



Direction des Routes Ile-de-France

Avant Projet – Annexe 3 : Notice protection au feu

Autoroute A115

Modernisation de la tranchée couverte de Taverny (95)

16/02/18

LOMBARDI INGÉNIERIE
66 rue Escudier 92100 Boulogne
Billancourt
70 rue de la Villette 69003 LYON
+33 (0)4 26 84 26 10
info@lombardi-ing.fr
www.lombardi.ch



Lombardi

SUIVI DES MODIFICATIONS

Version	Date	Rédaction	Vérification
1	16/02/2018	Diego JUAREZ	Eric Cesmat

SUIVI DES MODIFICATIONS	1
I. PREAMBULE	3
I.1. OBJET	3
II. DOCUMENTS DE REFERENCE	4
II.1. REGLEMENTS.....	4
II.2. GUIDES ET DOCUMENTS TECHNIQUES	4
II.3. ARCHIVES	4
III. DESCRIPTION DE L'OUVRAGE	5
III.1. LOCALISATION ET AVOISINANTS	5
III.2. CLASSEMENT	6
III.3. GEOMETRIE	7
III.4. FERRAILLAGE	8
IV. HISTORIQUE ET METHODOLOGIE.....	9
IV.1. HISTORIQUE	9
IV.2. METHODOLOGIE	9
V. ANALYSE DU NIVEAU DE PROTECTION AU FEU.....	11
VI. PROTECTION AU FEU DE LA SECTION COURANTE	13
VI.1. ANALYSE DE L'ETUDE ANTERIEURE DE TENUE AU FEU DE 2005.....	13
VI.2. ANALYSE DE L'ETUDE ANTERIEURE DE TENUE AU FEU DE 2014.....	16
VI.3. CALCUL DE TENUE AU FEU DU PLOT N°5 AVEC SAFIR	17
VII. PROTECTION AU FEU DE LA SECTION AU DROIT DES VENTILATEURS ET DE LA RUE DE BEAUCHAMPS.....	36
VII.1. PLOTS N°20 ET N°7- BOSSAGES VENTILATEURS	36
VII.2. PLOT N°18 RUE DE BEAUCHAMPS	40
VIII. CONCLUSION	41

I. PREAMBULE

I.1. OBJET

L'objet de ce document est l'étude de tenue au feu et la mise en œuvre de protection au feu des ouvrages afin d'atteindre les objectifs et niveaux de résistance au feu prescrits par l'annexe n°2 de la circulaire 2000-63.

Il s'agit dans un premier temps de déterminer les durées de résistance au feu des structures principales de l'ouvrage lorsqu'elles sont exposées aux actions thermiques résultant des courbes température/temps prédéfinies :

- La courbe normalisée de feu à développement progressif, désigné par l'acronyme «CN »,
- La courbe de feu à développer rapide, désigné par l'acronyme « HCM »

Dans un deuxième temps, seront définies les zones à protéger au feu de la tranchée couverte et leur niveau de protection.

Les résultats obtenus donneront lieu aux travaux de protection pour atteindre les niveaux de résistance requis. La définition du type de protection au feu à mettre en place sera justifiée par les coûts, la maintenabilité et la durée dans le temps des protections.

II. DOCUMENTS DE REFERENCE

II.1. REGLEMENTS

Charges routières :

- Fascicule 61, titre II du CPC : « Conception, calcul et épreuves des ouvrages d'art – Programmes de charges et épreuves des ponts routes »

Tenue au feu, sécurité tunnels :

- Circulaire n°2000-63 du 25 août 2000 relative à la sécurité dans les tunnels du réseau routier national
- Arrêté du 22 mars 2004 relatif à la résistance au feu des produits, éléments de construction et d'ouvrages, JO n°78 du 1er avril 2004
- EN1991-1-2 : Eurocode 1 : Actions sur les structures – Partie 1-2 : Actions générales – Actions sur les structures exposées au feu, mai 2002
- EN1992-1-2 : Eurocode 2 : Calcul des structures en béton – Partie 1-2 : Règles générales – Calcul du comportement au feu, décembre 2004

Béton armé :

- Fascicule 62, titre I, section I du CCTG : « Règles techniques de conception et de calcul des ouvrages et constructions en béton armé suivant la méthode des états limites » – BAEL 91 révisé 99

II.2. GUIDES ET DOCUMENTS TECHNIQUES

- DTU Feu-Béton – norme NF P 92-701 : « Méthode de prévision par le calcul du comportement au feu des structures en béton »
- Guide méthodologique « Comportement au feu des tunnels routiers », CETU, mars 2005

II.3. ARCHIVES

Etudes antérieures :

- Etude de tenue au feu de la tranchée couverte de Taverny - Mémoire technique - Aout 2005 - DREIF / DOAT / GOAE - M. Pasquier
- Etude de tenue au feu de la tranchée couverte de Taverny - Juillet 2014 - DRIEA-IF / DiRIF / SAR / DIOA - P. Peyrac

Documents de l'ouvrage :

- Pièce 4.15 : Note de calcul Génie Civil – Tranchée Couverte section Taverny Mery sur Oise – Octobre 1994 – DDE Cergy Pontoise – B. WILHERES
- Dossier de récolement de la tranchée couverte de Taverny – notes de calculs et plans d'exécution

Remarque : Le jeu de plans est incomplet pour certains plots en particulier pour le plot n°18 il manque la nomenclature des aciers.

III. DESCRIPTION DE L'OUVRAGE

III.1. LOCALISATION ET AVOISINANTS

La tranchée couverte de Taverny est située à 20 km au Nord-Ouest de Paris, sur l'autoroute A115 qui traverse la commune de Taverny.

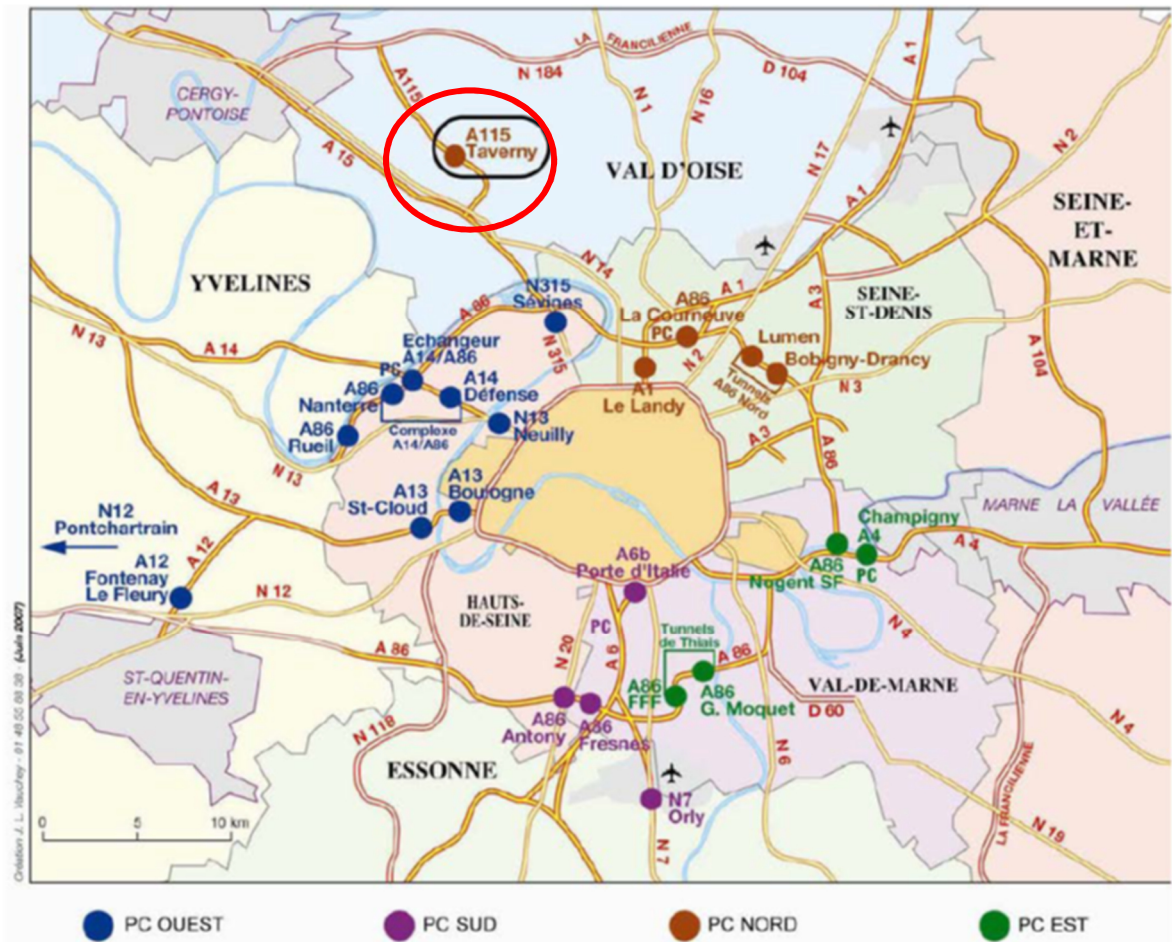


Figure 1 - Localisation de la tranchée couverte de Taverny

Orientée dans le sens Sud-Est / Nord-Ouest, elle est encadrée par l'échangeur n°4, à 400 m de la tête Sud de l'ouvrage, et l'échangeur n°5, à 400 m de la tête Nord.

La tranchée couverte de Taverny supporte essentiellement des espaces publics, et intercepte localement deux voiries orthogonales à l'ouvrage : la rue de Sedlcany, au Sud et la rue de Beauchamp au Nord, ainsi que le local technique.

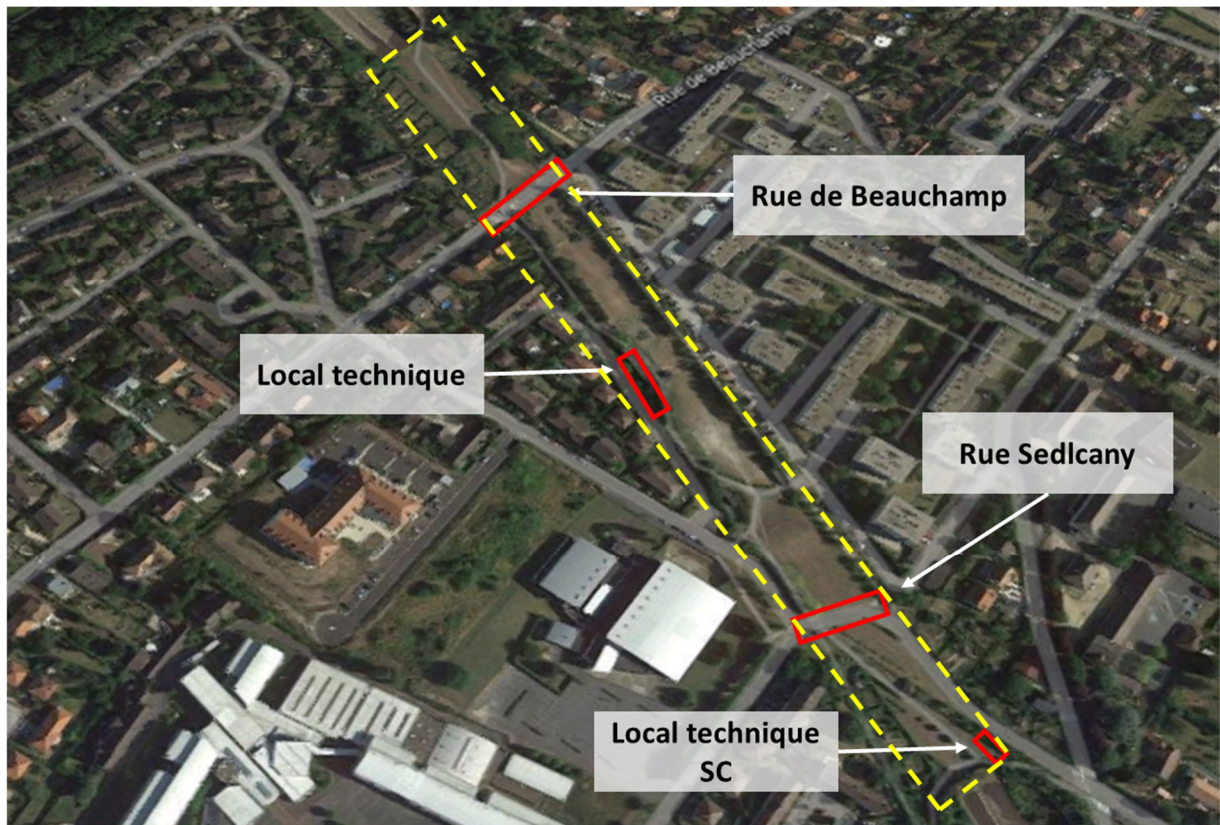


Figure 2 – Avoisinants de la tranchée couverte de Taverny

La tranchée comporte 4 issues de secours (2 par sens), 4 niches incendie et 4 niches de sécurité (2 par sens).

III.2. CLASSEMENT

Au sens de la Circulaire n° 2006-20, le tunnel de Taverny est classé de la manière suivante :

- Urbain,
- A deux tubes unidirectionnels,
- A trafic non faible,
- De gabarit supérieur à 3,5 m,
- De longueur supérieure à 500 m,
- Interdit aux transports de marchandises dangereuses,
- Avec un degré de surveillance D4 correspondant à une surveillance humaine permanente.

III.3.GEOMETRIE

La tranchée couverte de Taverny est constituée d'un double portique en béton armé fondé sur semelles superficielles.

Le tube Est a une ouverture qui varie de 10,65m à 12,06m, le tube Ouest a une ouverture constante de 10,65m. La hauteur libre est d'environ 5,30m sur l'ensemble du linéaire excepté au droit des bossages où sont implantés les accélérateurs pour ventilation longitudinale.

