



ETUDE

**ESSAIS VIBRATOIRES ET
SISMIQUES SUR MAQUETTE
DE STRUCTURE BOIS**

AVERTISSEMENT

Cette publication vise à mettre à disposition des acteurs de la construction les résultats d'études menées dans le cadre des travaux de la Commission Technique d' ADIVbois.

ADIVbois ne saurait être tenu pour responsable des omissions, inexactitudes ou erreurs que pourrait contenir cette publication et qui résulteraient de la retranscription de ces études, réalisées sous la responsabilité de leurs auteurs respectifs, et auxquelles le lecteur est invité à se référer directement.

ADIVbois souligne également que les éléments et recommandations retranscrites dans le présent ouvrage présentent un caractère informatif et ne sauraient en aucun cas se substituer, même pour partie, aux études techniques et juridiques, tant au stade de la conception que de l'exécution, qui incombent à chaque acteur de la construction dans le cadre des projets auxquels il pourra être amené à participer.

Droits d'auteur - copyright ©

L'ensemble de ce document relève de la législation française et internationale sur le droit d'auteur et la propriété intellectuelle. Tous les droits de reproduction sont réservés, y compris pour les documents téléchargeables et les représentations iconographiques et photographiques.

La reproduction de tout ou partie de ce document, y compris sur un support électronique quel qu'il soit est formellement interdite sauf autorisation expresse d' ADIVbois, du Codifab et des réalisateurs de l'étude.

PRÉAMBULE

Depuis 2016, l'Association pour le Développement des Immeubles à Vivre Bois porte un projet innovant reposant sur des immeubles bois de moyenne et grande hauteur, qui se distinguent par des solutions structurelles bois et des aménagements intérieurs faisant appel au bois.

Ce projet innovant va de pair avec un important travail collectif (études, benchmark, prototypages) visant à accompagner la réalisation d'immeubles démonstrateurs.

La Commission Technique d'ADIVbois a lancé, depuis 2016, un nombre conséquent de travaux dans le cadre d'ateliers thématiques (structure, incendie, acoustique, enveloppe, environnement...) et d'études afin d'accompagner la conception et la réalisation des Immeubles à Vivre Bois. L'objectif de ces travaux est de favoriser la levée de freins technico-réglementaires et d'être partagés avec la collectivité.

Le présent document s'inscrit dans cette démarche.

Les études de cas, menées en 2017, ont permis d'identifier plusieurs points fondamentaux à prendre en compte dans la démarche de conception d'un BBGH, repris dans le Vadémécum ADIVbois. Le comportement dynamique, sismique mais aussi le confort en tête (accélération et oscillations ressenties par les usagers sous les effets dynamiques de vent), est un point critique majeur, devenant le critère dimensionnant pour de nombreux éléments structuraux. Dans le cadre des études structurelles de bâtiment de moyenne et grande hauteur, qu'il soit en bois, en béton ou en acier, le comportement dynamique de la structure doit être étudié. En effet, lorsque la hauteur des constructions augmente, ces dernières deviennent potentiellement plus sensibles à des problématiques de mise en résonance avec les sollicitations irrégulières du vent ou de sollicitations sismiques.

Le comportement dynamique des structures est, de façon simplifiée, gouverné par trois paramètres :

- La masse de l'ouvrage
- La rigidité de la structure vis-à-vis des sollicitations horizontales
- L'amortissement de cette même structure (ou la capacité de cette dernière à dissiper les sollicitations dynamiques)

Les deux premiers paramètres sont accessibles de façon plus ou moins immédiate à l'ingénieur :

- Pour la masse, par une étude des composants de la structure et des charges qui y sont appliquées (planchers, façades, exploitants)
- Pour la rigidité, par un calcul RDM ou une méthode approchée modélisant le schéma de reprise des efforts horizontaux de la structure. Cette étude permettra de déterminer la fréquence fondamentale de l'ouvrage (plus d'informations sur les dispositions propres à l'analyse de structure en bois peuvent être trouvées dans le Vadémécum ADIVbois).

Pour ce qui est de l'amortissement, à l'inverse des structures béton ou acier, il n'existe pas à ce jour de valeur(s) donnée(s) pour les structures bois, ou encore mixte (bois-béton – bois-acier).

