

## *Titre*

# **Tour TRINITY à La Défense. Conception structurelle**

## *Chapeau*

Les travaux de la tour Trinity vont démarrer à La Défense. L'opération s'inscrit dans le cadre du plan de renouveau de La Défense et combine à la fois un aménagement urbain et la construction d'un IGH. Cet ouvrage atypique va être réalisé au-dessus des 4 voies de l'avenue de la Division Leclerc, accès à l'autoroute A14.

Conçue par l'Agence d'architecture Crochon-Brullmann & Associés, cette tour de 140m de hauteur mise sur la légèreté et la rapidité de construction. La tour proprement dite s'appuie sur une couverture routière qui lui sert de socle de répartition.

## *Auteurs*

- Jean-Marc Jaeger, Directeur, **setec tpi**
- Yoann Galle, Ingénieur Principal, **setec tpi**

## *Texte*

### ■ 1. PRESENTATION GENERALE

#### **1.1 Contexte du projet**

L'EPADESA a engagé depuis 2007 un Plan de Renouveau de la Défense visant à redynamiser le développement du quartier d'affaires de la Défense. C'est dans ce contexte qu'est prévu la construction de l'ensemble Trinity comprenant un IGH et des espaces ouverts au public.

Le projet est implanté au-dessus de l'avenue de la Division Leclerc (RN192) le long du CNIT. La tour repose sur une dalle ou « ouvrage de couverture des voiries » qui recouvre une partie de la RN192 et ses contre allées. Cette couverture permet de créer une liaison piétonne entre la dalle Coupole et celle du CNIT.

#### **1.2 Intervenants**

Le projet Trinity dans son ensemble est porté par Unibail-Rodamco qui en assure la maîtrise d'ouvrage. La maîtrise d'œuvre a été confiée à un groupement comprenant notamment l'agence d'architecture Crochon Brullmann + Associés et **setec tpi**, en charge de la Maitrise d'Œuvre structure.

L'EPADESA assure la maîtrise d'ouvrage des espaces publics et des infrastructures accompagnant la réalisation de la couverture Trinity.

L'Etat, dont l'ouvrage couvre partiellement les voiries de la RN 192, joue un rôle fort par l'examen des dossiers réglementaires qui lui sont transmis concernant en particulier l'ouvrage de couverture.

A la date de rédaction du présent article l'entreprise de construction n'a pas encore été désignée.

### **1.3 Description et particularités du projet**

La tour a une forme générale pouvant s'assimiler en plan à un parallélogramme. Les étages courants sont inscrits dans un rectangle de 87 m de long x 31 m de large, pour une surface brute d'environ 1 800 m<sup>2</sup>.

Le défi posé par le projet Trinity est de réaliser un immeuble de grande hauteur, le long du CNIT et situé au-dessus des voies de la RN 192. La demande du Maître d'Ouvrage était de réaliser le plus d'étages possibles, finalement le projet comportera 36 étages dont 30 étages de bureaux. Les voies resteront en circulation pendant les travaux.

Le site est fortement enclavé entre le CNIT et les bâtiments voisins : l'immeuble SGAM et la tour AREVA. Un ouvrage de couverture des voiries supporte l'IGH.

La superstructure de l'IGH a été conçue en fonction de l'ouvrage de couverture, pour limiter les descentes de charges et pour répartir au mieux celles-ci au niveau du substratum :

- les charges descendant du haut de la tour jusqu'à la couche de Calcaire le plus verticalement possible, les poteaux de la tour et les voiles du noyau s'alignent sur les piédroits,
- Les planchers sont légers et les éléments verticaux apportent la raideur: structure mixte pour les planchers et un Béton Haute Performance pour les éléments porteurs et voiles de contreventement pour contrôler les déplacements horizontaux en tête de tour.

Les fondations sont réalisées sous les piédroits de l'ouvrage de couverture. La conception de base prévoit des micropieux pour descendre les charges. Un socle de répartition en média structure permet d'étaler les charges de l'IGH selon la capacité portante des micropieux.

La tenue au feu de l'ouvrage de couverture est un facteur fondamental compte tenu de son rôle porteur de l'immeuble ; elle a été étudiée dans le détail.

Les points saillants de l'étude de conception qui seront développés ci-après sont les suivants :

- L'utilisation de la maquette numérique et du BIM pour contrôler la géométrie du projet en cohérence avec les calculs de structure et en coordination avec les autres lots,
- Le choix technique de fondations sur micropieux,
- Deux niveaux de répartition des charges pour contrôler les tassements induits sur les voisins : le socle en média structure et la couche de Calcaire,
- Les études poussées d'interaction sol-structure,
- La structure mixte et les tassements différentiels
- La tenue au feu et le test des bétons fibrés

### **1.4 Calendrier**

La conception du projet ont débuté en 2011 et ont abouti fin 2014 à l'émission du D.C.E. Les travaux de construction de l'ensemble Trinity devraient commencer début 2016 pour s'achever courant 2018.

Au préalable, l'EPADESA a fait réaliser les travaux de libération du site en 2014 qui comprennent notamment les adaptations de voirie et le dévoiement des réseaux.

## ■ 2. CONTRAINTES DU PROJET ET CRITERES DE CONCEPTION

### 2.1 Implantation et état existant

Le projet est compris entre : à l'Est l'ensemble Coupole, au Sud le tunnel d'accès à l'autoroute A14, à l'Ouest le CNIT. L'ouvrage de couverture n'est pas directement dans la continuité du tunnel A14, mais libère une trémie aéraulique d'environ 50 m.

La figure 5 illustre, les caractéristiques des différentes voies couvertes.

Les contre-allées montent vers la dalle de La Défense tandis que la RN 192 plonge sous cette dalle, d'où un dénivelé atteignant 6 m au plus haut. La largeur totale de la trémie routière perçant la dalle de La Défense est d'environ 42 m entre le nu Coupole et le nu CNIT.

### 2.2 Voies franchies

Le tracé et le niveling des voiries existantes sont globalement conservés.

En travers, la hauteur libre minimale prise en compte est de 4,75 m au droit de la RN 192 et de 4,30 m au droit des contre-allées, majorée des revanches de construction et de protection des équipements. La figure 5 illustre l'état existant et la figure 6 l'état projeté.

Les contraintes d'exploitation sont essentielles pour l'organisation du chantier, compte tenu du trafic de véhicules sur les voies de la RN 192 et sur la contre-allée Coupole.

### 2.3 Ouvrages existants et mitoyens

Parmi les ouvrages existants, les murs de soutènement de la RN 192 et la passerelle Leclerc sont démolis, la passerelle étant remplacée dans son fonctionnement par les liaisons urbaines créées dans le cadre du projet.

Les réseaux actifs existants situés dans le périmètre de construction du projet ont été dévoyés par l'EPADESA avant le début des travaux de l'ouvrage.

### 2.4 Contexte géotechnique et hydrogéologique

La nature des formations et leurs caractéristiques géotechniques moyennes sont estimées sur la base de sondages de reconnaissance géotechniques réalisés en 2011 et d'essais de laboratoire. Ces essais ont été analysés par Terrasol, filiale du groupe **setec**, dans le cadre des missions géotechniques G1 et G2.

La coupe géologique est typique de La Défense, avec successivement : des remblais d'épaisseur variable, les Marnes et Caillasses jusqu'à + 33 NGF environ avec une couche plus altérées en surface, le Calcaire Grossier jusqu'à +17,5 NGF, puis les Sables de Cuise, les Fausses Glaises, les Sables d'Auteuil et le Marno-calcaire de Meudon à partir de -21,5 NGF. Ces formations sont quasi horizontales sur le site de La Défense.

La nappe phréatique a été reconnue à 25,5 m NGF environ dans le Calcaire Grossier.

## 2.5 Critères de conception

Pour l'ouvrage de couverture, la faible emprise chantier disponible entre les voies de circulation pour la réalisation des fondations impose une conception minimisant les descentes de charges : optimisation du poids global et étalement des charges sur toute l'emprise en plan.

Pour l'IGH, les critères de déplacement sont flèche en tête de tour inférieure au 500ème de la hauteur, flèche différentielle entre deux étages sous l'action du vent inférieure au 500ème de la hauteur entre étages, accélération en tête de tour limitée à 18 mg sous vent décennal.

## ■ 3. OUTILS DE CONCEPTION

Compte tenu des contraintes énumérées ci-dessus, la conception structurelle a été menée à l'aide d'outils pointus permettant une grande maîtrise des études et de la géométrie des ouvrages

En premier lieu le BIM (*Building Information Modeling*) : toutes les structures ont été définies dans une maquette 3D Revit, qui a servi à l'établissement des plans de conception. On a ainsi pu maîtriser la géométrie du projet et ses évolutions à chaque instant, toute modification étant automatiquement répercutée sur tous les plans et coupes rendus ainsi cohérents entre eux.

Les extraits de plans et vues 3D du présent article sont tous issus de la maquette, qui permet de plus un suivi en temps réel des quantités de matériaux du projet. Enfin la volumétrie des structures a pu être partagée avec le BET Fluides pour valider en 3D plusieurs points de synthèse complexes.

Les outils de calculs se composent des traditionnels modèles aux Eléments Finis, qui ont été complétés par des outils d'optimisation des structures développés par **setec** tpi et permettant de définir, avec une grande réactivité, le système optimal de contreventement dans le respect des contraintes de conception.

## ■ 4. CONCEPTION GENERALE DE LA STRUCTURE

### Couverture routière supportant un IGH

La géométrie de l'ouvrage de couverture est calée sur celles des voiries existantes.

Les principales contraintes portent sur la rigidification du socle, qui doit permettre d'une part de d'étaler les charges descendantes sur toutes les files d'appuis, et d'autre part d'encastrer le noyau pour respecter les critères de service de l'IGH. Voir figure 7

Les hypothèses de base de la conception sont donc les suivantes.

## **Minimisation des descentes de charges**

L'IGH supporté doit être aussi léger que possible compte tenu des contraintes d'emprises chantier précédemment exposées. Ceci passe par une conception des ossatures avec planchers légers en bacs acier, poutraión acier et verticaux en Bétons Hautes Performances pour limiter leur section et donc leur poids.

## **Continuité verticale des structures**

Les structures porteuses du projet Trinity sont conçues de sorte que les descentes de charges arrivent directement sur les piédroits, sans reprise d'efforts dans la dalle de couverture.

## **Etalement des descentes de charges**

La descente de charges totale de l'IGH et de la portion de couverture qui le supporte est de l'ordre de 76 000 tonnes à l'ELS quasi permanent – dont 55 000 tonnes pour l'IGH seul – et 90 000 tonnes à l'ELS caractéristique, d'où un chargement linéaire « moyen » des piédroits de 2,7 MN/ml.

Pour obtenir une répartition des charges homogène, un quadrillage de voiles dans les deux directions en « bac à glaçons » est mis en œuvre sous le noyau de l'IGH qui concentre les descentes de charges : en longitudinal les quatre piédroits files d'appuis de la couverture, en transversal les voiles disponibles sur toute la largeur du socle.

Les calculs de structure montrent l'efficacité du raidissement : les deux files centrales reprenant chacune de l'ordre de 30 % de la descente de charges et les files extrêmes 25 % et 15 %. La contrainte de compression dans les piédroits reste modérée, de l'ordre de 6 MPa

## ■ **5 Les différentes parties de l'ouvrage**

### **Planchers de l'IGH**

La hauteur courante entre étages est de 3,80 m de fini à fini de plancher.

Les planchers de l'IGH sont réalisés à l'intérieur du noyau en béton armé et à l'extérieur du noyau en charpente acier, comme illustré sur la figure 8, supportant des planchers à dalles minces coulés sur bac collaborant pour un poids de 350 kg/m<sup>2</sup>.