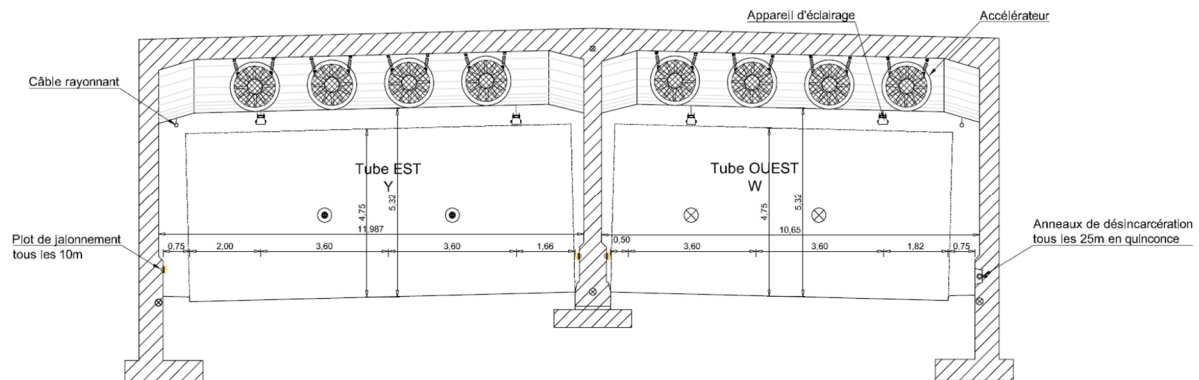


Figure 3 - Section transversale tranchée couverte au droit des bossages des ventilateurs

Longitudinalement la tranchée couverte a une longueur de 507m et la structure est composée de 24 plots de longueur variable. Les plots ont une géométrie assez proche, avec quelques particularités :

- Plot 2 : plot de tête Sud
- Plots 3, 4, 6, 9, 10, 11 : ouvertures tubes : Est / Ouest 10,65m
- Plot 5 : ouvertures tubes : Est / Ouest 10,65m + supporte la Rue Sedlcany
- Plot 7 : ouvertures tubes : Est / Ouest 10,65m + bossage accélérateur
- Plot 8 : ouvertures tubes : Est / Ouest 10,65m + issue de secours
- Plot 12 : ouvertures tubes : Est / Ouest 10,65m + support locaux électriques
- Plot 13 : ouvertures tubes : Est 10,68 à 10,81m / Ouest 10,65m
- Plot 14 : ouvertures tubes : Est 10,81 à 11,05m / Ouest 10,65m
- Plot 15 : ouvertures tubes : Est 11,05 à 11,45m / Ouest 10,65m
- Plot 16 : ouvertures tubes : Est 11,45 à 12,06m / Ouest 10,65m
- Plot 17 : ouvertures tubes : Est 12,045m / Ouest 10,65m + issue de secours
- Plot 18 : ouvertures tubes : Est 12,045m / Ouest 10,65m +supporte la rue de Beauchamps – le franchissement est biais à 80 grades – largeur droite du plot 9,98m
- Plot 19 : ouvertures tubes : Est 12,12 à 11,98m/ Ouest 10,65m
- Plot 20 : ouvertures tubes : Est 11,92 / Ouest 10,65m + bossage accélérateur
- Plot 21,22,23 : ouvertures tubes : Est 11,92 / Ouest 10,65m
- Plot 24 : plot tête Nord

Le synoptique suivant reprend les caractéristiques longitudinales de l'ouvrage :

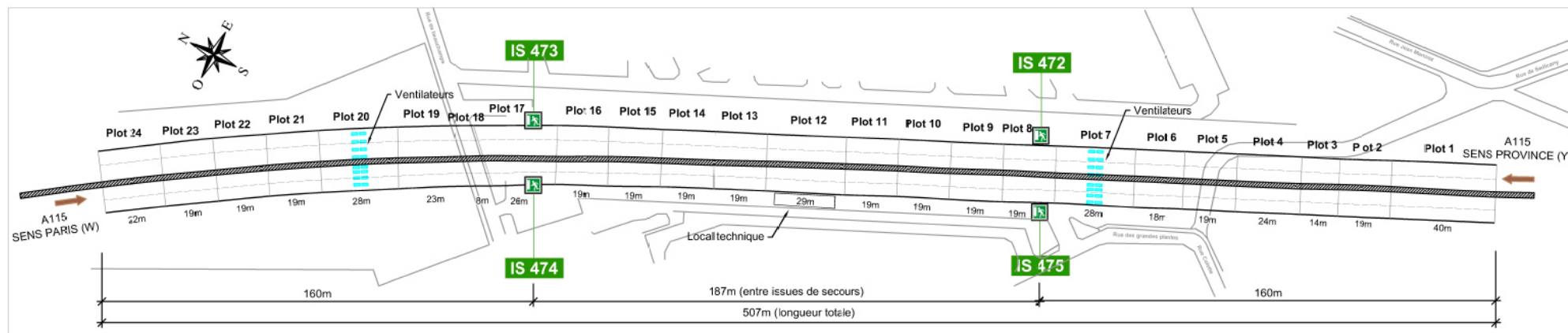


Figure 4 : Synoptique tranchée couverte de Taverny

III.4.FERRAILLAGE

L'analyse de la note de calcul : *Pièce 4.15 : Note de calcul Génie Civil – Tranchée Couverte section Taverny Mery sur Oise – Octobre 1994 – DDE Cergy Pontoise – B. WILHERES*, et du dossier de recollement de l'ouvrage indique que la Tranchée couverte de Taverny comprend en termes de ferrailage trois sections caractéristiques :

- Section courante comprenant le plot supportant le local technique (n°12), les plots des issues de secours (n°17 et n°8) et le plot au droit de la Rue de Sedlcany (Plot n°5)
- Section au droit des bossages ventilateurs
- Section au droit des Rues de Beauchamp

IV. HISTORIQUE ET METHODOLOGIE

IV.1. HISTORIQUE

Deux études antérieures de tenue au feu ont été réalisées pour la tranchée couverte de Taverny :

- **Etude de tenue au feu de la tranchée couverte de Taverny - Mémoire technique - Aout 2005 - DREIF / DOAT / GOAE - M. Pasquier**

L'objet de cette étude est d'évaluer stabilité au feu des structures du plot n°12 supportant le local technique de la tranchée couverte de Taverny. Cette première démarche a conclu à une durée de stabilité au feu de 30 min sous courbe CN et de 20 min, sous courbe HCM, et ce, sans prise en compte des phénomènes d'écaillage et d'éclatement du béton.

- **Etude de tenue au feu de la tranchée couverte de Taverny - Juillet 2014 - DRIEA-IF / DIRIF / SAR / DIOA - P. Peyrac**

Cette deuxième étude, plus fine, a été conduite en adoptant un niveau d'analyse intermédiaire entre les degrés G2 et G3, tels que définis par le Guide Comportement au feu des tunnels routiers du CETU – Mars 2005. Cette étude a conclu à une durée de résistance au feu de 60 min sous courbe CN, et de 40 min sous courbe HCM pour les plots en section courante, sans prise en compte de phénomènes d'écaillage du béton. Des tests de sensibilité, menés avec une hypothèse d'écaillage du béton de 2 cm mettent en évidence un impact faible sur ces durées ; en revanche, pour une valeur d'écaillage du béton égale à 3 cm, l'étude conclut à l'impossibilité de justifier la stabilité au feu des structures.

Nous constatons que :

- Les études précédentes sont conduites sur les plots courants de la couverture.
- Pour la section au droit de la Rue de Beauchamp (plot n°18) il est indiqué dans l'étude de 2014 : « le jeu de plan est incomplet pour certains plots en particulier pour le plot n°18 il manque la nomenclature des aciers ». Cette information est toujours d'actualité.
- La section du plot n°18, et celles au droit des bossages ventilateurs, n'ont pas fait l'objet d'une étude antérieure.

IV.2. METHODOLOGIE

La méthodologie proposée à ce stade d'avant-projet pour l'étude de tenue au feu et la mise en œuvre de protection au feu des ouvrages s'appuie pour la section courante de la tranchée sur une analyse critique des études antérieures et un contre calcul de vérification au moyen du code de calcul SAFIR.

Pour les sections au droit des bossages ventilateurs, ne faisant pas l'objet d'études antérieures, la méthodologie proposée s'appuie sur une analyse comparative avec la section courante et sur une préconisation qualitative de protection au feu.

Le plot n°18, qui correspond au franchissement de la rue de Beauchamps est très différent des plots courants (biais, dalle d'épaisseur variable). Il n'a pas pu être étudié en raison de plans de ferrailage incomplets. Une protection au feu de ce plot est prise comme mesure de précaution.

Le logigramme suivant résume la méthodologie adoptée pour cette étude :

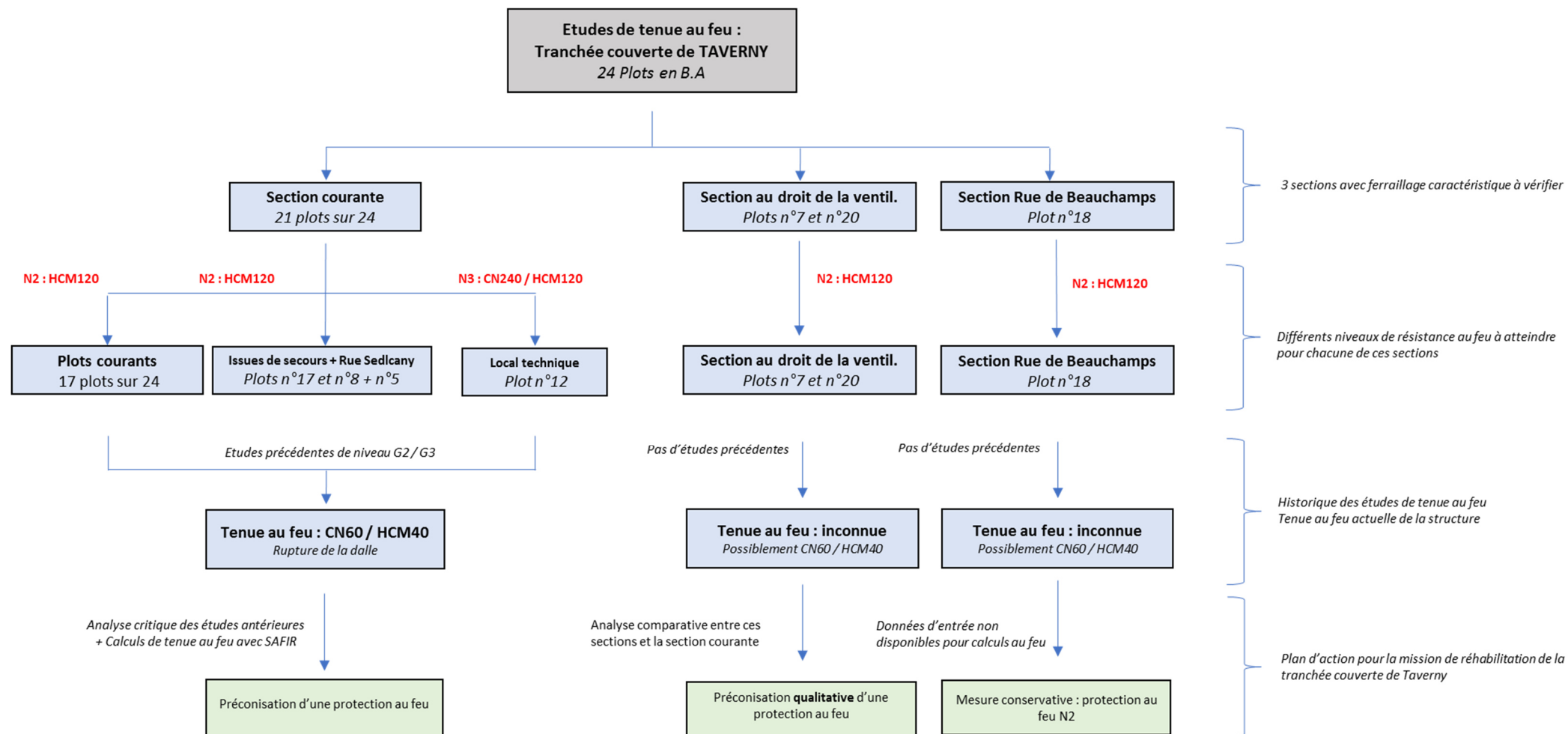


Figure 5 : Logigramme de méthodologie pour les études de tenue au feu d'AVP

V. ANALYSE DU NIVEAU DE PROTECTION AU FEU

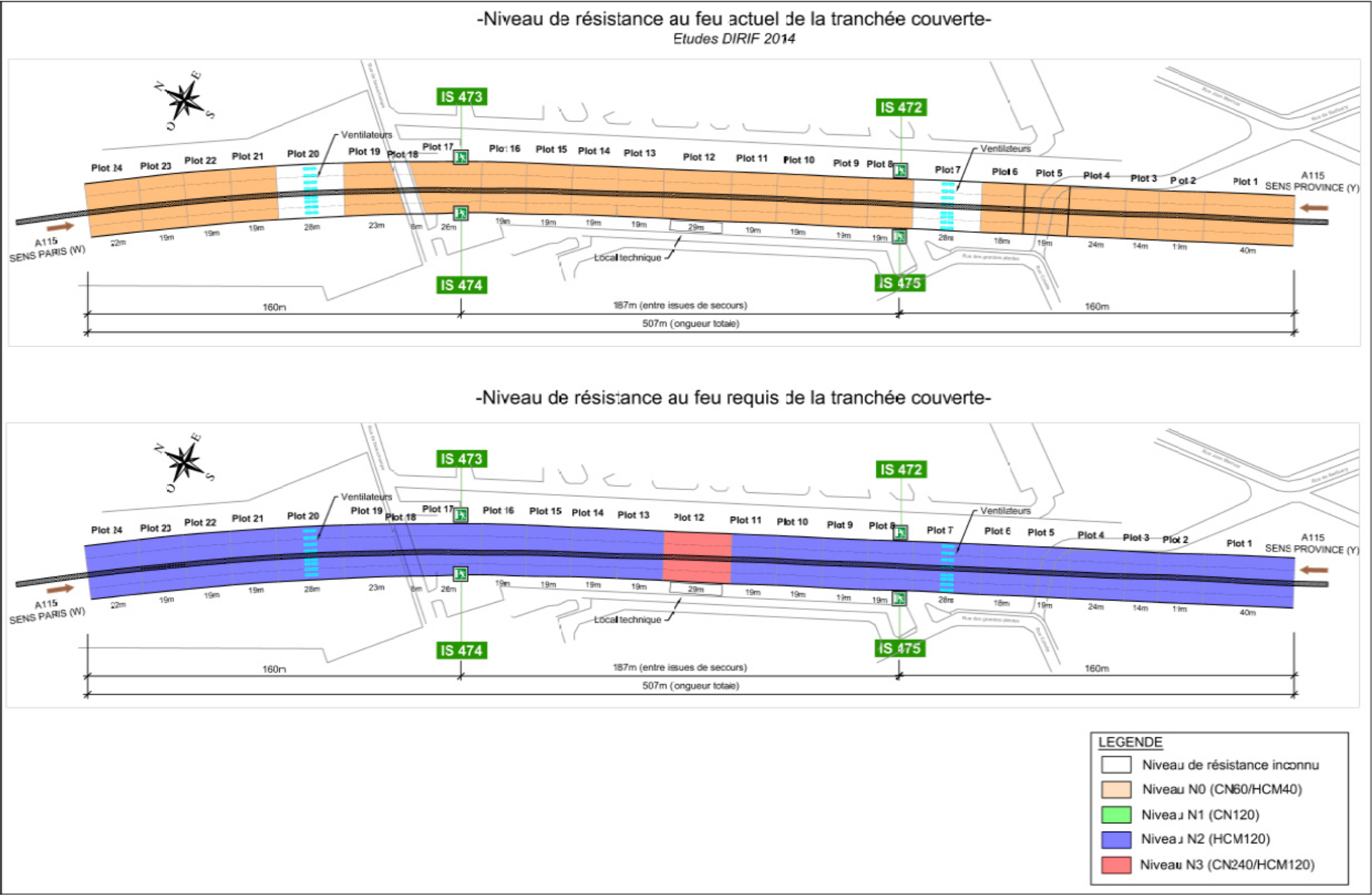
Le Programme indique qu'a priori le niveau N1 est requis à l'exception des points singuliers, sous les voiries de surface traversantes et au droit du local technique, qui requièrent un niveau N3. Par ailleurs, la pièce 3 du Dossier de Sécurité recommande un niveau de résistance au feu N2 au droit des issues de secours.

