



003 26 058/S/T/NDC/12 ind D**REVISIONS**

Date	Indice	Objet de la révision	Etablie par	Vérifiée par	Approuvé par
15/04/10	A	Création de document	N. LOPEZ	J. ABOUEZZI	JM. JAEGER
29/04/10	B	Révision suite à la réunion du 23/04/10	N. LOPEZ	J. ABOUEZZI	JM. JAEGER
04/05/10	C	Visa RFF du 04/05/10	N. LOPEZ	J. ABOUEZZI	JM. JAEGER
07/05/10	D	Visa RFF du 07/05/10	N. LOPEZ	J. ABOUEZZI	JM. JAEGER
Mai 2010	E	Finalisation	A. DUCREAU	A. BAYLE	

SOMMAIRE

1	OBJET DE LA NOTE	3
2	REFERENCES	3
3	SYNTHESE	3
4	ANALYSE DES DONNEES D'EXPLOSION.....	4
4.1	Détermination du chargement accidentel dimensionnant le long du tracé.....	4
4.2	Récapitulation des tronçons étudiés.....	4
5	DIMENSIONNEMENT DU TRONÇON NUMERO 2	5
5.1	Localisation.....	5
5.2	Géométrie.....	5
5.3	Matériaux et armatures.....	8
5.4	Actions appliquées sur le modèle de calcul structure du tronçon 2	8
5.4.1	Modélisation.....	8
5.4.2	Actions	10
5.5	Justification de la structure et des états limites du sol.	11
5.6	Estimation du cout du tronçon	12
5.6.1	Métre.....	12
5.6.2	Estimation du prix du tronçon	12
6	DIMENSIONNEMENT DU TRONÇON NUMERO 1	13
6.1	Localisation.....	13
6.2	Géométrie.....	13
6.3	Matériaux et armatures.....	15
6.4	Actions appliquées sur le modèle de calcul structure du tronçon 1	15
6.4.1	Modélisation.....	15
6.4.2	Actions	16
6.5	Justification de la structure	17
6.6	Estimation du coût du tronçon	17
6.6.1	Métre.....	17
6.6.2	Estimation du prix du tronçon	17
7	DIMENSIONNEMENT DU TRONÇON 3.....	18
7.1	Localisation.....	18
7.2	Géométrie.....	18
7.3	Matériaux et armatures.....	20
7.4	Actions appliquées sur le modèle de calcul structure du tronçon 3	20

7.4.1	Modélisation.....	20
7.4.2	Actions	21
7.5	Justification de la structure et des états limites du sol.	21
7.6	Estimation du cout du tronçon	22
7.6.1	Métre.....	22
7.6.2	Estimation du prix du tronçon	22
8	SECURITE FERROVIAIRE	22
8.1	Sécurité des voyageurs sous l'ouvrage.....	22
8.2	Sécurité vis-à-vis des risques de chocs ferroviaires	22
9	CALCUL DE L'ESTIMATION	23
9.1	Génie civil et ouvrage d'art.....	23
9.2	Equipements Ferroviaires et Non Ferroviaires.....	23
10	ESTIMATION POUR LE TRACE ENTIER.....	24
10.1	Estimation globale du tracé	24
11	ESTIMATION POUR LA TRAVERSEE DE LA RAFFINERIE.....	24
12	CONCLUSION.....	25

1 OBJET DE LA NOTE

Cette note fait suite à la note de présentation des hypothèses générales de dimensionnement de la couverture de la ligne ferroviaire au droit de la raffinerie de Donges. Elle présente une analyse des données d'entrée d'explosion ainsi que le dimensionnement et l'estimation financière du génie civil de la couverture sur toute la zone. Une approche comparative au tracé alternatif est présentée dans une seconde estimation.

2 REFERENCES

[1] Note d'hypothèses générales – Couverture de la voie ferrée au droit de la raffinerie de Donges

[2] Carnet de dessins – Couverture de la voie ferrée au droit de la raffinerie de Donges

[3] Note géotechnique TERRASOL

3 SYNTHÈSE

Cette note commence par l'analyse des données physiques de l'explosion qui conduit à définir plusieurs intensités d'explosion dimensionnantes le long du tracé. Ce nombre est, à ce stade de l'étude, réduit à trois zones d'intensité afin de disposer d'une sensibilité de dimensionnement de l'ouvrage au sein de la raffinerie.

Le tracé a donc été divisé en trois tronçons différents qui seront dimensionnés différemment selon la nature du chargement de l'explosion et de la nature du sous-sol.

Dans la suite, on appellera tronçon 1, le tronçon central du tracé situé au sud dans une zone où le sol de fondation est situé à environ -25m sous le terrain naturel. On appellera tronçon 2, la partie sud-est de la raffinerie qui subit les effets d'explosion les plus importants et tronçon 3 décomposé en deux zones de même catégorie situées en partie Ouest et extrême est. Ces deux derniers tronçons seront fondés sur semelles superficielles et ne diffèrent que par la nature de l'explosion envisagée.

Le tronçon 1 fait 500 m de longueur et est fondé sur des panneaux de paroi moulée de 5m de large encastrés dans la couche de bon sol dont la profondeur est variable et l'épaisseur encore inconnue à ce stade. Le coût de ce tronçon est, au mètre linéaire, le plus élevé du fait de la complexité du système de fondation indispensable pour limiter les déplacements de la superstructure et ancrer les efforts horizontaux engendrés par l'explosion.

Le tronçon 2 fait 850 m de longueur et est fondé sur des semelles superficielles filantes munies d'un retour vers le bas à 90° en partie extérieure afin de reprendre les efforts de cisaillement horizontaux accidentels très importants.

Enfin, le tronçon 3 fait 3200 m de longueur et diffère du tronçon 2 par des épaisseurs inférieures du fait de la moindre intensité de l'explosion dans cette zone du tracé. Son coût au mètre linéaire est le moins élevé.

A ce stade d'étude, il est important de noter que les chiffrages présentés concernent exclusivement l'ouvrage génie civil brut. Les coûts associés aux maintiens des 2 ITE (embranchements ferrées Antargaz et Raffinerie), au maintien ou déplacement de la halte voyageurs, à la création des issues de secours et aux impacts financiers sur l'exploitation ferroviaire en phase travaux ne sont pas pris en compte. Ces coûts sont de nature à augmenter significativement le coût global de cette solution.

Sous ces réserves, le coût de l'ouvrage de génie civil brut est évalué à 260 millions d'euros (conditions économiques Janvier 2010).

Comparativement aux tracés alternatifs, la longueur du tronçon 3 (coté ouest) peut être ramenée à 650 m ; le coût associé de l'ouvrage brut serait alors de 152 millions d'euros (conditions économiques janvier 2010) avec les mêmes hypothèses de prudence.

Il faut noter par ailleurs que :

- l'estimation a été menée sur la base de données géotechniques sommaires et qu'une campagne de sondages serait nécessaire afin de valider les hypothèses de sol dont dépend la faisabilité de l'ouvrage ;
- les effets "rebonds" d'une onde de choc au niveau du tunnel ainsi créé à proximité immédiate des unités d'exploitation du site n'ont pas été étudiés ;
- le dimensionnement de l'ouvrage a pris en compte les aléas actuels ; les extensions éventuelles du site (nouvelles unités) conduiraient à revoir ce dimensionnement et à des modifications complémentaires ;
- l'effet de confinement de la tranchée couverte qui peut être de nature à accumuler des gaz (toxiques et/ou explosifs), n'a pas été étudié.

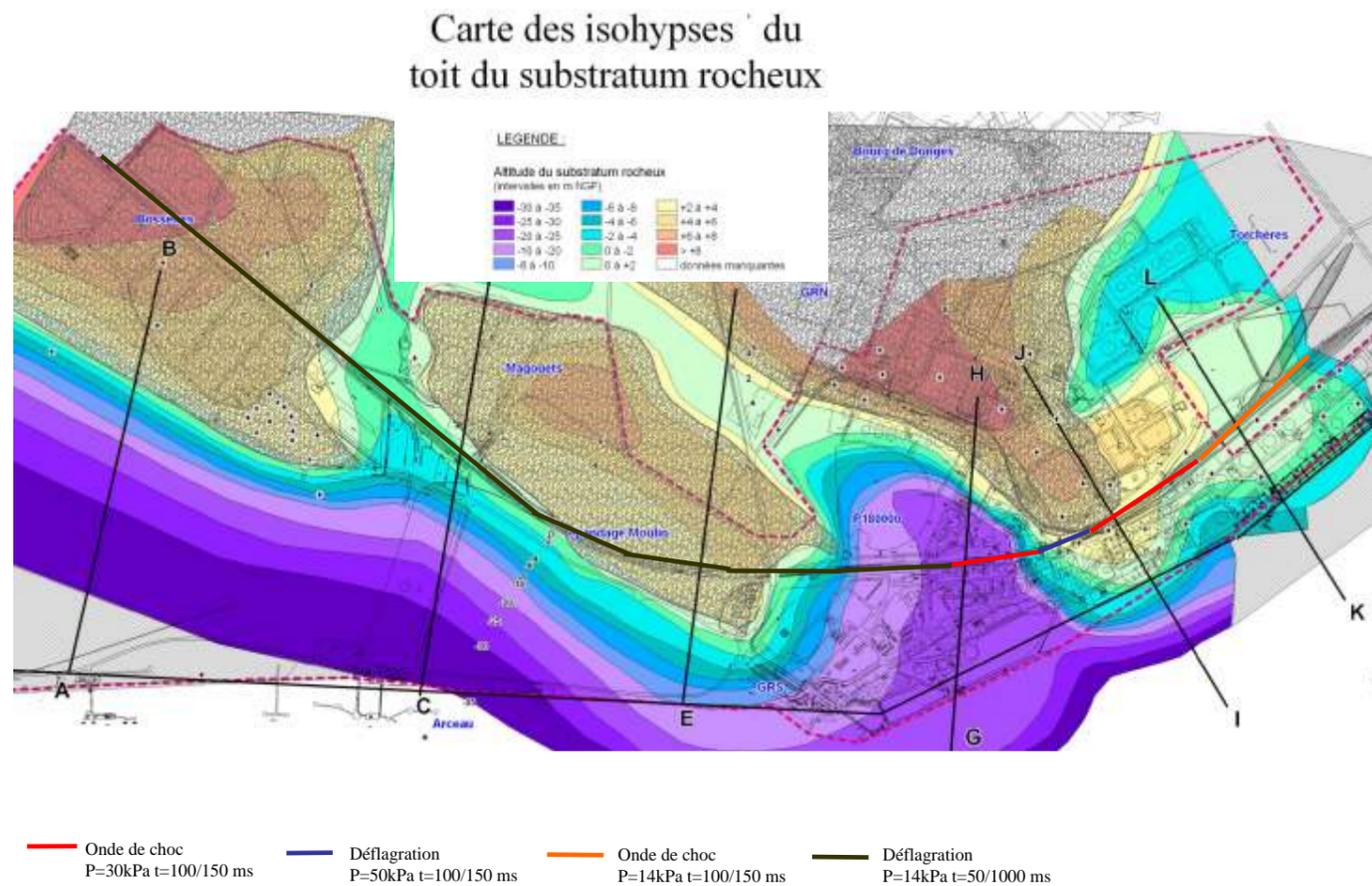
4 ANALYSE DES DONNEES D'EXPLOSION

4.1 Détermination du chargement accidentel dimensionnant le long du tracé

Afin d'analyser des données d'entrées, dans la vue ci-dessous, la profondeur du sol rocheux déterminant le type de fondation envisagée est superposée avec les chargements de l'explosion en pression dimensionnant le long du tracé. Le raisonnement suivant a été mené :

- Si une zone peut être impactée par des ondes de choc de 10kPa ou 20kPa, alors cette zone doit être dimensionnée pour une onde de choc de 20kPa,
- Si une zone peut être impactée par des ondes de choc et des déflagrations de même pression maximale incidente notée P, alors cette zone doit être dimensionnée pour l'onde de choc. En effet, dans la détermination de la pression statique équivalente s'appliquant sur la structure, le coefficient d'amplification dynamique maximal (valeur que nous utilisons) de l'onde de choc vaut 2 contre 1.6 pour la déflagration (voir [1]).

Ce raisonnement conduit à la cartographie suivante :



Des fondations sur semelle superficielle filante pourront être envisagées lorsque le long du tracé, la couche de sol de substratum rocheux se trouve à une profondeur ne dépassant pas -2m par rapport au niveau +0.00. Lorsque la couche de substratum s'enfonce au delà de -2m par rapport au niveau+0.00, des fondations profondes en barrettes de paroi moulée sont à prévoir.

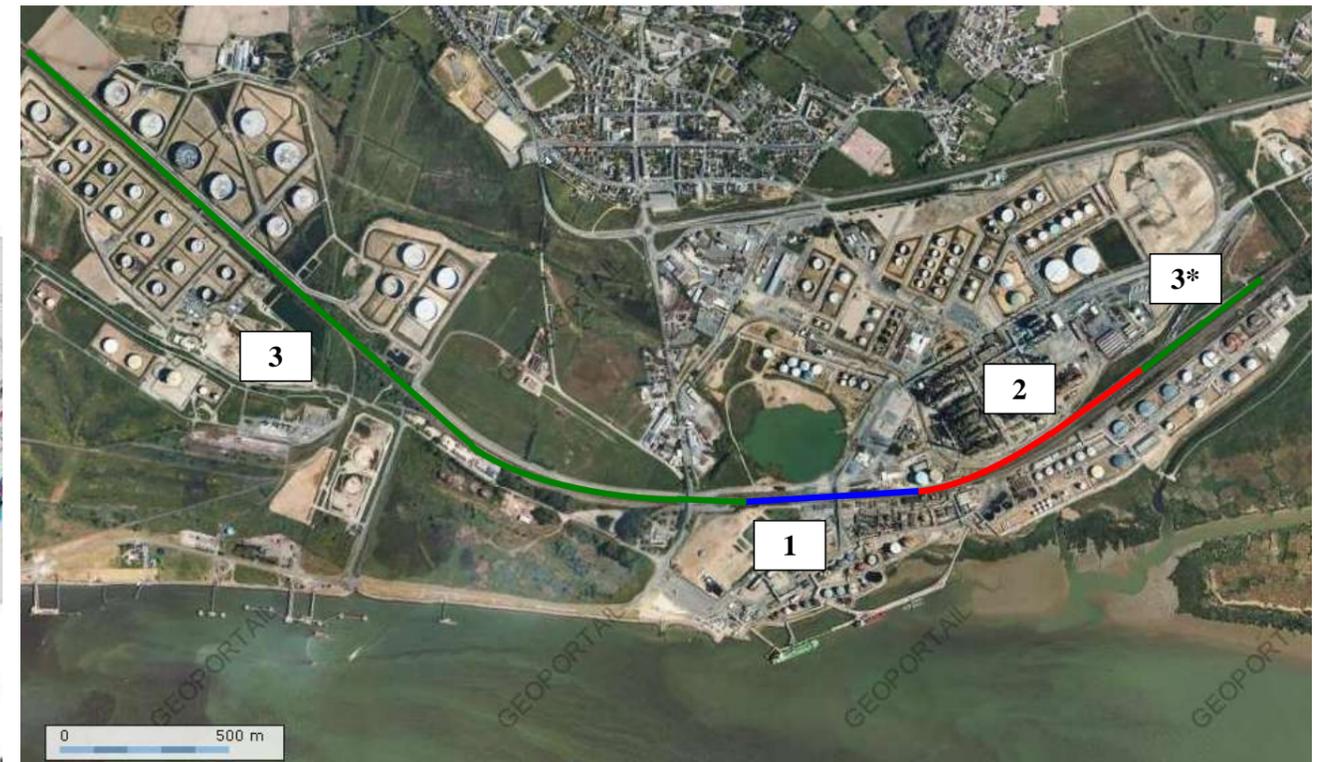
4.2 Récapitulation des tronçons étudiés

De manière sécuritaire, 3 calculs de dimensionnement différents le long du tracé sont retenus :

Ref	Localisation	Type de fondations	Explosion	P(kPa)	T (ms)	Type de calcul
1	Zone Sud	Profondes	Onde de choc	30	100/150	Calcul 2D-logiciel FRAME
2	Zone Est	Superficielles	Déflagration	50	100/150	Calcul 3D- logiciel Ansys
3	Zone Ouest de la raffinerie	Superficielles	Déflagration	14	50/1000	Calcul 2D-logiciel FRAME

Il a été décidé d'étudier le tronçon le plus exposé à l'aide d'un modèle éléments finis 3D grâce au logiciel Ansys.

