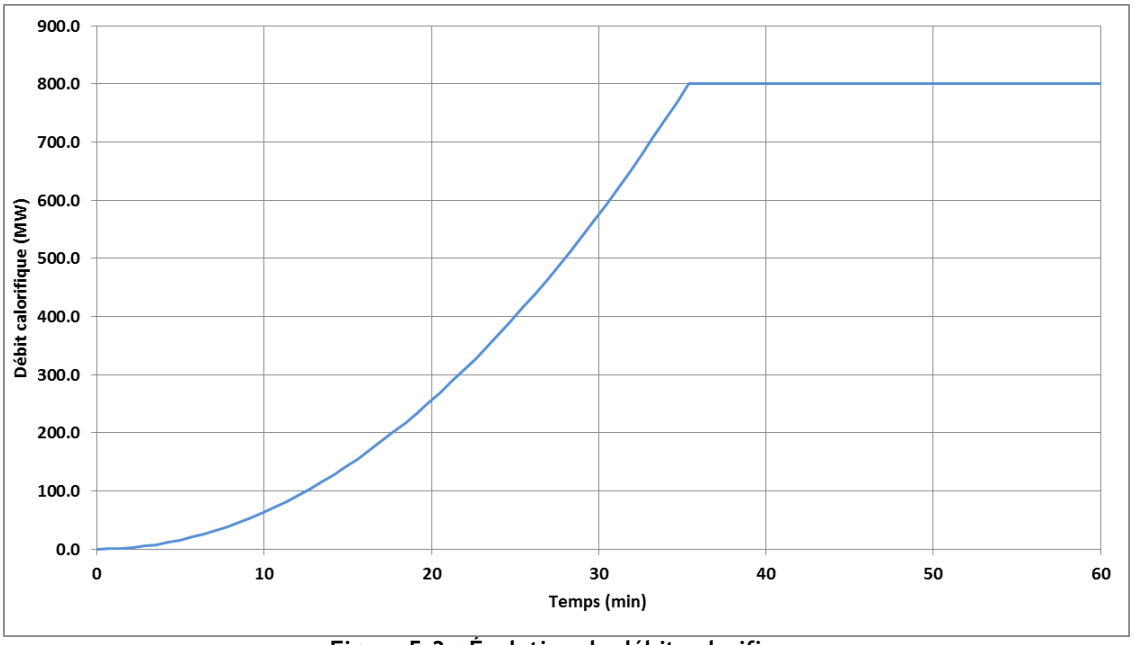


Figure 5-3 : Évolution du débit calorifique

Pour étudier le comportement thermomécanique de la structure, une combinaison entre les feux localisé et généralisé est utilisée en prenant les températures maximales. On suppose que le feu se développe près d'un poteau, les sollicitations thermiques générées par le feu localisé sont appliquées au voisinage de ce poteau. Les sollicitations thermiques du feu généralisé sont appliquées dès lors qu'elles deviennent prépondérantes par rapport au feu localisé. Les localisations les plus critiques sont déterminées pour étudier la stabilité au feu des structures en lien avec la répartition géométrique des éléments de structure.

5.2 RESULTATS – TEMPERATURES DES GAZ

Cette partie s'attache à présenter les résultats obtenus en termes de température de gaz pour le scénario de feu étudié. Les résultats détaillés sont présenté en ANNEXE A. Les températures sont renseignées suivant leur éloignement radial par rapport à la zone de départ de feu et la position verticale par rapport à la hauteur où le point considéré se trouve.

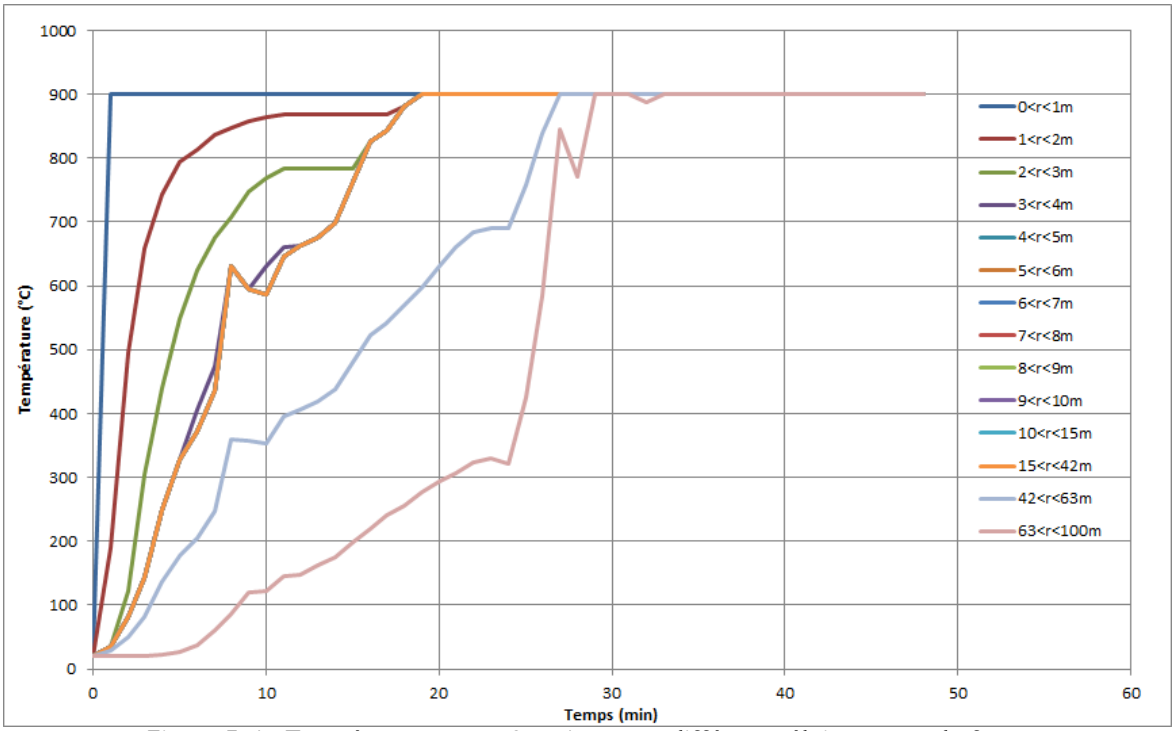


Figure 5-4 : Température entre 0 et 1 m pour différents éloignement du foyer

Les résultats présentés peuvent ainsi être utilisés pour déterminer l'échauffement des éléments de structure en prenant en compte différentes localisations du départ de feu et en se référant aux courbes de températures en fonction des distances radiales et suivant la hauteur vis-à-vis du départ de feu.

La reproduction de ce document n'est autorisée que sous sa forme intégrale

6. ÉTUDE DU COMPORTEMENT AU FEU DE LA STRUCTURE METALLIQUE

6.1 VERIFICATION DES EXIGENCES SOUS FEU NORMALISE R15

Conformément au guide du CTICM [11], la vérification de la stabilité au feu 15 min de la structure sera étudiée selon la combinaison de charges suivante :

$$G + 0{,}2\ S$$

Où :

- G est la valeur caractéristique des charges permanentes,
- S est la valeur caractéristique des charges de neige.

6.1.1 ÉTUDE DU DEGRE DE STABILITE AU FEU DE LA STRUCTURE

6.1.1.1 CALCUL D'ECHAUFFEMENT

La Figure 6-1 présente la température d'échauffement des éléments de la structure sous feu conventionnel conformément aux modèles de calculs simplifiés proposés dans l'Eurocode 3 partie 1-2 [3] :

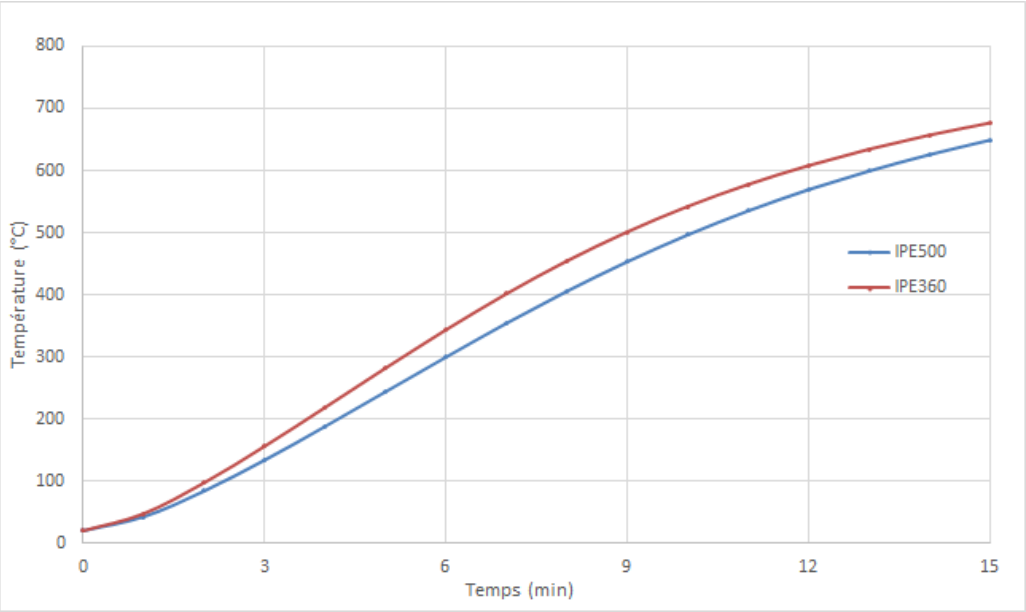


Figure 6-1 : Evolution de la température de l'acier sous feu conventionnel

Le Tableau 6-1 résume le facteur de massiveté de chaque élément :

Éléments du portique	Section	Massiveté (m^{-1})
Poutres	IPE 500	151
Poteaux	IPE 360	186

Tableau 6-1 : Massiveté des éléments du portique

6.1.1.2 ÉTUDE DU DEGRE DE STABILITE AU FEU R15 DE LA STRUCTURE PRINCIPALE

La Figure 6-2 montre le modèle étudié pour la vérification du degré de stabilité au feu de 15 min.

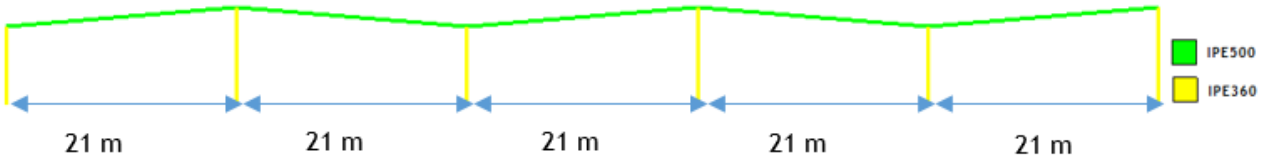


Figure 6-2 : Description du modèle étudié

Les Figure 6-3 et Figure 6-4 montrent l'allure de la déformée du portique à 15 min et 16 min.