Dans le « Mémoire d'Avant-Projet – Note De Synthèse » au §III.3.4 nous avons procédé à une analyse approfondie des différents éléments de l'Ouvrage et les exigences de résistance au feu à atteindre vis-à-vis de la réglementation (§4.2 de la Circulaire Interministérielle n.2000-63 du 25.08.2000).

Les conclusions de cette analyse sont présentées par la suite :

Section	Partie de l'ouvrage	Programme	Préconisation MOE
Section courante (17 plots sur 24)	Plafond	N1	N2
	Piédroits latéraux		
	Piédroit central		
Section au-dessous de la rue Beauchamp (plot n.18)	Plafond	N3	N2
	Piédroits		
Section au-dessous du local technique (plot n.12)	Plafond	N3	N3
	Piédroits		
Section au-dessous de la rue Sedlcany (plot n.7)	Plafond	N3	N2
	Piédroits		
Section au droit des issues de secours (plot n. 8 et 17)	Plafonds	N2	N2
	Piédroits		

Le synoptique suivant illustre le niveau de résistance au feu actuel de la tranchée couverte comparé au niveau de résistance requis par la réglementation.



VI. PROTECTION AU FEU DE LA SECTION COURANTE

L'analyse critique des études de tenue au feu de 2005 et 2014 est présentée par la suite. Pour chaque étude antérieure, notre analyse se structure en trois parties :

- 1) Analyse des hypothèses de calcul
- 2) Analyse des hypothèses de modélisation
- 3) Analyse des vérifications de la tenue au feu
- 4) Conclusion sur la fiabilité de chaque étude antérieure et son utilité à préconiser une protection au feu sur les plots étudiés.

Un contre calcul portant sur le plot n°5 effectué à l'aide du code de calcul SAFIR permet de jauger la précision et la validité des études antérieures.

VI.1. ANALYSE DE L'ETUDE ANTERIEURE DE TENUE AU FEU DE 2005

L'objet de ce document était d'évaluer la tenue au feu des structures d'un plot représentatif de la tranchée couverte de Taverny, le plot choisit est le plot n°12. Ce plot supporte les locaux électriques de la tranchée couverte.

VI.1.1. Hypothèses de calcul

Commentaire :

Les calculs sont effectués en utilisant un degré d'analyse G2 selon les recommandations du guide « comportement au feu des tunnels routiers » du CETU. Les caractéristiques de l'étude suivantes :

- L'évaluation du champ de température dans l'élément tient compte de la variation des caractéristiques thermo-physiques avec la température ;
- La détermination des sollicitations mécaniques est faite selon un modèle linéaire dans sa globalité mais non linéaire localement : prise en compte d'une ou de plusieurs rotules plastiques à chaque fois qu'un effort résistant ELU est atteint dans une section ;
- Le mode de vérification de la résistance de la structure est fait selon un modèle linéaire dans sa globalité mais non linéaire localement : admissibilité des déformations mécaniques des matériaux des rotules plastiques et nombre de rotules plastiques inférieur ou égal au degré d'hyperstaticité.

Analyse :

Le degré d'analyse utilisé n'est pas du niveau le plus élevé.

VI.1.2. Hypothèses de modélisation

Commentaire :

Le local technique « TC Taverny » est implanté pour partie au-dessus du tube W, sa structure est reliée à celle du tunnel comme représenté dans l'image ci-dessous :

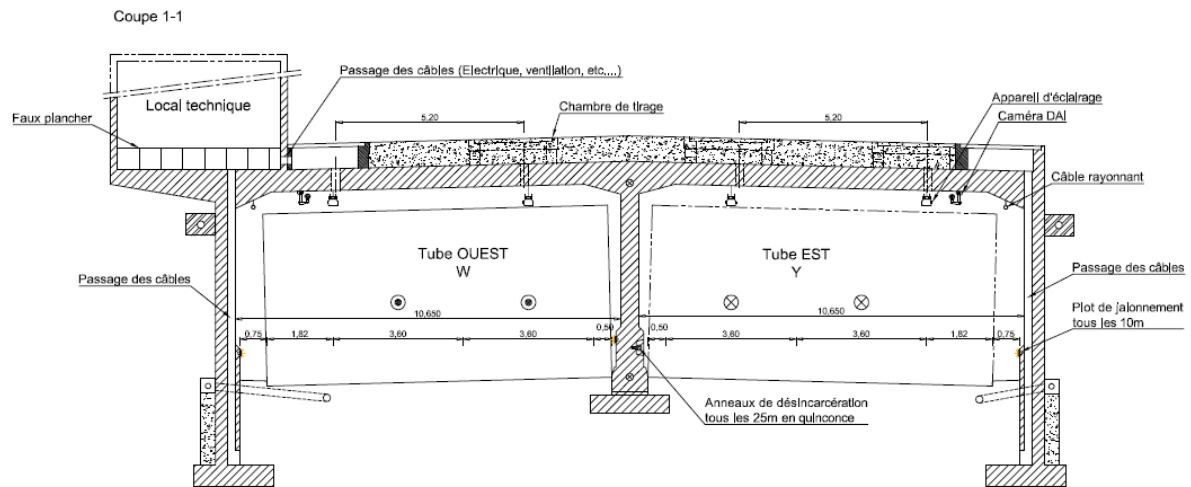


Figure 6 - Coupe transversale ouvrage au droit du local technique

Analyse :

L'étude antérieure de tenue au feu de 2005 ne fait aucune référence au local technique tant au niveau des chargements supplémentaires que son occupation et son poids induisent dans le portique, tant sur le transfert de charges qui existe entre les deux structures.

VI.1.1. Vérification de la tenue au feu

Commentaire :

- 1) L'effort normal n'est pas pris en compte dans le calcul des moments résistants pour la dalle. Il est pris en compte à sa valeur minimale pour les piédroits ;
- 2) Pour le calcul sous courbe HCM, le phénomène d'écaillage du béton n'est pas pris en compte.
- 3) Seule la tenue au feu de la dalle est précisée dans l'étude. La tenue au feu des piédroits et du mur central est inconnue

Analyse :

- 1) L'effort normal induit par la poussée des terres et le phénomène de dilatation thermique sous incendie a un rôle stabilisant sur la dalle. En effet l'effort normal de compression peut améliorer la capacité résistante de la dalle, le négliger est une hypothèse conservatrice.
- 2) Cette hypothèse est peu vraisemblable.

L'écaillage est un phénomène qui se matérialise par un détachement progressif et continu, de petits morceaux de béton expulsés avec force du parement exposé au feu. Ces écaillages de quelques centimètres de diamètre et de quelques millimètres d'épaisseur, assimilables à des copeaux minces, sont observées dès les premiers instants d'exposition aux effets du feu et pendant toute la durée de l'incendie. Ainsi, l'épaisseur de l'élément en béton diminue de manière permanente et quasi linéaire durant toute la durée de l'exposition au feu, étant précisé que la présence d'armatures métalliques ne modifie en rien les effets observés. Ce phénomène, extrêmement complexe, dépend de nombreux paramètres telles que la composition du béton, la nature des granulats, sa teneur en eau, sa compacité, mais également la géométrie des éléments structuraux, les contraintes mécaniques qui s'exercent ainsi que les actions thermiques qui s'exercent sur l'ouvrage.

Comme le précisent l’Instruction technique et les guides méthodologiques du CETU relatifs au comportement au feu des tunnels routiers, il n’existe pas, dans l’état actuel des connaissances scientifiques, de modèles prédictifs de l’écaillage du béton dont la fiabilité soit démontrée. Ainsi, seuls des essais de performance permettent de déterminer les épaisseurs de béton écaillé à prendre en considération. Ceci étant, ces essais étant très lourds à mettre en œuvre, une approche pragmatique consiste à procéder à l’évaluation des performances de résistance au feu, dans un premier temps sans prise en compte de l’écaillage, puis avec prise en compte d’une épaisseur forfaitaire, étant précisé que dans le cas où le niveau de résistance au feu prescrit par la réglementation est atteint, un essai de performance doit être effectué afin de vérifier la pertinence de la valeur forfaitaire retenue, et si besoin, reprend les calculs avec les données mesurées lors des essais. Bien que ces valeurs ne reposent sur aucun fondement scientifique, il est communément admis en première approche, pour des bétons traditionnels peu compacts, de retenir de manière purement conventionnelle une valeur d’écaillage du béton comprise entre 30 et 50 mm, ces valeurs devant ensuite être confirmées par des essais. Ainsi, la méthodologie d’évaluation proposée, qui s’appuie sur une démarche progressive destinée à éviter autant que possible la réalisation d’essais très lourds, est illustrée sur le logigramme ci-dessous.

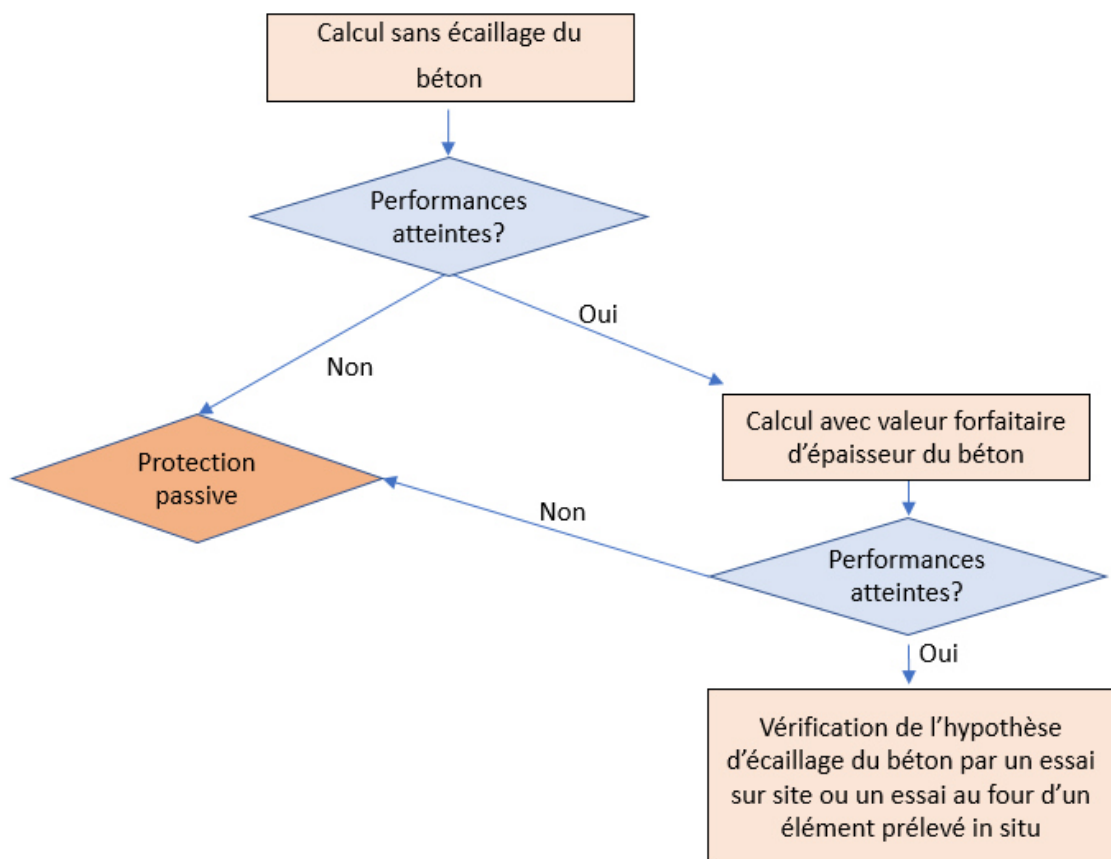


Figure 7 : Démarche des calculs de vérification au feu avec prise en compte de l’écaillage du béton

- 3) L'étude antérieure de tenue au feu de 2005 indique que la dalle est résistance à un feu CN30 et HCM20. Aucune indication est donnée sur le niveau de résistance des piédroits et du mur central.

VI.1.2. Conclusions sur l'étude antérieure de tenue au feu de 2005

L'étude antérieure de tenue au feu de 2005 conclue que la structure sans protection est vérifiée pour une durée d'incendie maximum **CN30 et HCM20**. Ces valeurs concernent la dalle de couverture et nous paraissent, d'après notre retour d'expérience sur des projets similaires, faibles. En effet, la non prise en compte de l'effort normal dans le calcul des moments résistants pour la dalle est peu réaliste et très conservative.

VI.2. ANALYSE DE L'ETUDE ANTERIEURE DE TENUE AU FEU DE 2014

L'objet de ce document était d'évaluer la tenue au feu de plots représentatifs de la section courante de la tranchée couverte de Taverny (plots n°5 et plot n°21).

VI.2.1. Hypothèses de calcul

Commentaire :

Les calculs sont effectués selon les recommandations du guide « comportement au feu des tunnels routiers » du CETU en utilisant un degré d'analyse intermédiaire entre les degrés G2 et G3. Les principales étapes du déroulement d'un calcul sont :

- 1) Evaluation du champ de température dans l'élément Calcul thermique prenant en compte les caractéristiques thermophysiques qui varient avec la température
- 2) Détermination des sollicitations mécaniques suivant un modèle non linéaire :
 - Déformation réelle dans les sections (prise en compte des autocontraintes dues au profil de température non linéaire)
 - Matériaux élasto-plastique dont la loi de comportement est associée à la température locale
 - Prise en compte de la fissuration du béton tendu par modèle de comportement

Analyse :

Le degré d'analyse utilisé apporte une précision suffisante à l'étude

VI.2.2. Hypothèses de modélisation

Commentaire :

La modélisation du ferrailage de sections, le chargement et le scénario d'incendie généralisé sont conformes à une analyse réaliste et efficace du tunnel pour les plots en section courante.

Analyse :

En analysant les documents disponibles dans le dossier de recollement de l'ouvrage, il semblerait qu'au moment de la construction la Rue Sedlcany n'existait pas. En effet le plot n°5 aurait été conçu et construit comme un plot de section courante et puis revérifié au calcul au moment de la construction de la Rue Sedlcany dans le futur.