Les deux autres tronçons sont étudiés à l'aide d'un modèle filaire calé sur le modèle éléments finis dans le logiciel FRAME développé par SETEC TPI.



Le dimensionnement du tronçon 3* n'est pas spécifiquement calculé mais estimé suivant un test de sensibilité.

Il apparaîtra dans le chiffrage comme ayant le prix / ml du tronçon 3 majoré de 15% du fait de la modification de la forme du chargement en pression par rapport au tronçon 3 (déflagration -> Onde de choc).

5 DIMENSIONNEMENT DU TRONÇON NUMERO 2

Le tronçon 2 est fondé sur semelles superficielles, ce type de fondation pourra être envisagé lorsque le long du tracé, la couche de sol de substratum se trouve à une profondeur ne dépassant pas -2m par rapport au niveau +0.00.

5.1 Localisation

Le tronçon 2 est celui pouvant être soumis aux explosions les plus importantes dont la pression incidente en champ libre peut atteindre 50 kPa sous la forme d'une déflagration. Il est situé dans la partie Sud-Est du tracé.

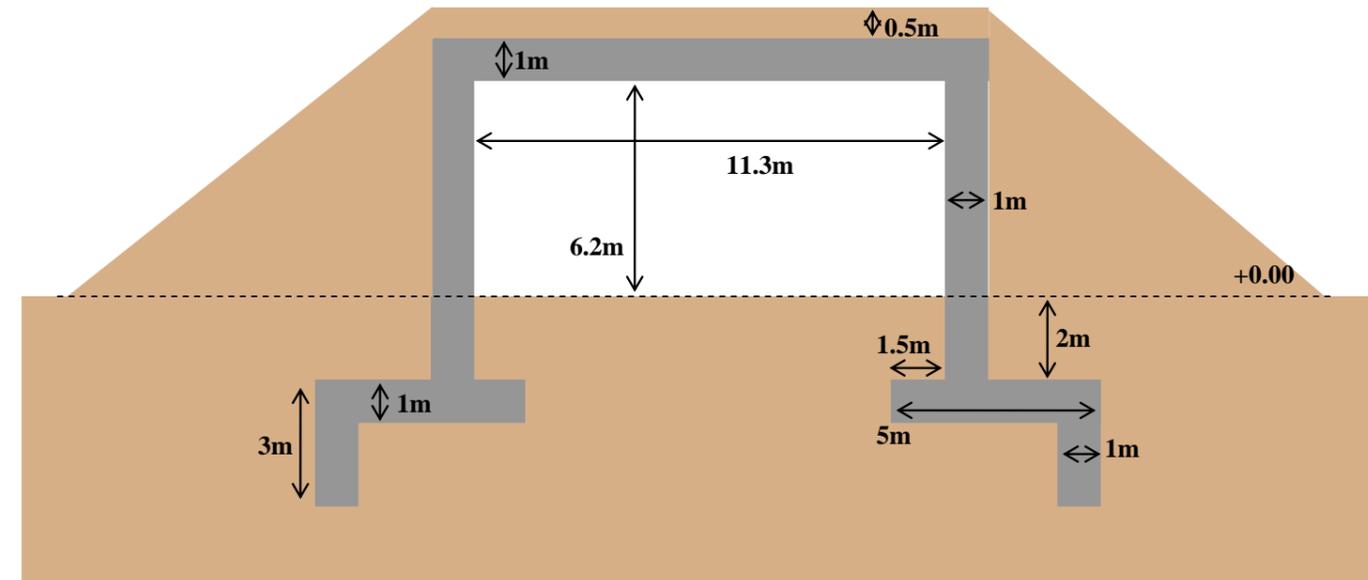


A ce stade du projet, on retiendra une longueur du tronçon de 850m dans l'estimation du coût global.

5.2 Géométrie

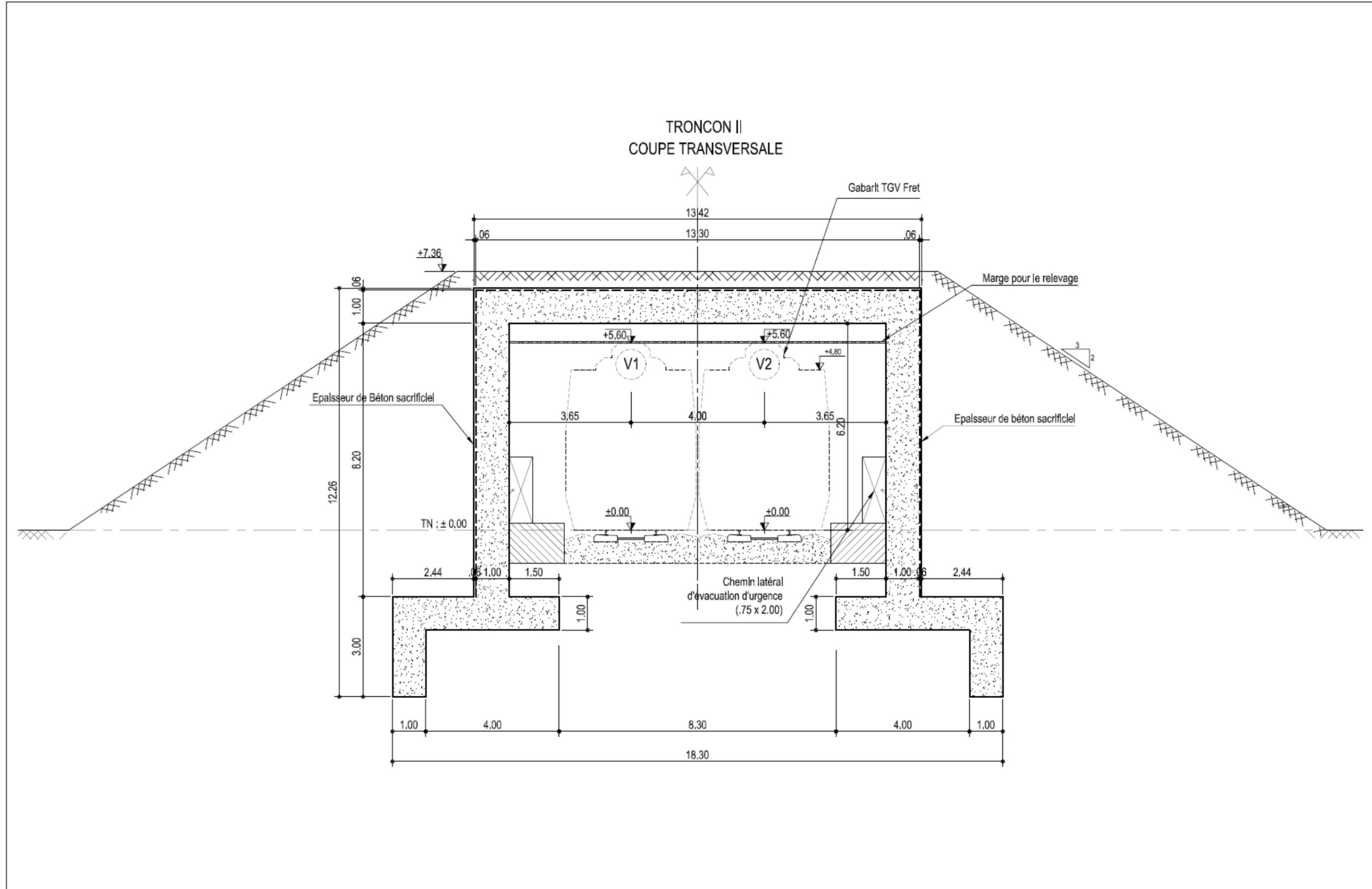
Ce tronçon est fondé sur des semelles superficielles filantes de 1m d'épaisseur à 3 mètres de profondeur par rapport au niveau +0.00. On rajoute une butée verticale filante de 2m de haut et de 1m d'épaisseur sous la semelle côté extérieur afin de transférer au sol l'effort horizontal important dû à l'explosion accidentelle.

La superstructure se compose d'un portique de 1m d'épaisseur recouvert au besoin d'une couche de remblai de 50cm sur le dessus.



Il sera rajouté à ce dimensionnement, une surépaisseur extérieure de 6cm de béton sacrificiel conformément à la note d'hypothèses [1].

Ci-contre un aperçu du coffrage de ce tronçon :

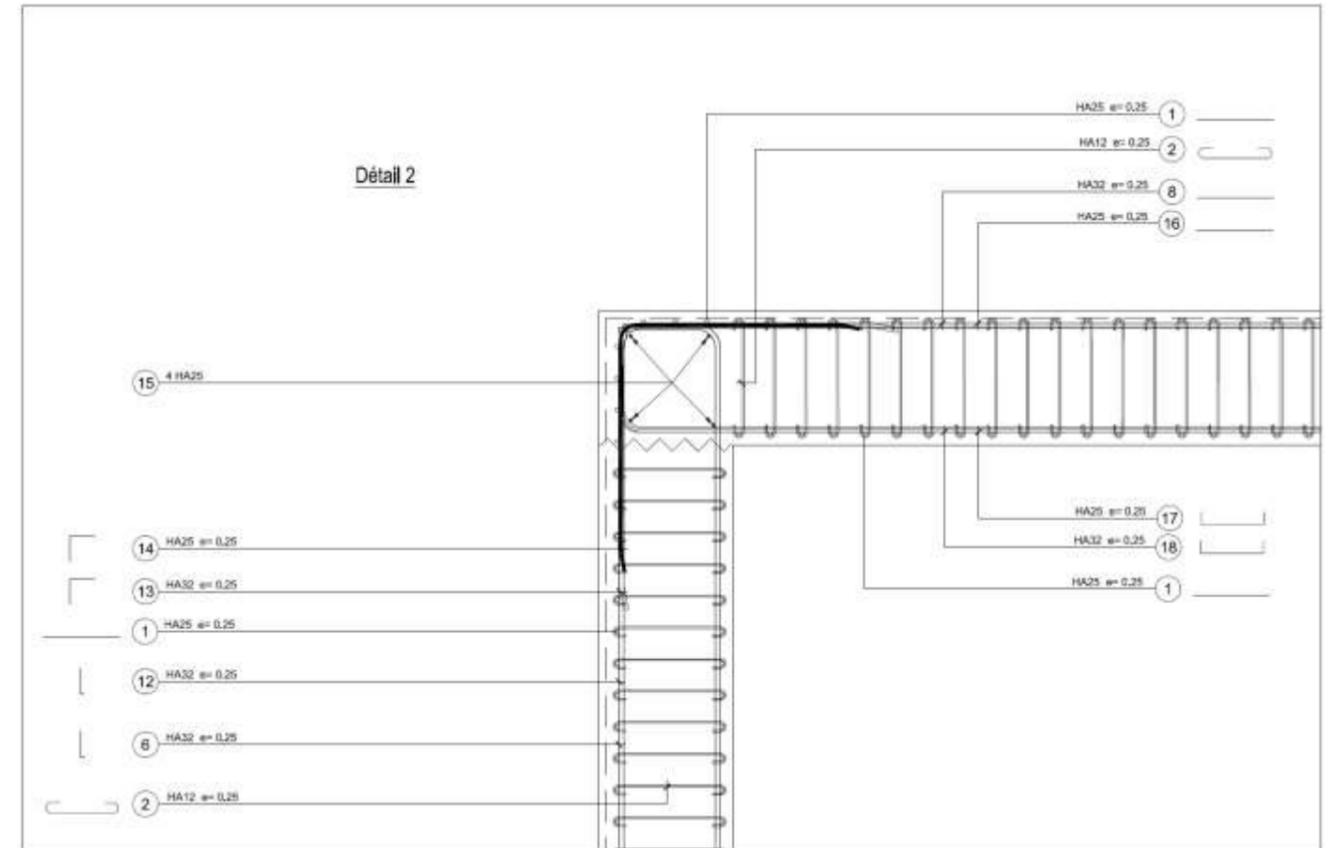
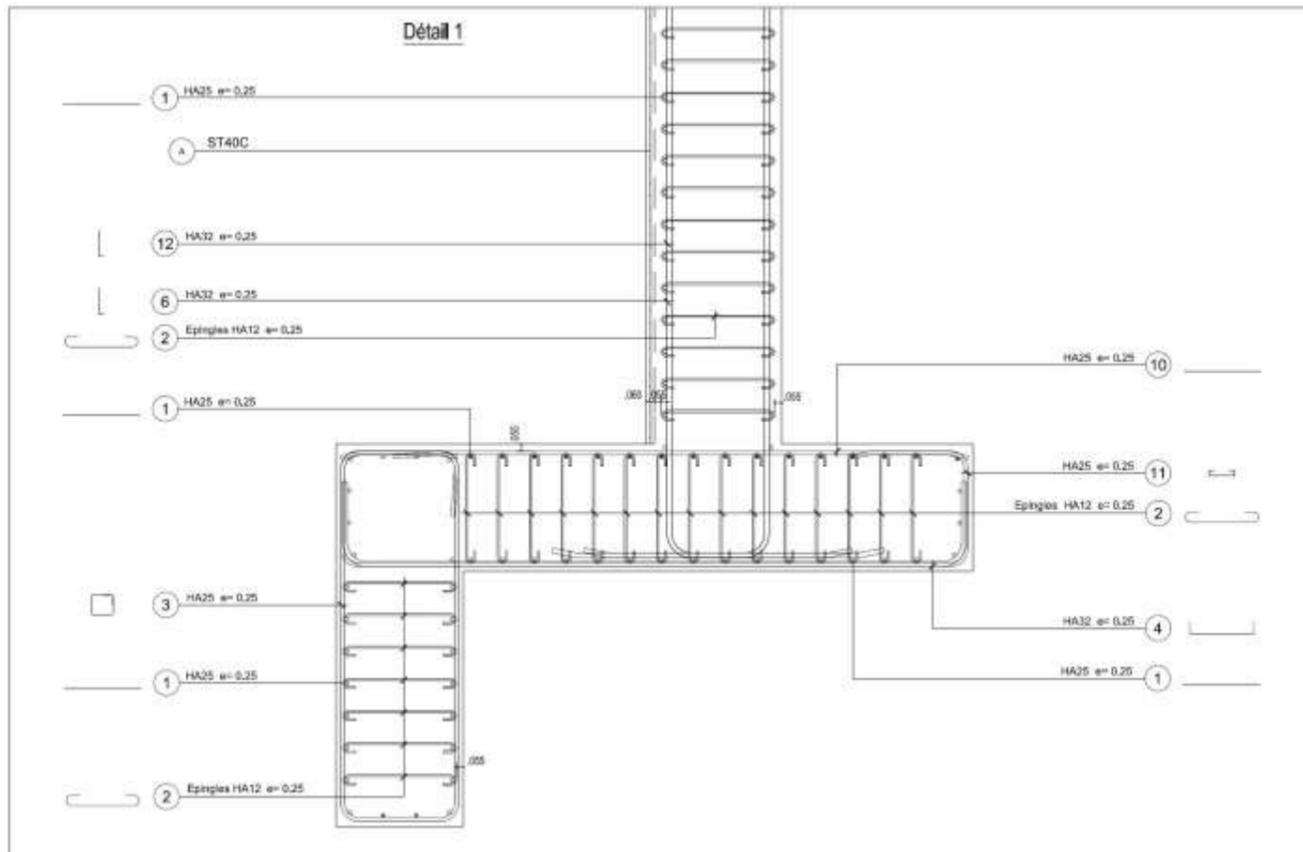