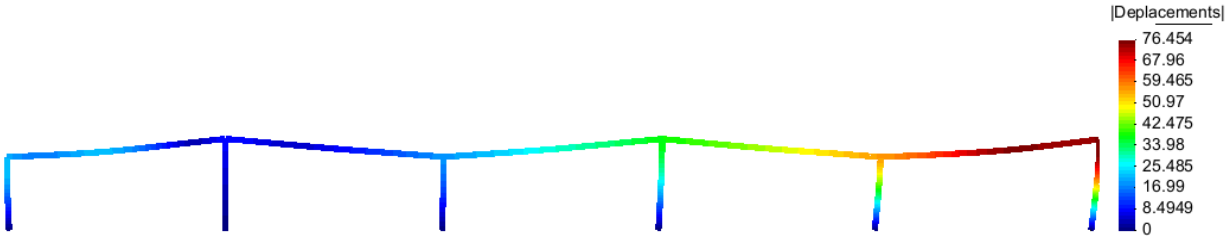


Figure 6-3 : Allure de la déformée du portique à t = 15 min

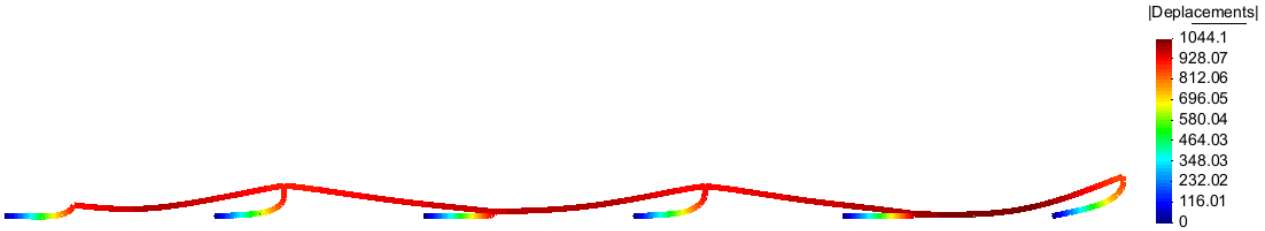


Figure 6-4 : Allure de la déformée du portique à t = 16 min

Les Figure 6-5 et Figure 6-6 donnent l'évolution du déplacement horizontal et vertical en tête des poteaux de rive.

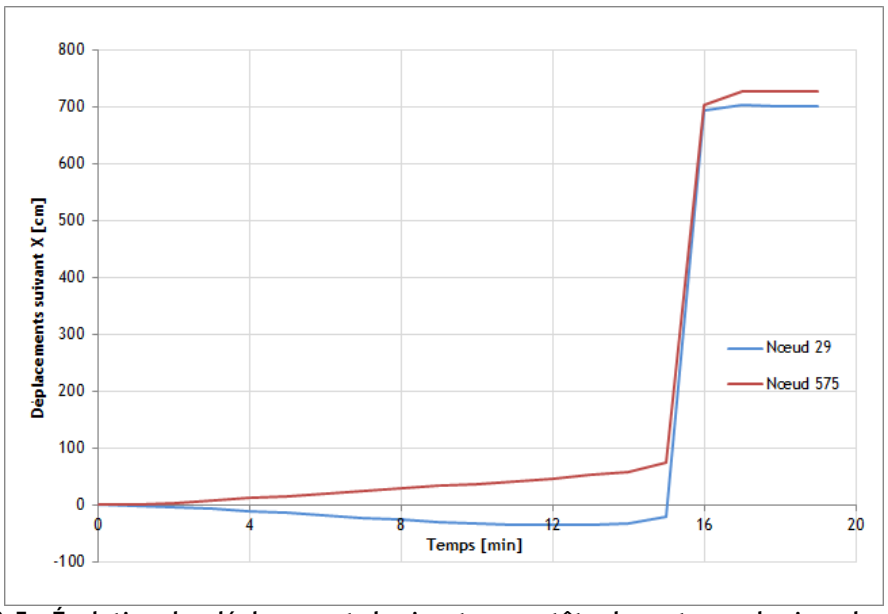


Figure 6-5 : Évolution des déplacements horizontaux en tête des poteaux de rives du portique

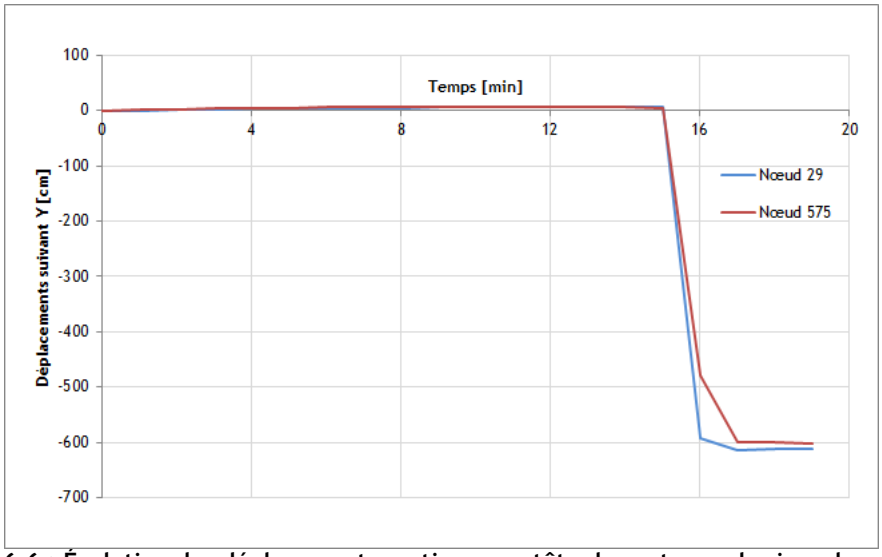


Figure 6-6 : Évolution des déplacements verticaux en tête des poteaux de rives du portique

On constate que la structure principale est stable au feu pendant 15 min, la ruine de la structure est observée à partir de 16 min.

6.1.2 ÉTUDE DU DEGRE DE STABILITE AU FEU R15 DES PANNES

Selon les relevés réalisés sur site, les pannes sont des profilés de type IPE240 de portée 10,75 m et espacées de 2,8 m. Afin de vérifier la stabilité au feu des pannes pendant 15 min, on calcule dans un premier temps la température critique des pannes qui sera comparée à la température d'échauffement du profilé à 15 min.

Par manque d'information, et de façon sécuritaire, on suppose que les pannes sont isostatiques. Le moment de flexion obtenue à mi-travée sous la combinaison G + 0,2 S est égal à : M_y = 14,1 kN.m.

La température critique correspondante à ce moment de flexion est égale à : T_{cr} = 759 °C alors que la température d'échauffement des pannes à 15 min est de : $T_{échauffement}$ = 697 °C.
On conclut donc que la $T_{échauffement} < T_{cr}$. La stabilité au feu des pannes est donc assurée pendant 15 min.

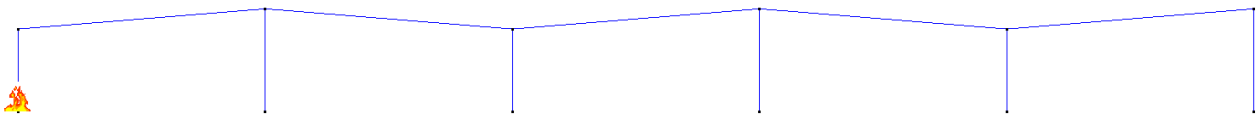
6.2 VERIFICATION DES EXIGENCES SUR LE MODE DE RUINE

On s'intéresse dans ce paragraphe au comportement au feu de la structure au regard des exigences à satisfaire dans le cadre de l'arrêté. Il s'agit de vérifier que :

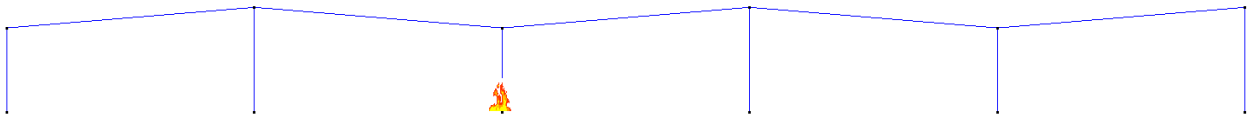
- Le risque de ruine de la structure vers l'extérieur est écarté ;
- Le risque de ruine intra-cellule est écarté ;
- Le risque de ruine inter-cellule est écarté.

Afin de vérifier le critère de ruine vers l'extérieur, plusieurs cas de feu sont étudiés. On présente sur la figure ci-dessous les différents scénarios considérés.

La reproduction de ce document n'est autorisée que sous sa forme intégrale



Scénario 1



Scénario 2

Figure 6-7 : Scénarios étudiés pour l'étude du mode de ruine de la cellule

Remarque : sur les 2 scénarios considérés, l'évolution du foyer et des températures est basée sur l'étude des sollicitations thermiques et du développement de feu donnée au §5. Seule la position du référentiel est donc modifiée en fonction du scénario.

6.2.1 CALCULS D'ECHAUFFEMENT

Les Figure 6-8, Figure 6-9, Figure 6-10 et Figure 6-11 montrent l'évolution de la température au sein des différents éléments de la structure en fonction de l'éloignement par rapport au foyer.