VI.2.3. Vérification de la tenue au feu

Commentaire :

- 1) Pour le calcul sous courbe HCM, le phénomène d'écaillage du béton n'est pas pris en compte.
- 2) Seule la tenue au feu de la dalle est précisée dans l'étude. La tenue au feu des piédroits et du mur central est inconnue

Analyse :

- 1) Voir §VI.1.1
- 2) L'étude antérieure de tenue au feu de 2014 indique que la dalle est résistance à un feu CN60 et HCM40. Le calcul de vérification s'arrête et aucune indication est donnée sur le niveau de résistance des piédroits et du mur central. Cette donnée est cependant essentielle en considérant que si uniquement la dalle est protégée au feu pour résister un incendie CN240 et HCM120 en laissant les piédroits et le mur central non protégés nous avons aucune assurance que ceux-ci résisteront ces scénarios d'incendie.

VI.2.1. Conclusions sur l'étude antérieure de tenue au feu de 2014

L'étude antérieure de tenue au feu de 2014 conclue que la structure des plots courants sans protection est vérifiée pour une durée d'incendie maximum **CN60 et HCM40**. Cette étude est conforme aux recommandations du CETU (Comportement au feu des tunnels routiers, mars 2005) et à la norme Eurocode NF EN 1992-1-2.

Concernant les piédroits et le mur central, la résistance au feu n'est pas explicitée dans l'ancienne étude.

VI.3. CALCUL DE TENUE AU FEU DU PLOT N°5 AVEC SAFIR

VI.3.1. Méthodologie

Les méthodes de calcul sont conformes aux recommandations du CETU et à la norme Eurocode NF EN 1992-1-2.

Les calculs de résistance au feu sont réalisés au moyen du Code de calculs aux éléments finis, Safir, selon le degré d'analyse G3 (évaluation par calcul avancé).

Cette analyse prend en considération les hypothèses suivantes :

- variation des caractéristiques thermo-physiques avec la température (α , Cp),
- non-linéarité des éléments de la structure (variation non linéaire de la température dans la section de béton, comportement élasto-plastique des matériaux avec prise en compte de la fissuration du béton.

Les calculs de vérification comprennent ainsi les étapes suivantes :

- modélisation de la structure (modèle grillage de poutre) sous le logiciel SAFIR,
- analyse thermique 2D des sections de béton armé pour déterminer l'évolution de la température du béton et des aciers,
- analyses des sollicitations et comparaison avec les moments résistants des sections chauffées,

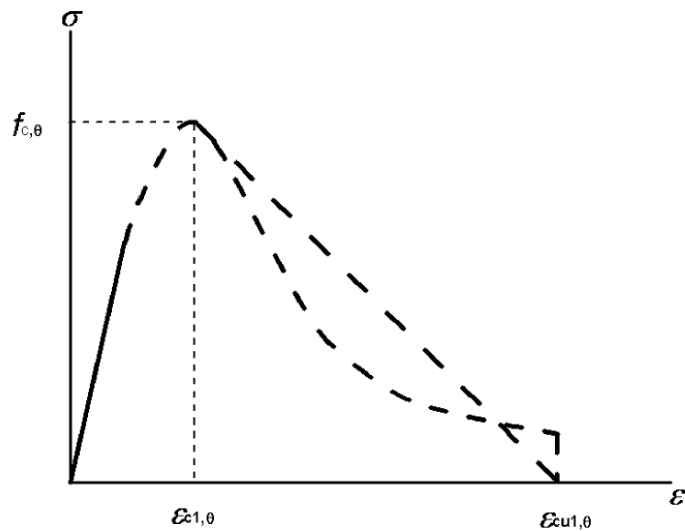
- vérification de l'admissibilité des rotations des rotules plastiques (rotations limitées à 25mrad).

VI.3.2. Hypothèses

- Caractéristiques mécaniques des matériaux
 - Béton

L'ouvrage a été réalisé avec un béton de résistance à la compression $f_{ck}=30\text{MPa}$ (Cf. note de calcul d'origine).

Les caractéristiques mécaniques du béton retenues sont conformes à l'Eurocode 2-1-2. Un béton à granulats siliceux est considéré. Les caractéristiques de compression sont rappelées aux pages suivantes. La résistance à la traction du béton est négligée.



Courbe contrainte déformation du béton en compression

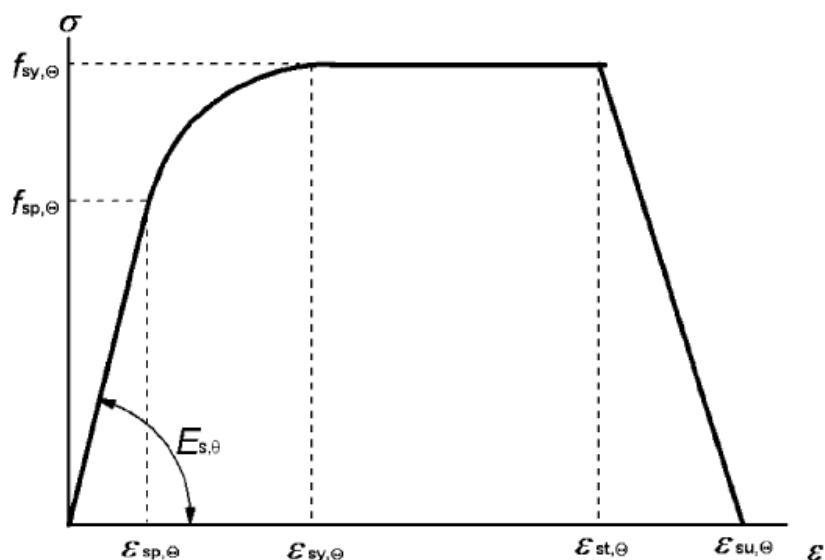
Intervalle	Contrainte $\sigma(\theta)$
$\epsilon \leq \epsilon_{c1,\theta}$	$\frac{3\epsilon f_{c,\theta}}{\epsilon_{c1,\theta} \left(2 + \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_{c1,\theta}} \right)^3 \right)}$
$\epsilon_{c1(\theta)} < \epsilon \leq \epsilon_{cu1,\theta}$	Pour des questions d'ordre numérique, il convient d'adopter une partie descendante. Les modèles linéaires ou non linéaires sont admis.

Température du béton θ	Granulats siliceux			Granulats calcaires		
	$f_{c,\theta} / f_{ck}$	$\varepsilon_{c1,\theta}$	$\varepsilon_{cu1,\theta}$	$f_{c,\theta} / f_{ck}$	$\varepsilon_{c1,\theta}$	$\varepsilon_{cu1,\theta}$
[°C]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
1	2	3	4	5	6	7
20	1,00	0,0025	0,0200	1,00	0,0025	0,0200
100	1,00	0,0040	0,0225	1,00	0,0040	0,0225
200	0,95	0,0055	0,0250	0,97	0,0055	0,0250
300	0,85	0,0070	0,0275	0,91	0,0070	0,0275
400	0,75	0,0100	0,0300	0,85	0,0100	0,0300
500	0,60	0,0150	0,0325	0,74	0,0150	0,0325
600	0,45	0,0250	0,0350	0,60	0,0250	0,0350
700	0,30	0,0250	0,0375	0,43	0,0250	0,0375
800	0,15	0,0250	0,0400	0,27	0,0250	0,0400
900	0,08	0,0250	0,0425	0,15	0,0250	0,0425
1 000	0,04	0,0250	0,0450	0,06	0,0250	0,0450
1 100	0,01	0,0250	0,0475	0,02	0,0250	0,0475
1 200	0,00	-	-	0,00	-	-

Béton - Variation des propriétés mécaniques en fonction de la température

- Armatures de béton armé

Les armatures sont des aciers HA de type Fe E500, $f_{yk}=500\text{MPa}$ (Cf. note de calcul d'origine). Les caractéristiques mécaniques de l'acier chauffé (acier laminé à froid) sont données ci-après.



Intervalle	Contrainte $\sigma(\theta)$	Module tangent
$\varepsilon_{sp,\theta}$	$\varepsilon E_{s,\theta}$	$E_{s,\theta}$
$\varepsilon_{sp,\theta} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{sy,\theta}$	$f_{sp,\theta} - c + (b/a)[a^2 - (\varepsilon_{sy,\theta} - \varepsilon)^2]^{0,5}$	$\frac{b(\varepsilon_{sy,\theta} - \varepsilon)}{a[a^2 - (\varepsilon - \varepsilon_{sy,\theta})^2]^{0,5}}$
$\varepsilon_{sy,\theta} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{st,\theta}$	$f_{sy,\theta}$	0
$\varepsilon_{st,\theta} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{su,\theta}$	$f_{sy,\theta} [1 - (\varepsilon - \varepsilon_{st,\theta}) / (\varepsilon_{su,\theta} - \varepsilon_{st,\theta})]$	—
$\varepsilon = \varepsilon_{su,\theta}$	0,00	—
Paramètre *)	$\varepsilon_{sp,\theta} = f_{sp,\theta} / E_{s,\theta}$ $\varepsilon_{sy,\theta} = 0,02$ $\varepsilon_{st,\theta} = 0,15$ $\varepsilon_{su,\theta} = 0,20$ Armature de classe A : $\varepsilon_{st,\theta} = 0,05$ $\varepsilon_{su,\theta} = 0,10$	
Fonctions	$a^2 = (\varepsilon_{sy,\theta} - \varepsilon_{sp,\theta})(\varepsilon_{sy,\theta} - \varepsilon_{sp,\theta} + c/E_{s,\theta})$ $b^2 = c(\varepsilon_{sy,\theta} - \varepsilon_{sp,\theta})E_{s,\theta} + c^2$ $c = \frac{(f_{sy,\theta} - f_{sp,\theta})^2}{(\varepsilon_{sy,\theta} - \varepsilon_{sp,\theta})E_{s,\theta} - 2(f_{sy,\theta} - f_{sp,\theta})}$	

*) Les valeurs des paramètres $\varepsilon_{pt,\theta}$ et $\varepsilon_{pu,\theta}$ pour l'acier de précontrainte peuvent être obtenues dans le Tableau 3.3. Les armatures de classe A sont définies dans l'Annexe C de l'EN 1992-1-1

Température de l'acier $\theta [^{\circ}\text{C}]$	$f_{sy,\theta} / f_{yk}$		$f_{sp,\theta} / f_{yk}$		$E_{s,\theta} / E_s$	
	laminé à chaud	formé à froid	laminé à chaud	formé à froid	laminé à chaud	formé à froid
1	2	3	4	5	6	7
20	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
100	1,00	1,00	1,00	0,96	1,00	1,00
200	1,00	1,00	0,81	0,92	0,90	0,87
300	1,00	1,00	0,61	0,81	0,80	0,72
400	1,00	0,94	0,42	0,63	0,70	0,56
500	0,78	0,67	0,36	0,44	0,60	0,40
600	0,47	0,40	0,18	0,26	0,31	0,24
700	0,23	0,12	0,07	0,08	0,13	0,08
800	0,11	0,11	0,05	0,06	0,09	0,06
900	0,06	0,08	0,04	0,05	0,07	0,05
1 000	0,04	0,05	0,02	0,03	0,04	0,03
1 100	0,02	0,03	0,01	0,02	0,02	0,02
1 200	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Caractéristique des aciers laminés à froid

- Propriétés thermiques des matériaux

Les propriétés thermiques du béton armé sont données par l'EC2-1-2 et son annexe nationale.

- Déformation thermique du béton $\varepsilon_{c\theta} = \alpha(T_Y - T_0)$:

Granulats siliceux :

■ $\varepsilon_c(\theta) = -1,8 \times 10^{-4} + 9 \times 10^{-6} \theta + 2,3 \times 10^{-11} \theta^3$ pour $20^{\circ}\text{C} \leq \theta \leq 700^{\circ}\text{C}$

■ $\varepsilon_c(\theta) = 14 \times 10^{-3}$ pour $700^{\circ}\text{C} < \theta \leq 1\,200^{\circ}\text{C}$

- Déformation thermique de l'acier $\varepsilon_{s\theta} = \alpha(T_Y - T_0)$:

■ $\varepsilon_s(\theta) = -2,416 \times 10^{-4} + 1,2 \times 10^{-5} \theta + 0,4 \times 10^{-8} \theta^2$ pour $20^{\circ}\text{C} \leq \theta \leq 750^{\circ}\text{C}$

■ $\varepsilon_s(\theta) = 11 \times 10^{-3}$ pour $750^{\circ}\text{C} < \theta \leq 860^{\circ}\text{C}$

■ $\varepsilon_s(\theta) = -6,2 \times 10^{-3} + 2 \times 10^{-5} \theta$ pour $860^{\circ}\text{C} < \theta \leq 1\,200^{\circ}\text{C}$

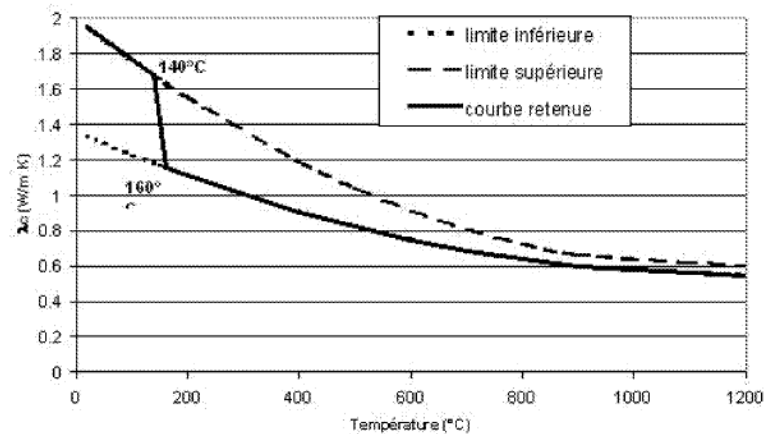
- Chaleur spécifique $C_p(\theta)$ en $J.Kg^{-1}.K^{-1}$:

Granulats siliceux et calcaires :

- $c_p(\theta) = 900$ (J/kg K) pour $20\text{ °C} \leq \theta \leq 100\text{ °C}$
- $c_p(\theta) = 900 + (\theta - 100)$ (J/kg K) pour $100\text{ °C} < \theta \leq 200\text{ °C}$
- $c_p(\theta) = 1\,000 + (\theta - 200)/2$ (J/kg K) pour $200\text{ °C} < \theta \leq 400\text{ °C}$
- $c_p(\theta) = 1\,100$ (J/kg K) pour $400\text{ °C} < \theta \leq 1\,200\text{ °C}$

- Conductivité thermique λ_c en W/mK.