Le choix de l'acier découle aussi des grandes portées imposées par le site : 10,29m + 10,29m + 7,94 m correspondant aux entraxes des piédroits. Le solivage suit une trame de 2,7 m cohérente avec les façades et avec le calepinage des éléments en plafond.

## **Ossature porteuse de l'IGH**

Le noyau central est en voiles minces C60/75 régnant sur toute la hauteur de la tour ; il descend une partie des charges verticales jusqu'au niveau de socle et assure le contreventement de l'IGH.

Il se compose d'un tube central rigide en torsion et d'un caisson ajouté côté ouest pour assurer un bras de levier suffisant vis-à-vis des efforts de flexion. Sa forme échancrée résulte des contraintes de transparence en façade imposées par les ascenseurs panoramiques, les salles de réunions et les jardins extérieurs.

Les trois voiles principaux dans le sens de la longueur sont directement situés dans le prolongement vertical des piédroits de la couverture.

Les poteaux sont conçus en béton, C80/95, pour homogénéiser les tassements avec ceux du noyau et ainsi limiter les mouvements différentiels entre les structures. Ce point est d'autant plus important que le noyau se situe en façade, les vitrages étant peu aptes à encaisser des déformations importantes.

Leur liaison poteau béton / poutres acier est réalisée par l'intermédiaire d'une virole en acier disposée en tête de chaque poteau et permettant des assemblages acier / acier comme illustré sur les figures 10 et 11.

Une variante en poteaux tout acier a été étudiée mais elle n'a pas permis d'obtenir un compromis satisfaisant entre la contrainte de limitation des déformations et le coût de construction.

## **Le socle : un niveau de transfert**

Le niveau « socle » règne entre deux dalles de niveaux fini +57,30 et +62,10 NG respectivement et constitue l'infrastructure de l'immeuble. Ces dalles permettent de faire la liaison entre les parvis du bâtiment CNIT à l'Ouest, et de l'esplanade Coupole côté Est.

Il abrite notamment un restaurant interentreprises et des locaux techniques.

Les zones situées sous le noyau de l'IGH subissent les plus fortes descentes de charges du projet. Des voiles de transfert sont implantés dans le socle au droit de ces noyaux de manière à réaliser la répartition des charges verticales entre les quatre files d'appuis des piédroits : 4 voiles transversaux sous le noyau et 3 voiles supplémentaires de part et d'autre du noyau pour diffuser les charges. Voir figure 12.

Les 7 voiles de transfert ainsi formé sont épais de 70 cm pour présenter une raideur suffisante.

## **Les piédroits : étalement des descentes de charges**

Les quatre lignes d'appuis sont implantées sur le terre-plein central de la RN 192, et entre la RN 192 et ses contre-allées. Ce sont des voiles pleins en béton armé de manière à isoler les tubes entre eux vis-à-vis de l'incendie. On crée ainsi des lignes d'appuis raides dans leur plan qui permettent de diffuser les charges concentrées issues du noyau sur une grande longueur, et d'ainsi lisser les pics de descentes de charges.

Leur épaisseur varie de 50 cm (hors IGH) à 80 cm (sous IGH) dans le respect des contraintes d'encombrement entre les voiries.

## **La couverture des voiries**

La couverture des voiries est essentiellement réalisée par la dalle de niveau fini +57,30 NGF, ainsi qu'une portion de la dalle +62,10 NGF couvrant la sortie de la RN 192 W.

Un fonctionnement monolithique avec continuité de la dalle entre les différentes travées et encastrement sur les piédroits a été retenu. Elle est conçue en béton armé avec une épaisseur de 50 cm de manière à résister à deux incendies pouvant se déclarer simultanément sous la couverture (en tunnel) et sur la couverture (dans le niveau de socle)

L'arase supérieure est calée au niveau fini +57,30 NGF de manière à s'aligner avec le parvis Coupole existant, déduction faite des surépaisseurs nécessaires aux aménagements paysagers (en extérieur) ou complexes de sol (en intérieur).

En sous-face, l'arase inférieure de la dalle de couverture doit respecter les hauteurs libres minimales vis-à-vis du trafic routier et des équipements suspendus. A ces contraintes s'ajoute la volonté de réaliser une planéité de l'intrados la plus homogène possible, pour des raisons esthétiques et aérauliques.

## **Les contreforts : reprise des efforts horizontaux**

Compte tenu des ouvertures pour le passage de la circulation automobile, le fonctionnement de la structure vis-à-vis des charges transversales est nécessairement de type portique.

Hors IGH, le contreventement est assuré par effet portique des piédroits et de la dalle de niveau fini +57,30. Sous l'IGH, le besoin de raideur est bien plus fort en raison des résultantes d'efforts de vent. L'ouvrage est raidi par 7 contreforts implantés en correspondance des 7 voiles transversaux du socle. L'ensemble formé par la liaison contreforts / voiles du socle est illustré sur la figure 6.

## **■ 6. FONDATIONS**

Les principes de fondation ont été déduits de caractéristiques de sol de manière à satisfaire plusieurs critères propres au site : emprise au sol restreinte, sous-sol occupé et préchargé par les fondations des structures avoisinantes.

Sous IGH les fortes charges conduisent à écarter la solution semelle superficielle pour des difficultés d'emprise au sol, de même que la solution puits pour éviter les points durs sous la structure.

On dispose des files de micropieux type IV injecté à haute pression qui descendant les charges dans les Marnes et caillasses et sont arrêtés au-dessus du toit du Calcaire Grossier (voir figure 13) du fait

du faible encombrement du matériel de chantier. En fonction des descentes de charges par zone on dispose de 2 à 4 unités par mètre linéaire de piédroit.

Le système est complété par des pieux forés de plus fort diamètre disposés sous les contreforts de manière à bloquer les déplacements horizontaux.

Hors IGH, de plus faibles charges autorisent le recours à des semelles superficielles ancrées dans les Marnes et Caillasses.

## ■ 7. ETUDES DE STRUCTURE

On présente ci-après quelques points d'études particuliers du projet.

### 7.1 Essai en soufflerie

Les charges de vent sur l'IGH constituent la plus grande part des actions horizontales. Elles ont été déterminées sur la base d'essais en soufflerie réalisés au CSTB de Nantes (figure 14). Ces essais, prenant en compte 36 directions de vent, ont permis de réduire la résultante globale de près de 30 % par rapport au calcul standard de l'Eurocode 1.

### 7.2 Interaction sol-structure

Le processus d'étude de l'interaction sol-structures est itératif et repose sur la convergence de deux modèles de calculs : l'un pour le sol, l'autre pour la structure. Ces deux modèles sont réalisés en 3D pour tenir compte de la répartition des descentes de charges dans les deux directions horizontales.

Le modèle général de calculs de structure est un modèle Ansys rétabli par **setec** tpi et modélisant toute la structure de l'IGH et de l'ouvrage. La réaction des fondations et du sol est modélisée par des ressorts de comportement élastique linéaire disposés en tête des fondations. Terrasol a développé un modèle géotechnique aux Eléments Finis Plaxis, permettant de déduire une matrice de souplesse de sol.

Cette méthode illustrée en figure 15 est très puissante car elle permet d'éviter les itérations fastidieuses entre les modèles de calculs géotechniques et de structure. En pratique une seule entité – le BE structure – réalise le calage des ressorts de sols et vérifie la convergence des calculs : sous la descente de charges du modèle de structure, on compare les déplacements du modèle de structure et ceux du modèle de sol (via la matrice de souplesse et moyennant un traitement par tableur). Après quelques itérations sur les raideurs de ressorts et les descentes de charges induites, la convergence est atteinte quand les déplacements calculés sont identiques.

Deux jeux de modules de sol sont définis dans la note de synthèse géotechnique et les études structurelles ont pris en compte ces fourchettes pour tester la robustesse de la conception vis-à-vis de variations d'hypothèses. En effet la variation des raideurs relatives entre le sol et la structure modifie la répartition des descentes de charges et, par analogie avec le cas d'une poutre sur appuis élastiques, a des effets différents suivant le critère considéré : tassements, descentes de charges maximale, ferraillage des piédroits.

## 7.3 Calculs d'ensemble

Une fois calé, le modèle de structure a ensuite permis de réaliser les calculs d'ensemble : efforts de contreventement dans l'IGH, estimation des déplacements d'ensemble, édition des descentes de charges sur les fondations.

## ■ 8. ETUDES AU FEU

Le texte de référence pour la prise en compte de la sécurité en tunnel routier est l'instruction technique relative à la sécurité dans les tunnels du réseau routier annexée à la circulaire n°2000-63 d'août 2000. La méthodologie de justification du génie civil est définie d'après le guide du CETU de mars 2005 *Comportement au feu des tunnels routiers* et ses *Compléments* de mars 2011.

Au regard des longueurs des trois tubes composant l'ouvrage, toutes inférieures à 300 m, la circulaire ne s'applique pas au projet. Toutefois elle a été prise en compte pour la conception et l'intégration d'équipements de sécurité (études équipements réalisées sous Maîtrise d'Ouvrage de l'EPADESA).

### 8.1 Tenue au feu de l'ouvrage de couverture

Le niveau de résistance au feu retenu pour les structures de l'ouvrage de couverture des voiries est N3 c'est-à-dire CN 4 heures et HCM (hydro carbures majoré) 2 heures selon la figure 16. Il se justifie par la présence de niveaux habités au-dessus de la dalle de couverture.

On considère que le feu est susceptible de se produire soit en tunnel, soit juste au-dessus de la dalle de couverture dans le socle, soit simultanément dans ces deux endroits. La figure 17 illustre différents scénarios possibles.

### 8.2 Essais au feu

Compte tenu du risque d'écaillage sous incendie HCM, les bétons qui seront mis en œuvre sur chantier doivent obligatoirement avoir préalablement fait l'objet d'essais au feu pour caractériser ce phénomène.

Le Maître d'Ouvrage a souhaité anticiper ces essais en phase conception de manière à proposer dès le stade du D.C.E. plusieurs formules béton déjà testées. Des essais portant sur trois formules et plusieurs configurations de chargement ont été réalisés en 2014 au CSTB de Champs-sur-Marne. La méthodologie de formulation des bétons et d'essais retenue s'apparente à une « étude simplifiée » au sens des *Compléments* au guide du CETU.

En phase travaux, l'Entrepreneur aura le choix entre utiliser une de ces formules ou proposer sa propre formule dûment justifiée.

### 8.3 Calculs au feu

En phase conception la résistance au feu des structures résistance est évaluée sur la base de calculs de type G3 au sens du guide du CETU prenant en compte les autocontraintes, la modification des lois

de comportement des matériaux et les grands déplacements. Cette analyse a été réalisée à l'aide du logiciel Pythagore développé par **setec tpi**.

On a recours à des modèles portiques représentatifs d'une « tranche » de 1 ml d'ouvrage, bien adaptés à l'analyse de phénomènes fins comme les non linéarités géométriques et de matériaux qui se présentent en situation d'incendie. L'écaillage du béton est pris en compte dès le début du calcul par une réduction de la section béton, l'épaisseur sacrifiée étant déduite des essais au feu.

La figure 18 montre un extrait du calcul. Pour cet exemple, l'échauffement en face inférieure induit une compression en bas de la section sous l'effet des dilatations générées et une mise en traction des armatures supérieures. La contrainte décroît à proximité du parement exposé au feu du fait de la réduction du module de déformation avec la température.