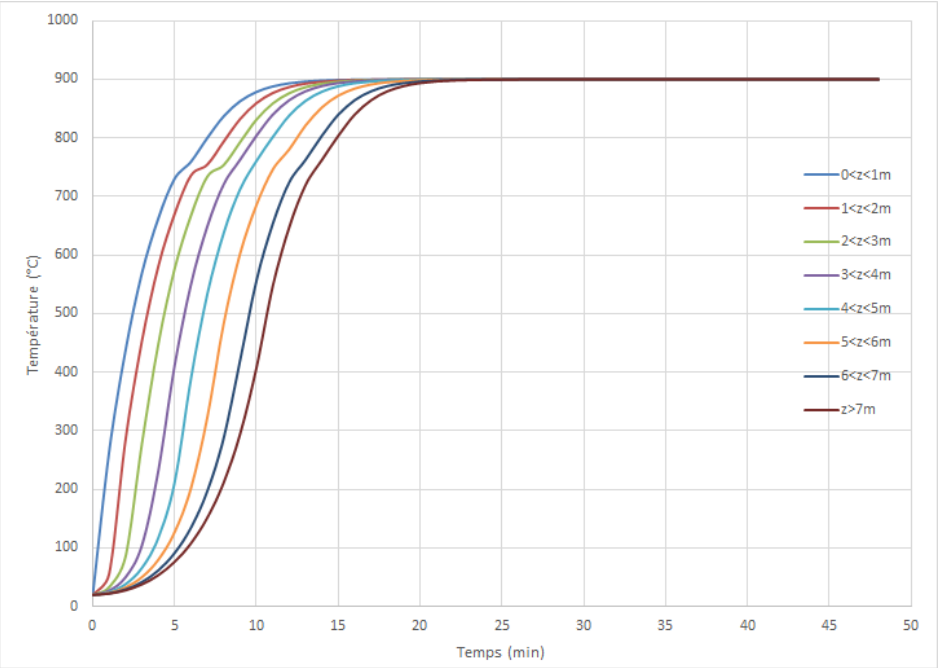


Figure 6-8 : Échauffement des poteaux au droit du foyer

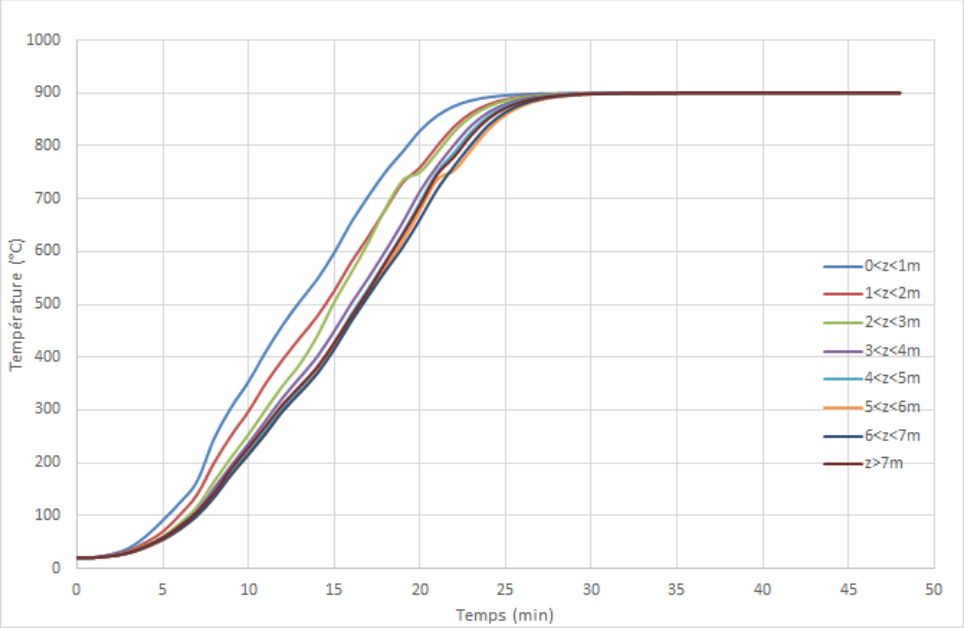


Figure 6-9 : Échauffement des poteaux à 21 m du foyer

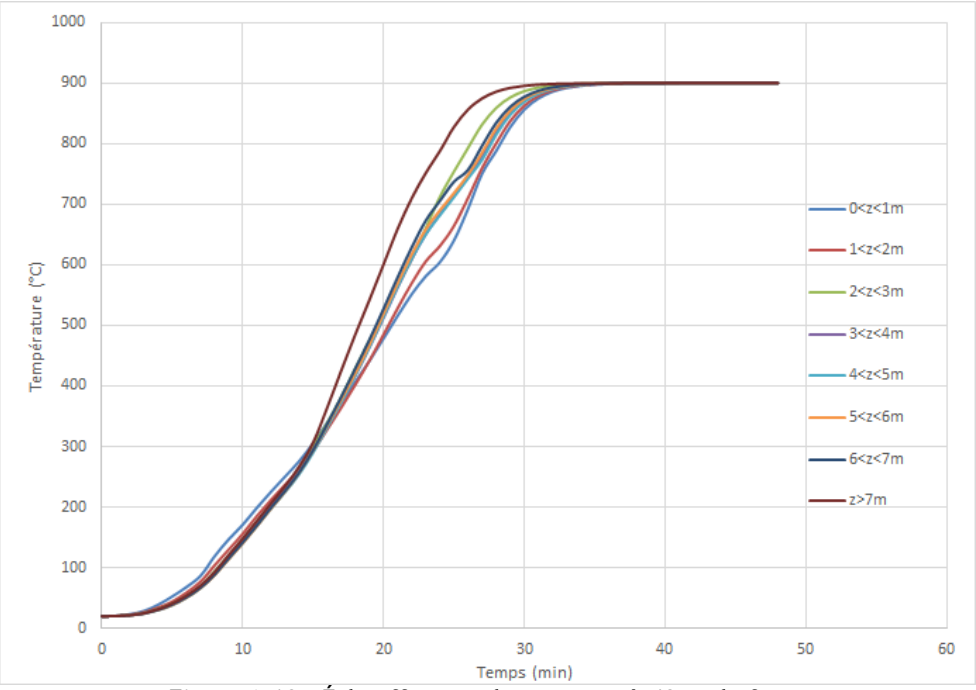


Figure 6-10 : Échauffement des poteaux à 42 m du foyer

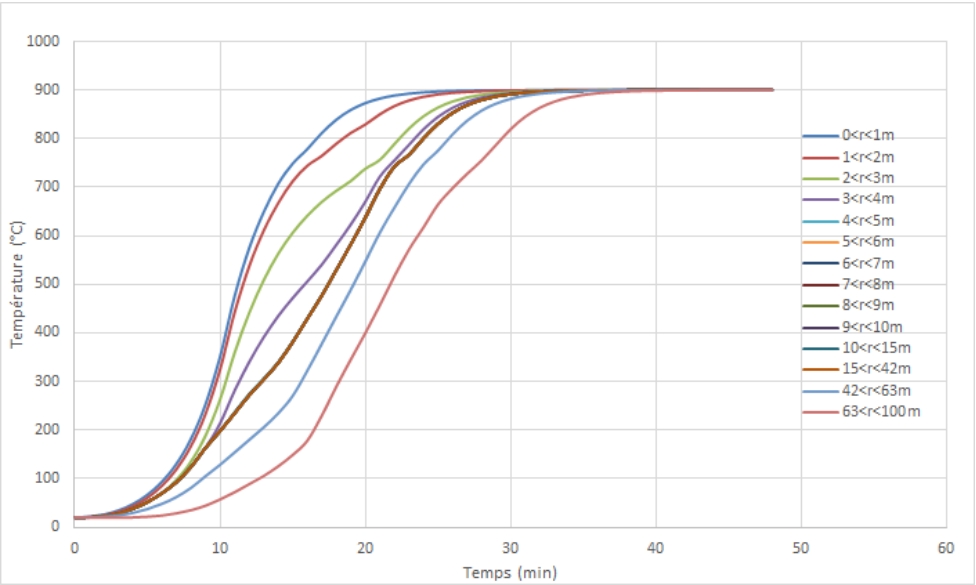


Figure 6-11 : Échauffement des poutres en fonction de l'éloignement du foyer

6.2.2 COMPORTEMENT MECANIQUE DU PORTIQUE – COMBINAISON AVEC CHARGE DE NEIGE

6.2.2.1 SCENARIO 1

Figure 6-12 : Visualisation de la position du foyer

Les Figure 6-13, Figure 6-14 et Figure 6-15 montrent la déformée de la structure à 22 min, 23 min et 24 min.

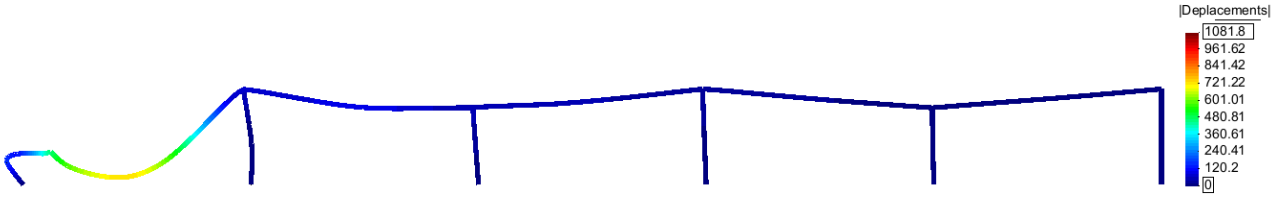


Figure 6-13 : Allure de la déformée à 22 min

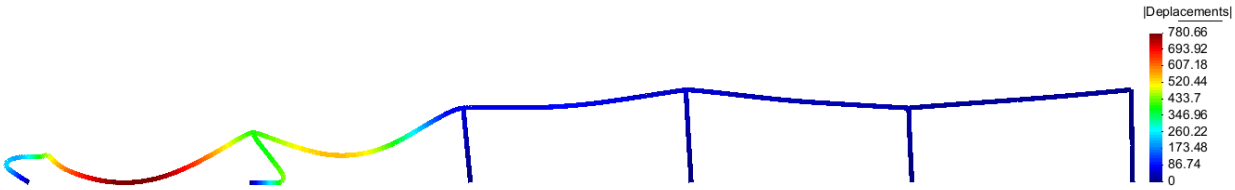


Figure 6-14 : Allure de la déformée à 23 min

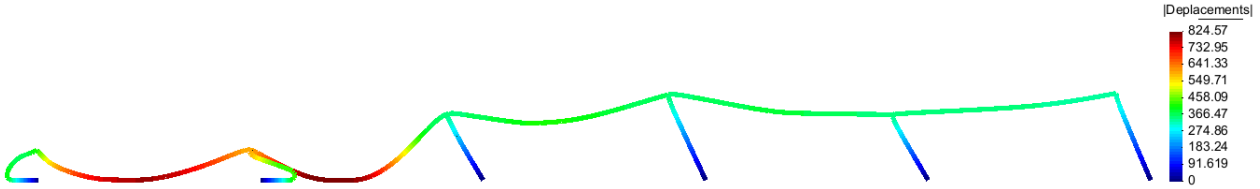


Figure 6-15 : Allure de la déformée à 24 min

Les figures suivantes montrent les déplacements horizontaux et verticaux obtenus en tête de poteaux (cf. points 29 et 575 désignés sur la Figure 6-12).

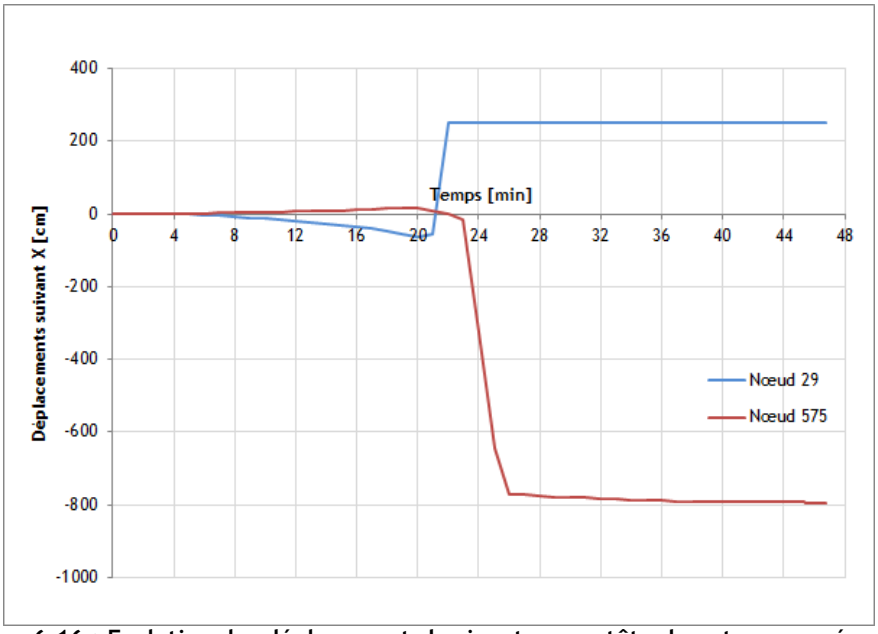


Figure 6-16 : Evolution des déplacements horizontaux en tête de poteaux - scénario 1

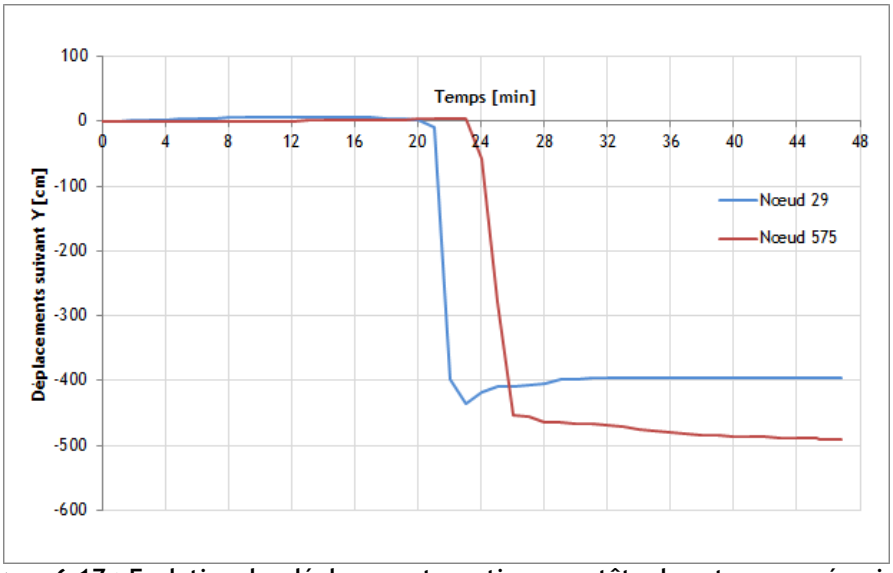


Figure 6-17 : Evolution des déplacements verticaux en tête de poteaux - scénario 1

On constate que :

- La structure ruine vers l'intérieur,
- La ruine locale de la structure se produit à 21 min et la ruine globale se produit à 25 min.

6.2.2.2 SCENARIO 2

Figure 6-18 : Visualisation de la position du foyer

Les Figure 6-19, Figure 6-20 et Figure 6-21 montrent la déformée de la structure à 27 min, 34 min et 38 min.