5.3 Matériaux et armatures

On utilisera un béton de type C30/37 armé de la façon suivante selon la partie de l'ouvrage considérée :

	Couverture -portique	Fondation : Semelle	Fondation : Butée
Béton – épaisseur (m)	1	1	1
Armatures pratiques dans le plan (cm ² /ml) sur les 2 faces	2 lits HA32 e=25 soit 64.34cm ² /ml	1 lit HA32 e=25 + 1lit HA25 e=25 soit 51.8 cm ² /ml	1 lit HA25 e=25 soit 24.54 cm ² /ml
Armatures longitudinales (hors plan) (cm ² /ml) sur les 2 faces	1 lit HA25 e=25 soit 24.54 cm ² /ml	1 lit HA25 e=25 soit 24.54 cm ² /ml	1 lit HA25 e=25 soit 24.54 cm ² /ml
Armatures d'effort tranchant (cm ² /m ²)	Epingle HA12 à chaque croisement : 16x1.13cm ² =18.08 cm ² /m ²	Epingle HA12 à chaque croisement : 16x1.13cm ² =18.08 cm ² /m ²	Epingle HA12 à chaque croisement : 16x1.13cm ² =18.08 cm ² /m ²
Ratio d'acier (kg/m3)	172	147	91

Ci-dessous, on présente des extraits du carnet de dessins [3] illustrant le tableau ci-dessus :



5.4 Actions appliquées sur le modèle de calcul structure du tronçon 2

5.4.1 Modélisation

Il a été choisi de modéliser 60m linéaires d'ouvrages dans Ansys, mais d'étudier les résultats uniquement dans la zone centrale sur 20m pour ne pas tenir compte des effets de bord induits par les conditions limites dans notre modélisation.

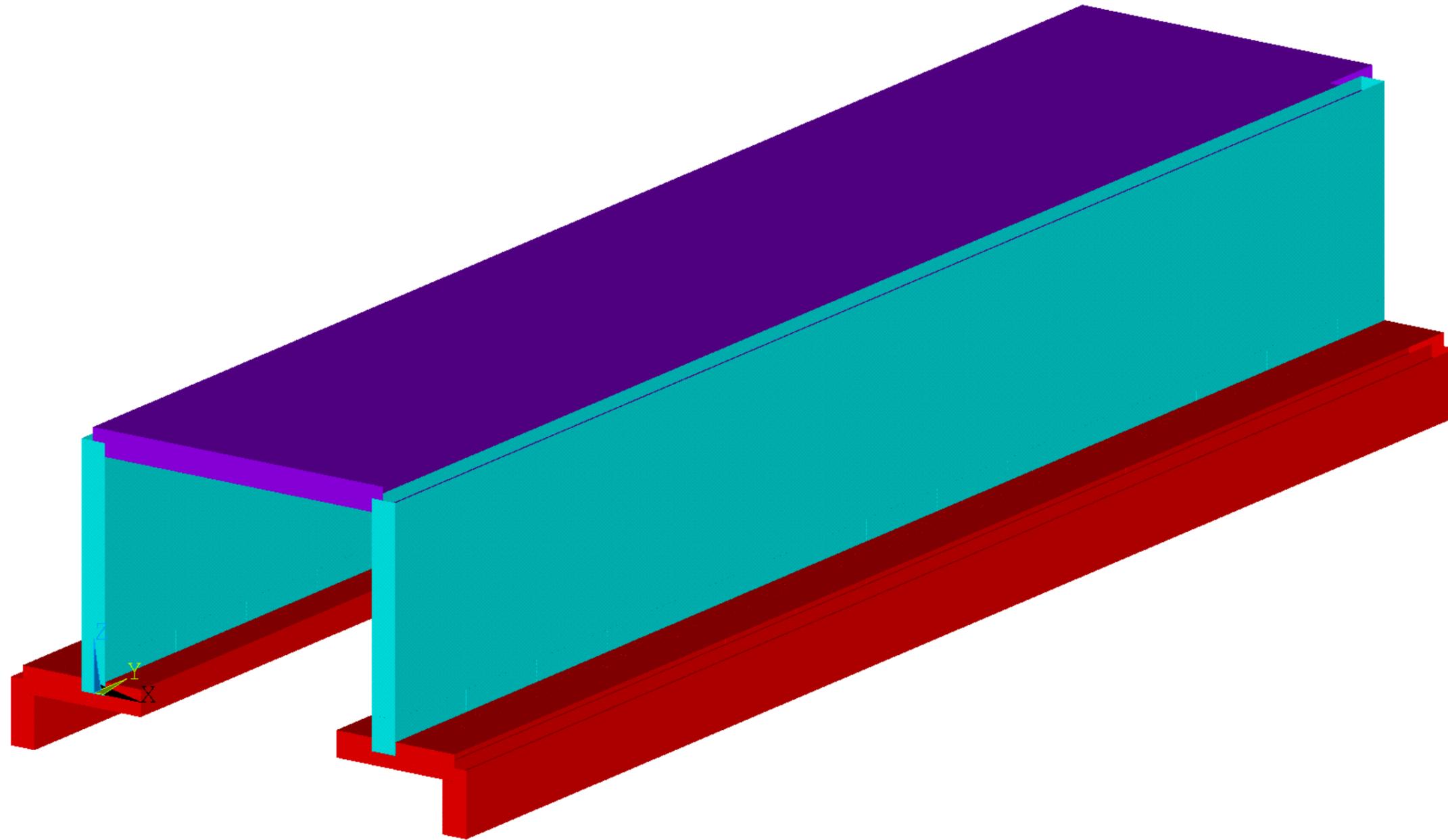
L'interaction sol-structure a été prise en compte par un tapis de ressorts élastiques verticaux sous les semelles filantes et horizontaux sur les butées dont la raideur est calée sur les caractéristiques mécaniques du sous-sol au niveau du tronçon considéré.

1

ELEMENTS
REAL NUM

ANSYS

APR 15 2010
15:17:29
PLOT NO. 1

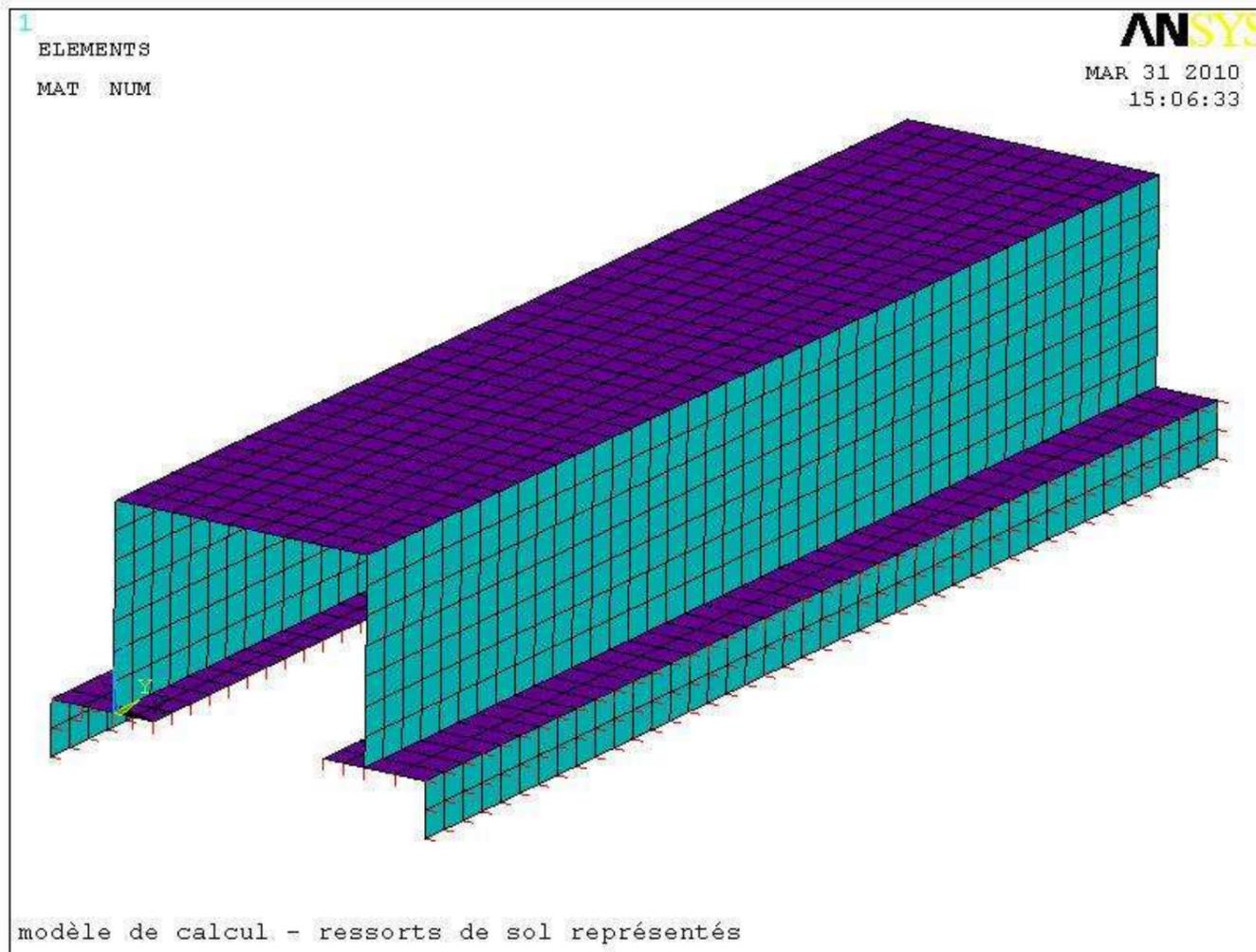


Modele 3D – Couverture de Donges

Les raideurs de sol (calculées selon le Fascicule 62 – Titre V) utilisées dans la modélisation sont détaillées ci-dessous :

Modules de réaction de sol		
Cas de charges	Permanents -Exploitation	Explosion-Séisme
Verticalement (kPa/m)	74807	149614
Horizontalement (kPa/m)	10160000	20320000

La raideur horizontale est calculée en supposant que la structure est fondée sur dans une couche de substratum altéré, ce qui est défavorable. Un coefficient 2 a été considéré entre les raideurs statiques et dynamiques.