## ■ 9. CONCLUSION

Les conditions spécifiques du site de la tour Trinity, à l'aplomb de la RN 192, ont engendré les grands principes de conception illustrés dans cet article : continuité verticale des structures tramées selon le tracé des voiries, légèreté des ossatures de l'IGH, étalement des charges, résistance à l'incendie en tunnel. Ces contraintes ont été surmontées par l'emploi d'outils modernes et réactifs : le BIM et les logiciels d'optimisation des structures développés en interne.

Une nouvelle étape du projet s'engage avec le démarrage à venir du chantier de construction.

### Résumé

La conception de la tour Trinity à La Défense relève le défi d'un Immeuble de Grande Hauteur construit en surplomb de voies d'accès à l'autoroute A14. Les concepts de bases sont donc la légèreté des structures de la tour, l'étalement des charges au moyen d'infrastructures rigides, et des fondations filantes sur micropieux pour limiter les emprises chantier. La couverture routière ainsi formée est dimensionnée selon les règles incendie applicables aux tunnels.

Les études ont été réalisées grâce à des outils pointus incluant la maquette numérique et le BIM.

### Encadrés

Chiffres clés

Couverture

3 tubes de 127 à 148 m de longueur

Largeur totale : 40 m

Emprise : environ 4 700m<sup>2</sup>

IGH

Emprise : 87 m de long x 31 m

surface SHON : environ 53 000 m<sup>2</sup>

36 niveaux de planchers dont 30 de bureaux

Hauteur des fondations à la toiture : 150 m

Volume béton : 30 000 m<sup>3</sup>

Poids de charpente : 1 900 t

Poids y compris ouvrage de couverture : 76 000 t ELS quasi-permanent

Efforts de vent : 10,4 MN

Principaux acteurs du projet

Maîtrise d’Ouvrage : SCI Trinity Défense (Unibail-Rodamco)

Aménageur : EPADESA

Maîtrise d’œuvre: groupement solidaire constitué de

- Architecte : Crochon-Brullmann + Associés

- Bureau d’études structure : **setec** tpi

- Maître d’œuvre d’exécution : Egyde

- Bureau d’études fluides : Barbanel

- Economiste : AE75

- Bureau d’études VRD : Progexial

Contrôle technique : Socotec

Filiales du groupe **setec** impliquées dans le projet

**setec** tpi : MOE structure

terrasol : géotechnicien

T/E/S/S : étude des assemblages architectoniques

**setec** international : Dossier d’Exploitation sous Chantier

LERM : étude de formulation des bétons N3

hydratec : diagnostic environnemental de la qualité des sols

## Article tour Trinity à La Défense : liste des figures

Figure 1 : photomontage du projet (source SCI TRINITY DEFENSE / Crochon Brullmann + Associés / L'autre Image Production)

Figure 2 : structures du projet Trinity – vue depuis le nord est (côté Coupole). Vue maquette Revit **setec tpi**

Figure 3 : plan masse du projet (source Crochon-Brullman + Associés) – à droite la toiture de l'IGH, à gauche les liaisons urbaines

Figure 4 : implantation au sein du quartier d'affaires de La Défense

Figure 5 : état existant en 2011. A droite le CNIT, au fond le tunnel de l'A14

Figure 6 : coupe en travers du projet : couverture, socle et amorce de l'IGH

Figure 7 : ouvrage de couverture, socle et amorce des verticaux de l'IGH. Vue maquette Revit **setec tpi**

Figure 8 : structure en tête de tour avec la poutraison métallique (planchers supérieurs non représentés) Vue maquette Revit **setec tpi**

Figure 9 : étage type

Figure 10 : assemblage poutre-poteau masqué dans le faux-plafond

Figure 11 : assemblage poutre-poteau visible dans les gaines d'ascenseurs

Figure 12 : plancher haut du socle. A droite la zone sous IGH

Figure 13 : fondations profondes sous l'IGH. Vue maquette Revit **setec tpi**

Figure 14 : maquette de l'IGH et de l'environnement proche pour les essais en soufflerie

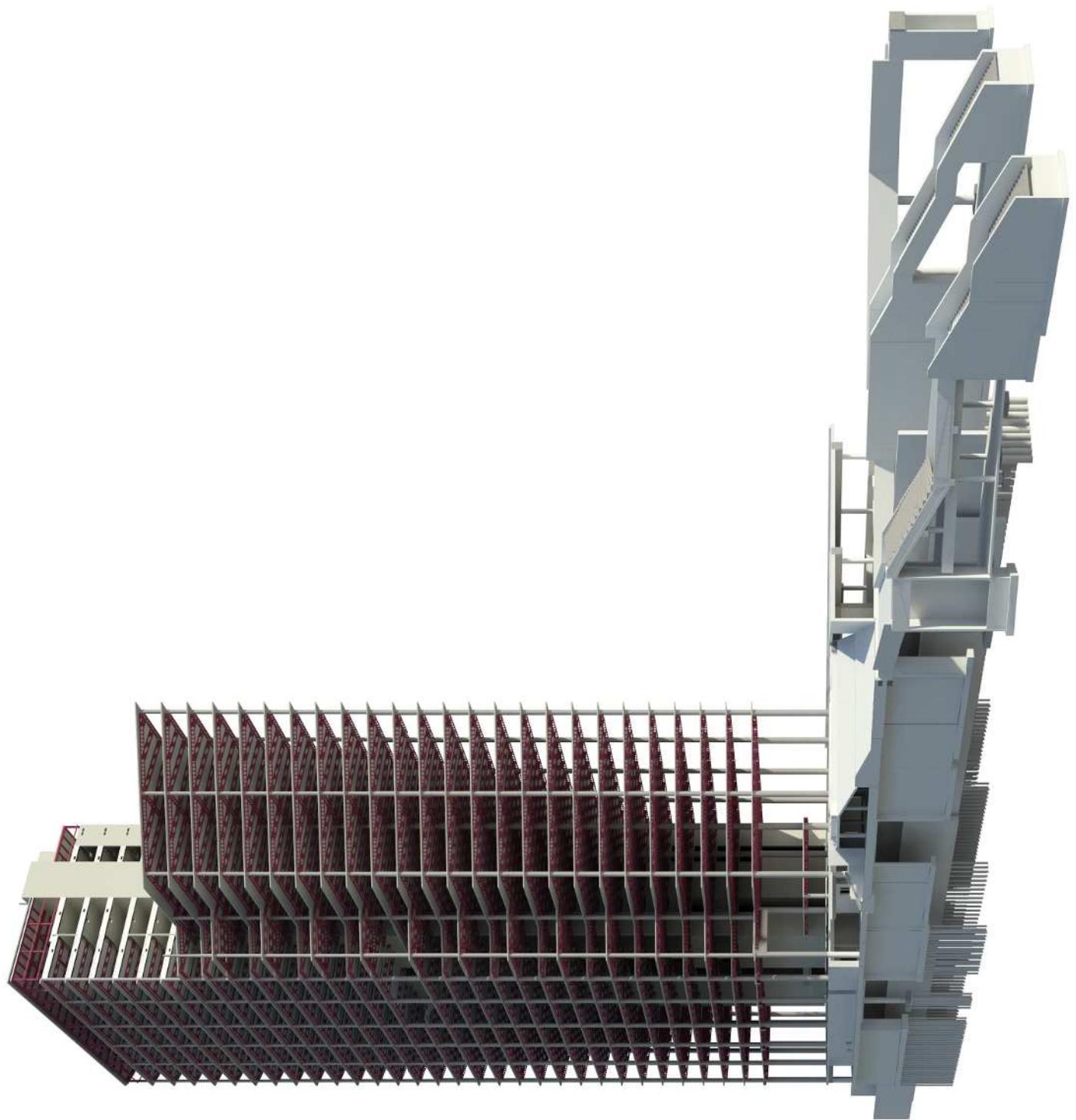
Figure 15 : exemple de matrice de souplesse déduite du modèle géotechnique (à gauche) et approximation par des ressorts linéaires (à droite).