La variation de la conductivité thermique en fonction de la température du béton est fixée par l'annexe nationale à l'EC2-1-2.



pour $\theta \leq 140\text{ °C}$, $\lambda_c = 2 - 0,2451 (\theta/100) + 0,0107 (\theta/100)^2$ W/mK

pour $140 < \theta \leq 160\text{ °C}$, $\lambda_c = -0,02604 \theta + 5,324$ W/mK

pour $\theta > 160\text{ °C}$, $\lambda_c = 1,36 - 0,136 (\theta/100) + 0,0057 (\theta/100)^2$ W/mK

- Courbes de température temps

Les calculs de résistance au feu sont menés en considérant les courbes température-temps :

- CN ou ISO 834 ($t_{max}=240mn$) :

$$\theta = 345 * \log(8t + 1) + 20$$

- et HCM ($t_{max}=120mn$) :

$$\theta = 1280 * (1 - 0,325e^{-0,167t} - 0,675e^{-2,5t}) + 20$$

VI.3.3. Modèle de calcul

Le calcul a été réalisé grâce à un modèle barres éléments finis établi sur le logiciel de calcul au feu SAFIR. Le modèle comprend la modélisation des structures (traverses et piédroits) et le ferrailage des différents éléments. Ce type de modèle est non-linéaire, il prend en compte la variation des propriétés thermiques des matériaux en fonction de la température, la fissuration du béton, la création de rotules plastiques et la redistribution des efforts.

Nous prenons comme hypothèses de modélisation :

- Le portique est symétrique, l'étude sera réalisée en considérant une configuration d'incendie : incendie dans un des tubes
- Comme pour l'étude 2014 Les semelles ne sont pas modélisées et les piédroits sont considérés comme encastrés à leur base.
- Les charges appliquées, conformes à la note de calcul d'origine sont :
 - Charges permanentes (G) : poids propre ; remblais sur traverses de 0,50m ; poussée des terres sur les piédroits avec un coefficient de poussée active fixé à sa valeur moyenne de 0,30 (cf. note de 2014)
 - Charges d'exploitation (Q) : charge uniforme de 1t/m² ; A(I) du fasc. 61 titre II du CPC pour les charges de chaussée
 - Effet de la température (Fa)
- Les calculs sont menés à l'état limite ultime en situation accidentelle : (G) + (Fa) + $\psi_{11}(Q)$ avec $\psi_{11}=0,6$ coefficient de la valeur représentative fréquente des charges d'exploitation.

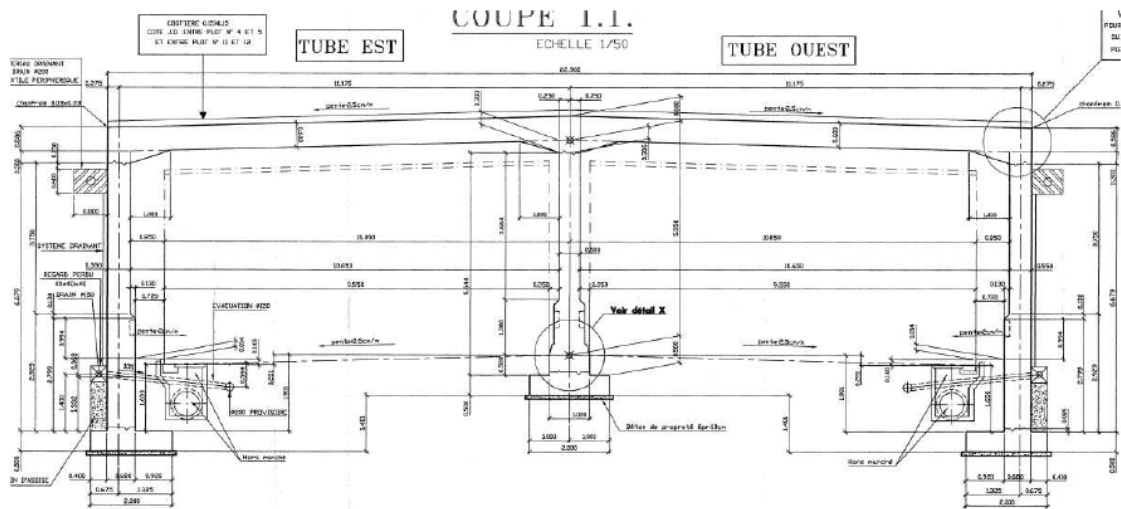


Figure 8 : Description du plot n°5 Cf. plans TRC006 et TRF016, TRF017, TRN017

- Le portique est modélisé sur une largeur 1m par des barres de caractéristiques suivantes :

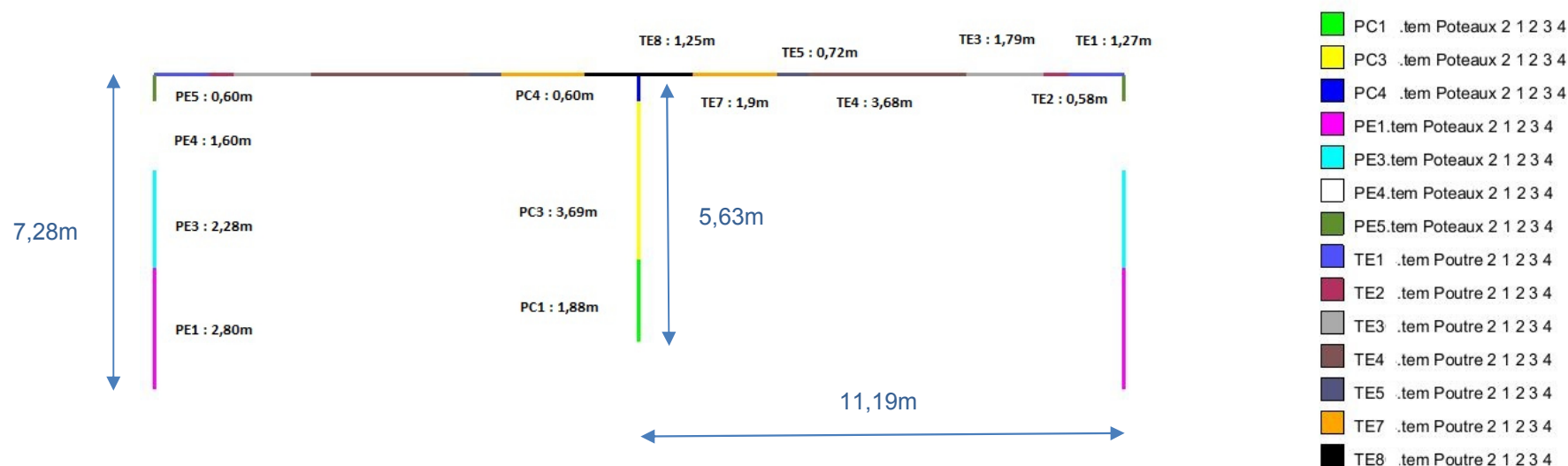


Figure 9 : Modélisation et longueur des barres du portique

L'enrobage des aciers transversaux de premier lit est de 3cm, soit pour les aciers longitudinaux de deuxième lit un enrobage minimal de 4cm en supposant que les aciers transversaux sont au minimum des barres de diamètre 10mm.

Après analyse des plans de ferrailage, les barres d'acier pour toutes les sections sont disposées en une seule nappe.

Elément	Nom Barre	Longueur	Epaisseur	Aciers ext.	Section Aciers ext.	Enrobage ext.	Aciers int.	Section Aciers int.	Enrobage int .
Piédroits Latéraux	PE1	2,80m	0,68m	Φ20 e50 + Φ25 e50	16,1 cm2/ml	4cm	Φ20 e50 + Φ20 e50	12,6 cm2/ml	17cm
	PE3	2,28m	0,55m	Φ20 e50 + Φ25 e50	16,1 cm2/ml	4cm	Φ20 e50 + Φ20 e50	12,6 cm2/ml	4cm
	PE4	1,60m	0,55m	Φ20 e50 + Φ25 e50 + Φ25 e25	35,7 cm2/ml	4cm	Φ20 e50 + Φ20 e50	12,6 cm2/ml	4cm
	PE5	0,60m	0,80m	Φ20 e50 + Φ25 e50 + Φ25 e25	35,7 cm2/ml	4cm	Φ20 e50 + Φ20 e50	12,6 cm2/ml	4cm
Piédroit central	PC1	1,88m	0,76m	Φ20 e50 + Φ16 e50	10,3 cm2/ml	17cm	Φ20 e50 + Φ16 e50	10,3 cm2/ml	17cm
	PC3	3,69m	0,50m	Φ20 e50 + Φ16 e50	10,3 cm2/ml	4cm	Φ20 e50 + Φ16 e50	10,3 cm2/ml	4cm
	PC4	0,60m	1,00m	Φ20 e50 + Φ16 e50	10,3 cm2/ml	4cm	Φ20 e50 + Φ16 e50	10,3 cm2/ml	4cm
Traverses	TE1	1,27m	0,75m	Φ20 e50 + Φ16 e50 + Φ20 e25	22,9 cm2/ml	4cm	Φ25 e25	19,6 cm2/ml	19cm
	TE2	0,58m	0,60m	Φ20 e50 + Φ16 e50 + Φ20 e25	22,9 cm2/ml	4cm	Φ25 e25	19,6 cm2/ml	4cm
	TE3	1,79m	0,60m	Φ20 e50 + Φ16 e50	10,3 cm2/ml	4cm	Φ25 e25	19,6 cm2/ml	4cm

	TE4	3,68m	0,60m	Φ20 e50 + Φ16 e50	10,3 cm ² /ml	4cm	Φ25 e25 + Φ20 e50	25,9 cm ² /ml	4cm
	TE5	0,72m	0,60m	Φ25 e50 + Φ25 e50	19,6 cm ² /ml	4cm	Φ25 e25 + Φ20 e50	25,9 cm ² /ml	4cm
	TE6	0,35m	0,60m	Φ25 e50 + Φ25 e50	19,6 cm ² /ml	4cm	Φ25 e25	19,6 cm ² /ml	4cm
	TE7	1,55m	0,60m	Φ25 e50 + Φ25 e50 + Φ25 e25	39,3 cm ² /ml	4cm	Φ25 e25	19,6 cm ² /ml	4cm
	TE8	1,25m	0,75m	Φ25 e50 + Φ25 e50 + Φ25 e25	39,3 cm ² /ml	4cm	Φ25 e25	19,6 cm ² /ml	19cm

VI.3.4. Résultats à froid

Le cas de charge étudié est le suivant :

- Charges permanentes avec poussée symétrique sur les piédroits latéraux, coefficient de poussée de 0,3 (Cf. note d'origine et note 2014) (G)
- Poussée due aux surcharges de remblai : 1t/m², coefficient de poussée de 0,3. Surcharges appliquées sur les deux piédroits latéraux (Cf. note d'origine et note 2014) (G)
- Surcharge sur dalle : 1t/m². Surcharges appliquées sur les deux travées. (Q)

Les calculs sont menés à l'état limite ultime en situation accidentelle : (G) + (Fa) + $\psi_{11}(Q)$ avec $\psi_{11}=0,6$ coefficient de la valeur représentative fréquente des charges d'exploitation.

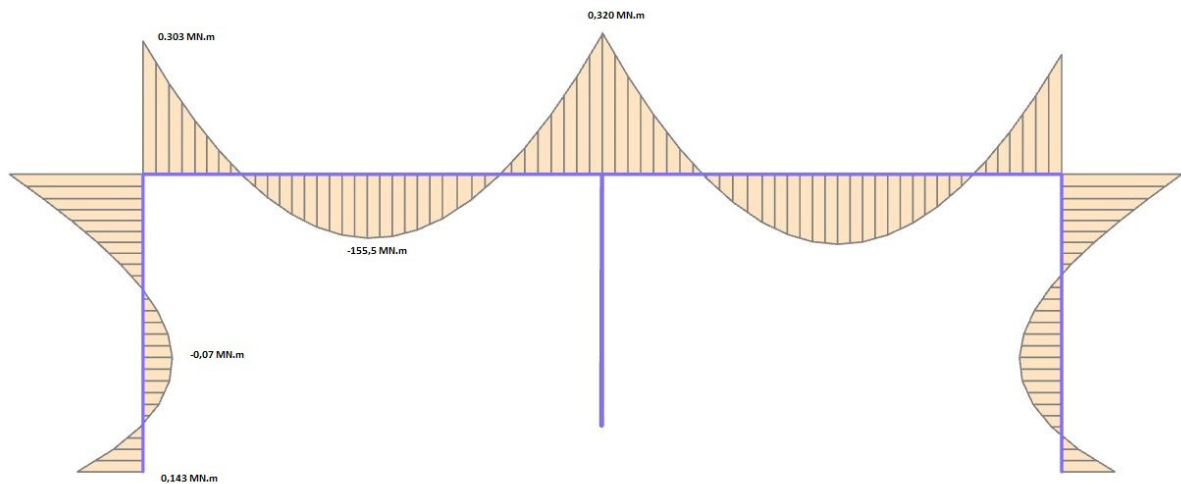


Figure 10 : Moment fléchissant à froid plot n°5

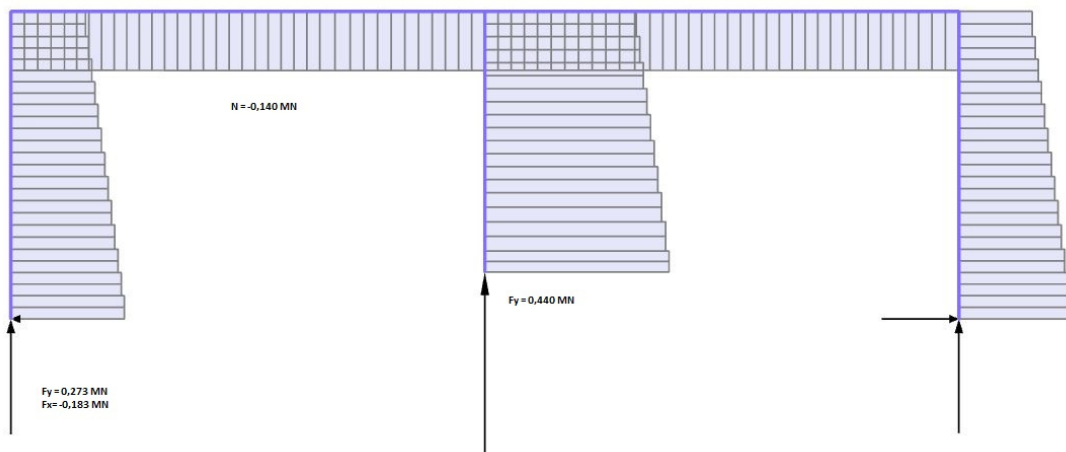


Figure 11 : Effort normal à froid plot n°5

VI.3.5. Résultats sous courbe CN

Le cas de charge étudié est le suivant :

- Charges permanentes avec poussée symétrique sur les piédroits latéraux, coefficient de poussée de 0,3 (Cf. note d'origine et note 2014) (G)
- Poussée due aux surcharges de remblai : 1t/m², coefficient de poussée de 0,3. Surcharges appliquées sur les deux piédroits latéraux (Cf. note d'origine et note 2014) (G)
- Surcharge sur dalle : 1t/m². Surcharges appliquées sur les deux travées. (Q)

Les calculs sont menés à l'état limite ultime en situation accidentelle : (G) + (Fa) + $\psi_{11}(Q)$ avec $\psi_{11}=0,6$ coefficient de la valeur représentative fréquente des charges d'exploitation.