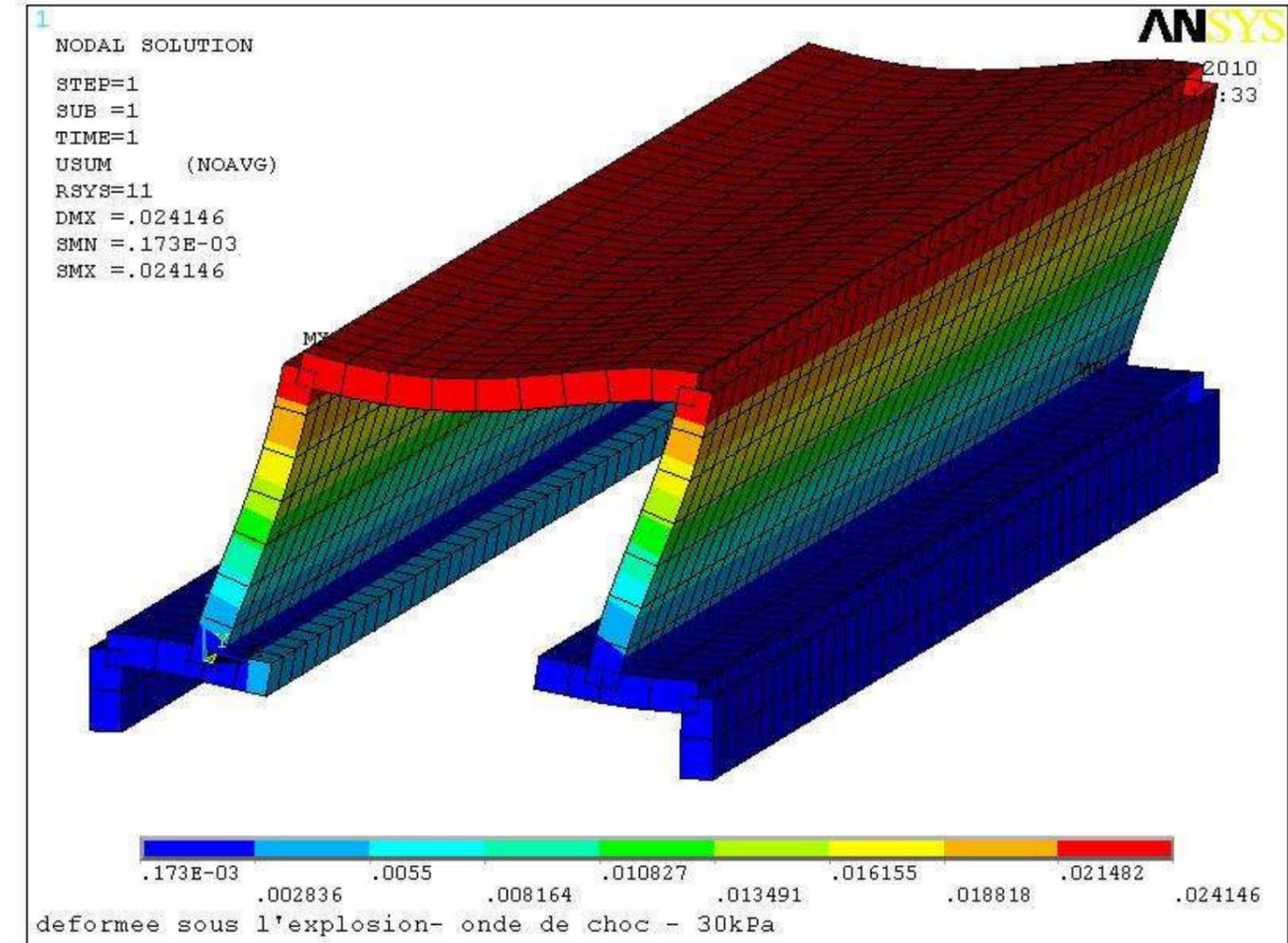


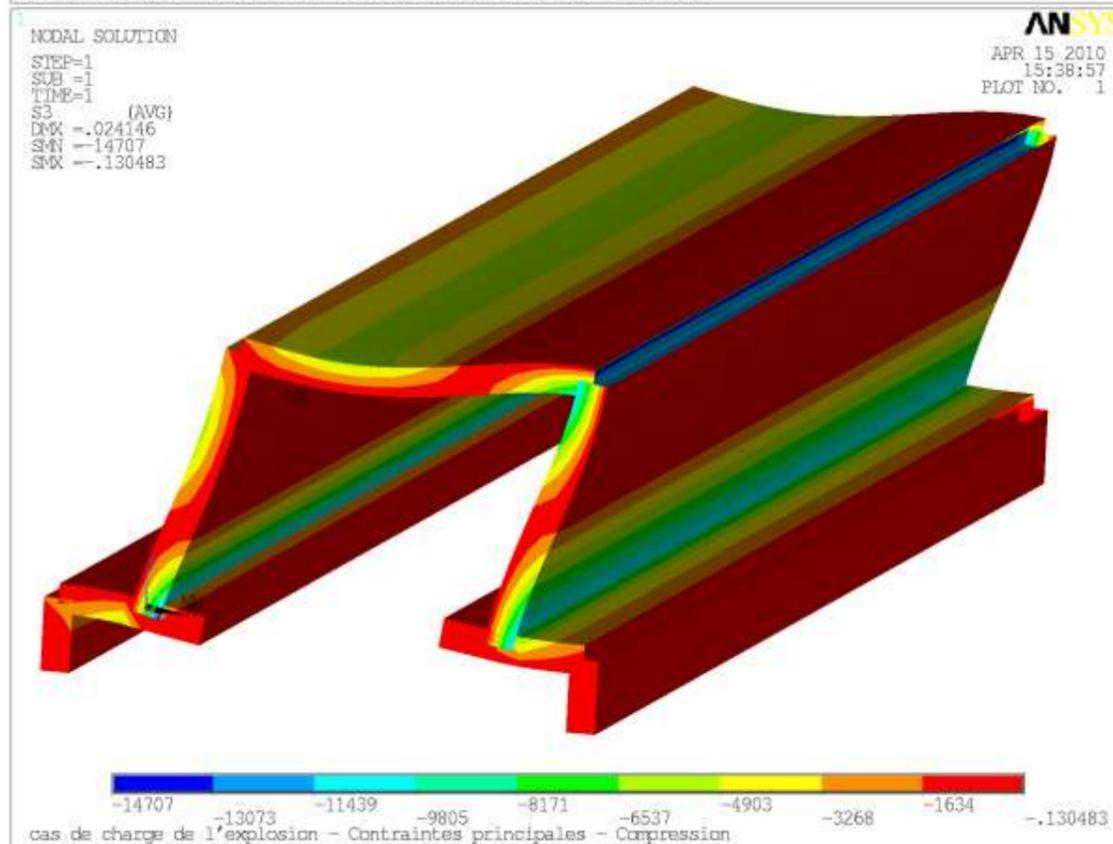
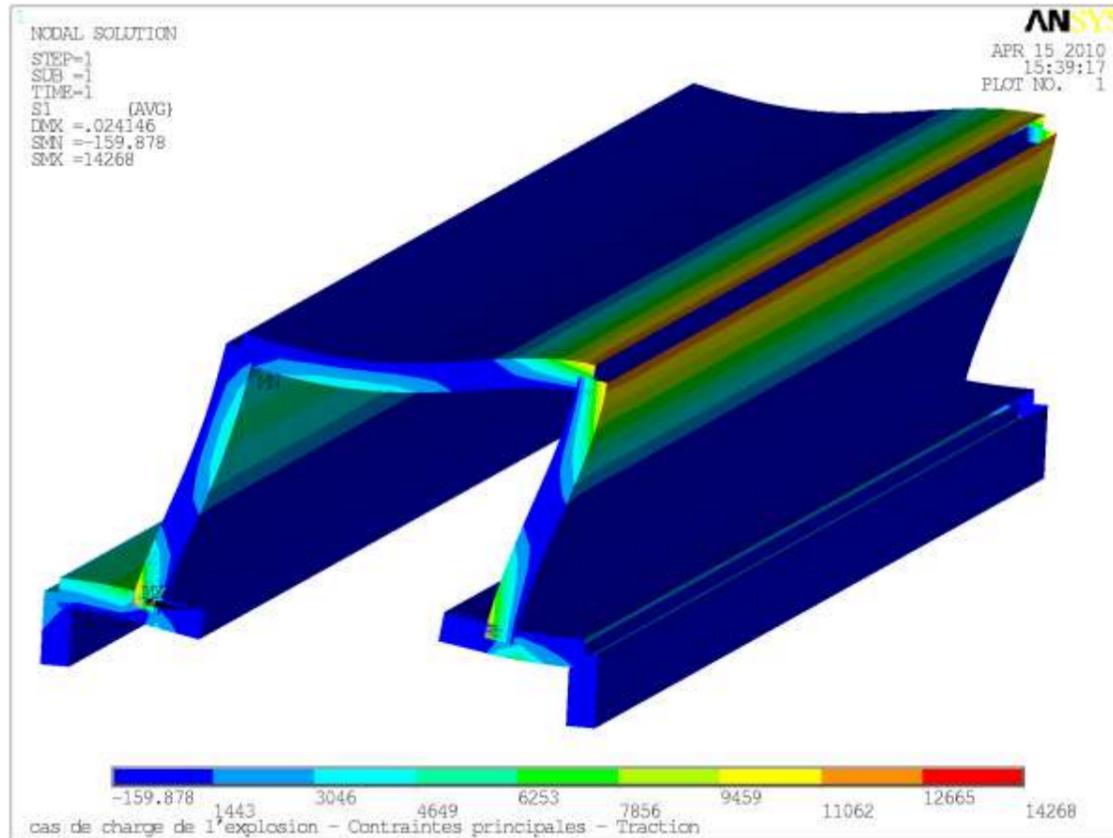
5.4.2 Actions

Toutes les actions décrites dans la note d'hypothèses ont été appliquées à la modélisation. On donne dans la suite la descente de charge par mètre linéaire pour chacun des cas de charges, sauf le séisme qui n'est pas dimensionnant ici compte tenu de l'importance des efforts horizontaux engendrés par la déflagration :

	Fz (kN/ml) Verticalement	Fx (kN/ml) Horizontalement dans le plan du portique
Poids propre de la structure béton	-1121	0
Charge des remblais	-1240	0
Charge d'exploitation	-123	0
Explosion	-984	1472

Ci-dessous la déformée de la structure sous le cas de charge d'explosion, ainsi que les contraintes principales de traction et de compression :





5.5 Justification de la structure et des états limites du sol.

La justification de la structure est donnée en annexe, Les principaux résultats sont résumés ci-dessous :

➤ Justification de la structure

Les déplacements maximaux de la structure (multipliés par 1.5 pour prendre en compte la fissuration du béton) sous l'effet de l'explosion sont égaux à $0.025\text{m} \times 1.5 = 0.038\text{m}$ dans la direction horizontale (atteint dans les angles supérieurs de la structure portique) et $-0.011\text{m} \times 1.5 = 0.017\text{m}$ dans la direction verticale (atteint à mi-travée de la dalle de couverture).

Le moment de flexion maximal sous l'effet de l'explosion vaut 2586 kNm/ml et est atteint dans l'angle supérieur de la structure portique.

➤ Etats limites du sol

Le déplacement vertical maximal sous les semelles filantes vaut -0.0068m sous combinaison accidentelle et -0.0029m sous combinaison ELS. De plus la semelle est entièrement comprimée pour les 2 enveloppes.

La contrainte maximale ELS vaut donc :

$$0.0029\text{m} \times 74807\text{kN/m}^3 = 216\text{kPa} < q_{\text{-els}}=744\text{ kPa} . \text{ Les états de service du sol sont donc assurés.}$$

La contrainte maximale ELUA (explosion) vaut :

$$216\text{kPa} + (0.0068-0.0039) \times 2 \times 74807\text{ kN/m}^3 = 800\text{ kPa} < q_{\text{-elu}}=1097\text{ kPa}$$

Les états limites du sol sont donc assurés.

5.6 Estimation du cout du tronçon**5.6.1 Métré**

Tronçon 2 : métré	Longueur de tronçon	Dimension transversale	Surface	épaisseur	Ratio	Coffrage	Volume de béton	Acier HA
	m	m	m ²	m	kg/m3	m ²	m3	T
Dalle de couverture	850	13,3	11 305	1,06	175	11 305	11 983	2 097
Piedroits 1	850	8,2	6 970	1,06	175	13 940	7 388	1 293
Piedroits 2	850	8,2	6 970	1,06	175	13 940	7 388	1 293
Semelle filante 1	850	5	4 250	1	150	1 700	4 250	638
Semelle filante 2	850	5	4 250	1	150	1 700	4 250	638
Butée verticale 1	850	2	1 700	1	91		1 700	155
Butée verticale 2	850	2	1 700	1	91		1 700	155
Total :						42 585	38 660	6 267
Terrassement = 255 000 m3 Remblais = 76 500 m4								

5.6.2 Estimation du prix du tronçon

DESIGNATION	Unité	Quantité	P.U. €	Montant k€
TRONCON 2				
GO				
Béton	M3	38 660	250	9 665
Acier	kg	6 267 348	1,4	8 774
Coffrage	M2	42 585	90	3 833
Terrassement	M3	255 000	10	2 550
Remblais	M3	76 500	15	1 148
Travaux divers			15%	3 895
Sous total GO				29 865
DEPENSES GENERALES				
15%				
				4 480
Installations générales de chantier Direction de projet (Planification, Encadrement, Pilotage...) Ingénierie (Etudes d'exécution structure et méthode Synthèse technique,,)				
Sous total de tronçon 2				34 344

(Base janvier 2009)

Le prix de tronçon 2 ramené au mètre linéaire revient à 40 000 euros /ml

6 DIMENSIONNEMENT DU TRONÇON NUMÉRO 1

Ce type de fondation pourra être envisagé lorsque le long du tracé, la couche de sol de substratum se trouve à une profondeur dépassant -2m par rapport au niveau +0.00.

6.1 Localisation

Le tronçon 1 est celui pouvant être soumis à des explosions dont la pression incidente maximale en champ libre peut atteindre 30 kPa sous la forme d'une onde de choc. Il est situé dans la partie Sud du tracé à proximité du littoral.



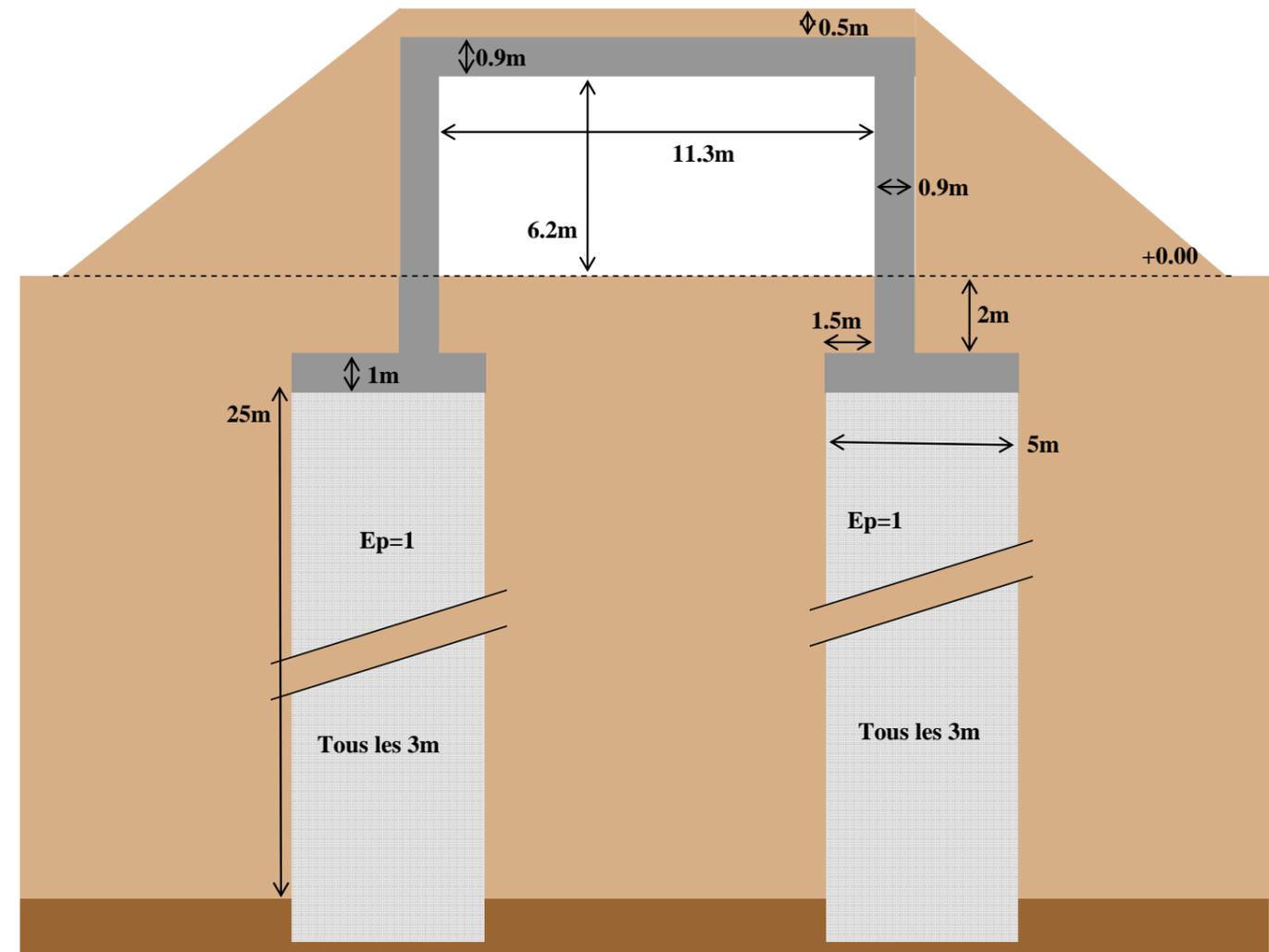
A ce stade du projet, on retiendra une longueur du tronçon de 500m dans l'estimation du coût global.