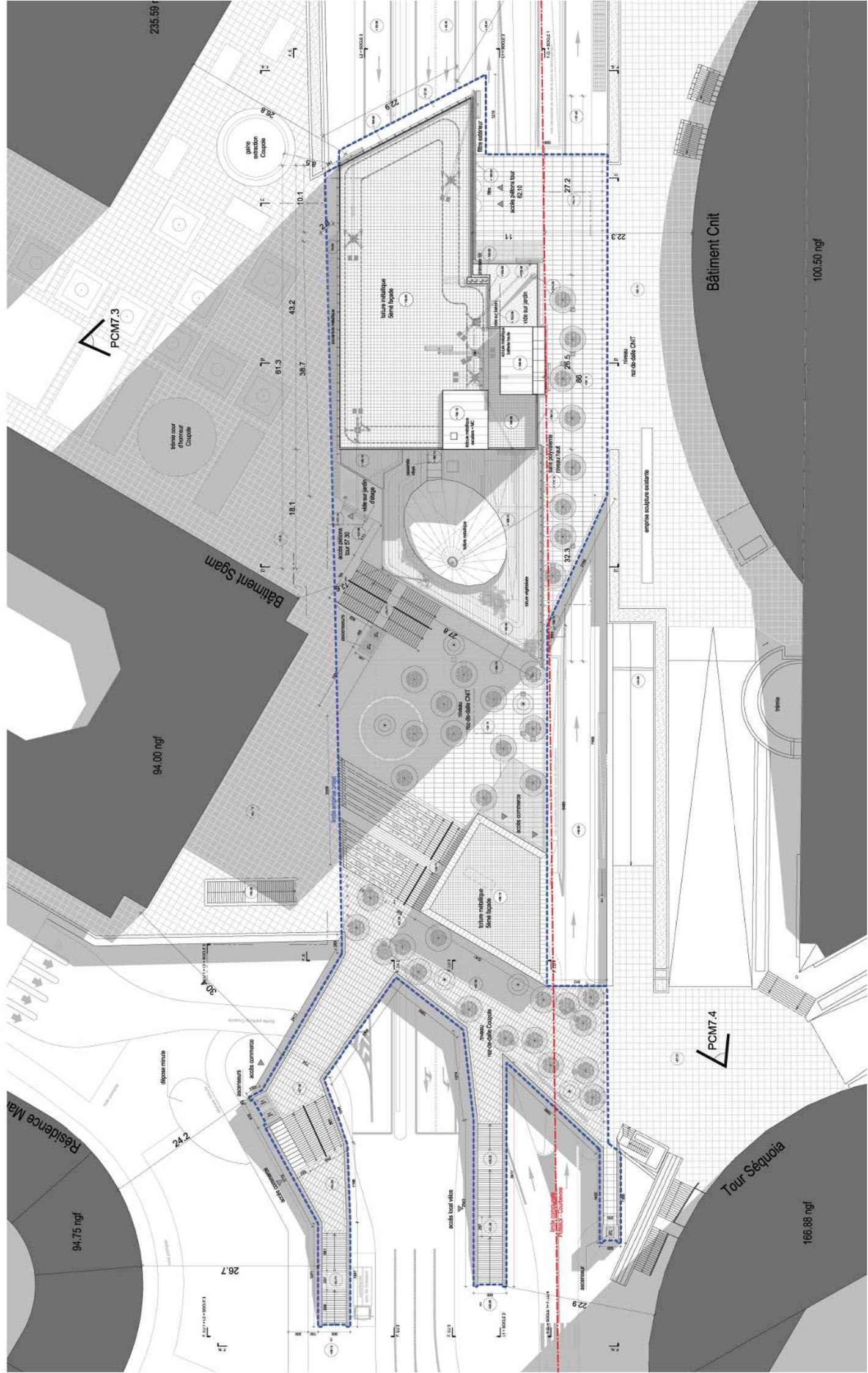
Figure 16: courbes temps-température

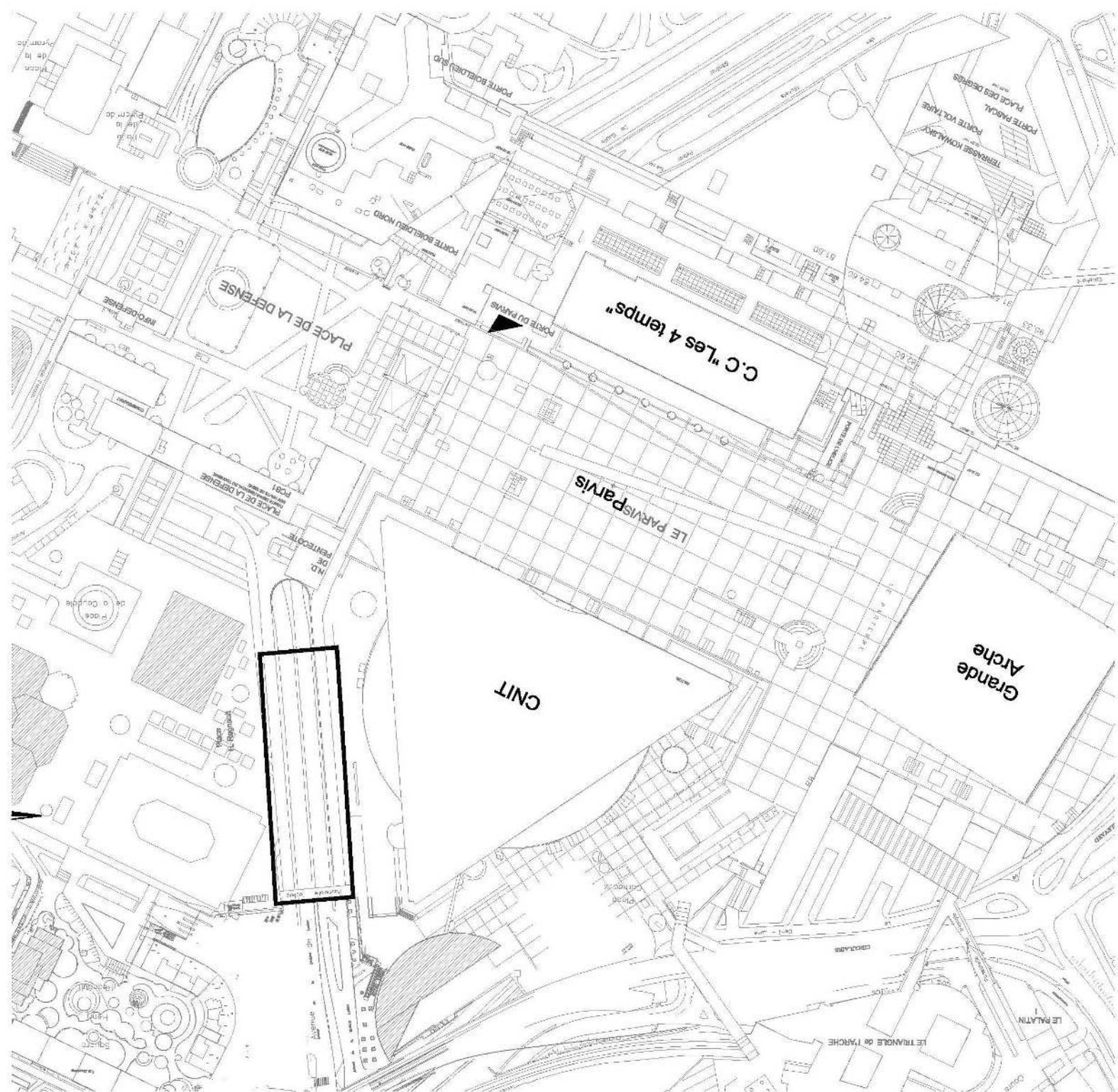
Figure 17 : exemples de scénarios d'incendie (non exhaustifs)

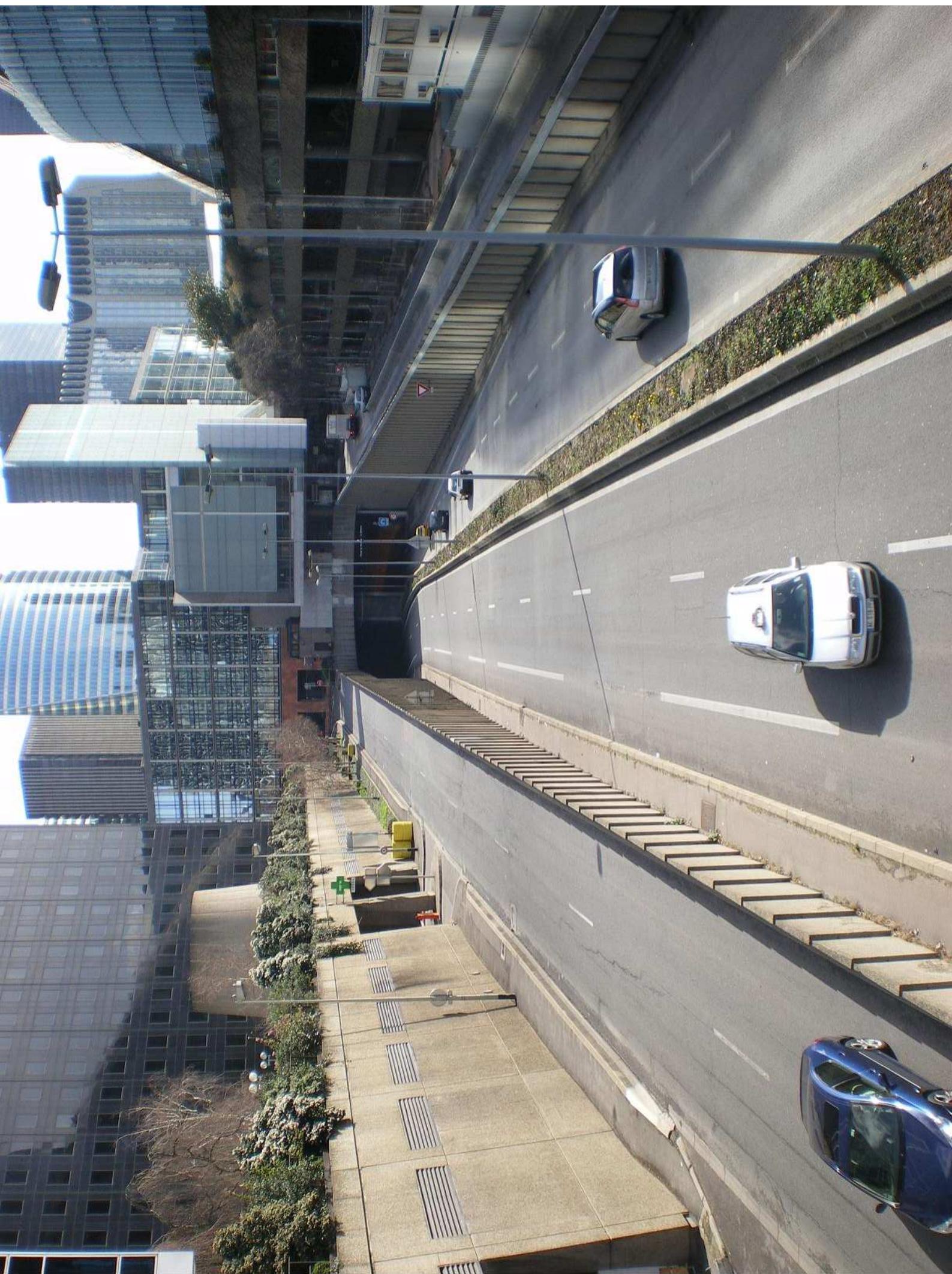
Figure18 : isocontraintes de compression dans une section soumise à un incendie CN 240 en face inférieure (logiciel Pythagore de **setec** tpi)