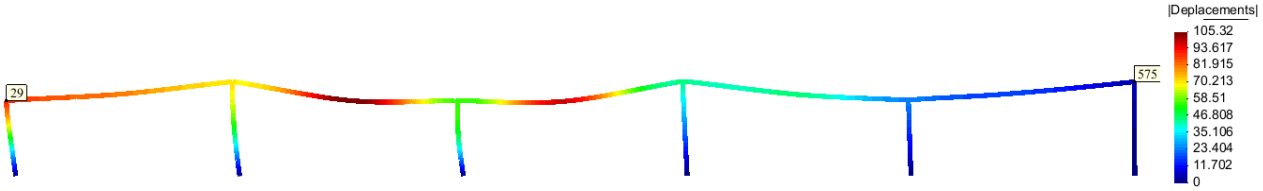


Figure 6-19 : Allure de la déformée à 21 min

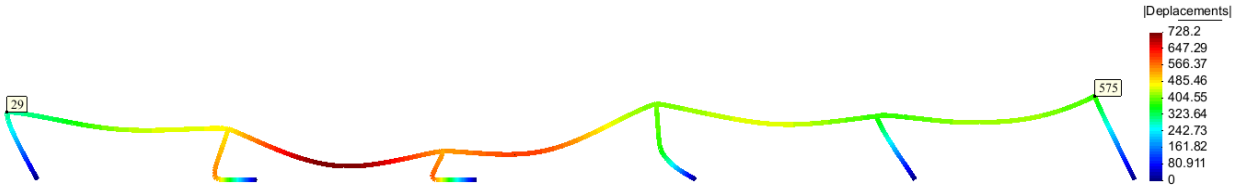


Figure 6-20 : Allure de la déformée à 22 min

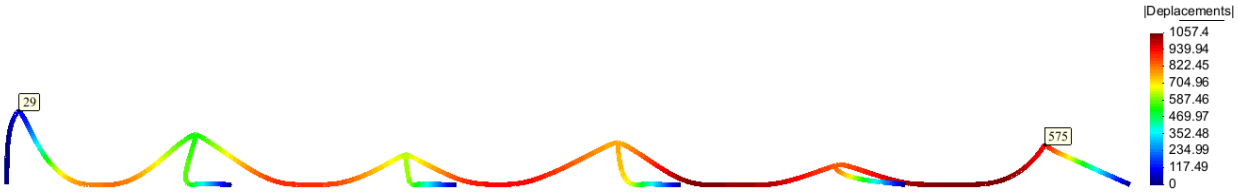


Figure 6-21 : Allure de la déformée à 25 min

Les figures suivantes montrent les déplacements horizontaux et verticaux obtenus en tête de poteaux (points 29 et 575).

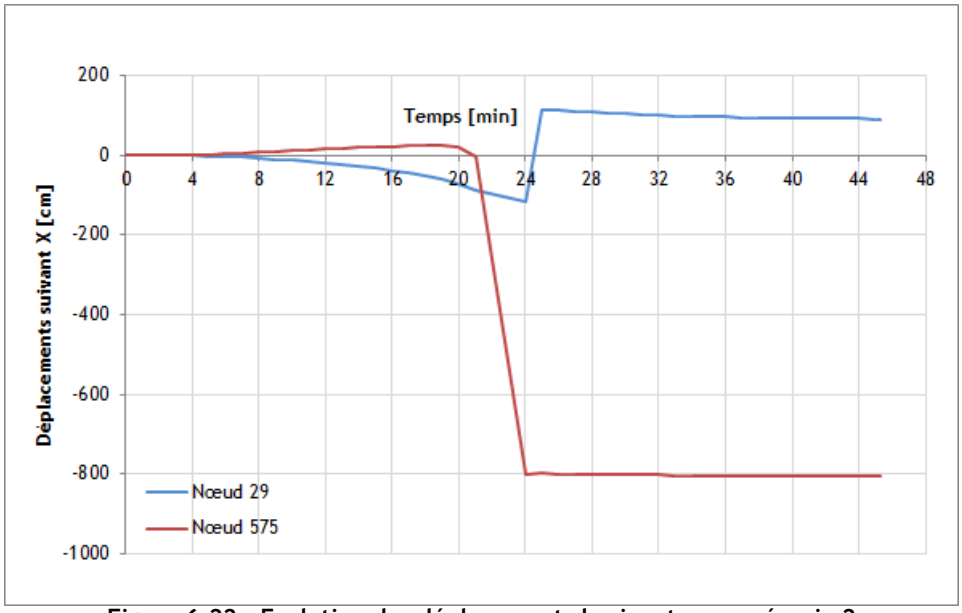


Figure 6-22 : Evolution des déplacements horizontaux - scénario 2

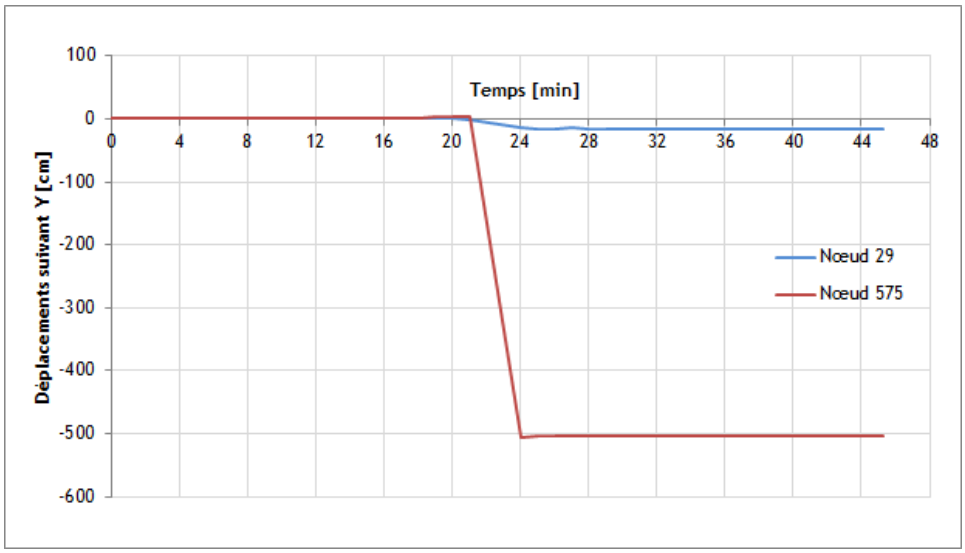


Figure 6-23 : Evolution des déplacements verticaux - scénario 2

6.2.3 COMPORTEMENT MECANIQUE DU PORTIQUE – COMBINAISON AVEC CHARGE DE VENT

Un calcul a été réalisé en prenant en compte la combinaison avec la charge de vent en situation d'incendie :

$$G + 0{,}2\ W$$

6.2.3.1 SCENARIO 1

La Figure 6-24 montre le chargement appliqué dans le cas où on applique le vent. Le vent est appliqué de gauche vers droite.

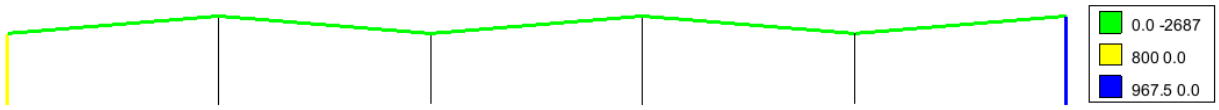


Figure 6-24 : Visualisation du chargement (cas du vent)

Figure 6-25 : Visualisation de la position du foyer

Les Figure 6-26, Figure 6-27 et Figure 6-28 montrent la déformée de la structure à 21, 23 et 25 min.

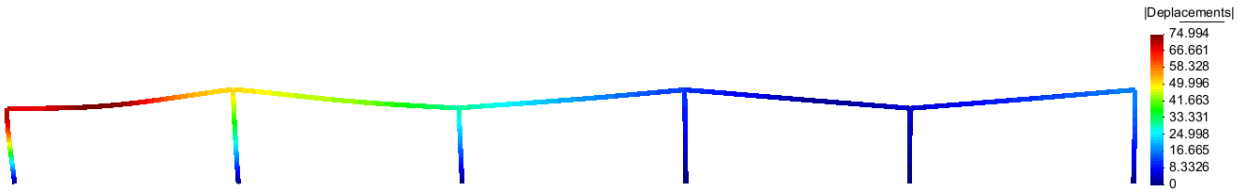


Figure 6-26 : Allure de la déformée à 21 min

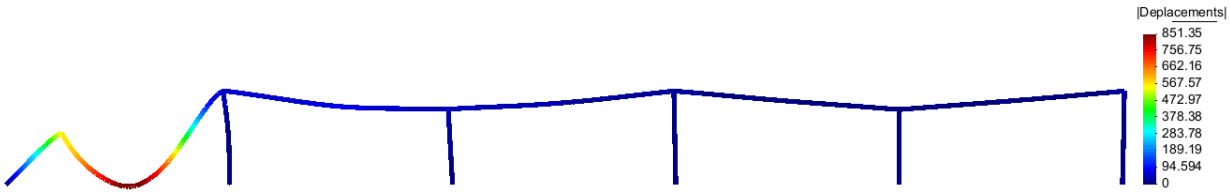


Figure 6-27 : Allure de la déformée à 23 min

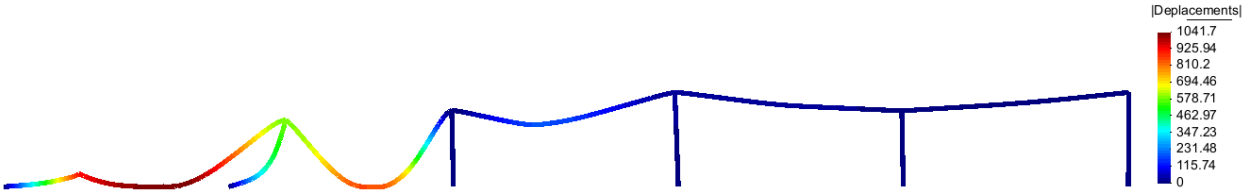


Figure 6-28 : Allure de la déformée à 25 min

Les figures suivantes montrent les déplacements horizontaux et verticaux obtenus en tête de poteaux (points 29 et 575).

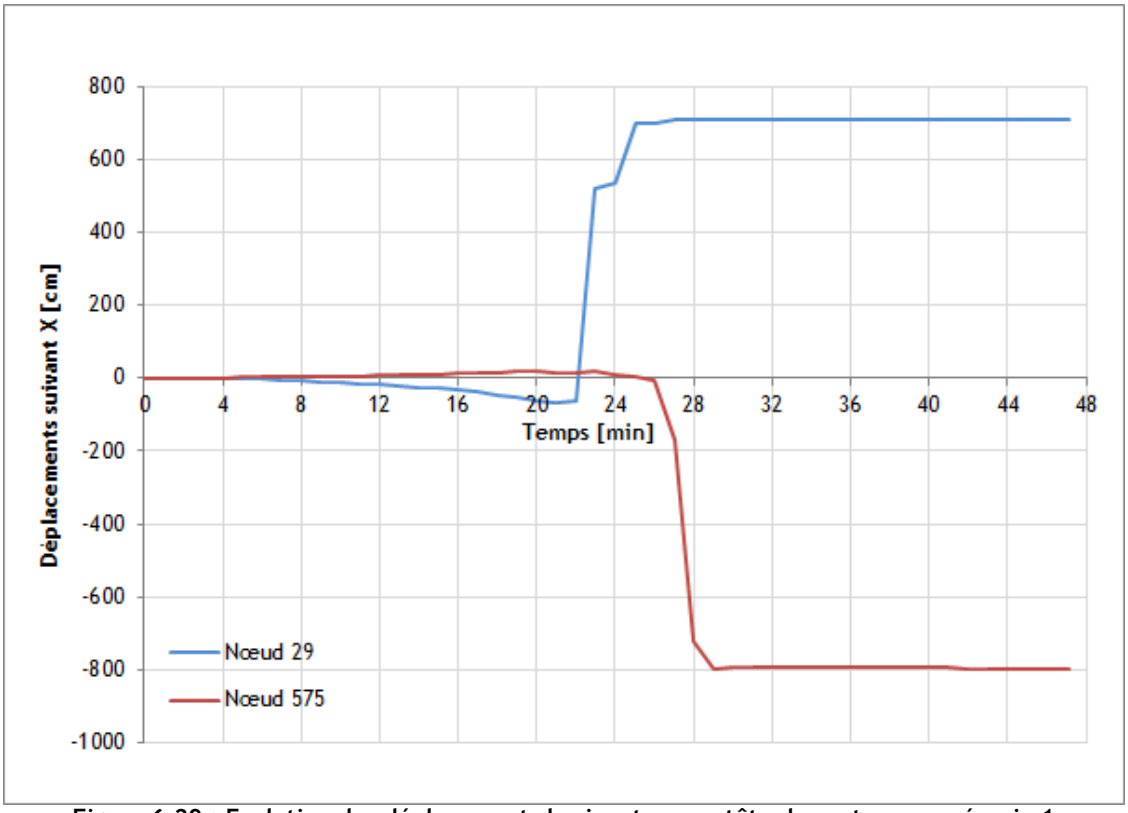


Figure 6-29 : Evolution des déplacements horizontaux en tête des poteaux – scénario 1