6.2 Géométrie

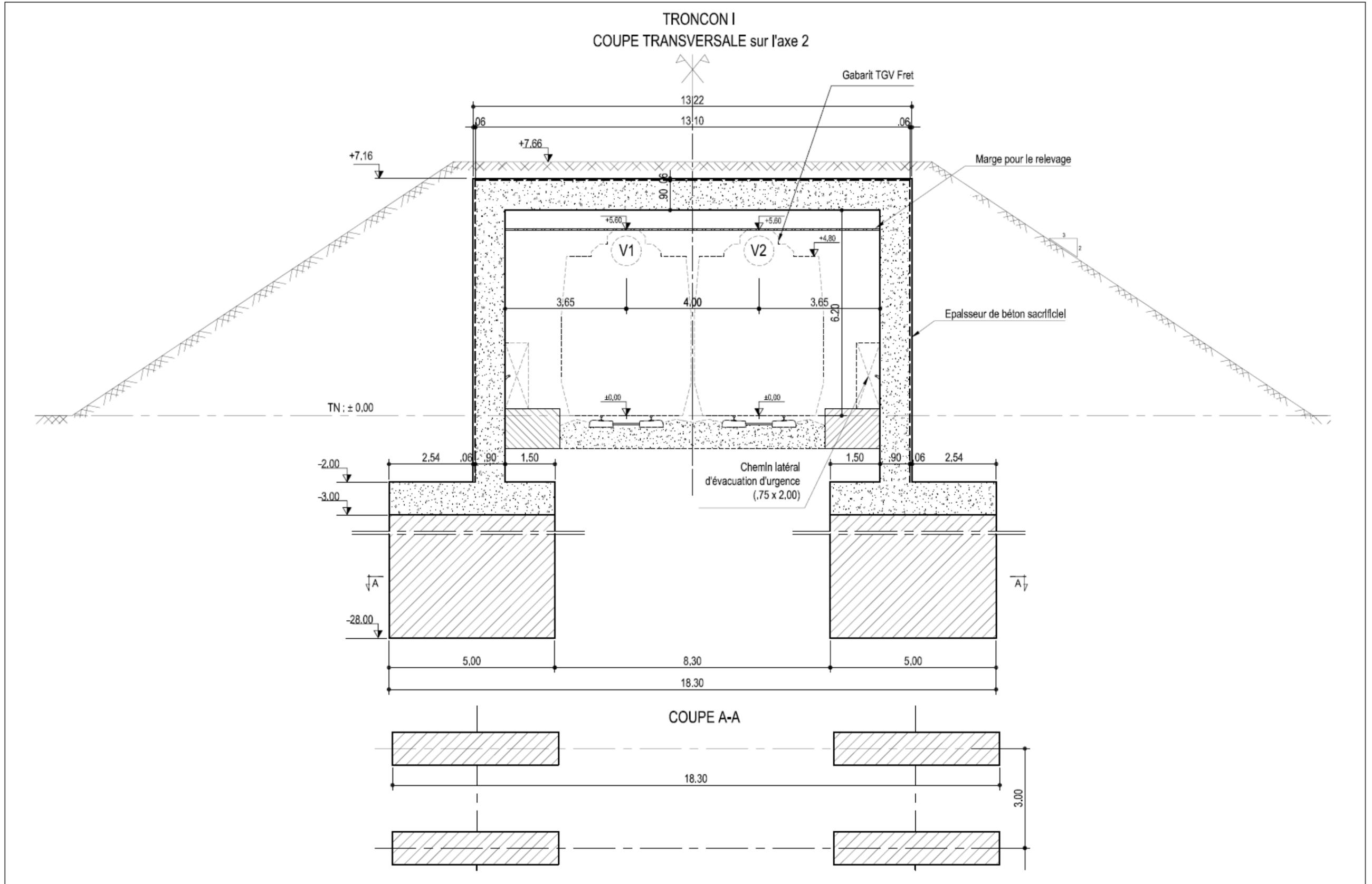
Ce tronçon est fondé sur des semelles filantes de 1m d'épaisseur à 3 mètres de profondeur par rapport au niveau +0.00 dans lesquelles sont encastrées des parois moulées de 5m de large et de 1m d'épaisseur réparties tous les 3m dans la direction hors plan. La hauteur de ces parois dépend de la profondeur de la couche de substratum sain dans laquelle viennent s'encastrer en pied les parois moulées.

Dans l'attente d'une campagne de sondages complémentaires dans cette partie du tracé, nous avons retenu pour le calcul de stabilité une hauteur de 25m.

La superstructure se compose d'un portique de 0.9m d'épaisseur recouvert au besoin d'une couche de remblai de 50cm sur le dessus.



Il sera rajouté à ce dimensionnement, une surépaisseur extérieure de 6cm de béton sacrificiel conformément à la note d'hypothèses [1].



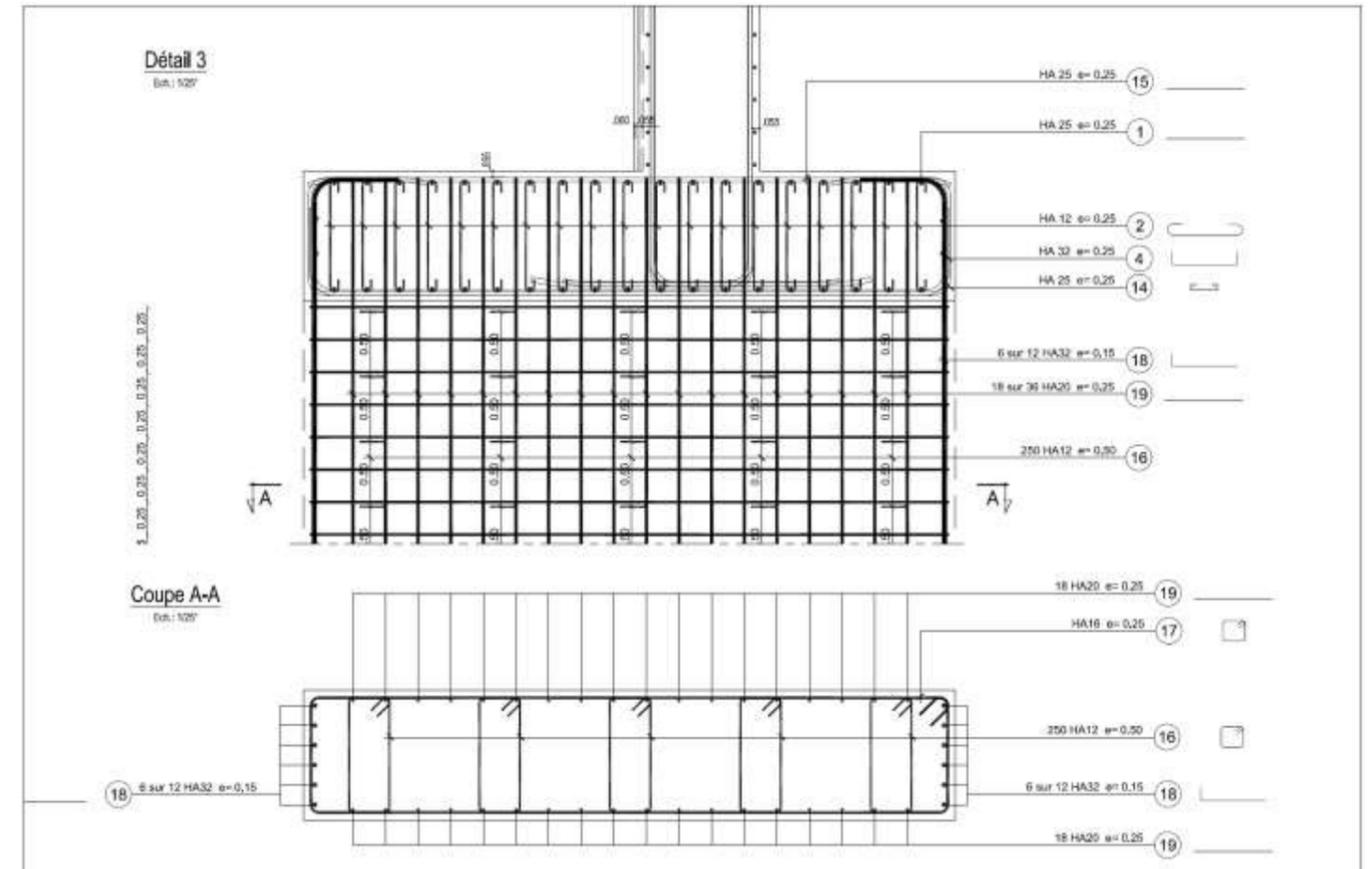
6.3 Matériaux et armatures

On utilisera un béton de type C30/37 armé de la façon suivante selon la partie de l'ouvrage considérée :

	Couverture -portique	Fondation : Semelle filante
Béton – épaisseur (m)	0.9	1
Armatures pratiques dans le plan (cm ² /ml) sur les 2 faces	1 lit HA32 e=25 + 1lit HA25 e=25 soit 51.8 cm ² /ml	1 lit HA32 e=25 + 1lit HA25 e=25 soit 51.8 cm ² /ml
Armatures longitudinales (hors plan) (cm ² /ml) sur les 2 faces	1 lit HA25 e=25 soit 24.54 cm ² /ml	1 lit HA25 e=25 soit 24.54 cm ² /ml
Armatures d'effort tranchant (cm ² /m ²)	Epingle HA10 à chaque croisement : 16x0.79cm ² =12.64cm ² /m ²	Epingle HA10 à chaque croisement : 16x0.79cm ² =12.64cm ² /m ²
Ratio d'acier (kg/m ³)	154	140

	Fondation : parois moulées
Béton – épaisseurs (m)	1m x 5m x 25m
Armatures principales verticales	6 HA32 aux 2 extrémités + HA20 e=25 sur les deux faces au milieu
Armatures horizontales	Cadres HA16 e=25 verticalement sur toute la hauteur
Armatures d'effort tranchant	9 Cadres HA12 e=50 verticalement sur toute la hauteur e=50
Ratio d'acier (kg/m ³)	80

Nous donnons dans la suite des extraits du carnet de dessins [3] illustrant le tableau ci-dessus :



6.4 Actions appliquées sur le modèle de calcul structure du tronçon 1

6.4.1 Modélisation

Il a été choisi de modéliser 3 mètre linéaire de l'ouvrage dans le logiciel FRAME développé par Setec TPI, de façon à modéliser un panneau de paroi moulée de chaque côté du portique.

L'interaction sol-structure a été prise en compte par des ressorts horizontaux le long des panneaux de paroi moulée dont la raideur dépend de la couche de sol traversée et de la taille des mailles du modèle éléments finis.

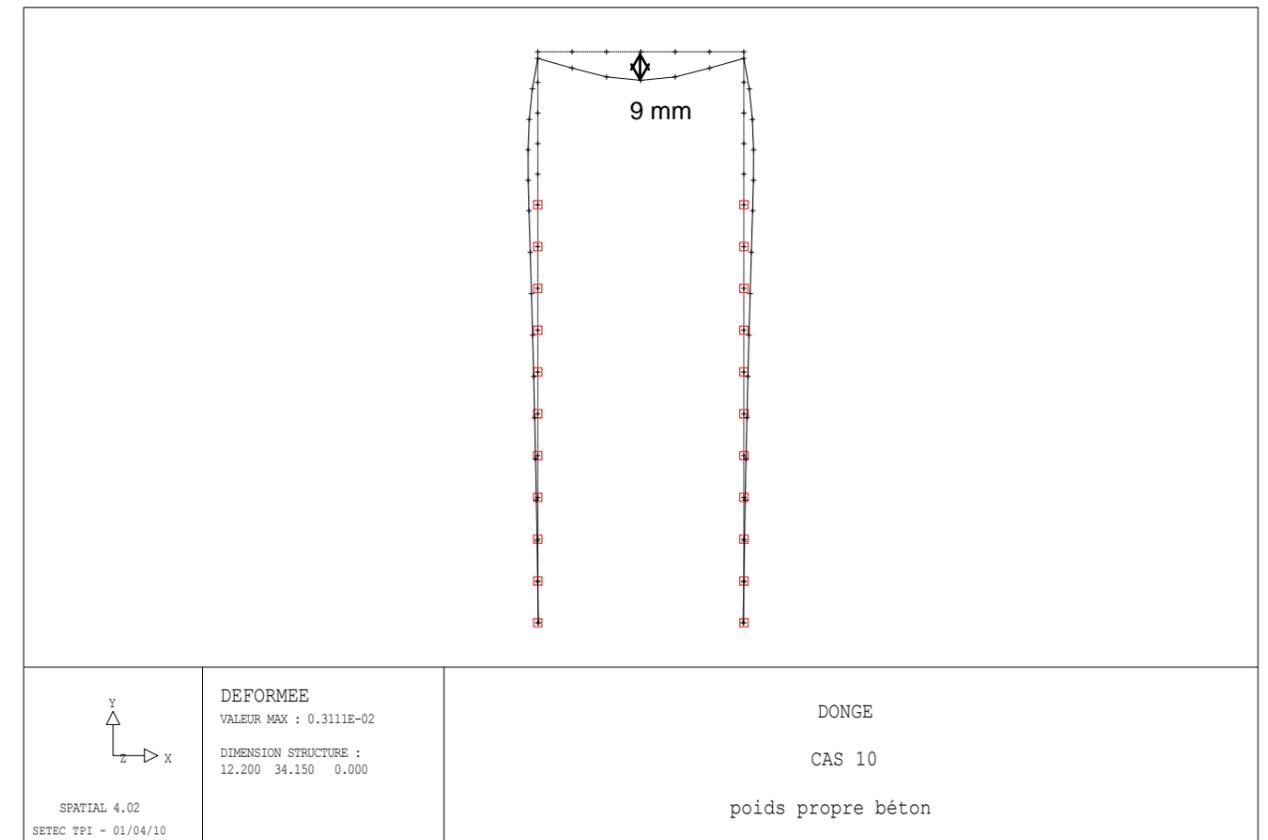
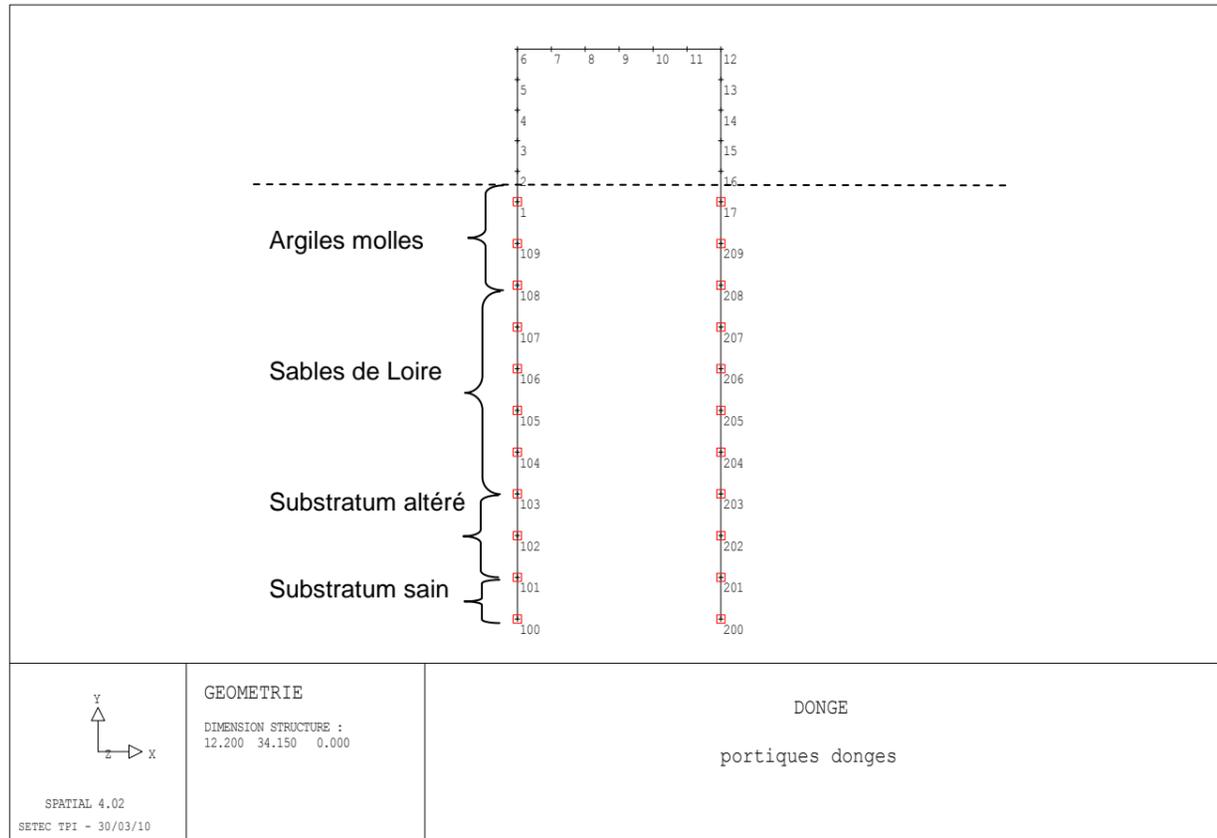
Les déplacements verticaux ont été bloqués en pied des parois moulées.