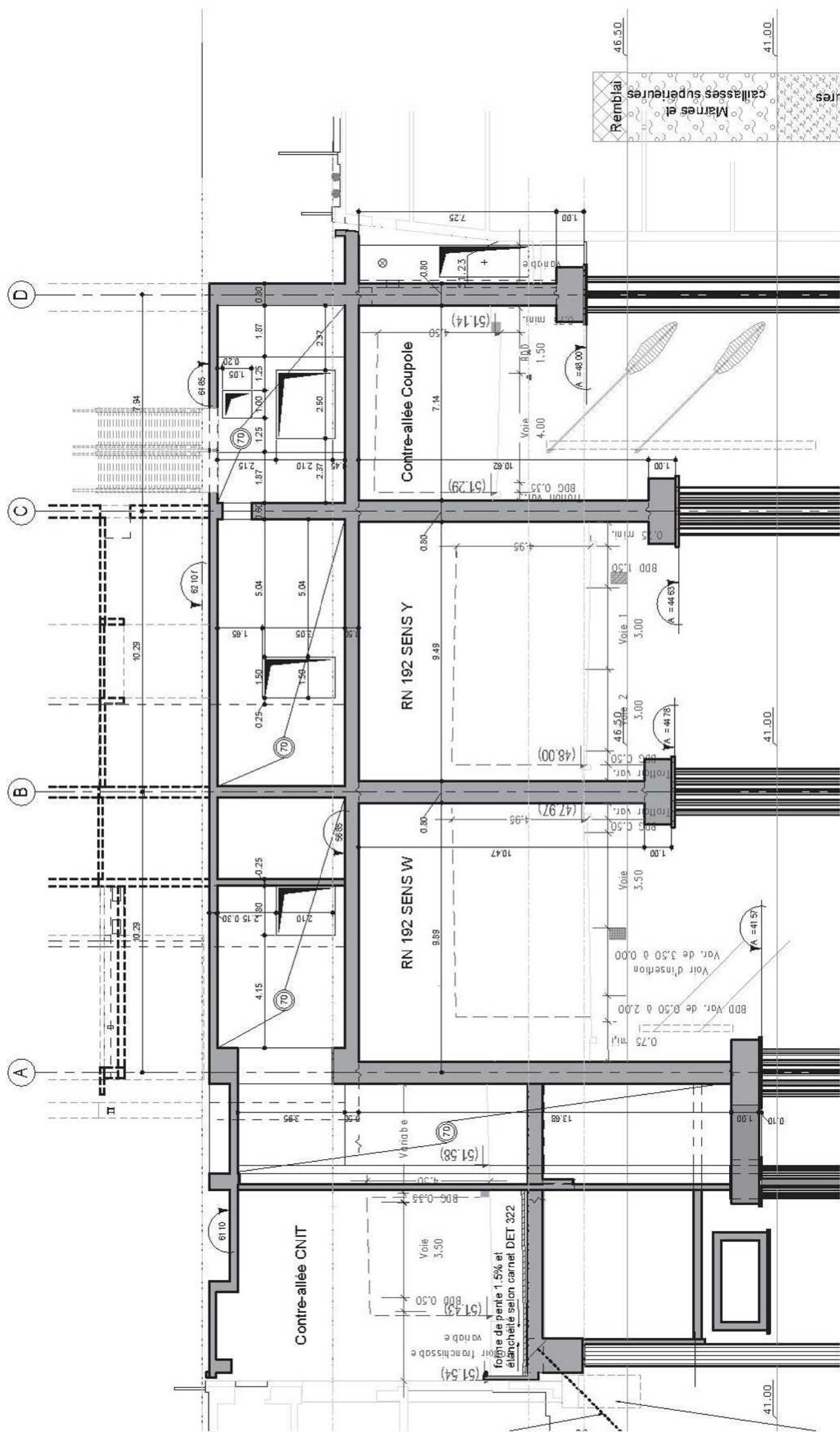


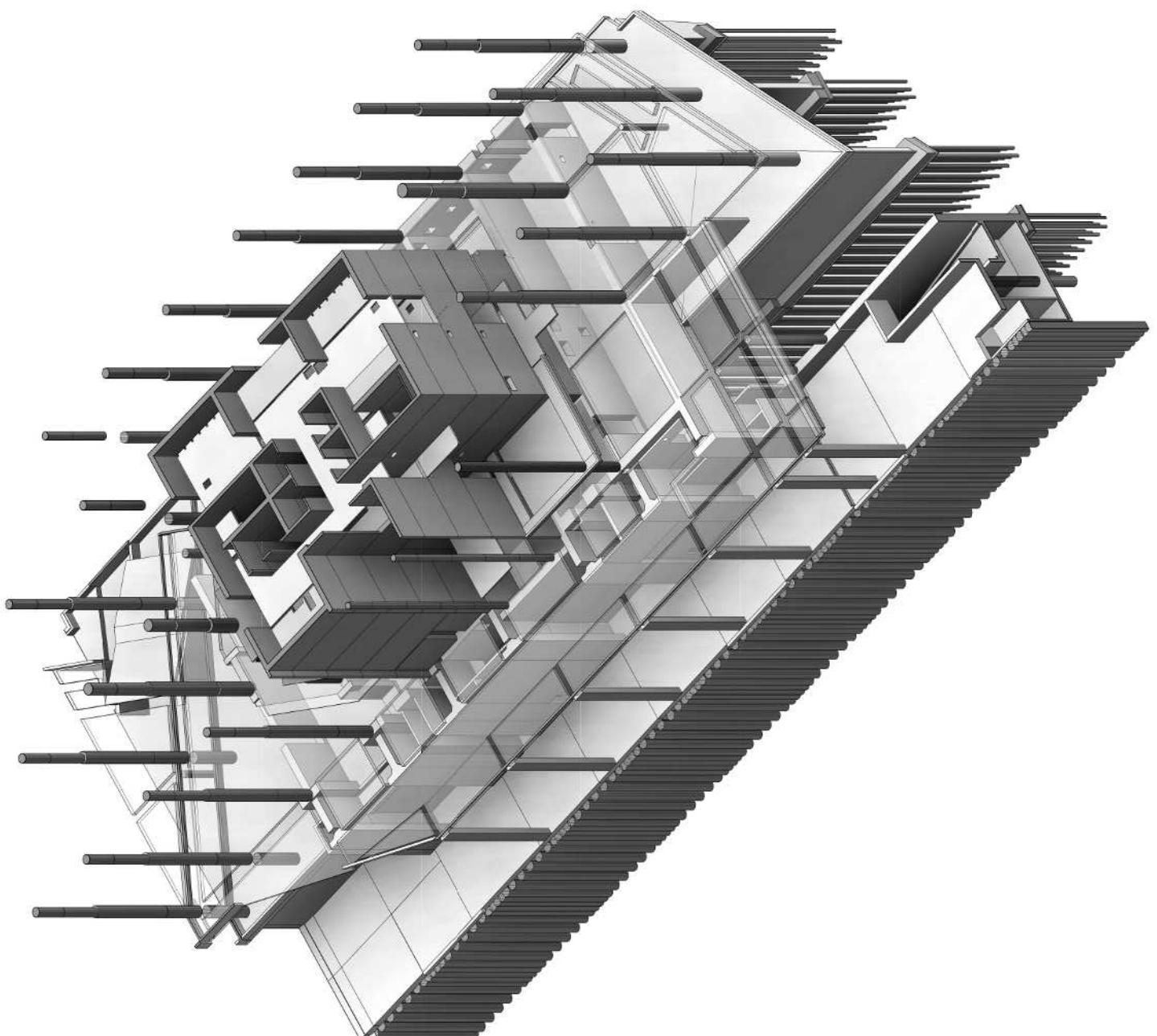


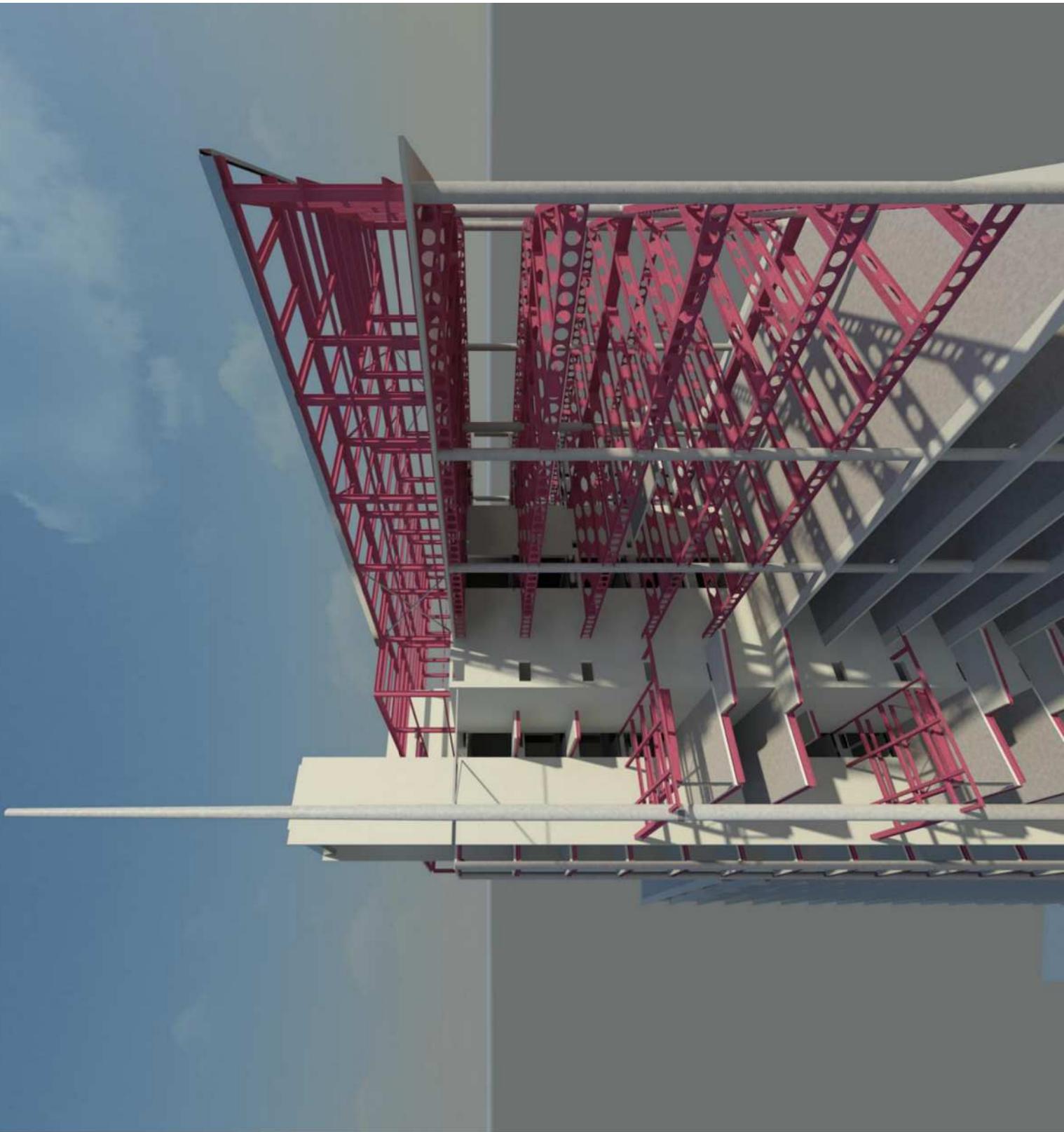