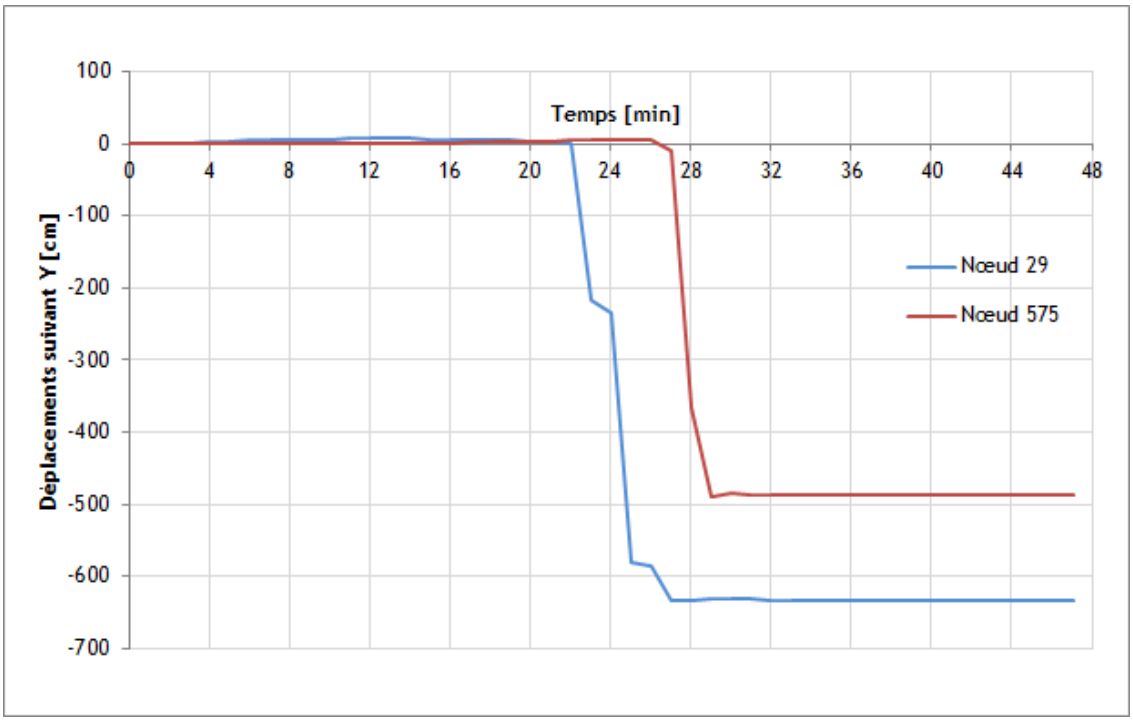


Figure 6-30 : Evolution des déplacements verticaux en tête des poteaux – scénario 1

On constate que :

- La structure ruine vers l'intérieur,
- La ruine locale de la structure se produit à 21 min et la ruine globale à 27 min.

6.2.3.2 SCENARIO 2

Figure 6-31 : Visualisation de la position du foyer

Les Figure 6-32, Figure 6-33 et Figure 6-34 montrent la déformée de la structure à 21, 23 et 24 min.

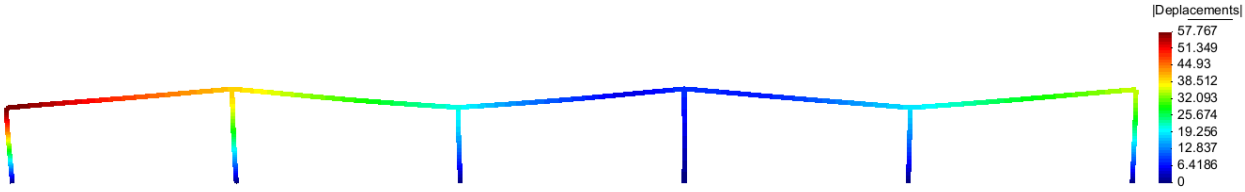


Figure 6-32 : Allure de la déformée à 21 min

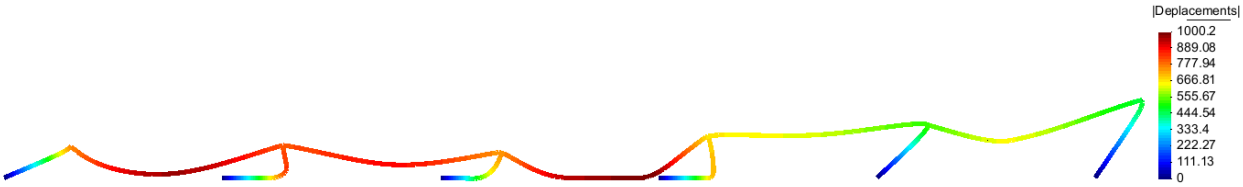


Figure 6-33 : Allure de la déformée à 23 min

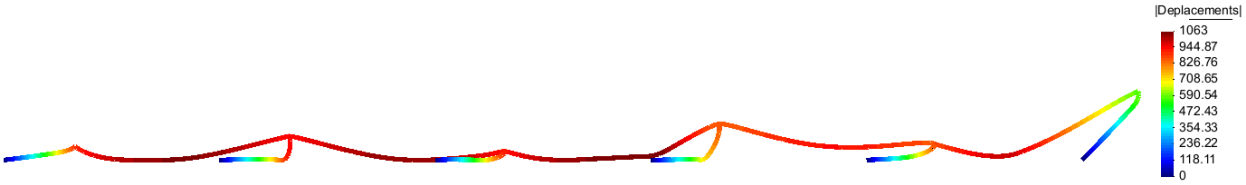


Figure 6-34 : Allure de la déformée à 24 min

Les figures suivantes montrent les déplacements horizontaux et verticaux obtenus en tête de poteaux (points 29 et 575).

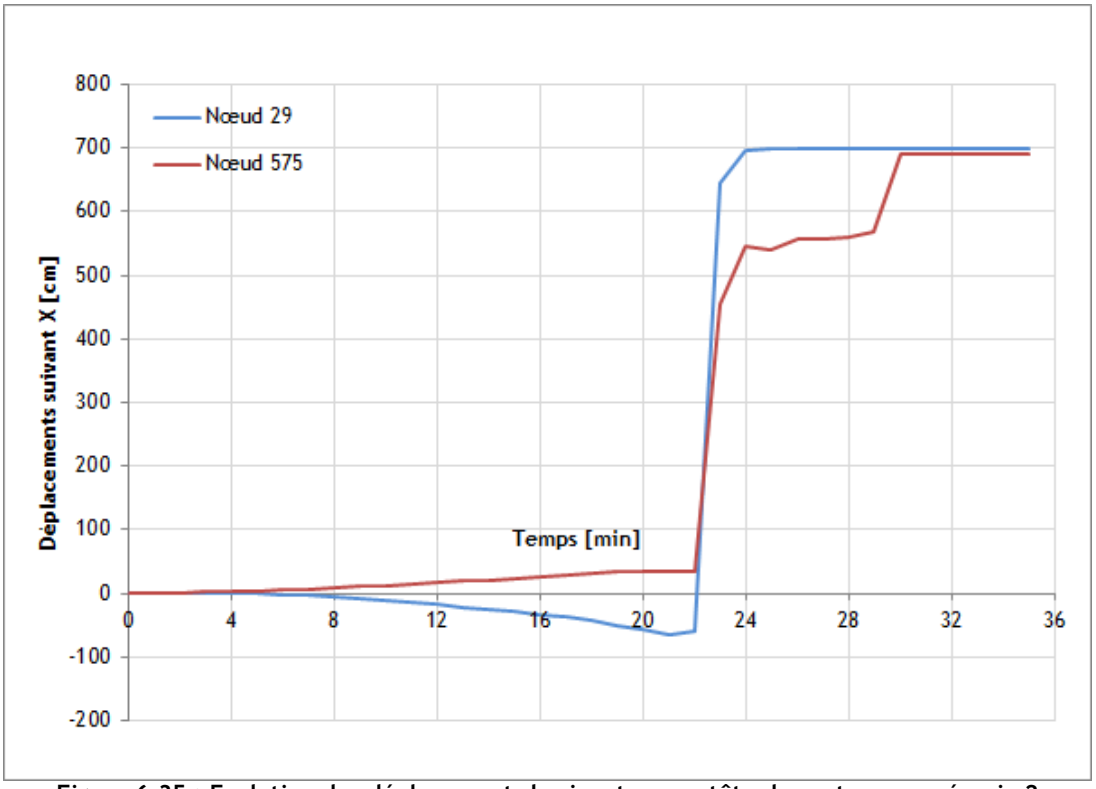


Figure 6-35 : Evolution des déplacements horizontaux en tête des poteaux – scénario 2

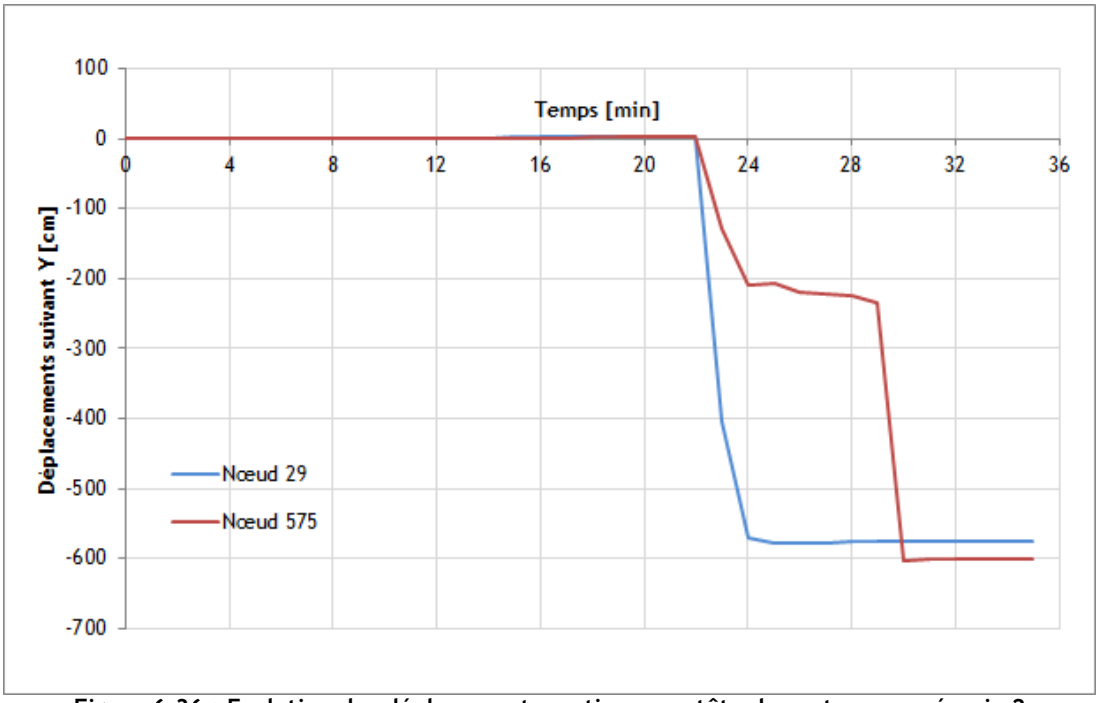


Figure 6-36 : Evolution des déplacements verticaux en tête des poteaux – scénario 2

On constate que :

- La structure ruine vers l'extérieur,
- La ruine locale de la structure se produit à 21 min et la ruine globale à 23 min.