6.4.2 Actions

Toutes les actions décrites dans la note d'hypothèses ont été appliquées à la modélisation. Nous donnerons dans la suite la descente de charge par mètre linéaire pour chacun des cas de charges sauf le séisme qui n'est pas dimensionnant ici compte tenu de l'importance des efforts horizontaux engendrés par la déflagration:

	Fz (kN/ml) Verticalement	Fx (kN/ml) Horizontalement dans le plan du portique
Poids propre de la structure béton	-2769	0
Charge des remblais	-1095	0
Charge d'exploitation	-122	0
Explosion	-732	1098

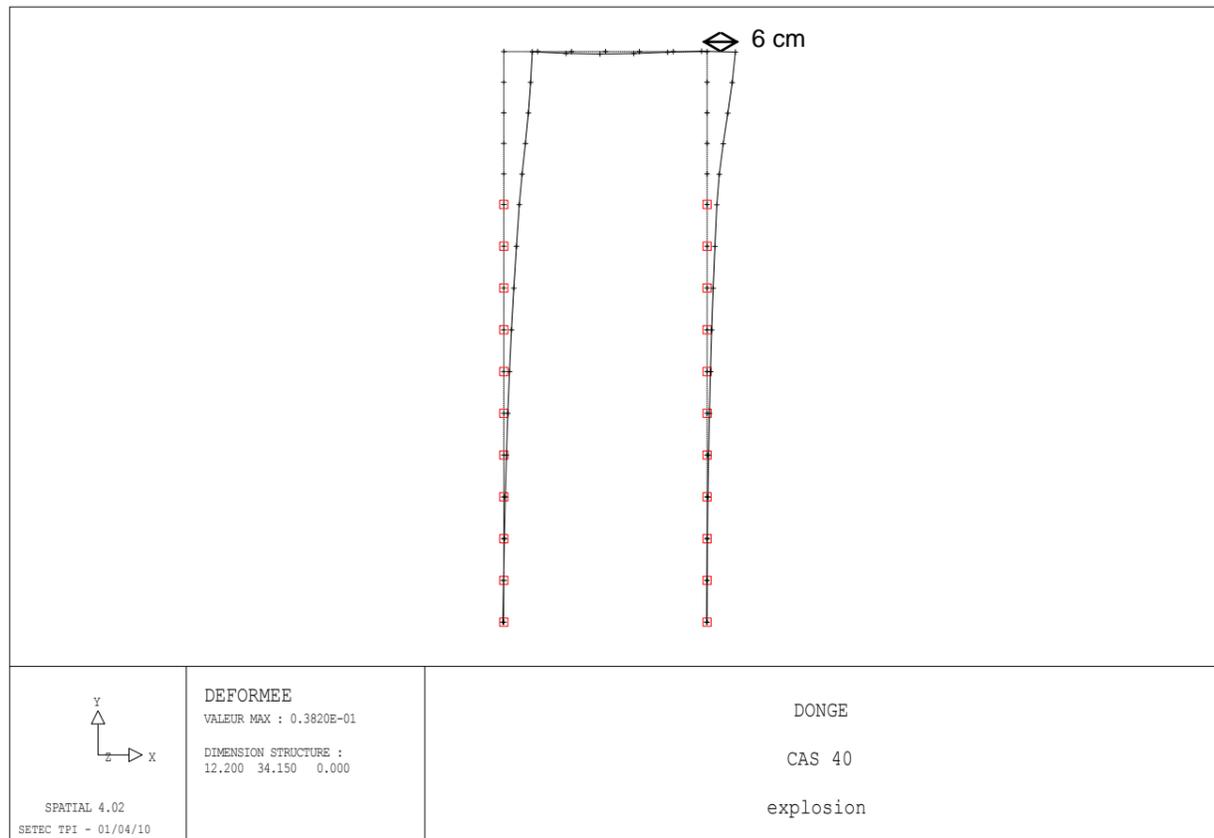
Ci-dessous les déformées de la structure sous le cas de charge de poids propre ainsi que pour le cas de charge de l'explosion :



Les raideurs de sol (calculées selon le Fascicule 62 – Titre V) utilisées dans la modélisation sont détaillées ci-dessous :

Couche de Sol	Modules de réaction de sol horizontaux	
	Permanents -Exploitation	Explosion-Séisme
Argiles molles -3m à -7m	5 MPa/m par mètre vertical de paroi moulée	10 MPa/m par mètre vertical de paroi moulée
Sables de Loire -7m à -20m	11 MPa/m par mètre vertical de paroi moulée	22 MPa/m par mètre vertical de paroi moulée
Substratum altéré -20m à -25m	52.5 MPa/m par mètre vertical de paroi moulée	105 MPa/m par mètre vertical de paroi moulée
Substratum sain -25m à -28m	345 MPa/m par mètre vertical de paroi moulée	690 MPa/m par mètre vertical de paroi moulée

Un coefficient 2 a été considéré entre les raideurs statiques et dynamiques.



6.5 Justification de la structure

La justification de la structure est donnée en annexe, il n'est résumé ici que les principaux résultats :

Les déplacements maximaux de la structure (multipliés par 1.5 pour prendre en compte la fissuration du béton) sous l'effet de l'explosion sont égaux à $0.04\text{m} \times 1.5 = 0.06\text{m}$ dans la direction horizontale (atteint dans les angles supérieurs de la structure portique) et $-0.006\text{m} \times 1.5 = -0.009\text{m}$ dans la direction verticale (atteint à mi-travée de la dalle de couverture).

6.6 Estimation du coût du tronçon

6.6.1 Métré

Tronçon 1 : métré	Longueur de tronçon		Dimension transversale	Surface	épaisseur	Ratio	Coffrage	Volume de béton	Acier HA
	m								
Dalle de couverture	500		13,1	6 550	0,96	155	6 550	6 288	975
Piedroits 1	500		8,2	4 100	0,96	155	8 200	3 936	610
Piedroits 2	500		8,2	4 100	0,96	155	8 200	3 936	610
Semelle filante 1	500		5	2 500	1	140	1 000	2 500	350
Semelle filante 2	500		5	2 500	1	140	1 000	2 500	350
Paroi moulée 1	167 parois	20 de profondeur*	5	16 700	1	80		16 700	1 336
Paroi moulée 2	167 parois	20 de profondeur*	5	16 700	1	80		16 700	1 336
Total :							24 950	52 560	5 567
Terrassement =		152 000	m3						
Remblais =		45 000	m4						

* profondeur moyenne sur le tronçon

6.6.2 Estimation du prix du tronçon

DESIGNATION	Unité	Quantité	P.U. €	Montant k€
TRONCON 1				
GO				
Beton	M3	19 160	250	4 790
Acier	kg	2 894 800	1,4	4 053
Coffrage	M2	24 950	90	2 246
Parois moulées	M2	33 400	700	23 380
Terrassement	M3	152 000	10	1 520
Remblais	M3	45 000	15	675
Travaux divers			15%	5 499
sous total GO				42 163
DEPENSES GENERALES			15%	6 324
Installations générales de chantier				
Direction de projet (Planification, Encadrement, Pilotage...)				
Ingénierie (Etudes d'exécution structure et méthode Synthèse technique,...)				
Sous total de tronçon 1				48 487

(Base janvier 2009)

Le prix de tronçon 1 ramené au mètre linéaire revient à 97 000 euros /ml

7 DIMENSIONNEMENT DU TRONÇON 3

Le tronçon 3 est fondé sur semelles superficielles, ce type de fondation pourra être envisagé lorsque le long du tracé, la couche de sol de substratum se trouve à une profondeur ne dépassant pas -2m par rapport au niveau +0.00.

7.1 Localisation

Le tronçon 3 est celui pouvant être soumis aux explosions les moins importantes dont la pression incidente en champ libre peut atteindre 14 kPa sous la forme d'une déflagration. Il est situé dans la partie Ouest du tracé.

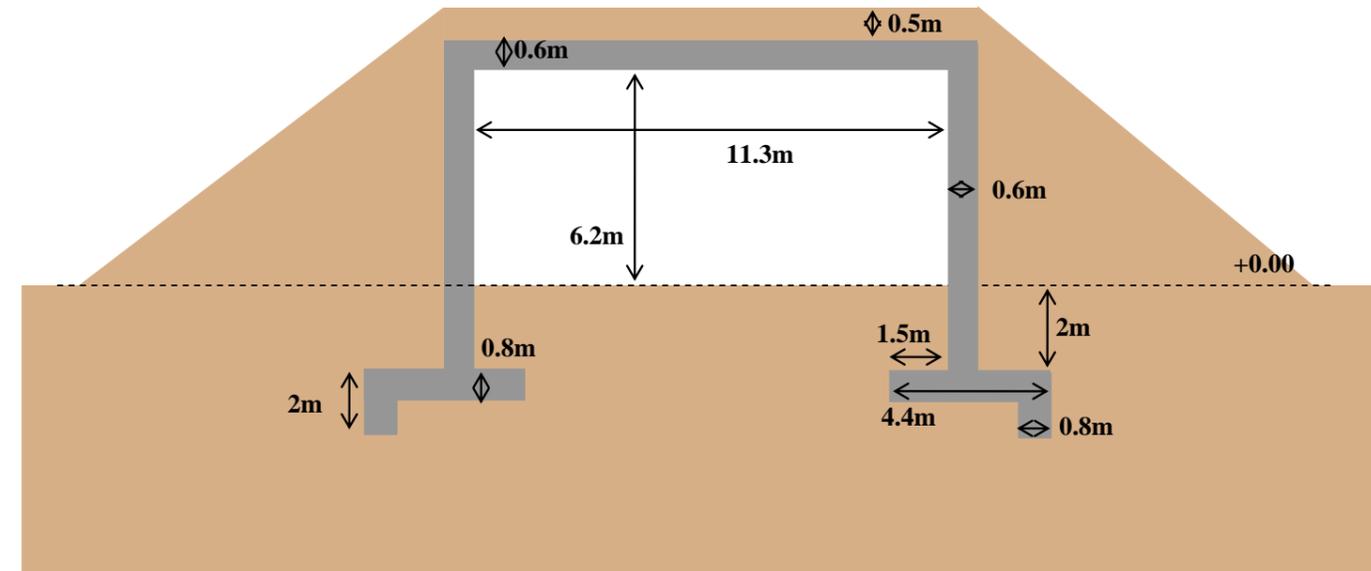


A ce stade du projet, on retiendra une longueur du tronçon de 2700m +500m (pour le tronçon 3*) = 3200m dans notre estimation du cout global.

7.2 Géométrie

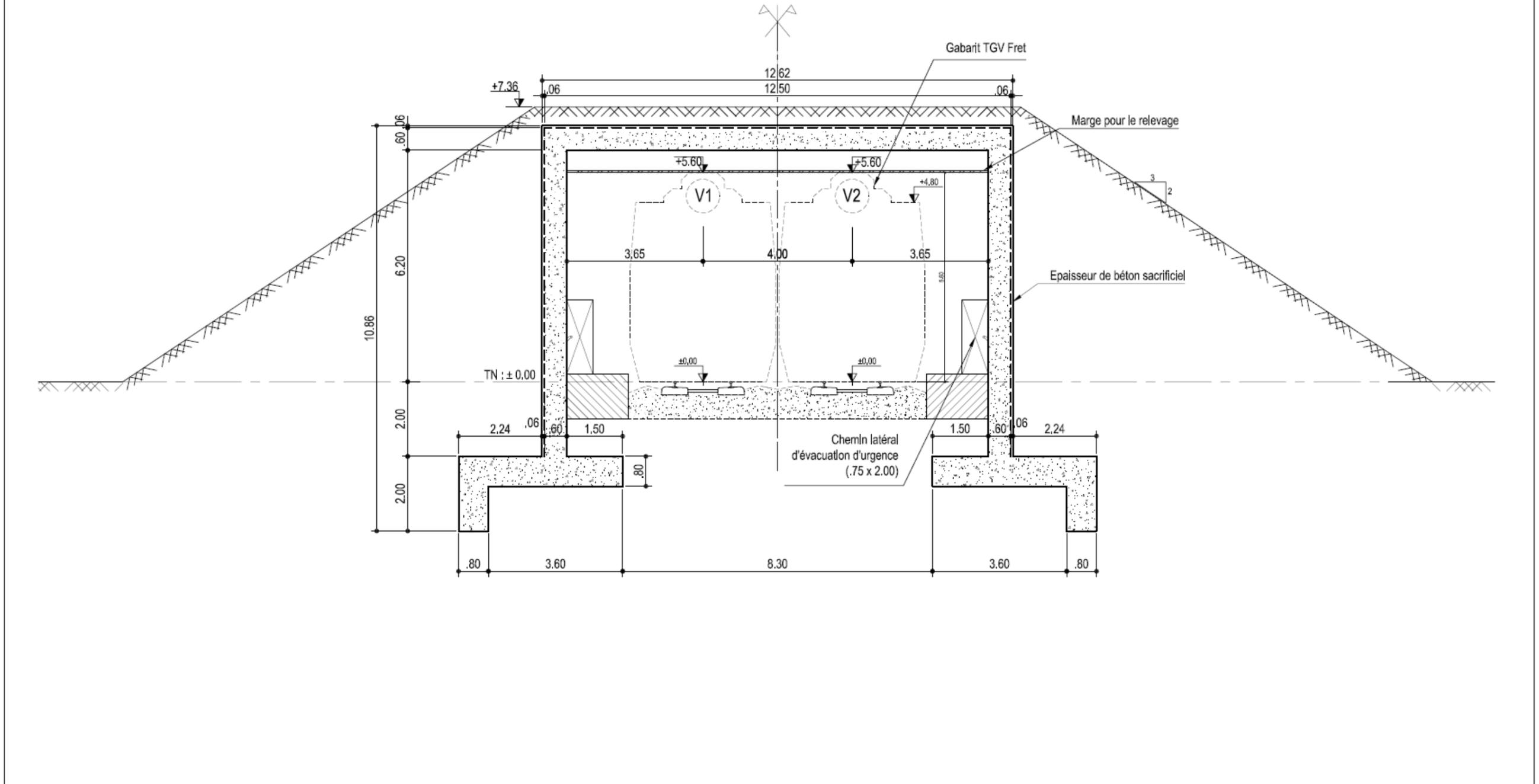
Ce tronçon est fondé sur des semelles superficielles filantes de 0.8m d'épaisseur à 2.8 mètres de profondeur par rapport au niveau +0.00. On rajoute une butée verticale filante de 1m de haut et de 0.8m d'épaisseur sous la semelle côté extérieur afin de transférer au sol l'effort horizontal important dû à l'explosion accidentelle.