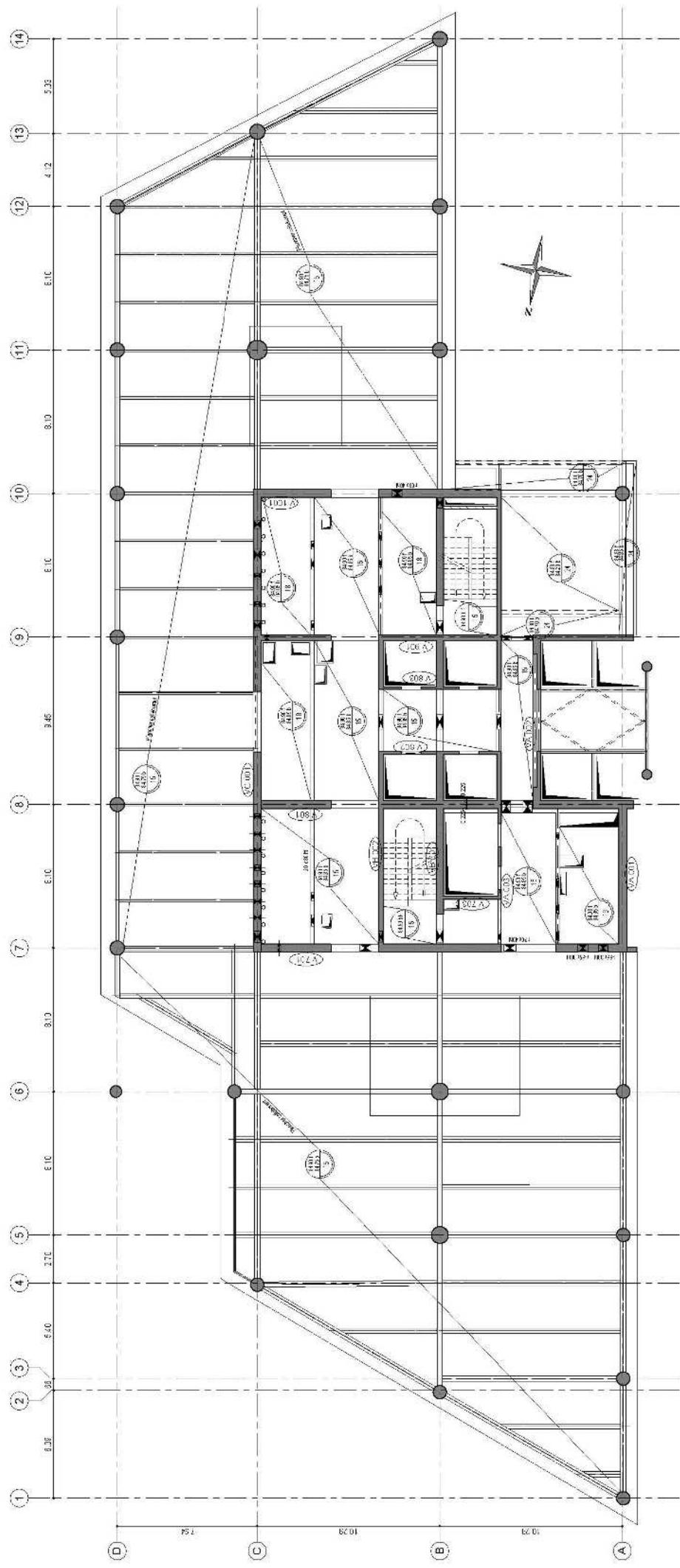


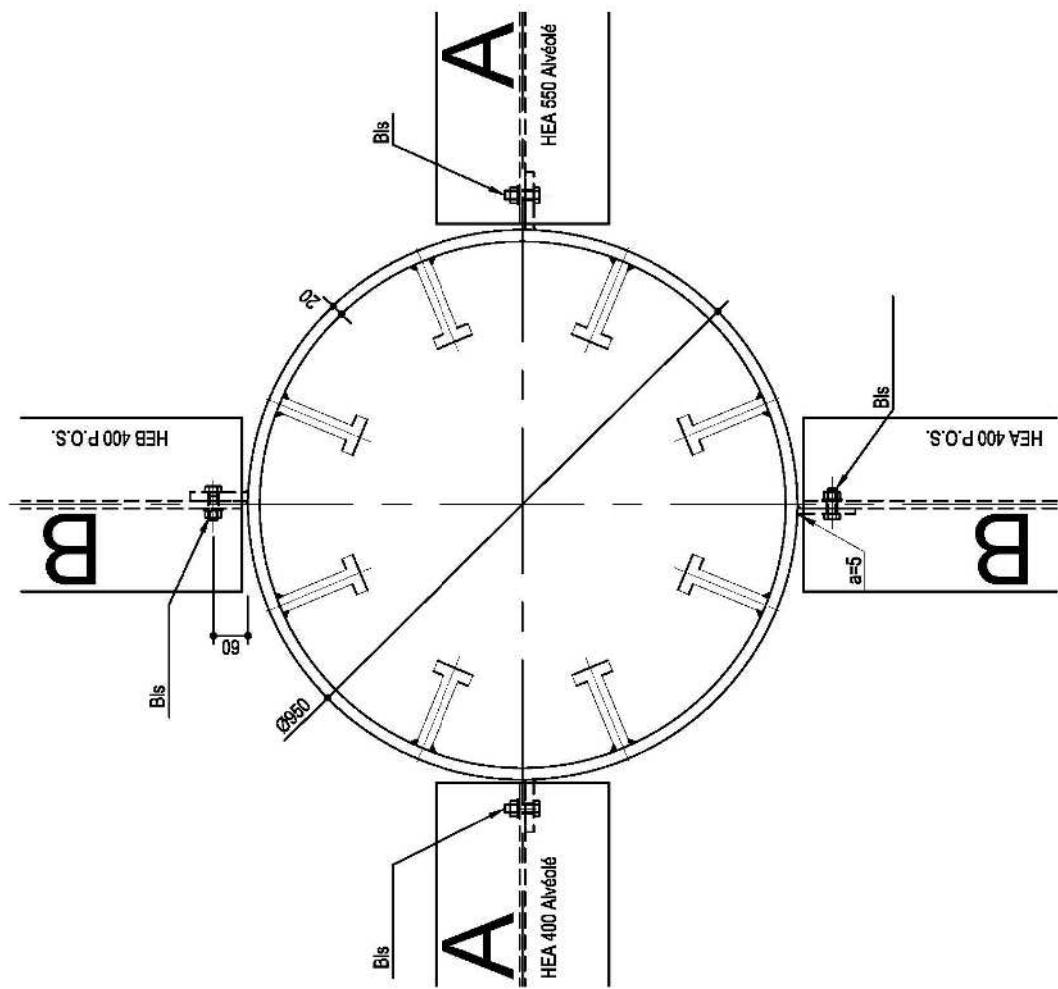
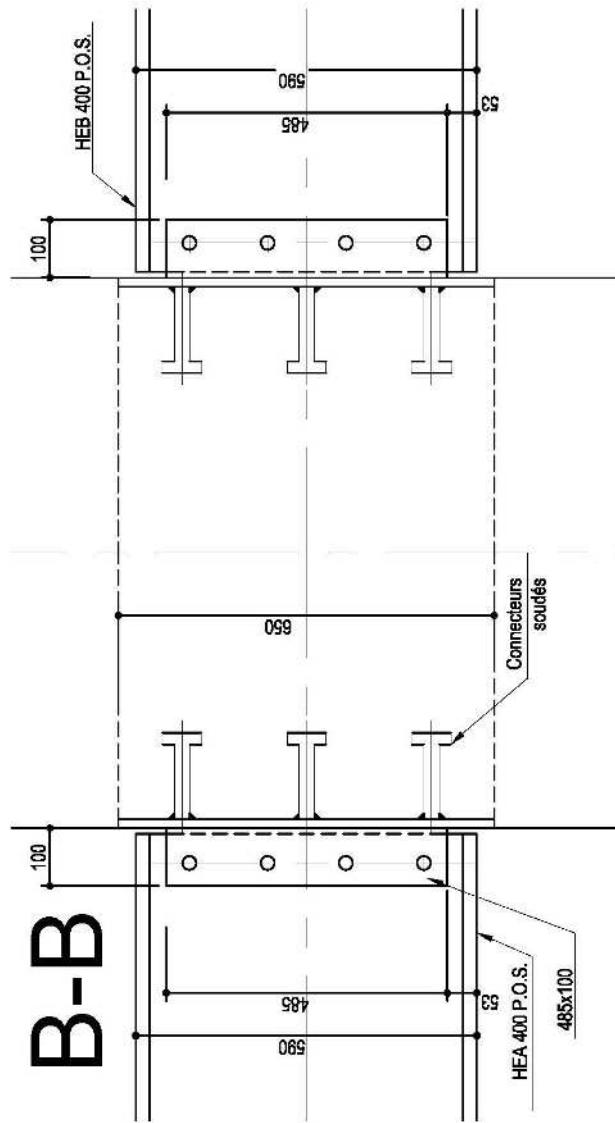
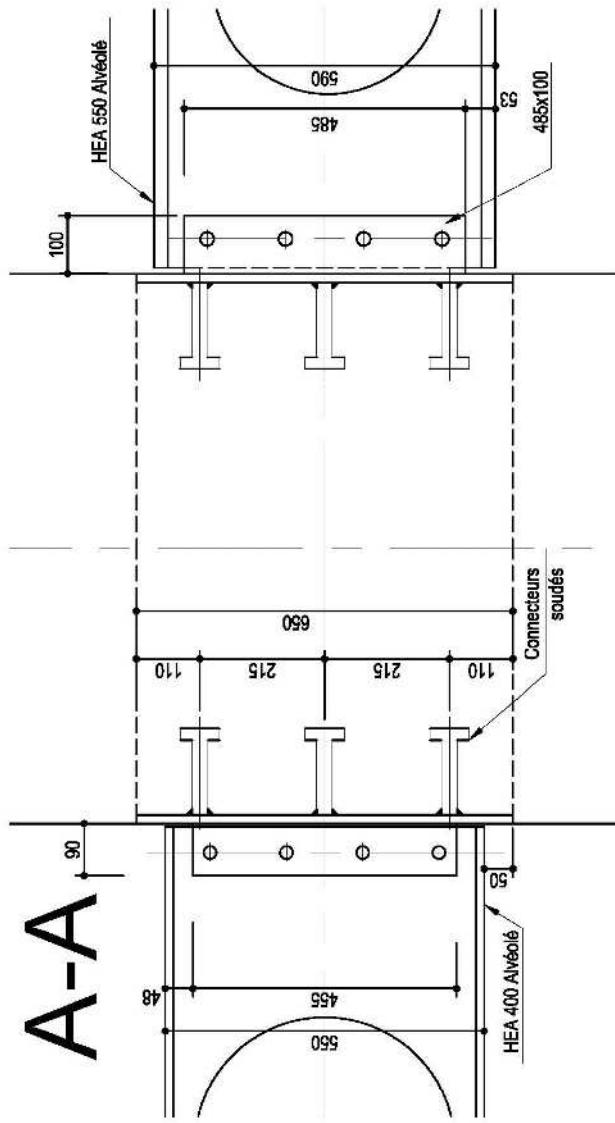