7. ÉTUDE DE PRECONISATIONS PAR RAPPORT A LA RUINE VERS L'EXTÉRIEUR DE LA STRUCTURE

Les résultats présentés au paragraphe précédent ont montré que la structure porteuse ruine vers l'extérieur pour le cas d'un départ de feu au milieu sous l'action du vent. L'objet du présent paragraphe est de rechercher des solutions afin de résoudre cette problématique de ruine vers l'extérieur.

Une solution est proposée par EFECTIS France afin de satisfaire l'exigence de non ruine vers l'extérieur. Cette solution consiste à protéger la trame de rive repérée sur la Figure 7-1. Cette trame devra être protégée pour une température maximale de 500 °C pendant 1h (poteaux et poutres). L'intérêt de protéger cette trame de rive est de créer une zone froide qui permettra de reprendre les efforts de compression pendant la phase de dilatation.

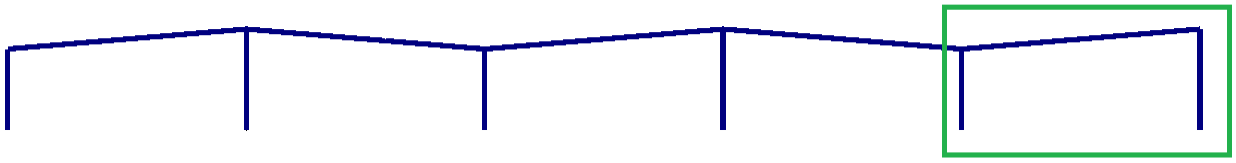


Figure 7-1 : Repérage de la zone à protéger

Les figures suivantes montrent les déformées obtenues pour un départ de feu au milieu à 22, 23 et 25 min.

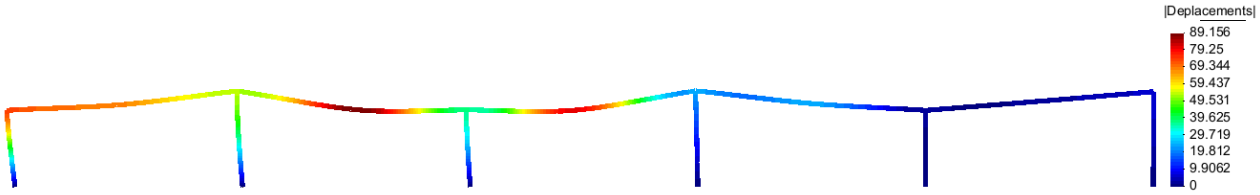


Figure 7-2 : Allure de la déformée à 22 min

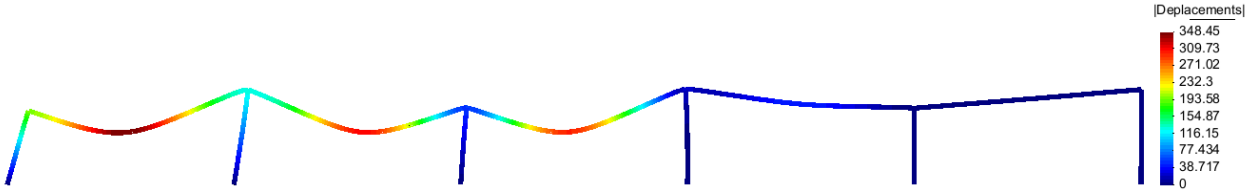


Figure 7-3 : Allure de la déformée à 23 min

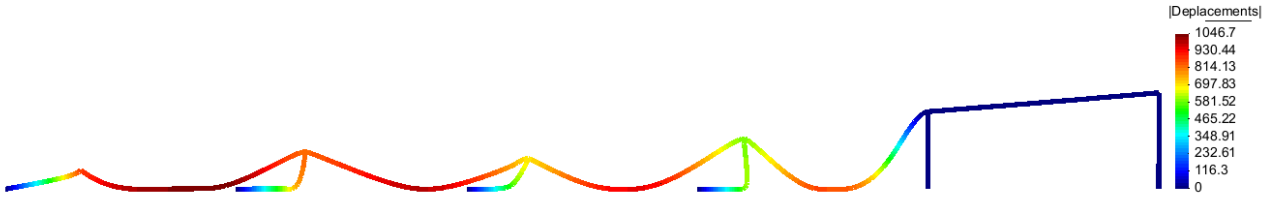


Figure 7-4 : Allure de la déformée à 25 min

Les figures suivantes montrent les déplacements horizontaux et verticaux obtenus en tête de poteaux (points 29 et 575).

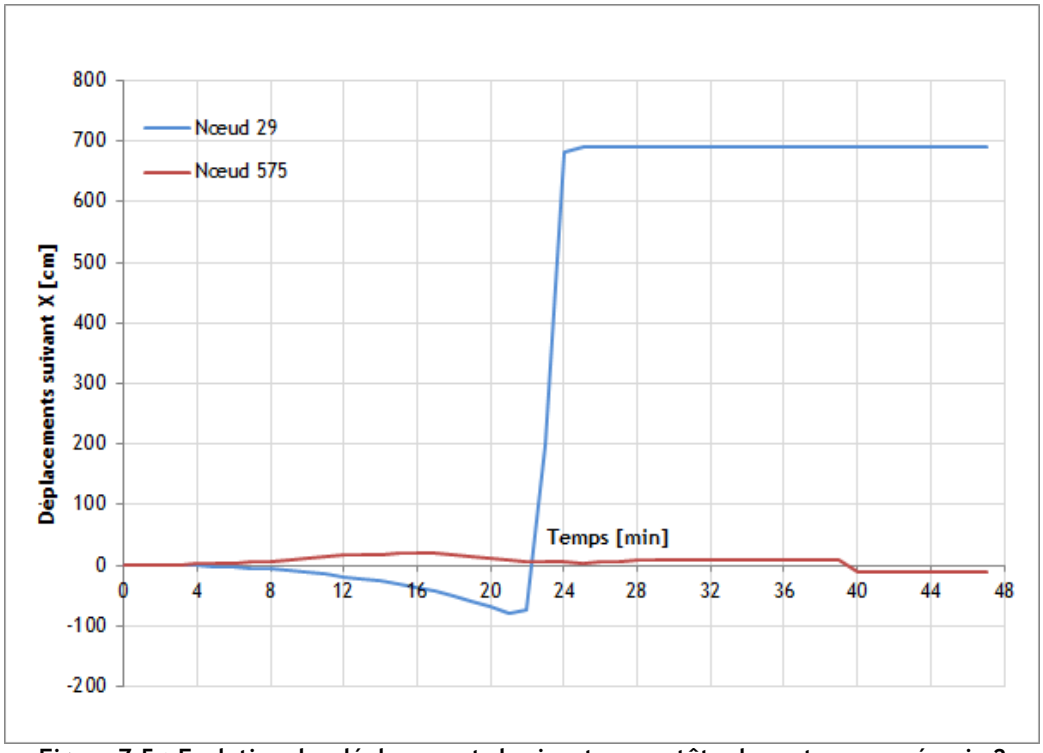


Figure 7-5 : Evolution des déplacements horizontaux en tête des poteaux - scénario 2

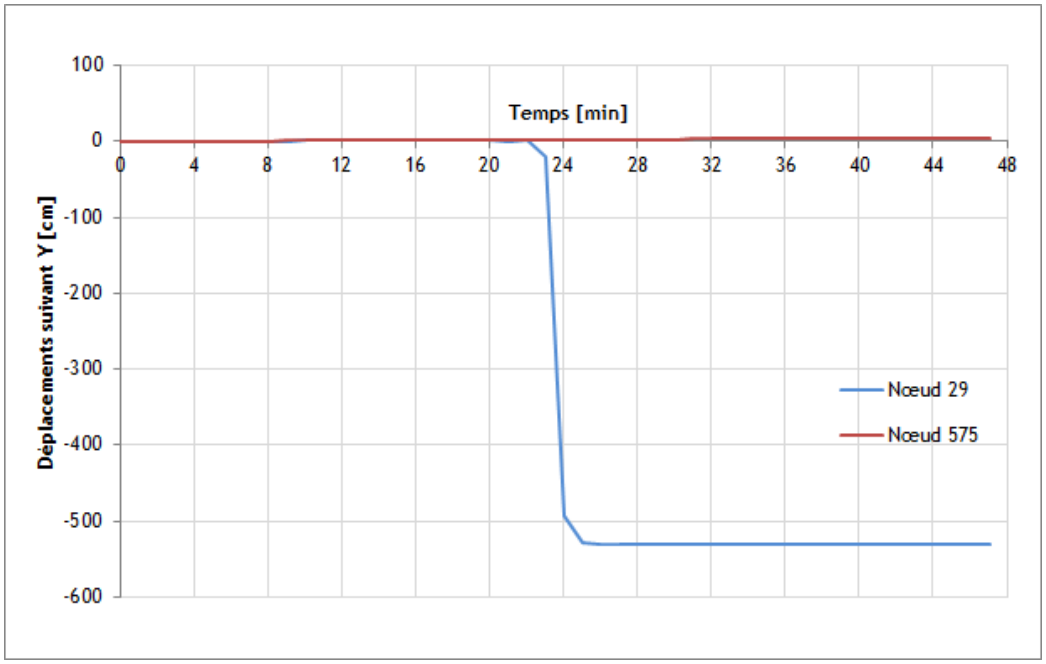


Figure 7-6 : Evolution des déplacements verticaux en tête des poteaux - scénario 2

On constate que :

- La structure ruine vers l'intérieur,
- La ruine locale de la structure se produit à 21 min et la ruine globale à 25 min.

8. CONCLUSIONS

Cette étude porte sur la vérification du mode de ruine, selon l'article 2.2.6 de l'arrêté du 15 avril 2010, de la structure du bâtiment Tonnerre relevant du régime de l'enregistrement.

L'étude a montré que :

- Concernant le degré de stabilité au feu 15 min de la structure :
  - La stabilité au feu de la structure principale est **satisfaite** ;
  - La stabilité au feu des pannes est **satisfaite**.

- Concernant les exigences relatives au mode de ruine de la structure :
  - L'exigence de non ruine en chaîne inter-cellule **est satisfaite ;**
  - L'exigence de non ruine en chaîne intra-cellule **est satisfaite ;**
  - L'exigence de non ruine vers l'extérieur **est non satisfaite.**

Des calculs supplémentaires ont été réalisés en prenant en compte une protection au feu afin de respecter les exigences relatives au mode de ruine. L'exigence de non ruine vers l'extérieur est satisfaite **si et seulement si une protection au feu de la trame de rive est appliquée conformément à la Figure** 7-1**. Cette travée devra être protégée pour un échauffement maximal de 500 °C pendant 1h.**

Cette étude a été réalisée dans le strict respect des documents qui ont été communiqués à Efectis France (documents cités au §2).