La superstructure se compose d'un portique de 0.6m d'épaisseur laissant recouvert d'une couche de remblai de 50cm sur le dessus.



Il sera rajouté à ce dimensionnement, une surépaisseur extérieure de 6cm de béton sacrificiel conformément à la note d'hypothèses [1].

TRONCON III
COUPE TRANSVERSALE



7.3 Matériaux et armatures

On utilisera un béton de type C30/37 armé de la façon suivante selon la partie de l'ouvrage considérée :

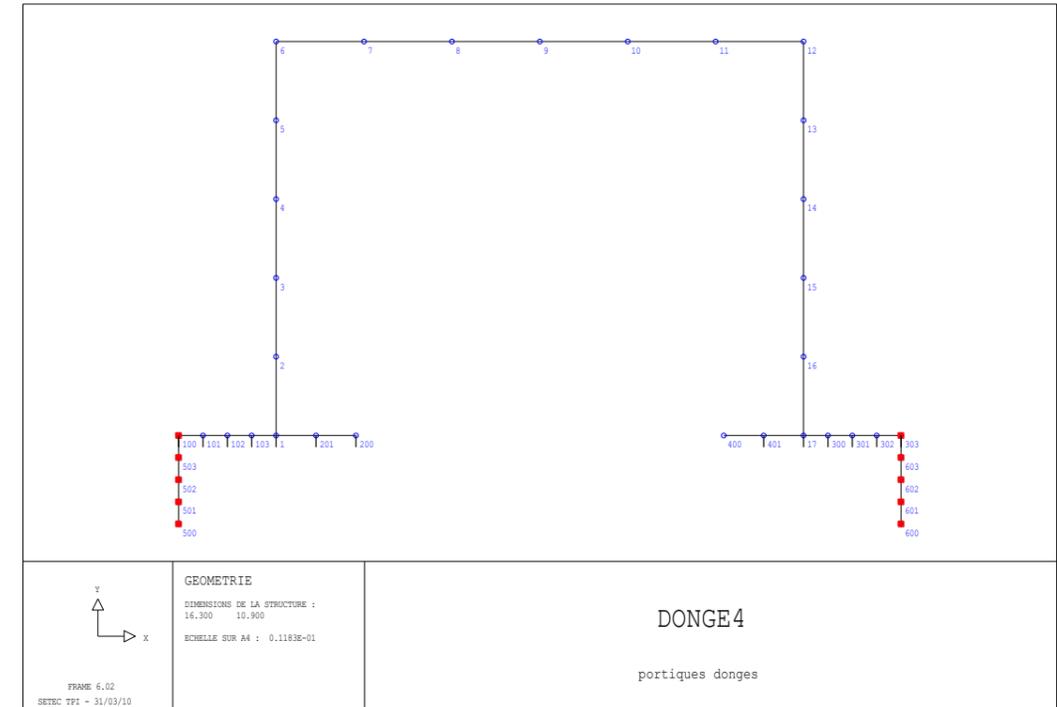
	Couverture -portique	Fondation : Semelle	Fondation : Butée
Béton – épaisseur (m)	0.6	0.8	0.8
Armatures pratiques dans le plan (cm ² /ml) sur les 2 faces	1 lit HA32 e=25 soit 32.2 cm ² /ml	1 lit HA32 e=25 soit 32.2 cm ² /ml	1 lit HA25 e=25 soit 24.54 cm ² /ml
Armatures longitudinales (hors plan) (cm ² /ml) sur les 2 faces	1 lit HA25 e=25 soit 24.54 cm ² /ml	1 lit HA25 e=25 soit 24.54 cm ² /ml	1 lit HA25 e=25 soit 24.54 cm ² /ml
Armatures d'effort tranchant (cm ² /m ²)	Epingle HA10 à chaque croisement : 16x0.79cm ² =12.64cm ² /m ²	Epingle HA10 à chaque croisement : 16x0.79cm ² =12.64cm ² /m ²	Epingle HA10 à chaque croisement : 16x0.79cm ² =12.64cm ² /m ²
Ratio d'acier (kg/m ³)	170	131	103

7.4 Actions appliquées sur le modèle de calcul structure du tronçon 3

7.4.1 Modélisation

Il a été choisi de modéliser 1 mètre linéaire de l'ouvrage dans le logiciel FRAME développé par Setec TPI.

L'interaction sol-structure a été prise en compte par un tapis de ressorts verticaux elasto-plastiques sous les semelles filantes et horizontaux sur les butées dont la raideur est calée sur les caractéristiques mécaniques du sous-sol au niveau du tronçon considéré.



Les raideurs de sol (calculées selon le Fascicule 62 – Titre V) utilisées dans la modélisation sont détaillées ci-dessous :

Cas de charges	Modules de réaction de sol	
	Permanents -Exploitation	Explosion-Séisme
Verticalement (kPa/m)	74807	149614
Horizontalement (kPa/m)	12850000	25700000

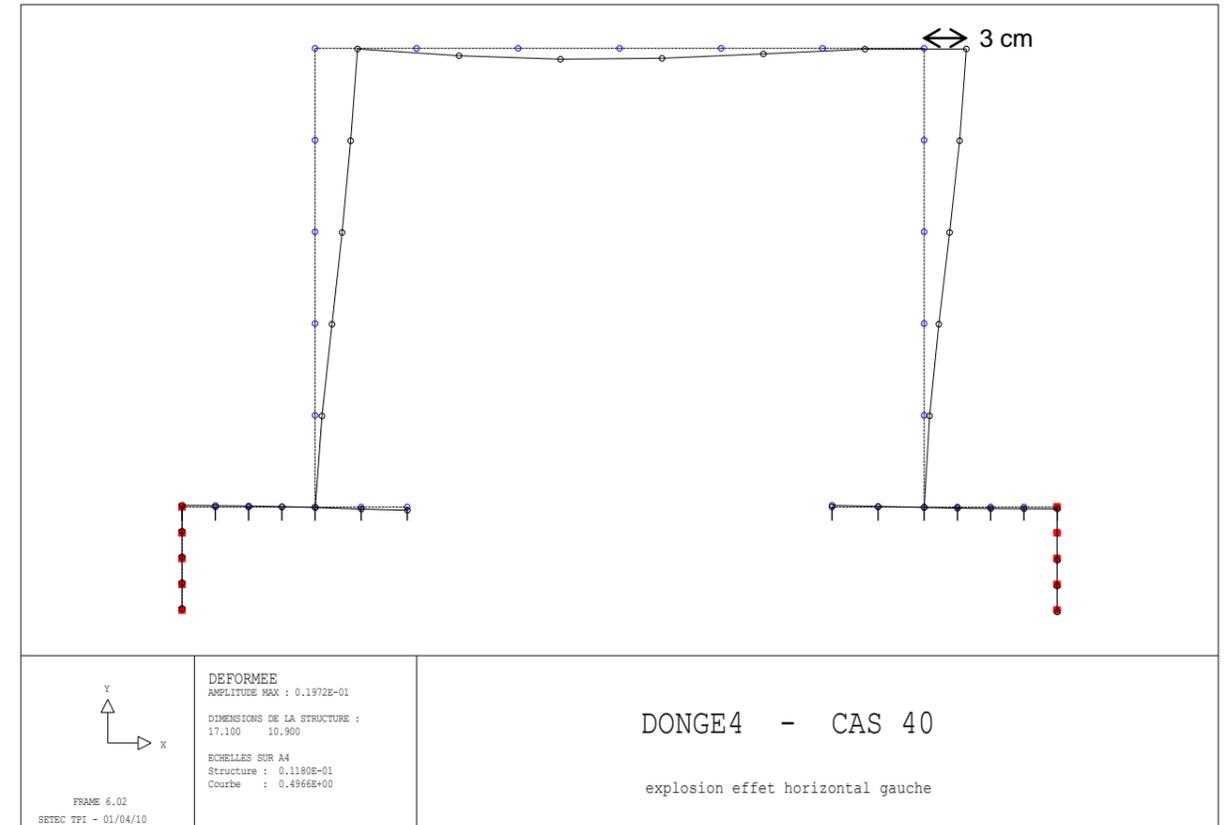
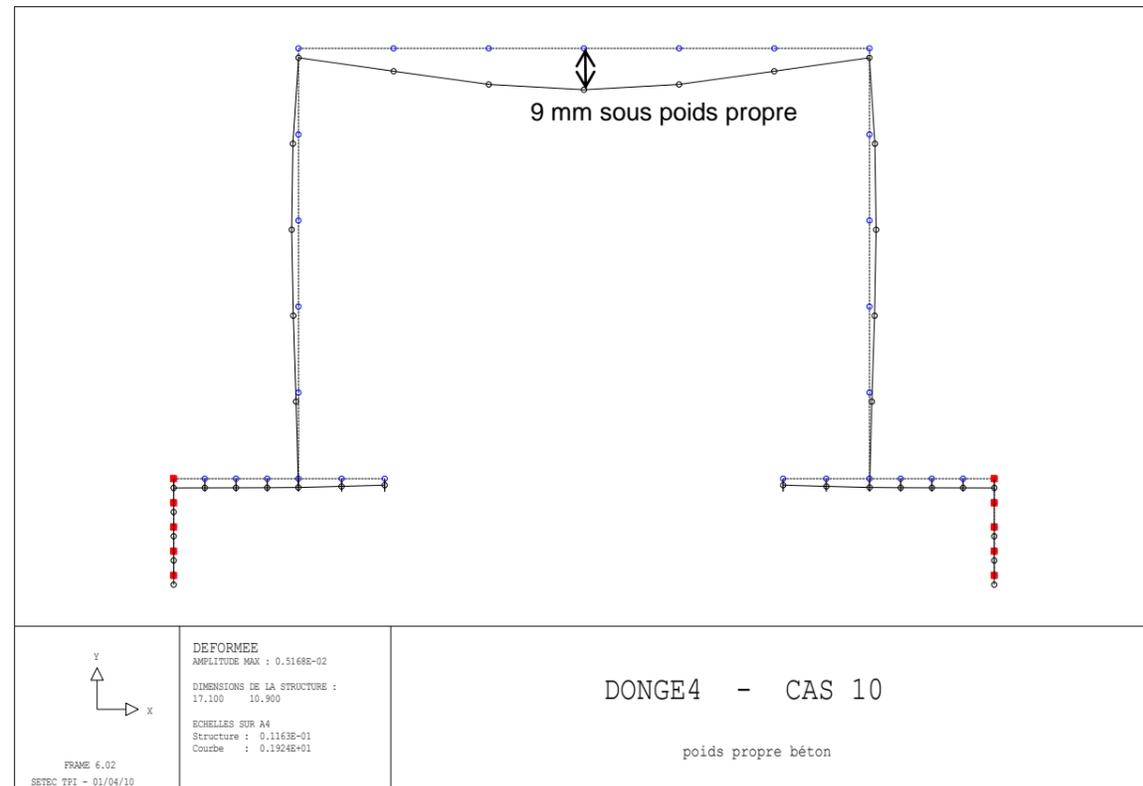
La raideur horizontale est calculée en supposant que la structure est fondée sur dans une couche de substratum altéré, ce qui est défavorable. Un coefficient 2 a été considéré entre les raideurs statiques et dynamiques.

7.4.2 Actions

Toutes les actions décrites dans la note d'hypothèses ont été appliquées à la modélisation. Nous donnerons dans la suite la descente de charge par mètre linéaire pour chacun des cas de charges sauf le séisme qui n'est pas dimensionnant ici compte tenu de l'importance des efforts horizontaux engendrés par la déflagration:

	Fz (kN/ml) Verticalement	Fx (kN/ml) Horizontalement dans le plan du portique
Poids propre de la structure béton	-686	0
Charge des remblais	-1164	0
Charge d'exploitation	-117	0
Explosion	-267	399

Ci-dessous les déformées de la structure sous le cas de charge de poids propre ainsi que pour le cas de charge de l'explosion :



7.5 Justification de la structure et des états limites du sol.

La justification de la structure est donnée en annexe, on résume ici que les principaux résultats :

➤ Justification de la structure

Les déplacements maximaux (multipliés par 1.5 pour prendre en compte la fissuration du béton) de la structure sous l'effet de l'explosion sont égaux à $0.02\text{m} \times 1.5 = 0.03\text{m}$ dans la direction horizontale (atteint dans les angles supérieurs de la structure portique) et $-0.014\text{m} \times 1.5 = -0.021\text{m}$ dans la direction verticale (atteint à mi-travée de la dalle de couverture).

Le moment de flexion maximal sous l'effet de l'explosion vaut 857 kNm/ml et est atteint dans l'angle supérieur de la structure portique.

➤ Etats limites du sol

Le déplacement vertical maximal sous les semelles filantes vaut -0.0039m sous combinaison accidentelle et -0.0031m sous combinaison ELS. De plus la semelle est entièrement comprimée pour les 2 enveloppes.

La contrainte maximale ELS vaut donc :

$$0.0031\text{m} \times 74807\text{kN/m}^3 = 231\text{kPa} < q_{\text{els}}=744\text{ kPa} . \text{ Les états de service du sol sont donc assurés.}$$

La contrainte maximale ELUA (explosion) vaut :

$$231\text{kPa} + (0.0039-0.0031) \times 2 \times 74807\text{ kN/m}^3 = 351\text{ kPa} < q_{\text{elu}}=1097\text{ kPa}$$

Les états limites du sol sont donc assurés.