La déformée de la structure sous courbe CN à $t=7200s$ est présentée par la suite.

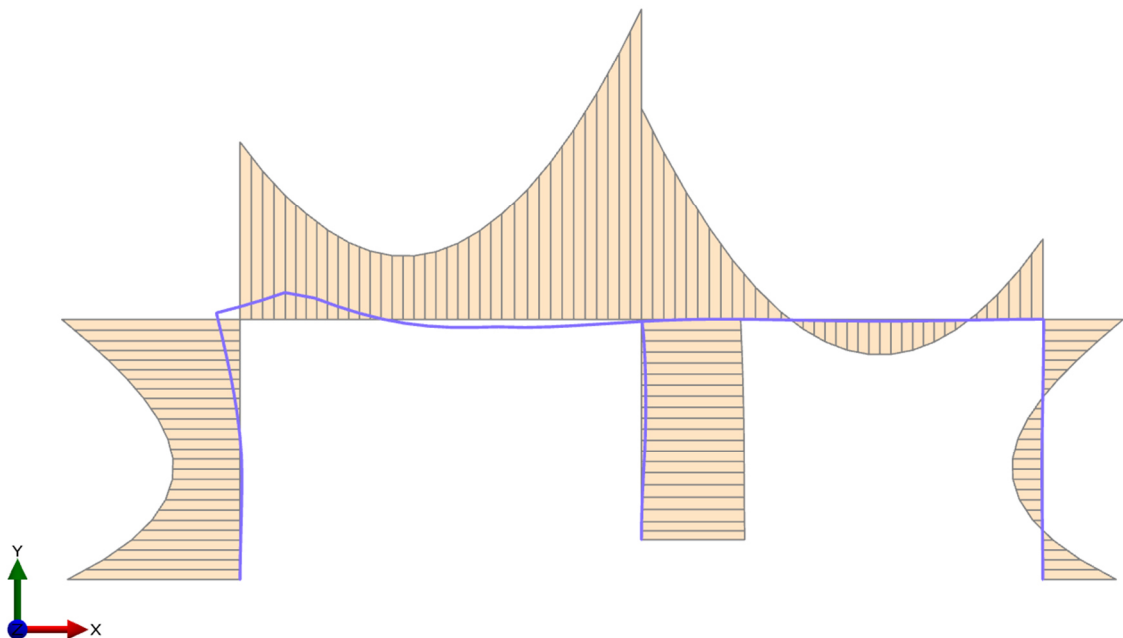


Figure 12 : Déformée du plot n°5 sous courbe CN

Nous constatons la création d'une rotule plastique sur la traverse pour une barre de type TE3. En zoomant sur la rotule nous constatons qu'elle se forme au niveau du nœud n°17. Entouré des nœuds n°16 et n°18, le nœud n°17 relie les barres n°16 et n°17.

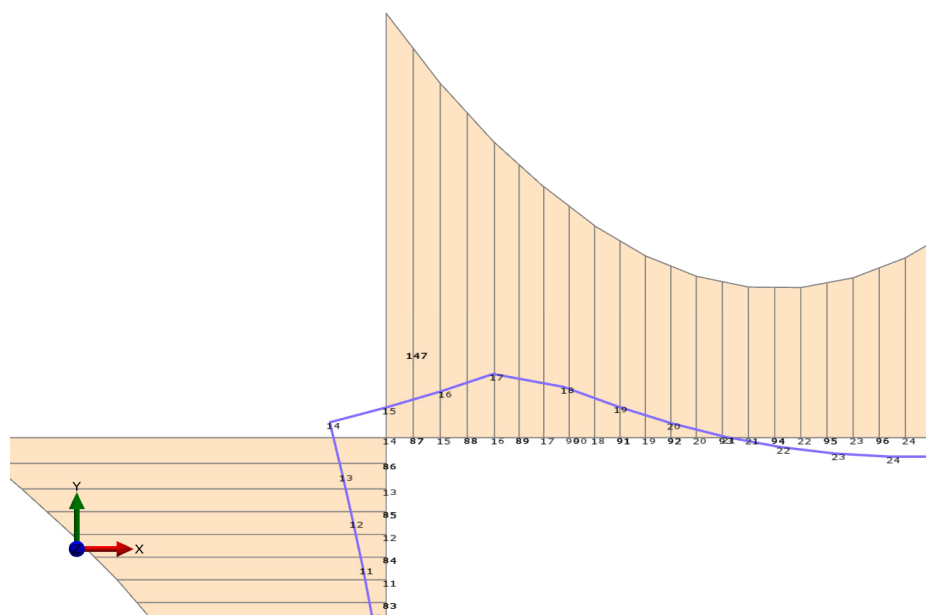


Figure 13 : Rotule plastique plot n°5 sous courbe CN

En projetant la rotation du nœud n°17 et ses nœuds environnant dans le temps sous courbe CN et les moments fléchissant des barres environnantes, nous obtenons :

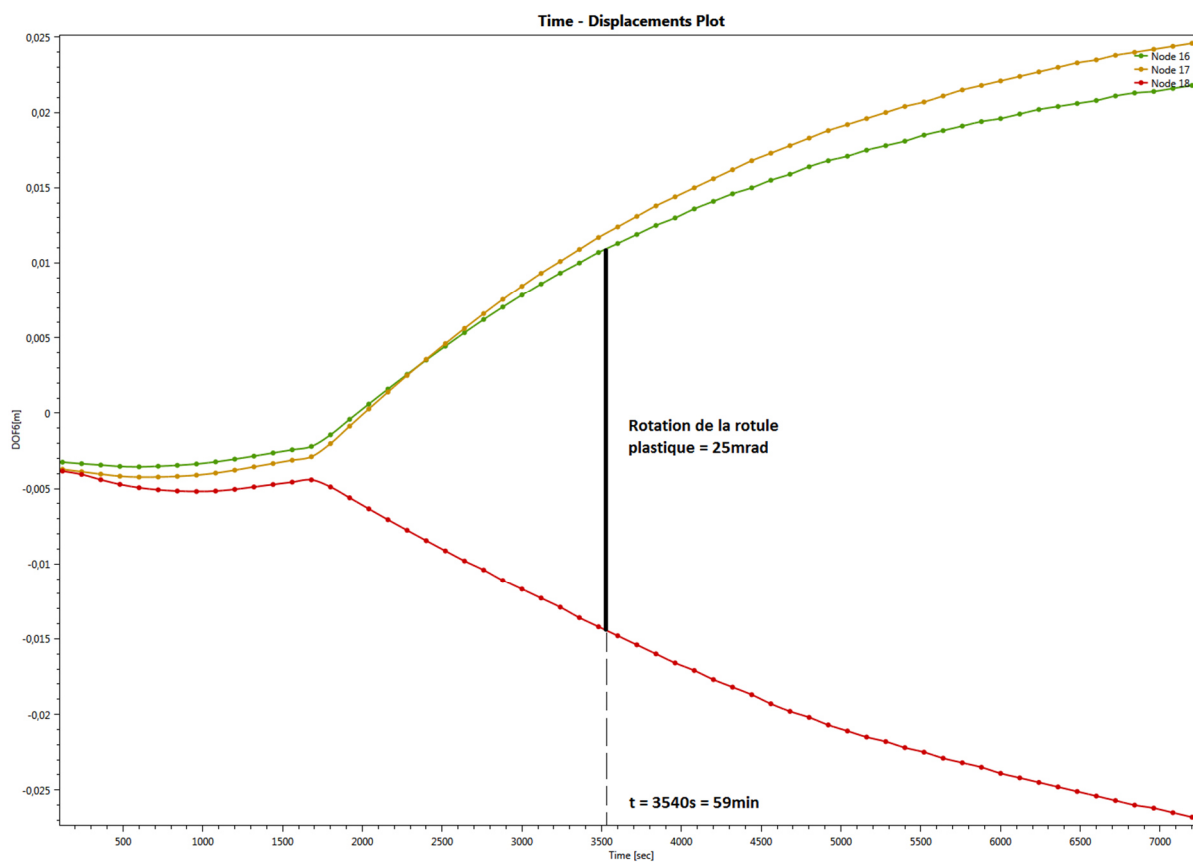


Figure 14 : Rotation de la rotule plastique sous courbe CN

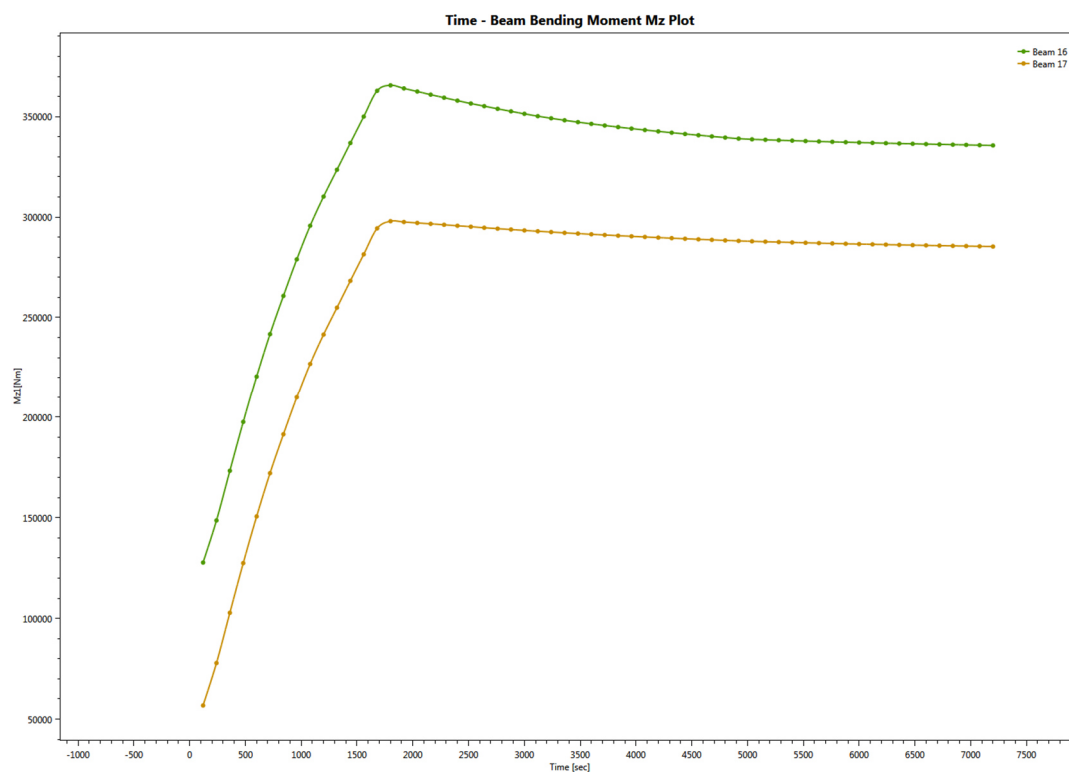


Figure 15 : Moment de flexion rotule plastique sous courbe CN

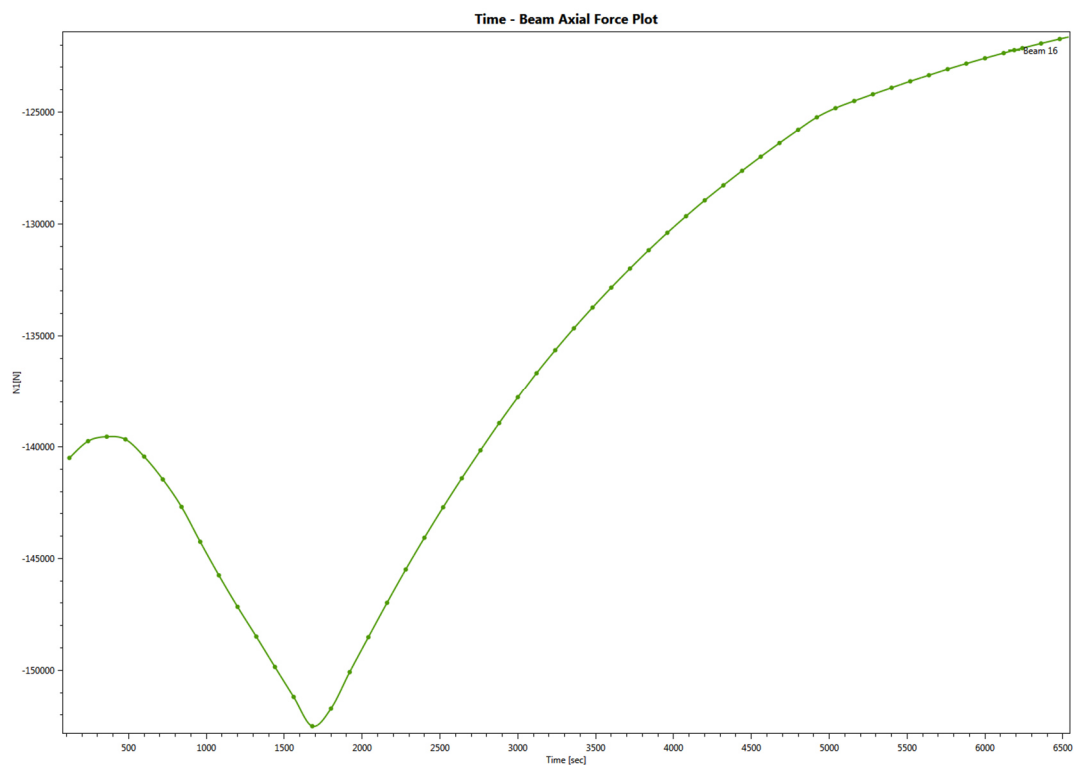


Figure 16 : Effort normal rotule plastique sous courbe CN

En effectuant la différence des rotations absolues des nœuds environnant la rotule plastique sur la traverse nous obtenons la rotation effective de celle-ci. La valeur limite de rotation de rotule plastique de 25mrad est atteinte à $t=3540s$ soit 60 min.

Nous retenons à $t=3540s$ une valeur de Moment fléchissant de 360 kN.m et d'effort normal de 130kN. En analysant la résistance de la section sous combinaison ELU, nous validons que cette sollicitation plastifie la section.