ANNEXE A COURBES DE TEMPERATURE DES GAZ

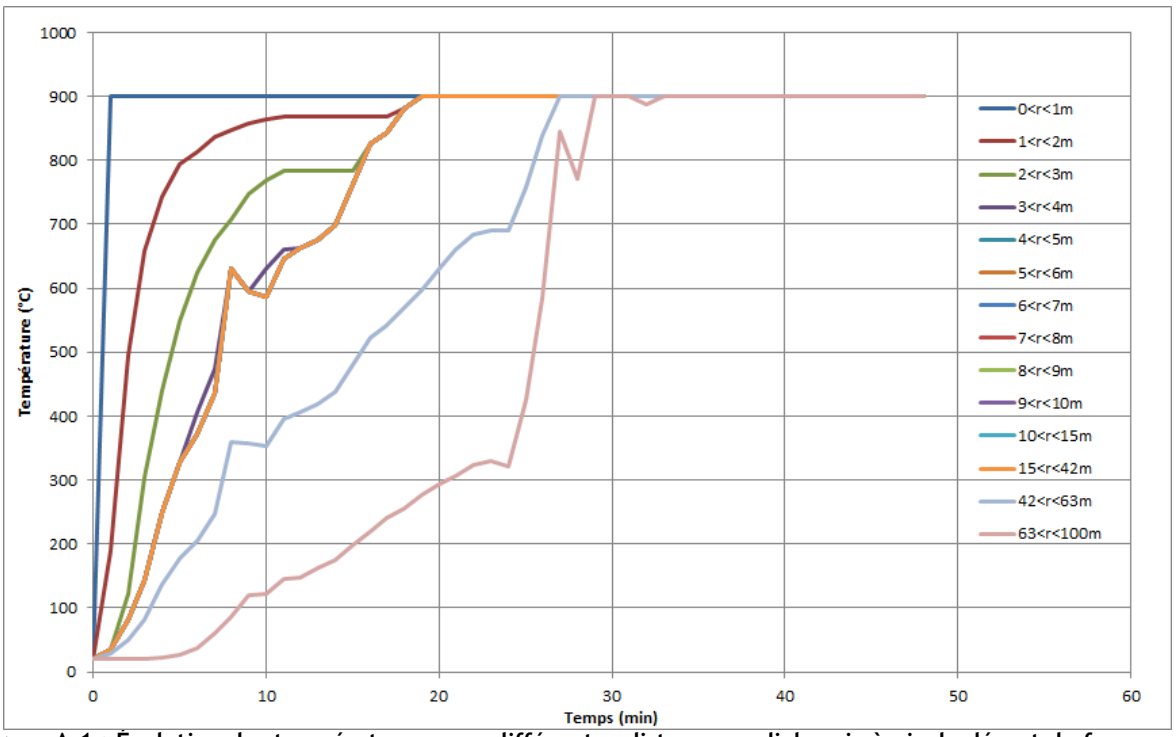


Figure A-1 : Évolution des températures pour différentes distances radiales vis-à-vis du départ de feu pour Z compris entre 0 et 1 m

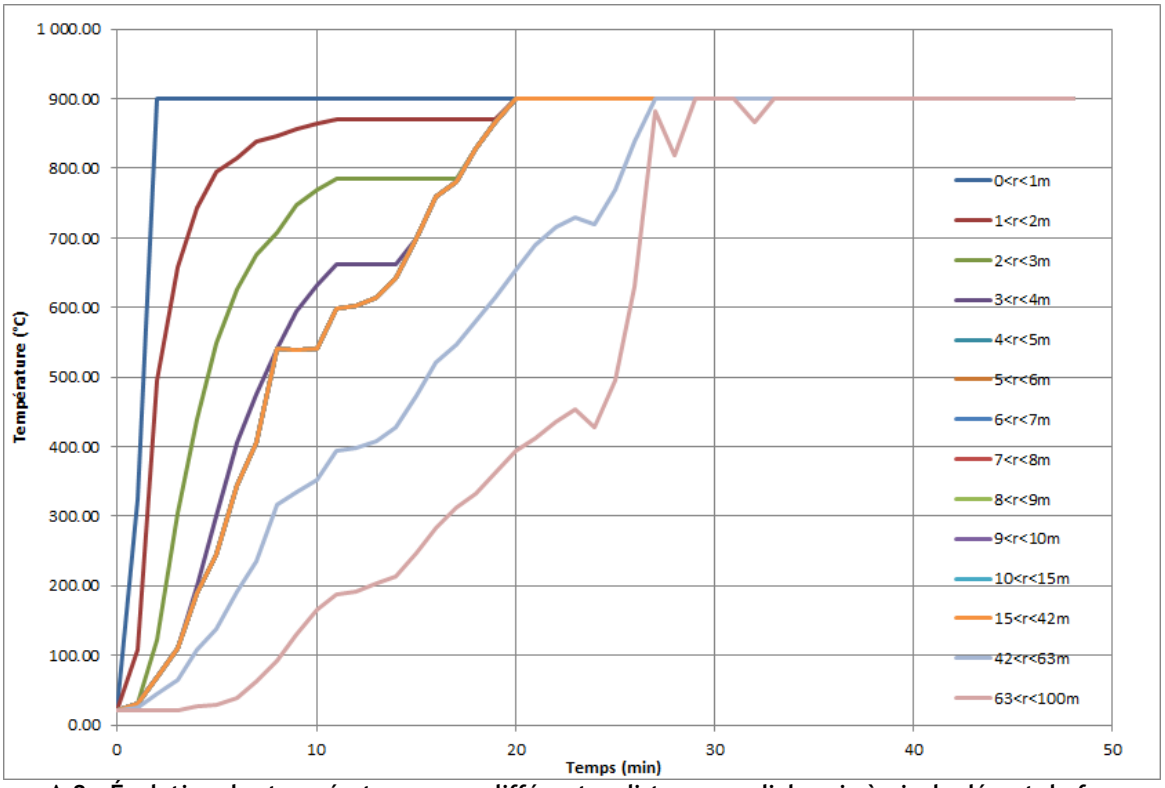


Figure A-2 : Évolution des températures pour différentes distances radiales vis-à-vis du départ de feu pour Z compris entre 1 et 2 m

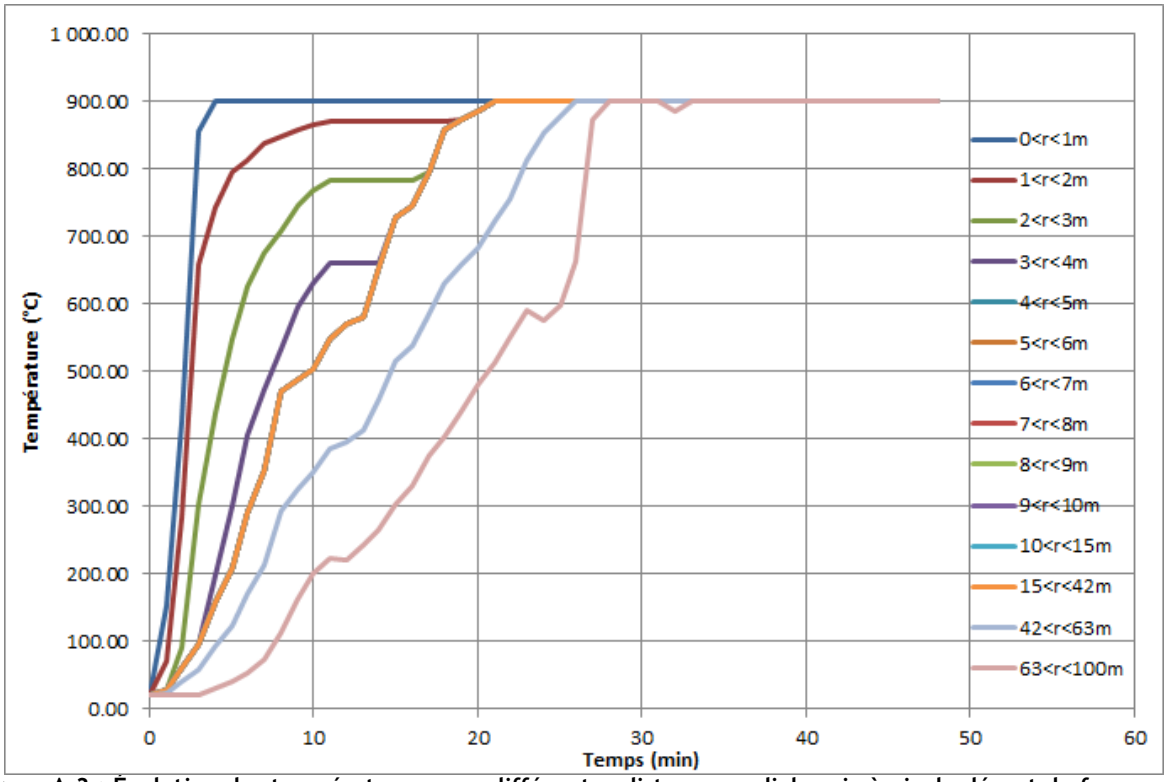


Figure A-3 : Évolution des températures pour différentes distances radiales vis-à-vis du départ de feu pour Z compris entre 2 et 3 m

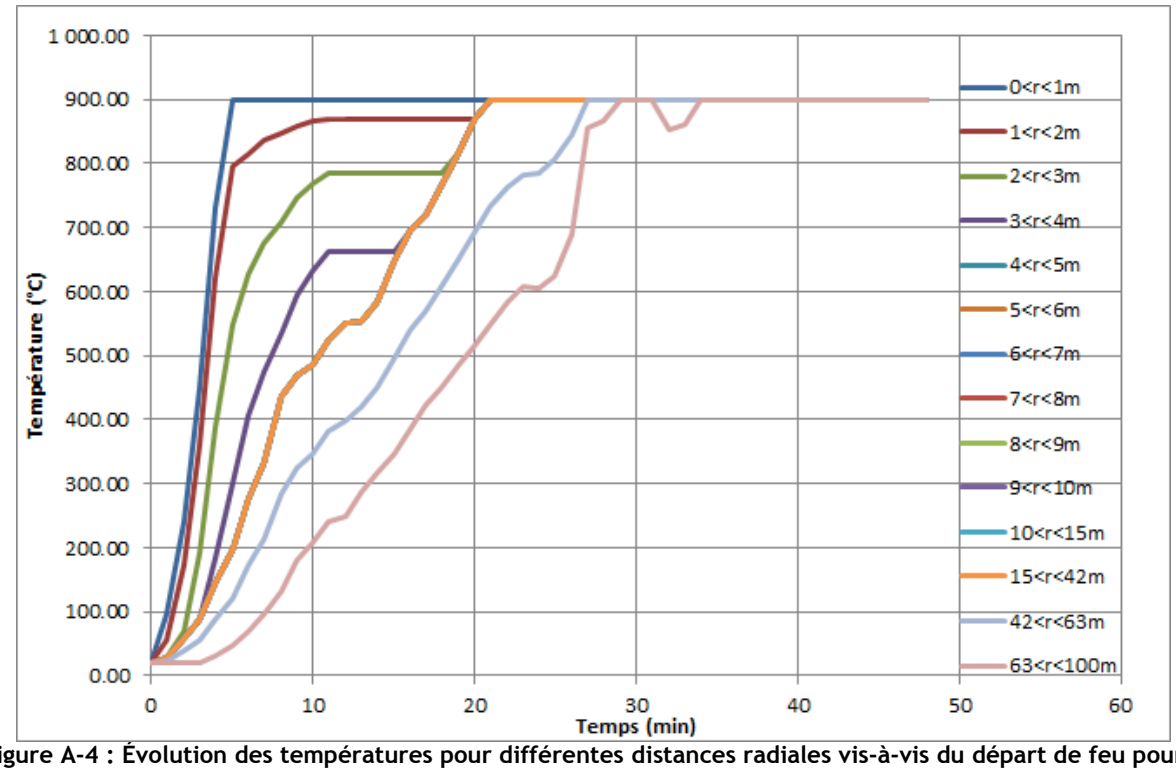


Figure A-4 : Évolution des températures pour différentes distances radiales vis-à-vis du départ de feu pour Z compris entre 3 et 4 m