7.6 Estimation du cout du tronçon

7.6.1 Métré

Tronçon 3 : métré	Longueur de tronçon	Dimension transversale	Surface	épaisseur	Ratio	Coffrage	Volume de béton	Acier HA
	m	m	m ²	m	kg/m ³	m ²	m ³	T
Dalle de couverture	3 200	12,5	40 000	0,66	170	40 000	26 400	4 488
Piedroits 1	3 200	8,2	26 240	0,66	170	52 480	17 318	2 944
Piedroits 2	3 200	8,2	26 240	0,66	170	52 480	17 318	2 944
Semelle filante 1	3 200	4,4	14 080	0,8	135	5 120	11 264	1 521
Semelle filante 2	3 200	4,4	14 080	0,8	135	5 120	11 264	1 521
Butée verticale 1	3 200	1,2	3 840	0,8	103		3 072	316
Butée verticale 2	3 200	1,2	3 840	0,8	103		3 072	316
Total :						155 200	89 709	14 050
Terrassement = 160 000 m ³								
Remblais = 288 000 m ⁴								

7.6.2 Estimation du prix du tronçon

DESIGNATION	Unité	Quantité	P.U. €	Montant k€
TRONCON 3				
GO				
Béton	M3	89 709	250	22 427
Acier	kg	14 050 368	1,4	19 671
Coffrage	M2	155 200	90	13 968
Terrassement	M3	160 000	10	1 600
Remblais	M3	288 000	15	4 320
Travaux divers			15%	9 298
Sous total GO				71 284
DEPENSES GENERALES				
15%				
				10 693
Installations générales de chantier				
Direction de projet (Planification, Encadrement, Pilotage...)				
Ingénierie (Etudes d'exécution structure et méthode Synthèse technique,,)				
Sous total de tronçon 3				81 976

(Base janvier 2009)

Le prix de tronçon 1 ramené au mètre linéaire revient à 26 000 euros /ml

8 SÉCURITÉ FERROVIAIRE

8.1 Sécurité des voyageurs sous l'ouvrage

L'ouvrage de protection ainsi réalisé sera à considérer comme un tunnel du point de vue de la sécurité des usagers des trains vis-à-vis des risques d'accident et en particulier d'incendie dans le tunnel pouvant provoquer un arrêt du train sous l'ouvrage.

Il y aura donc lieu de définir précisément les différents dispositifs et équipements non ferroviaires d'évacuation, d'alerte et de secours dont il devra nécessairement être équipé en application des textes réglementaires ci-dessous :

- **ITI 98300 : Instruction Technique Interministérielle** relative à la sécurité dans les tunnels ferroviaires
- **STI (Spécification Technique d'Interopérabilité)** relative à «la sécurité dans les tunnels ferroviaires» du système ferroviaire transeuropéen conventionnel et à grande vitesse

En l'occurrence, s'il était décidé de poursuivre les études d'un ouvrage de ce type, l'étude et l'estimation de l'ouvrage "brut" telle qu'elle a été réalisée dans cette première approche devrait être précisée et complétée par toutes les mesures à prendre :

- pour favoriser l'auto évacuation des voyageurs en cas de sinistre:

La STI impose en particulier des issues de secours latérales espacées de moins de 1000m (ce qui en représenterait 4 dans le cas présent) et exprime de nombreuses exigences vis-à-vis du sous-système infrastructure (Détection d'incendie, installations permettant le sauvetage, cheminements d'évacuation, éclairage de secours sur les voies d'évacuation, communication en situation d'urgence, accès réservés aux services de secours, aires de secours à l'extérieur des tunnels, bornes incendie et approvisionnement en eau, ventilation pour stratification des fumées,...).

- Assurer la continuité de la voie de desserte de l'ITE TOTAL et des autres ITE éventuels au travers des parois de l'ouvrage.
- Permettre la continuité d'une desserte à la halte ferroviaire.

8.2 Sécurité vis-à-vis des risques de chocs ferroviaires

La construction de cet ouvrage à proximité des voies ne le soumet pas au respect des exigences de la fiche UIC 777-2, certes relative aux dispositions constructives à observer pour les ouvrages situés au dessus des voies ferrées, mais pour des ouvrages dits de "Classe A" et de "Classe B" qui peuvent abriter ou voir circuler dans leur partie supérieure du public à titre permanent ou occasionnel.

En l'occurrence, la conception de l'ouvrage lui permettant de résister à une explosion de la raffinerie, tout choc ferroviaire, quelle que soit la vitesse ou la nature de la circulation incriminée (matières dangereuses...), sera a priori inoffensif sur sa structure.

Toutefois, lors d'études plus détaillées, la conception de l'ouvrage notamment à ses extrémités pourra s'inspirer des préconisations de cette fiche UIC qui prévoient dans certains cas de figure en fonction de la proximité d'appareils de voie de réaliser des "musoirs" assurant une fonction de détournement. Cette fonction, qui pourrait être assurée par exemple par un quai d'au moins 55cm de haut en entonnoir ou par la pose de rails de sécurité, aurait elle pour objectif de renforcer la sécurité des voyageurs.

9 CALCUL DE L'ESTIMATION

9.1 Génie civil et ouvrage d'art

Les prix concernent l'ouvrage brut défini dans le présent rapport et n'intègrent pas la prise en compte des aménagements éventuels que nécessiteraient :

- La surlargeur éventuelle de l'ouvrage pour abriter des quais voyageurs,
- L'aménagement d'issues de secours latérales,
- Les dispositions particulières qu'il y aurait lieu de prendre au niveau des parois latérales pour maintenir les voies déviées des appareils de voie vers les ITE.

Les prix n'intègrent pas les impacts financiers éventuels sur l'exploitation ferroviaire compte tenu du stade d'étude.

9.2 Equipements Ferroviaires et Non Ferroviaires

DESIGNATION	Unité	Quantité	P,U,€	Montant,k€
EQUIPEMENTS				
EQUIPEMENTS FERROVIAIRES				
Dépose des installations (caténaires, etc.)		5	87 500	403
Électrification 25kV dans la TC		5	570 000	2 622
Adaptation Signalisation		5	170 000	782
Adaptation télécom		5	110 000	506
Phasage - conditions de réalisation sur ligne exploitée ~30%		1	1 293 750	1 294
Sous total Equipements Ferroviaires				5 606
EQUIPEMENTS NON FERROVIAIRES				
Alimentation Electrique, Eclairage, etc.		3	2 500 000	7 500
Aménagements annexes (Issues de secours, Métallerie, etc.)		8	150 000	1 200
Sous total Equipements Non Ferroviaires				8 700
DEPENSES GENERALES			15%	2 146
Installations générales de chantier				
Direction de projet (Planification, Encadrement, Pilotage...)				
Ingénierie (Etudes d'exécution structure et méthode Synthèse technique,,)				
Sous total Equipements				16 452
Sous total Equipements arrondi à				16 500

➤ Equipements ferroviaires

Les prix comprennent la dépose des installations électriques existantes, l'électrification de la voie dans la tranchée couverte, l'adaptation des installations de télécommunication et de signalisation (en particulier résistance au feu) dans la tranchée couverte.

La voie ferrée proprement dite est supposée non impactée par le projet de couverture.

Les prix n'intègrent pas les impacts financiers éventuels sur l'exploitation ferroviaire compte tenu du stade d'étude.

➤ Equipements non ferroviaires de sécurité

La tranchée couverte compte tenu de sa longueur nécessite par ailleurs des équipements non ferroviaires conformément aux réglementations en vigueur (voir article 8.1).

Les prix comprennent en outre les équipements suivants : Eclairage, Alimentation électrique des installations en tunnel, signalisation des issues des secours, ...ainsi que des l'aménagement des issues de secours (portes, métallerie diverses, etc.).

Les prix n'intègrent pas les impacts financiers éventuels sur l'exploitation ferroviaire compte tenu du stade d'étude.

10 ESTIMATION POUR LE TRACE ENTIER

10.1 Estimation globale du tracé

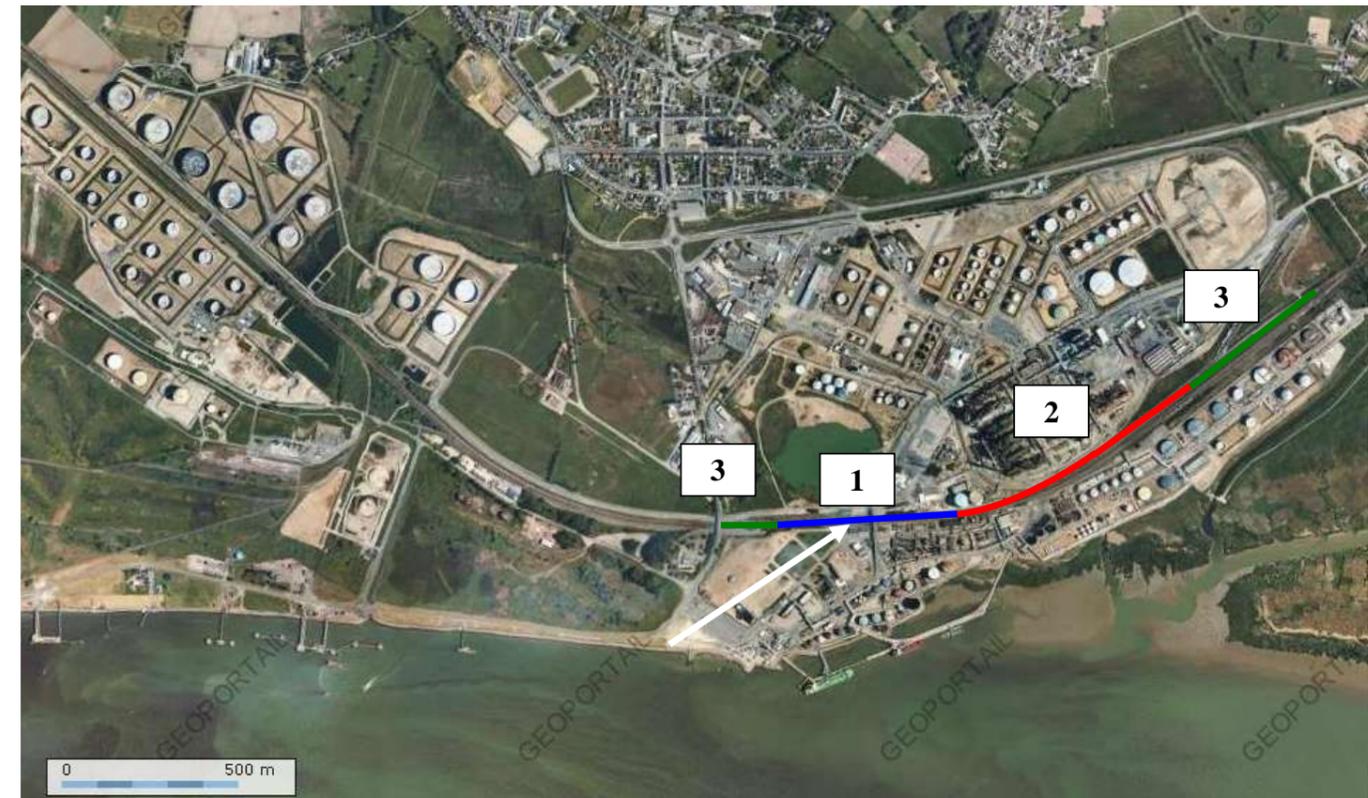
Tronçon	Longueur, m	Prix k€/ml	Total k€
1	500	97	48 500
2	850	40	34 000
3	3200	26	83 200
Equipements ferroviaires			16 500
Sous total			182 200
Somme à valoir		15%	27 330
Provision pour risque		20%	36 440
MOA		3%	5 466
Actualisation 01/2010		3,13 %	7 870
Total*			259 270

A ce stade, les chiffrages présentés concernent exclusivement l'ouvrage génie civil brut. Les coûts associés aux maintiens des 2 ITE (embranchements ferrées Antargaz et Raffinerie), au maintien ou déplacement de la halte voyageurs, à la création des issues de secours et aux impacts financiers sur l'exploitation ferroviaire en phase travaux ne sont pas pris en compte. Ces coûts sont de nature à augmenter significativement le coût global de cette solution.

Sous ces réserves, le coût de l'ouvrage de génie civil brut est évalué à 260 millions d'euros (aux conditions économiques janvier 2010).

11 ESTIMATION POUR LA TRAVERSEE DE LA RAFFINERIE

A titre comparatif avec les tracés ferroviaires alternatifs présentés à l'issue des études préliminaires, la longueur du tronçon 3 côté ouest peut être réduite jusqu'à l'ouvrage de la RD4. En effet, les tracés ferroviaires alternatifs traversent la zone de stockage ouest de la raffinerie.



Tronçon	Longueur, m	Prix, k€	Total, k€
1	500	97	48 500
2	850	40	34 000
3	650	26	16 900
Equipements ferroviaires (prorata)			7 300
Sous total			106 700
Somme à valoir		15%	16 000
Provision pour risque		20%	21 400
MOA		3%	3 200
Actualisation 01/2010		3,13 %	4 610
Total*			151 910

Il est également rappelé que les chiffrages présentés concernent exclusivement l'ouvrage génie civil brut. Les coûts associés aux maintiens des 2 ITE (embranchements ferrées Antargaz et Raffinerie), au maintien ou déplacement de la halte voyageurs, à la création des issues de secours et aux impacts financiers sur l'exploitation ferroviaire en phase travaux ne sont pas pris en compte. Ces coûts sont de nature à augmenter significativement le coût global de cette solution. Ainsi, le coût de l'ouvrage de génie-civil brut est évalué à 152 millions d'euros (aux conditions économiques janvier 2010).

12 CONCLUSION

La présente note conclue l'étude de pré-dimensionnement de la couverture de la voie ferrée au droit de la raffinerie de DONGES et de sa faisabilité structurelle.

Elle présente le découpage du tracé en trois tronçons différents qui font chacun l'objet d'une étude de dimensionnement et d'estimation de prix.

Un cahier de plans de coffrage et de plans guides de ferrailage sont présenté dans le carnet de dessins afin d'illustrer les résultats de la présente étude.

Le coût financier correspond à l'estimation brute de la construction de l'ouvrage de couverture dans des conditions de réalisation en site propre ne prenant pas en compte à ce niveau d'études les multiples contraintes d'exécution qui pourraient relever de la proximité des voies principales en exploitation et d'une nécessaire continuité de desserte des Installations Terminales Embranchées, en particulier de TOTAL et ANTARGAZ.

Il ne prend pas en compte les éventuelles sujétions particulières liées à l'intégration de la halte dans l'ouvrage ou son déplacement en dehors des zones de risques technologiques.

L'absence de contraintes permettrait une réalisation mobile du chantier de construction avec en premier lieu la réalisation des 167 barrettes (à raison de 2 jours par unité) suivie du ferrailage et du coulage du portique proprement dit par un dispositif de coffrage glissant permettant une progression de 10 mètres tous les 5 jours. Dans ces conditions optimales de réalisation considérées dans les estimations, il faudrait compter 1 an ½ pour terminer l'ouvrage. Il faudrait donc compter entre 2 ans et 2ans ½ pour la totalité des travaux équipements inclus.

Les phases ultérieures d'études plus détaillées devront surtout s'attacher à analyser les meilleures dispositions constructives à adopter vis-à-vis des contraintes des circulations ferroviaires à prendre en compte, qu'elles soient d'ordre technique ou commercial.

Le maintien en exploitation de la ligne pendant les travaux nécessitera un phasage complexe et de multiples situations temporaires peuvent avoir un impact très conséquent à la fois sur leurs coûts et sur la durée de réalisation (non chiffré au stade actuel d'études).