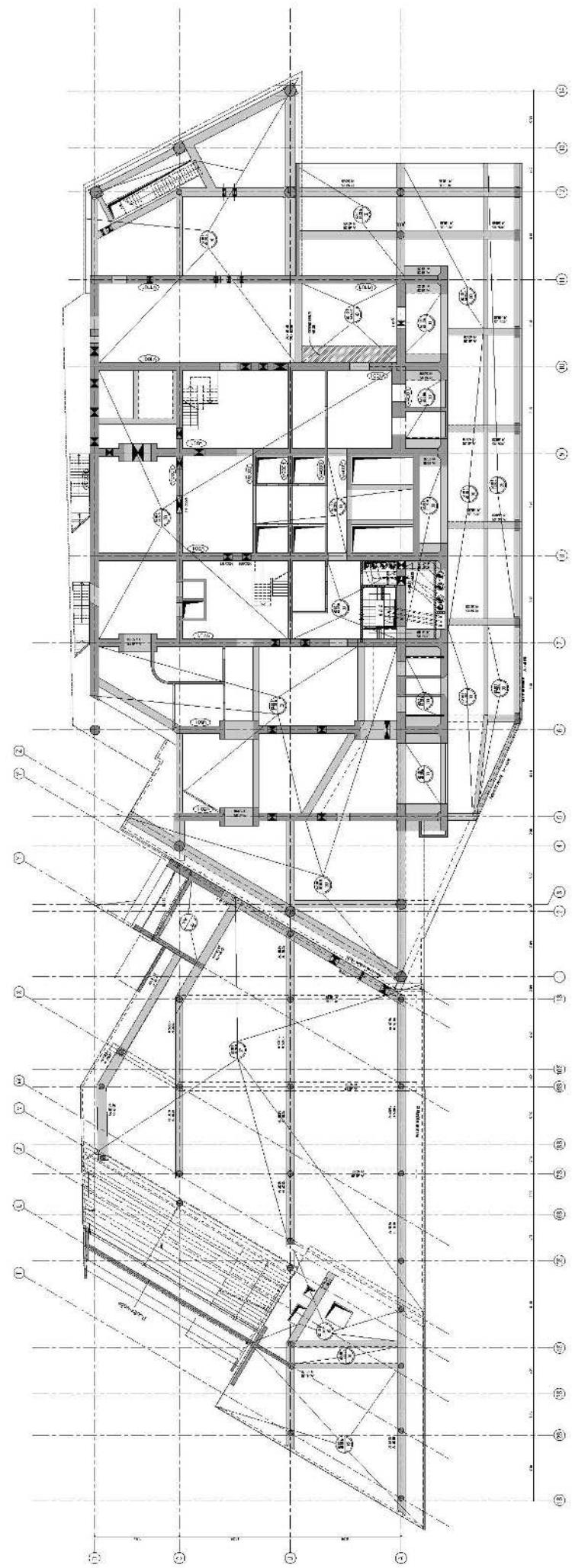


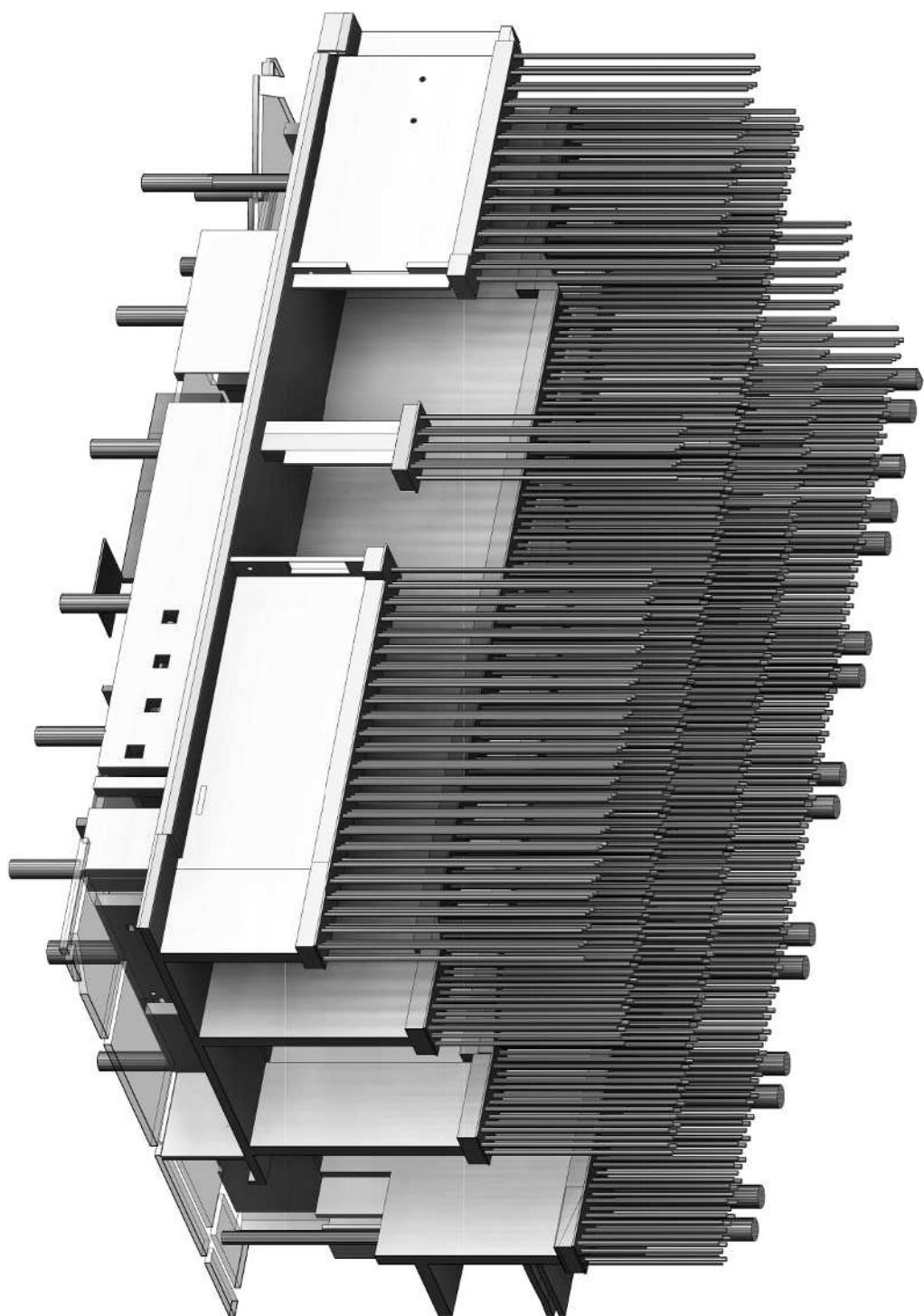






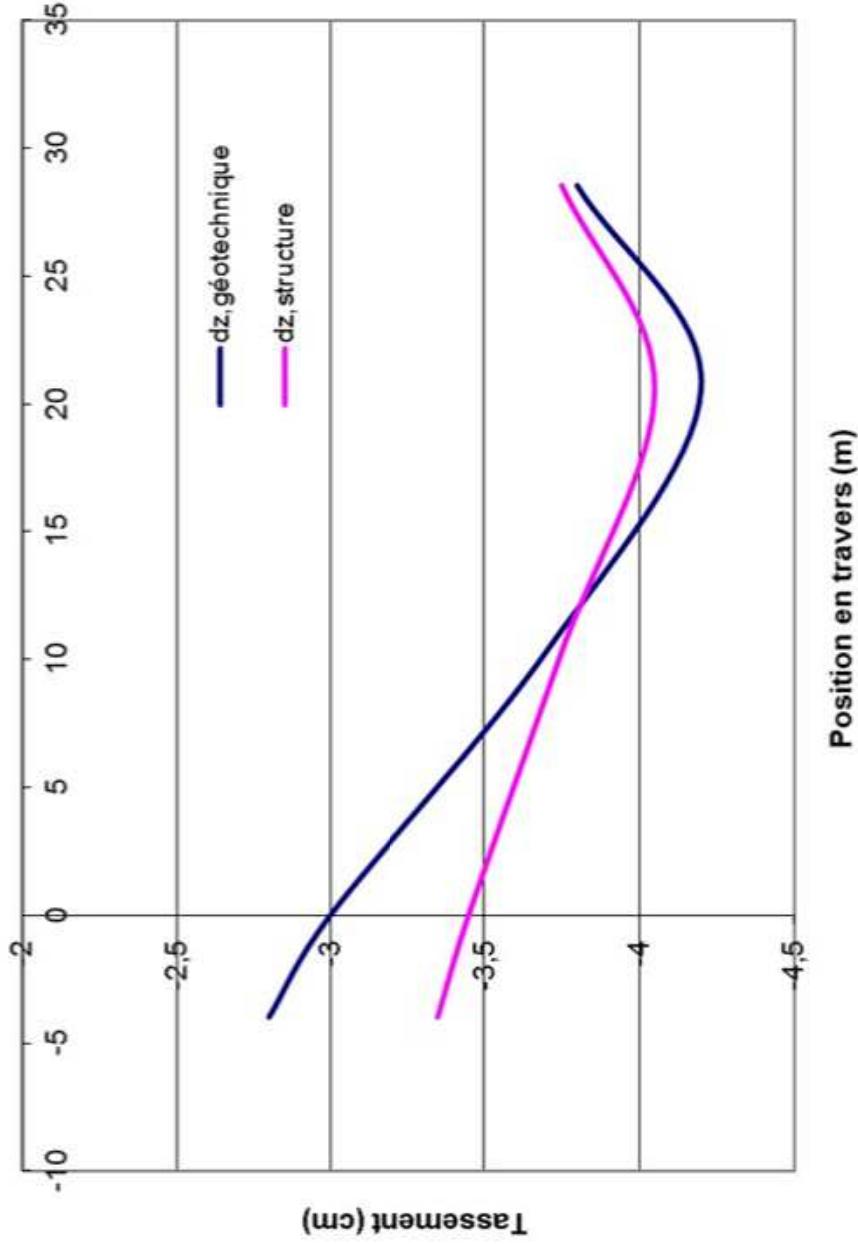


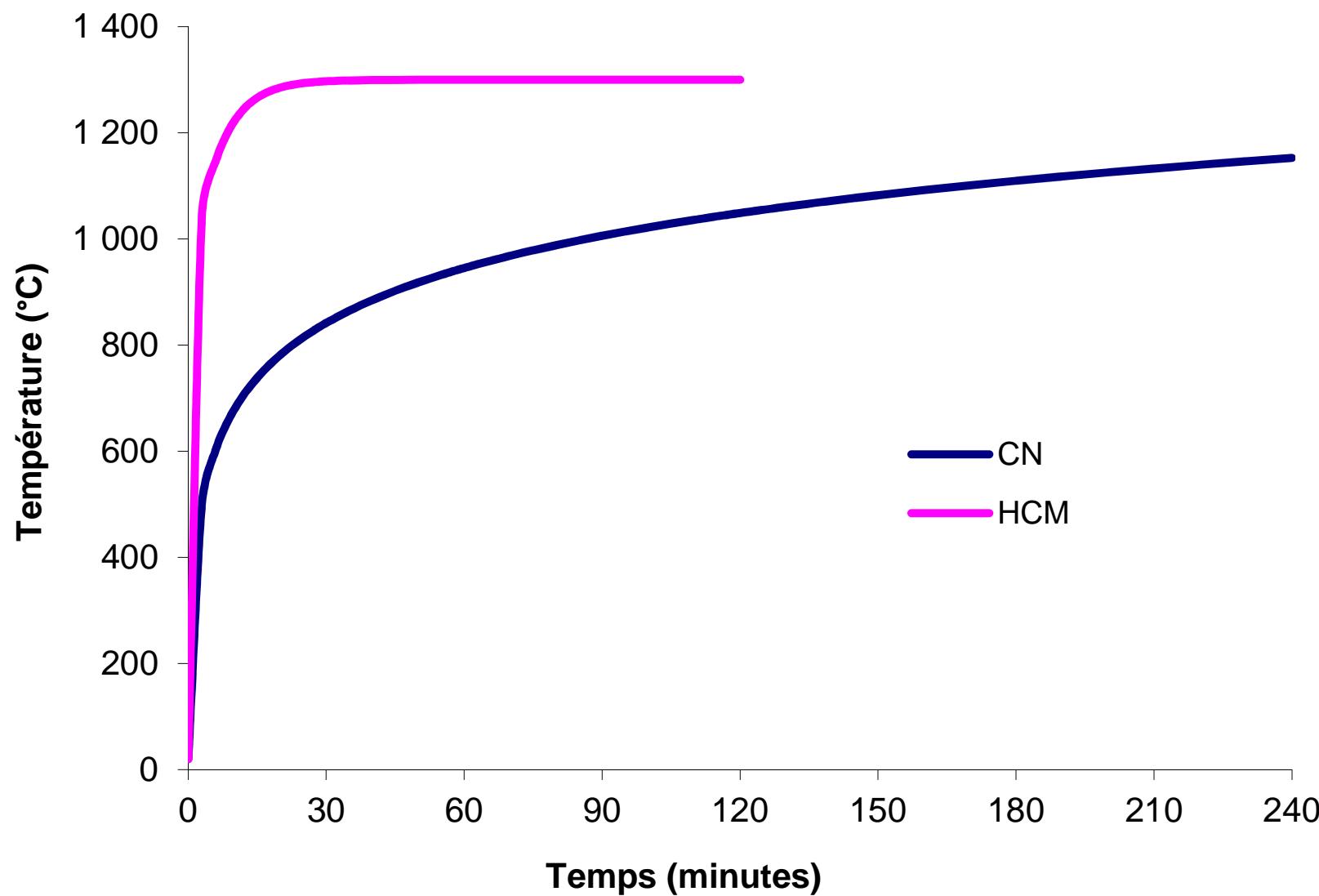


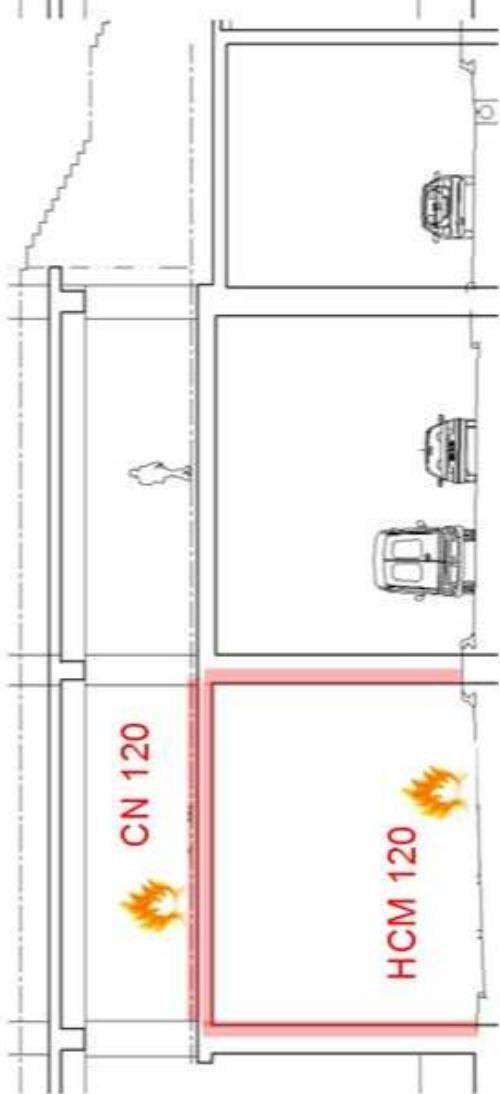
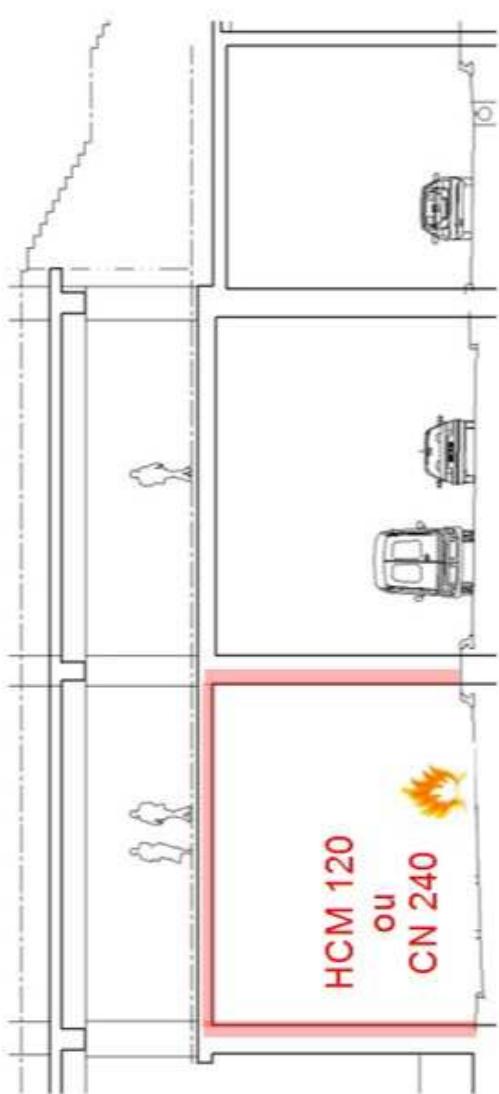
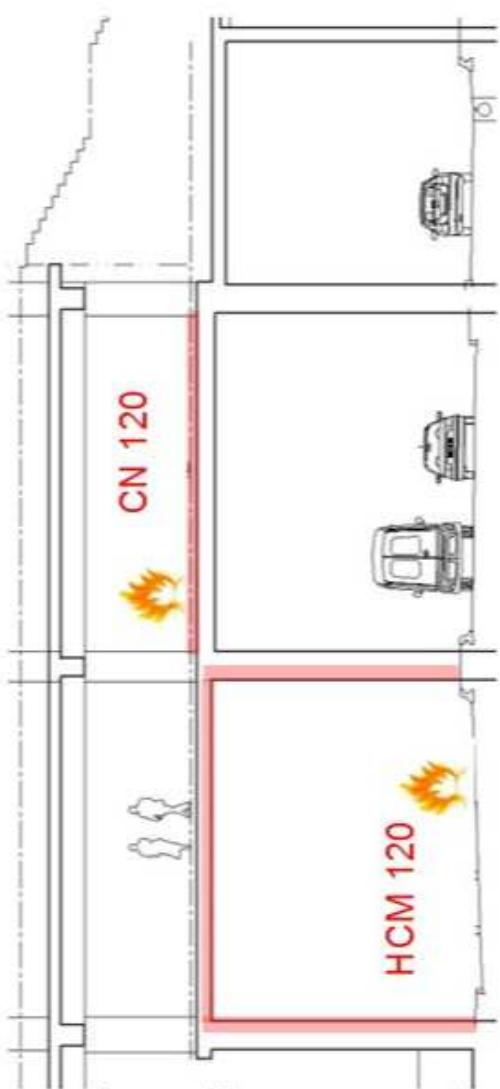
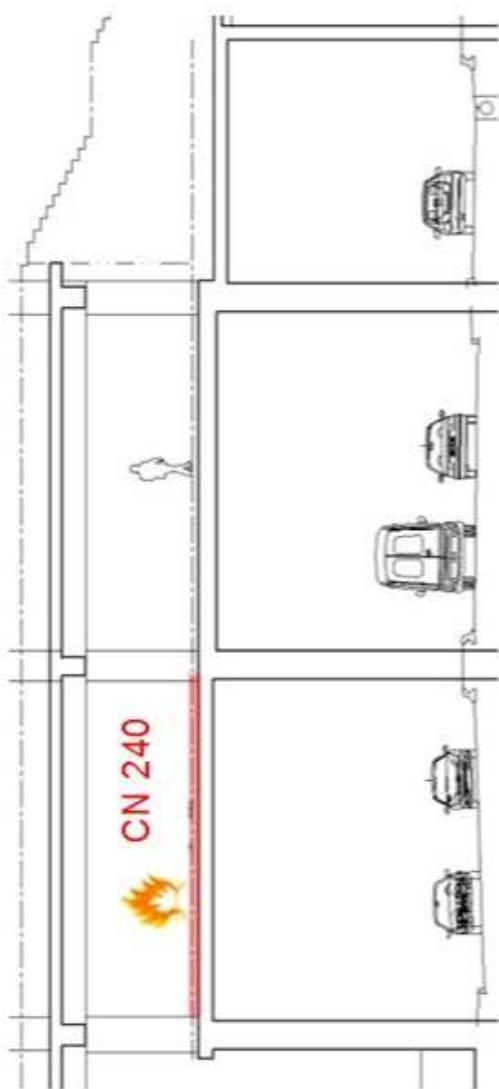




$$\begin{aligned}
& \begin{pmatrix} d_{z1} \\ d_{z2} \\ \vdots \\ d_{zi} \\ d_{zj} \\ \vdots \end{pmatrix} \underbrace{\begin{pmatrix} \tau_1 & \tau_{12} & \cdots & \tau_{1i} & \tau_{1j} & \cdots \\ \tau_{21} & \tau_2 & & \tau_{2i} & \tau_{2j} & \\ \vdots & & \ddots & & & \\ \tau_{i1} & \tau_{i2} & & \tau_i & \tau_{ij} & \\ \tau_{j1} & \tau_{j2} & & \tau_{ji} & \tau_j & \ddots \end{pmatrix}}_{\text{géotechnique}} \begin{pmatrix} R_{z1} \\ R_{z2} \\ \vdots \\ R_{zi} \\ R_{zj} \\ \vdots \end{pmatrix} \\