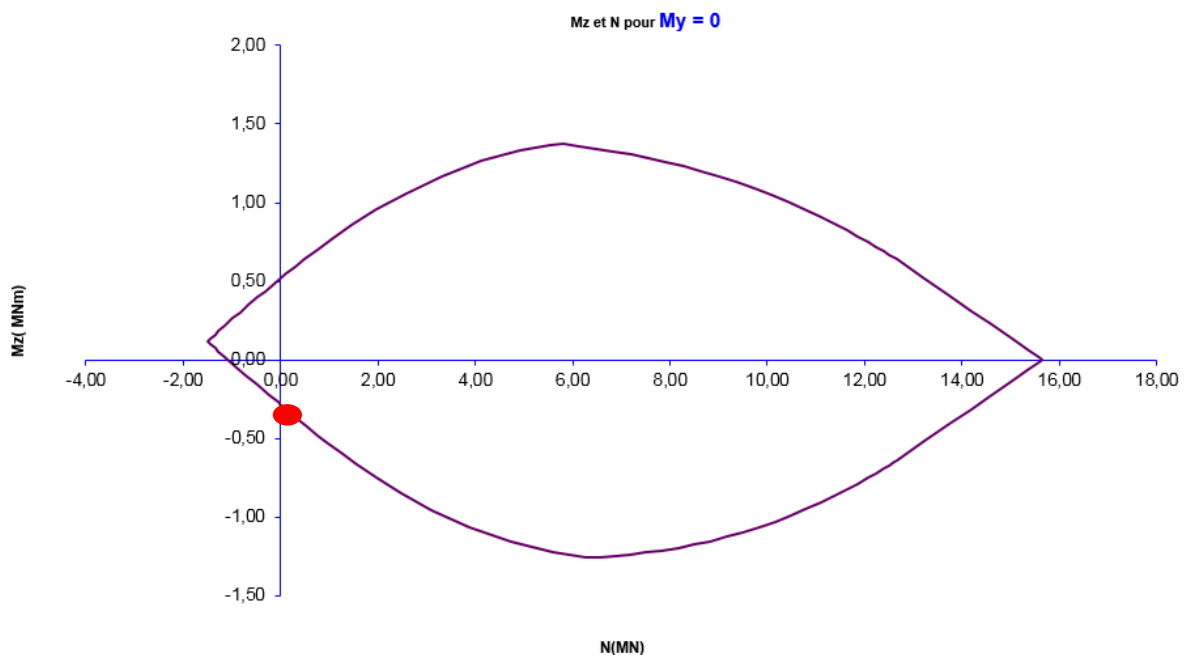


Figure 17 : Diagramme MN de résistance de la section TE3

Aucune rotule plastique ne se forme sur les pénétrations pendant la durée de l'incendie.

Conclusion : Le plot n°5 a une résistance de CN60 pour la traverse et une résistance supérieure à CN120 pour les pénétrations.

VI.3.6. Résultats sous courbe HCM sans écaillage

Sous feu HCM nous constatons également la création d'une rotule plastique sur la traverse pour une barre de type TE3. En zoomant sur la rotule nous constatons qu'elle se forme au niveau du nœud n°17. Entouré des nœuds n°16 et n°18, le nœud n°17 relie les barres n°16 et n°17.

En projetant la rotation du nœud n°17 et ses nœuds environnant dans le temps sous courbe HCM et les moments fléchissants des barres environnantes, nous obtenons :

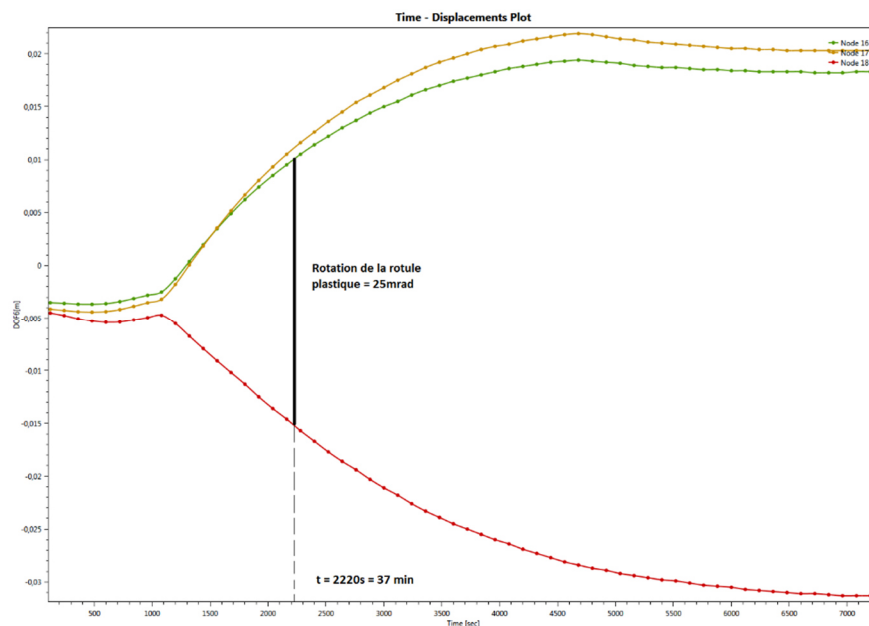


Figure 18 : Rotation de la rotule plastique sous courbe HCM

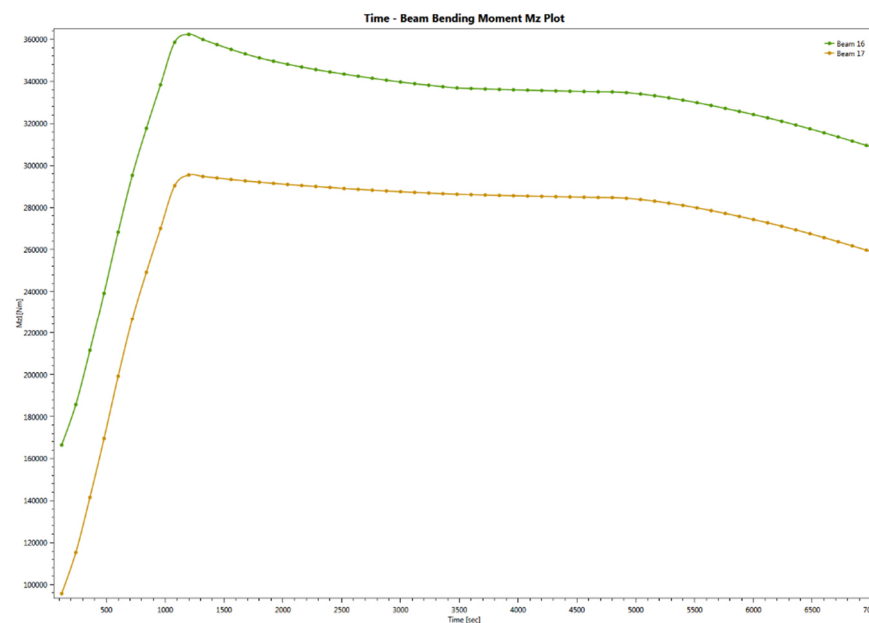


Figure 19 : Moment de flexion rotule plastique sous courbe HCM

En effectuant la différence des rotations absolues des nœuds environnant la rotule plastique sur la traverse nous obtenons la rotation effective de celle-ci. La valeur limite de rotation de rotule plastique de 25mrad est atteinte à $t=2220s$ soit 40 min.

Nous retenons à $t=2220s$ une valeur de Moment fléchissant de 360 kN.m et d'effort normal de 130kN. En analysant la résistance de la section sous combinaison ELU, nous validons que cette sollicitation plastifie la section.

Aucune rotule plastique se forme sur les piédroits pendant la durée de l'incendie.

Conclusion : Le plot n°5 a une résistance sans écaillage de HCM40 pour la traverse et une résistance supérieure à HCM120 pour les piédroits.

VI.3.7. Résultats sous courbe HCM avec écaillage

L'objectif de ce chapitre est de déterminer la résistance des piédroits et du mur central de la tranchée couverte sous feu HCM avec écaillage. Nous prenons par la suite l'hypothèse d'un écaillage de 4cm comme indiqué au §VI.1.2.

Etant donné que l'enrobage des aciers est de 4cm, lorsque l'écaillage se produit les aciers intérieurs sont affleurants. Directement exposés au feu lors d'un incendie HCM avec écaillage, nous considérons par la suite que les aciers intérieurs sont inexistantes ayant perdu leurs propriétés de résistance mécanique.

Au stade d'AVP nous effectuons la vérification de la résistance de la structure avec écaillage en prenant comme données d'entrée les valeurs de moment et d'effort normal des sections sous feu HCM sans écaillage.

Les sections sont vérifiées sans tenir compte des aciers de la face chauffée. En prenant les valeurs de moment fléchissant et d'effort normal sous feu HCM sans écaillage, on vérifie si la section est en tension du côté de la face chauffée. Cette condition traduit la ruine de la structure.

Pour un incendie HCM nous avons à $t=120s$:

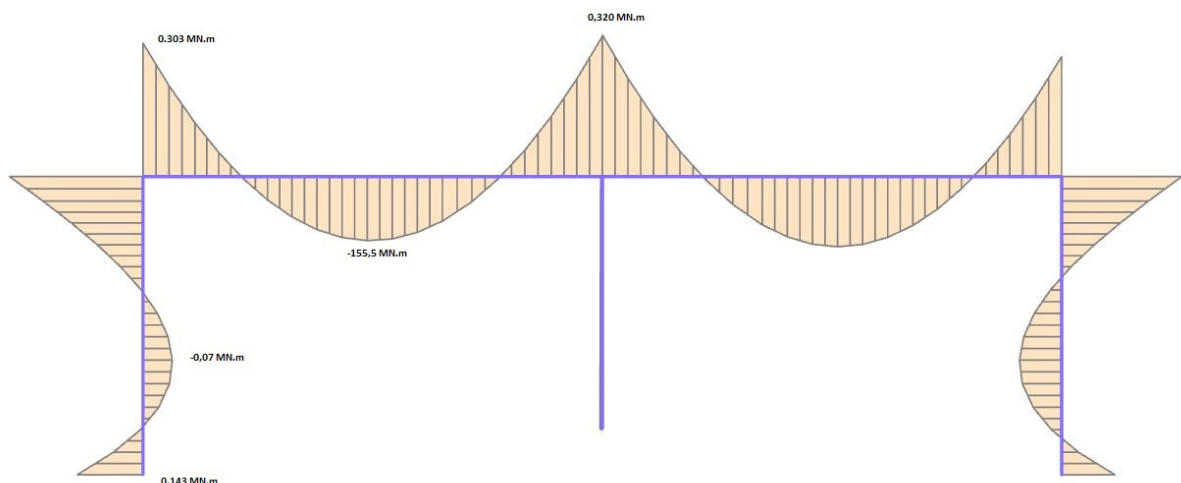


Figure 20 : Moments fléchissant HCM $t=120s$

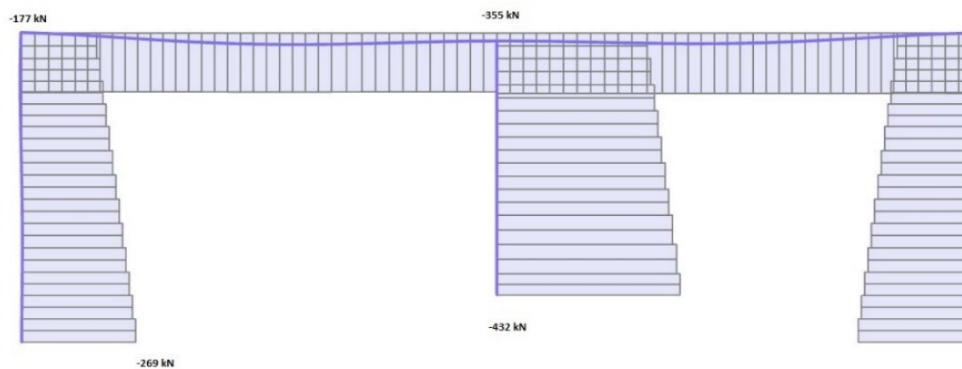


Figure 21 : Effort normal HCM $t=120s$

Pour un incendie HCM nous avons à $t=7200s$:

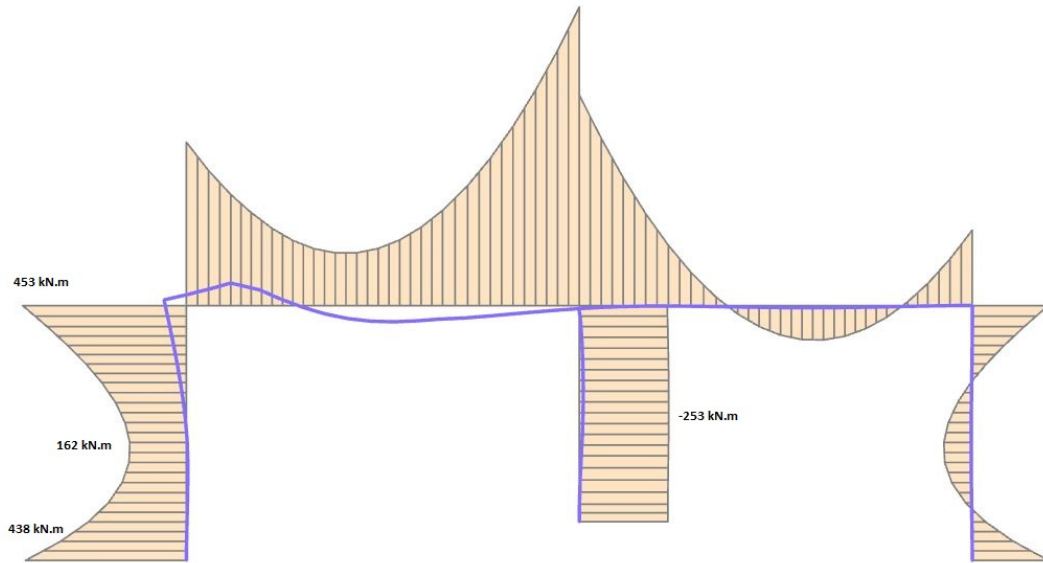


Figure 22 : Moments fléchissant HCM $t=7200s$

Analyse :

Au début de l'incendie la section du milieu du piédroit reprend un moment négatif illustrant de la tension dans la fibre intérieure face chauffée. Dans le cas d'une montée en température rapide créant un écaillage, les aciers intérieurs perdent leur résistance mécanique et la tension ne peut pas être reprise provoquant la ruine du piédroit.

Le diagramme de résistance de la section sans aciers intérieurs est présenté ci-dessous. En rouge est indiqué la combinaison $M=-70 \text{ kN.m}$ / $N=190 \text{ kN}$ issue des diagrammes.