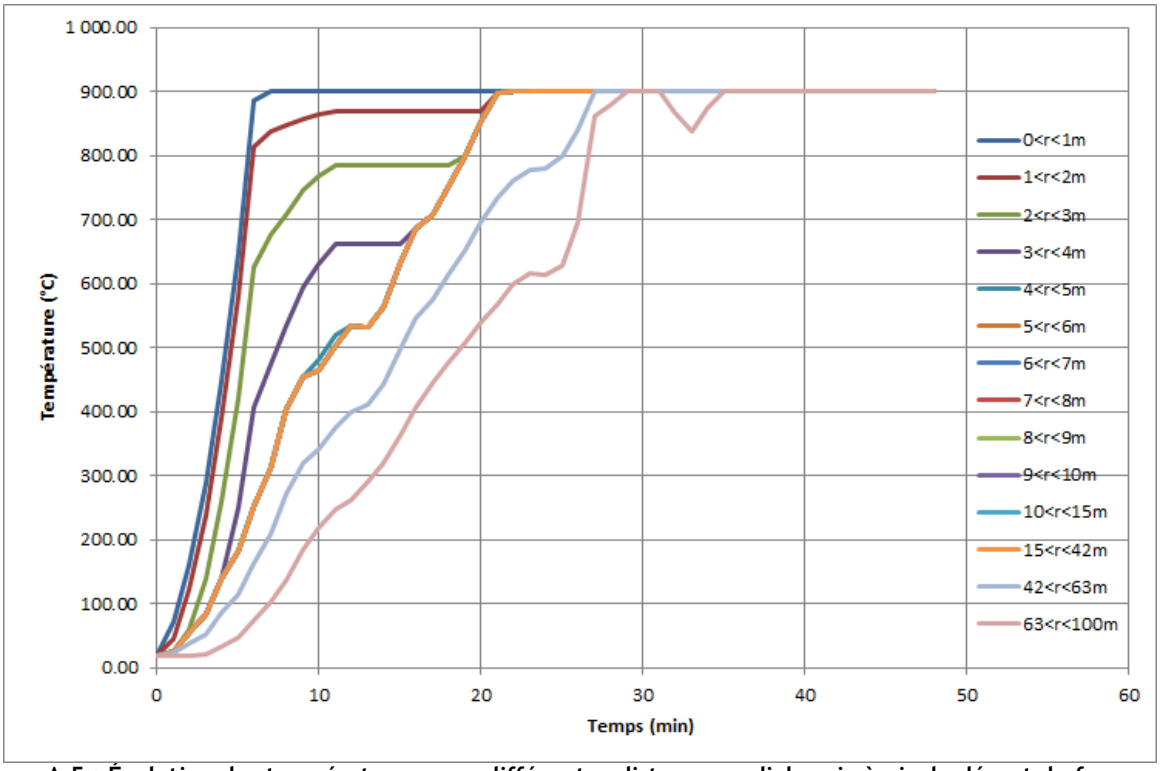


Figure A-5 : Évolution des températures pour différentes distances radiales vis-à-vis du départ de feu pour Z compris entre 4 et 5 m

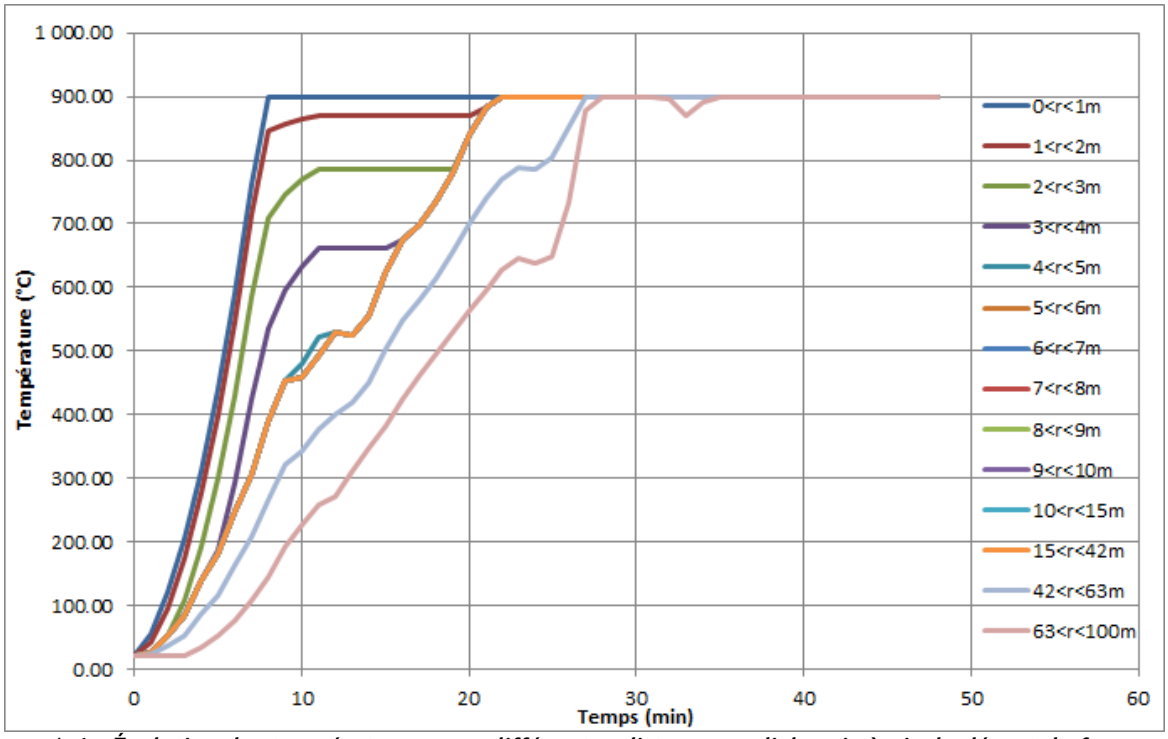


Figure A-6 : Évolution des températures pour différentes distances radiales vis-à-vis du départ de feu pour Z compris entre 5 et 6 m

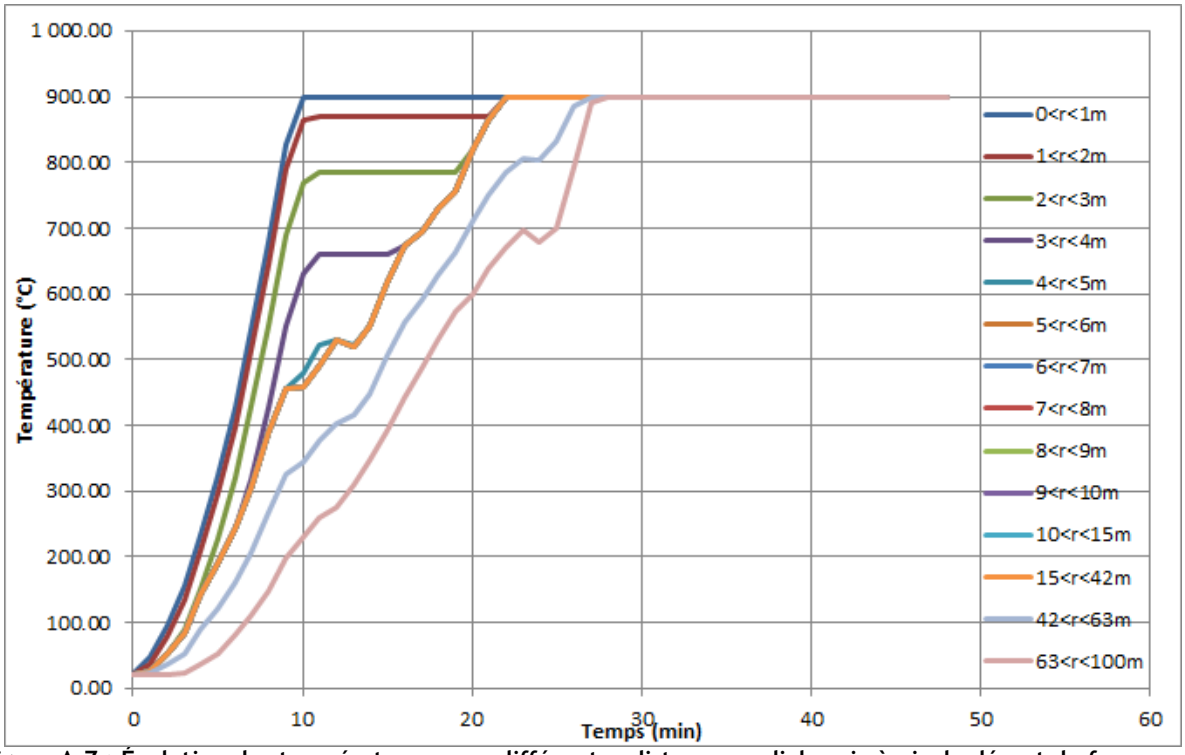


Figure A-7 : Évolution des températures pour différentes distances radiales vis-à-vis du départ de feu pour Z compris entre 6 et 7 m

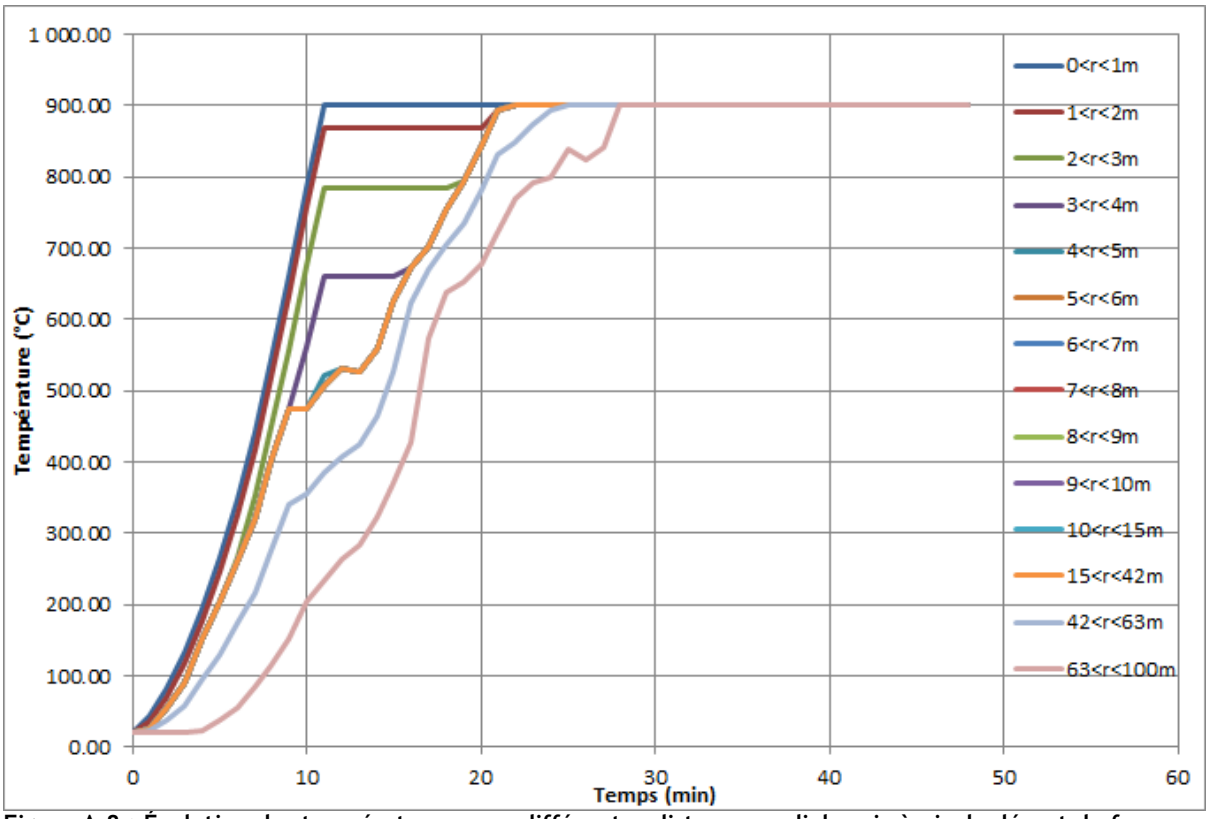


Figure A-8 : Évolution des températures pour différentes distances radiales vis-à-vis du départ de feu pour Z > 7 m