& = \begin{pmatrix} d_{z1} \\ d_{z2} \\ \vdots \\ d_{zi} \\ d_{zj} \\ \vdots \end{pmatrix} \underbrace{\begin{pmatrix} R_{z1} & & & & & \\ & R_{z2} & & & & \\ & & \ddots & & & \\ & & & R_{zi} & & \\ & & & & R_{zj} & \\ & & & & & \ddots \end{pmatrix}}_{\text{structure}} \begin{pmatrix} 1/k_{z,1} \\ 1/k_{z,2} \\ \vdots \\ 1/k_{z,i} \\ 1/k_{z,j} \\ \vdots \end{pmatrix} \quad (0)
\end{aligned}$$







\*\* PYTHAGORE \*\*

INCENDIE TUBE COUPOLE - CN 240

ELEMENT NUMERO 727

SECTION EXTREMEITE

CONTRAINTES BETON

BETON SELON LOI DE SARGIN

FCJ 43000

GAMMA\_B 1.00

THETA 1.00

FBU 36550

FT 0

SOLlicitations

N 60

MY 0

MZ -3.88

CONTRAINTES

BETON MAX 15198.46  
MIN 0.00

ACIER MAX 255455.84  
MIN -500000.00

DEFORMATIONS

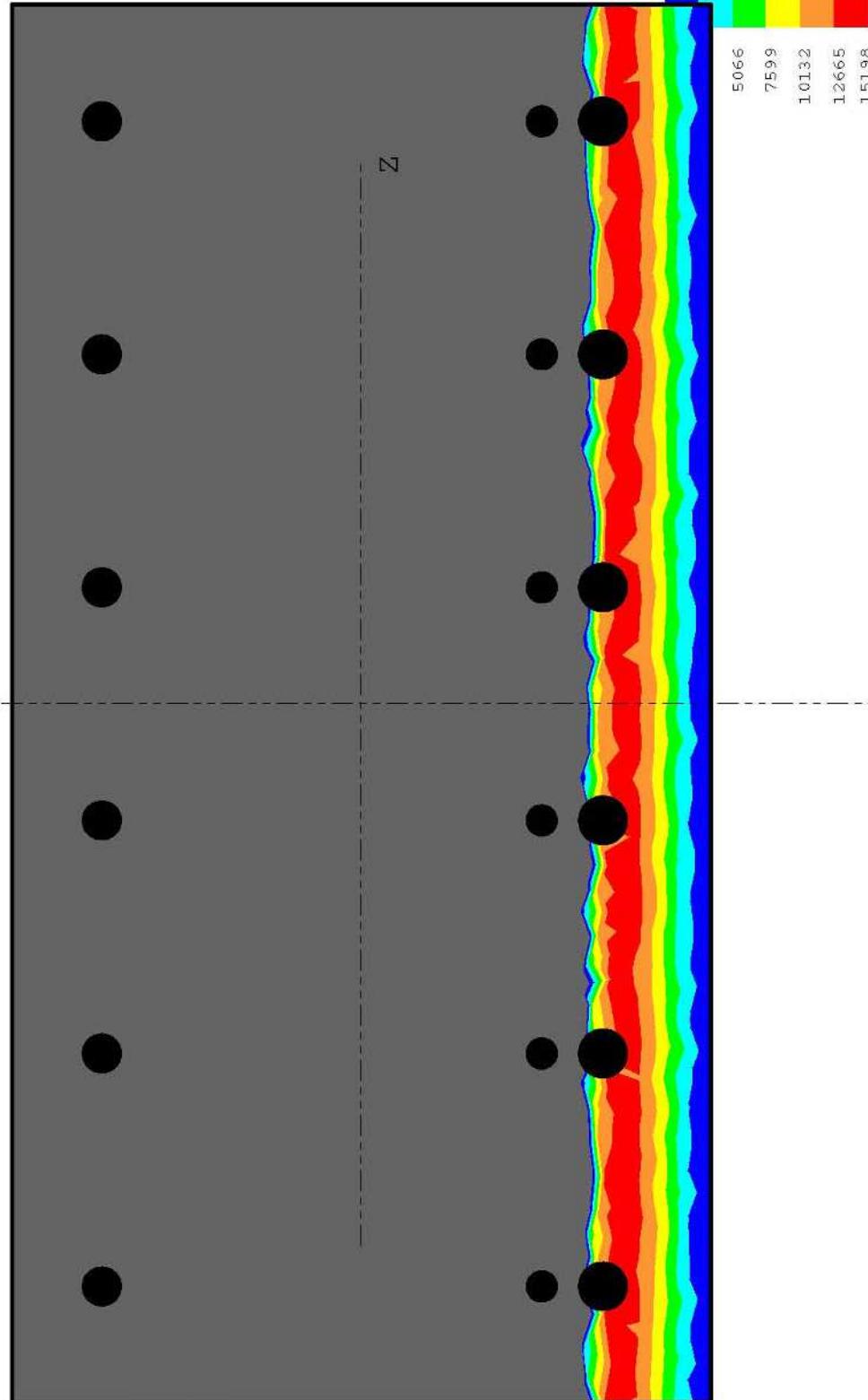
BETON MAX 0.0187540  
MIN -0.0375108

ACIER MAX 0.0013526  
MIN -0.0320889

POST-TRAITEMENT PIC 498  
CONVERGENCE EN 1 ITERATIONS

Y

Z



ECHELLE 1 / 4.85