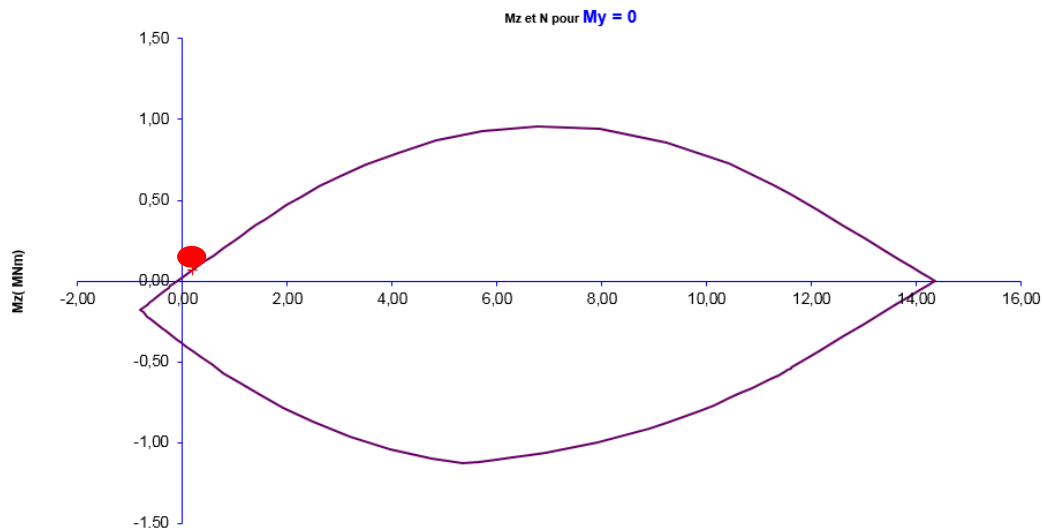


Figure 23 : Diagramme MN de résistance de la section PE3 avec écaillage

La résistance de la section du piédroit latéral PE3 est dépassée.

En ce qui concerne le piédroit central. A froid cette section est entièrement en compression, reprenant des moments fléchissant que lors de chargements dissymétriques sur les travées. En cas d'incendie dans un des tubes, l'effet du gradient thermique crée des moments qui mettent en tension la fibre non chauffée du piédroit.

En considérant un écaillage de 4cm et en négligeant la résistance mécanique des aciers chauffés nous avons une section sollicitée à :

$$M=260 \text{ kN.m et } N=331\text{kN}$$

En confrontant ces sollicitations à une section réduite de 4cm sans aciers sur face chauffée nous avons :



La résistance de la section du piédroit central PC3 est maintenue.

Conclusion :

Les piédroits latéraux de la tranchée couverte de Taverny n'atteignent pas le niveau de résistance HCM120 avec prise en compte de l'écaillage.

Le piédroit central de la tranchée couverte de Taverny est en mesure de résister à un incendie HCM120 avec prise en compte de l'écaillage.

VII. PROTECTION AU FEU DE LA SECTION AU DROIT DES VENTILATEURS ET DE LA RUE DE BEAUCHAMPS

Les résultats des études de tenue au feu antérieures ne concernent pas tous les plots de la tranchée couverte, notamment :

- Le plot n°18 : franchissement de la Rue de Beauchamps, ce plot est différent des plots courants non seulement par les surcharges routières qui lui sont appliquées mais par sa géométrie en biais avec une dalle d'épaisseur variable. Le plot n'a pas été étudié dans le passé en raison de plans de ferrailage incomplets ;
- Les plots n°20 et n°7 : ces plots supportent les ventilateurs et présentent un bossage de la dalle de couverture. Les études antérieures de tenue au feu ne font pas référence à ces plots qui présentent une géométrie et un chargement différent par rapport aux plots courants ;

L'objectif de ce paragraphe est de porter une analyse comparative entre les plots anciennement étudiés et les plots n°18 ; 20 ; 7 pour déterminer si les données géométriques et de chargement de la note de calcul d'origine nous permettent d'inférer sur la nécessité d'une protection au feu.

VII.1. PLOTS N°20 ET N°7- BOSSAGES VENTILATEURS

La note de calcul de l'ouvrage : Pièce 4.15 : Note de calcul Génie Civil – Tranchée Couverte section Taverny Mery sur Oise – Octobre 1994 – DDE Cergy Pontoise – B. WILHERES distingue trois sections de calcul de ferrailage :

SOMMAIRE

I	Hypothèses de calcul	4
II	Modélisation de la section courante (cas a) et de la section au droit de la ventilation (cas b)	14
III	Modélisation de la section au droit de la rue Beauchamps (cas c)	21
IV	Calcul du ferrailage et des sections	
	1. Cas a	30
	2. Cas b	54
	3. Cas c	75
V	Stabilité des nouvelles et calcul des contraintes au sol	101

Figure 24 : Sommaire note de calcul d'origine

Nous nous intéressons au §II Modélisation de la section courante (cas a) et de la section au droit de la ventilation (cas b) et aux plans de ferrailage pour analyser les différences entre ces sections.

Trois grandes différences distinguent de ces sections :

VII.1.1. Géométrie

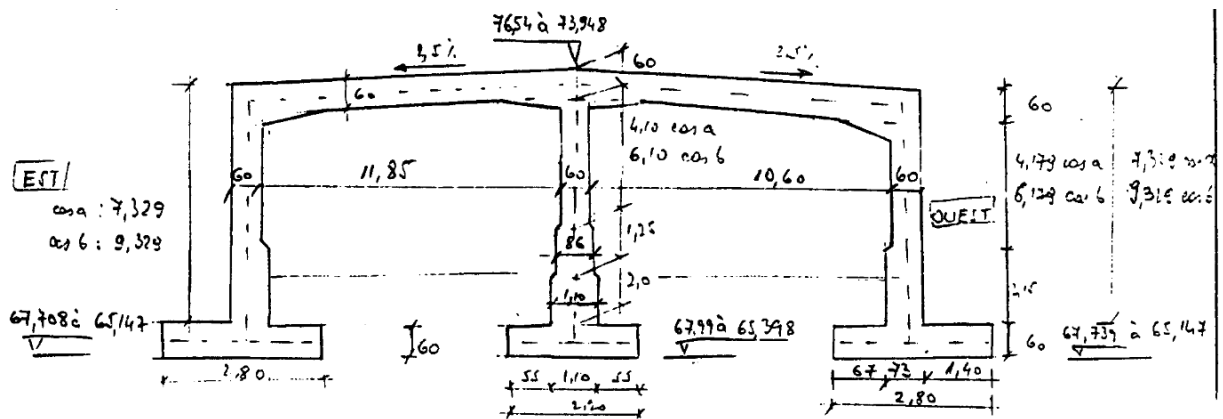


Figure 25 : Comparatif de la géométrie des plots entre section courante et section au droit de la ventilation Cf. NDC d'origine

Les piédroits de la section au droit de la ventilation sont 2m plus hauts que ceux de la section courante. La charge de poussée reprise par les piédroits latéraux est donc plus importante.

VII.1.2. Chargement

NOTE DE CALCUL CALCULATION NOTE									
				Issue	0	1	2	3	4
				Date					
				Calcul					
				Vérif					
				Appr					
Page 20									
Cas a et b									
cas	Dénomination	Fléchant	Type	Val ₁	Val ₂	Val ₃	Val ₄	Val ₅	Val ₆
1	Poids propre	-999	PP	2,5	2,5	0	0	0	0
2	Terre sur remblais	13	NO	0	0	-22,86	-22,86	0	0
		15	NO	0	0	-3,35	-3,35	0	0
		16	NO	0	0	-1,25	-1,25	0	0
		12	NO	0	0	-1,25	-1,25	0	0
		13	NO	0	0	-2,35	-2,35	0	0
		18	NO	0	0	-2,35	-2,35	0	0
		20	NO	0	0	-22,86	-22,86	0	0
3	Terre sur portique et remblais	-2	UN	-1,0	-0,95	0	0	0	0
	Poids ventilateurs	13	NO	0	0	-1,4	-1,4	0	0
	Poids ventilateurs sur b	20	NO	0	0	-1,4	-1,4	0	0
4	Poussée active K=0,33	1	TR	5,247	6,562	2,97	4,79	0	4
		2	TR	2,97	4,28	0	0	0	4
		11	TR	-2,97	-4,28	-5,247	-6,562	0	4
		10	TE	0	0	-2,97	-4,28	0	4
		1	UN	-0,33	-0,33	0	0	0	4
		2	UN	0,33	0,33	0	0	0	4
		11	UN	-0,33	-0,33	0	0	0	4
		10	UN	-0,33	-0,33	0	0	0	4
5	Poussée passive K=0,5	1	TR	4,95	4,95	4,95	6,50	0	4
		2	TR	4,95	6,50	0	0	0	4
		11	TR	-4,95	-6,50	-4,95	-6,50	0	4
		10	TR	0	0	-4,95	-6,50	0	4
		1	UN	0,5	0,5	0	0	0	4
		2	UN	0,5	0,5	0	0	0	4
		11	UN	-0,5	-0,5	0	0	0	4
		10	UN	-0,5	-0,5	0	0	0	4
6	Retrait + fluage	-2	TE	1	1	-0,0005	-0,0005	0	0
7	Surcharge verticale S=0,5 t/m²	-2	UN	-0,5	-0,5	0	0	0	5
		13	NO	0	0	-0,2	-0,2	0	0
		20	NO	0	0	-0,2	-0,2	0	0
8	Poussée due à la surcharge de remblais 3,4 t/m²	1	UN	0,33	0,33	0	0	0	4
		2	UN	0,33	0,33	0	0	0	4
		11	UN	-0,33	-0,33	0	0	0	4
		10	UN	-0,33	-0,33	0	0	0	4

Figure 26 : Comparatif du chargement des plots entre section courante et section au droit de la ventilation Cf. NDC d'origine

Hormis la différence entre hauteur de piédroits et la poussée des terres associée, la différence majeure entre le chargement de la section courante et la section au droit de la ventilation correspond au §3 : Terres sur portique et semelles (cas a) / Poids ventilateurs (cas b).

Nous constatons que bien que la section au droit de la ventilation comporte une charge permanente en plus due au poids des équipements, la surcharge du poids de terre en dessus de la couverture diminue en raison du bossage de la section.

Nous avons donc une charge de 1t/m² pour la section courante et de 0,15t/m² pour la section au droit de la ventilation. Lors d'un scénario incendie, des moments qui tendent la fibre supérieure de la travée se produisent. Les charges verticales appliquées sur la travée ont tendance à contrer les moments générés par le feu.

Ainsi la charge inférieure sur travée appliquée sur les plots au droit de la ventilation est plus pénalisante dans un scénario d'incendie.

VII.1.3. Ferrailage

L'analyse du dossier de recollement de l'ouvrage et en particulier les plans de ferrailage, coffrage et nomenclature du plot n°7 nous permettent d'appréhender le ferrailage des sections au droit de la ventilation.

Cf. plans TRF021, TRF022, TRF023, TRC008.

Elément	Nom Barre	Epaisseur	Aciers ext.	Enrobage ext.	Aciers int.	Enrobage int .
Traverses	TE1	0,75m	39,3 cm ²	4cm	12,6 cm ²	19cm
	TE2	0,60m	39,3 cm ²	4cm	12,6 cm ²	4cm
	TE3	0,60m	19,6 cm ²	4cm	12,6 cm ²	4cm
	TE4	0,60m	19,6 cm ²	4cm	22,4 cm ²	4cm
	TE5	0,60m	19,6 cm ²	4cm	22,4 cm ²	4cm
	TE6	0,60m	19,6 cm ²	4cm	12,6 cm ²	4cm
	TE7	0,60m	51,8 cm ²	4cm	12,6 cm ²	4cm
	TE8	0,75m	51,8 cm ²	4cm	12,6 cm ²	19cm

On constate que le ferrailage partie ventilation appliqué sur la traverse suit la même distribution que celui de la section courante avec une division en 8 zones.

La densité de ferrailage des plots en section courante (plot n°5) et des plots en section ventilateurs (plot n°7) est très proche.

VII.1.4. Conclusion

Les plots n°20 et n°7 supportant la ventilation sont semblables aux plots courants en termes de géométrie, de chargement et de ferrailage.

Les études de tenue au feu de la section courante montrent que les traverses des plots ont une résistance CN60 / HCM 40 qui est loin d'atteindre la résistance minimale de N2 demandée pour l'ensemble des plots de la tranchée couverte.

En raison des fortes similarités entre les différentes sections de la tranchée il paraît judicieux de considérer que la résistance au feu des plots de ventilation est la même que celle des plots courants soit : CN60 / HCM40.

VII.2. PLOT N°18 RUE DE BEAUCHAMPS

Le plot n°18 correspond au franchissement de la Rue de Beauchamps. Ce plot est différent des plots courants non seulement par les surcharges routières qui lui sont appliquées mais par sa géométrie en biais avec une dalle d'épaisseur variable.

Le plot n'a pas été étudié dans le passé en raison de plans de ferrailage incomplets. Après analyse du dossier de recollement de l'ouvrage en notre possession nous constatons que la nomenclature des aciers pour ce plot n'est pas disponible. Aucune étude supplémentaire au présent marché n'a pas pu être réalisée.

Nous préconisons, par mesure sécuritaire de protéger au feu ce plot de façon à atteindre l'objectif de sécurité d'un niveau de résistance N2.

VIII. CONCLUSION

La détermination des performances de résistance au feu de la Tranchée Couverte de Taverny, met en évidence que l'ouvrage ne respecte pas les exigences de résistance au feu.

L'ensemble des résultats de vérification sont récapitulés dans le tableau ci-après :

Section	Partie de l'ouvrage	Impact	Scénario étudié	Durée de stabilité au feu CN [min]	Durée de stabilité au feu HCM [min]	Niveau de résistance au feu requis	Protection au feu
Section courante	Plafond	-	Incendie généralisé dans un tube	60	40	N2	Oui
	Piédroits	-		240	<120*	N2	Oui
	Mur central	-		240	120	N2	Non
Section au-dessous de la rue Beauchamp	Plafond	Rue Beauchamp		Non évalué	Non évalué	N2	Oui
	Piédroits			Non évalué	Non évalué	N2	Oui
	Mur central			Non évalué	Non évalué	N2	Non
Section au-dessous du local technique	Plafond	Local technique		60	40	N3	Oui
	Piédroits			240	<120*	N3	Oui
	Mur central			240	120	N3	Non
Section au-dessous de la rue Golette	Plafond	Rue Sedlcany		60	40	N2	Oui
	Piédroits			240	120	N2	Oui
	Mur central			240	<120*	N2	Non
Section au droit des issues de secours	Plafonds	Issues de secours		60	40	N2	Oui
	Piédroits			240	120	N2	Oui
	Mur central			240	<120*	N2	Non
Section au droit des ventilateurs	Plafond	-		60	40	N2	Oui
	Piédroits	-		240	<120*	N2	Oui
	Mur central	-		240	120	N2	Non

* : Avec prise en compte de l'écaillage.