Fort de ce constat et souhaitant apporter des clés et des outils aux ingénieurs pour la conception et le calcul des bâtiments de moyenne et grande hauteur en bois, ADIVbois a initié plusieurs actions concernant le comportement dynamique des structures bois (voir aussi STR_B1 et STR_B2).

Dans le cadre d'une opération de construction spécifique, une convention de partenariat a été signée entre ADIVbois-CODIFAB et Kaufmann & Braud. Cette convention a concerné des essais dynamiques sur une maquette pour une typologie de structure bois « d'exosquelette ».

La description détaillée de l'élément testé, les modalités d'essai et les résultats des mesures effectuées pendant l'essai sont donnés dans le rapport suivant réalisée par le FCBA.

ESSAI VIBRATOIRES ET SISMIQUE SUR MAQUETTE DE STRUCTURE BOIS

A l'occasion du congrès WOODRISE, le FCBA a réalisé des essais vibratoires et sismiques afin de caractériser le comportement dynamique et sous chargement sismique du système constructif du projet de la tour SILVA de KAUFMAN & BROAD.

L'essai sismique a été réalisé sur une maquette à l'échelle 1 :3 représentant trois étages du système constructif de la tour.

Ce rapport présente les résultats des mesures et essais réalisés soit :

- Essai de réponse impulsionnelle
- Analyse modale expérimentale
- Essais sismiques



Rapport d'essais

403 / 17 / 6929 du 30.05.2018

Essais sismiques sur maquette de la structure de la tour SILVA à l'échelle 1:3

Projet WOODRISE

KAUFMAN & BROAD
30 Allée de Tourny
33000 Bordeaux

Pôle des Laboratoires Bois



Siège social
10, rue Gallée
77420 Champs-sur-Marne
Tél +33 (0)1 72 84 97 84
www.fcba.fr

Bordeaux
Allée de Boutaut – BP 227
33028 Bordeaux Cedex
Tél +33 (0)5 56 43 63 00

Siret 775 680 903 00132
APE 7219Z
Code TVA CEE : FR 14 775 680 903

Institut technologique FCBA Forêt, Cellulose, Bois – Construction, Ameublement

Ce document comporte 27 pages de rapport d'essais et 28 pages d'annexes. La reproduction de ce rapport d'essais n'est autorisée que sous sa forme intégrale.
Les résultats mentionnés dans ce rapport d'essai ne sont applicables qu'à l'échantillon soumis au laboratoire et tel qu'il est décrit dans le présent document.
Les échantillons essayés sont à la disposition du demandeur pendant 2 mois à dater de l'envoi du rapport d'essais. Passé ce délai ils ne pourront en aucun cas être réclamés.
Toute communication relative aux résultats des prestations d'essais de FCBA est soumise aux termes de l'article 14 des Conditions Générales de Vente.

page 1/55

1	CONTEXTE	3
2	RECEPTION DE LA MAQUETTE :	3
3	BANC D'ESSAIS	4
3.1	TABLE DE VIBRATION	4
3.2	MATERIEL DE MESURE	4
4	SIMILITUDE	6
4.1	PRINCIPE	6
4.2	VARIABLES D'INTERET	6
4.3	EXPRESSION DES FACTEURS DE SIMILITUDE	6
4.4	MASSE ADDITIONNELLE	7
4.5	TABLEAU RECAPITULATIF	8
5	MONTAGE DE LA MAQUETTE	9
6	CONDITIONS LIMITES	10
7	PROGAMME D'ESSAIS	11
8	PROCEDURE D'ANALYSE MODALE	12
8.1	PRINCIPE	12
8.2	PARAMETRES DU BRUIT BLANC UTILISES	13
8.3	ACQUISITION PAR SEQUENCE	13
9	PROCEDURE D'ESSAI DE RÉPONSE IMPULSIONNELLE	13
9.1	PRINCIPE	13
9.2	CONDITIONS LIMITES & PARAMETRES D'ESSAI	13
10	PROCEDURE D'ESSAI SISMIQUE	14
10.1	SIGNAL SISMIQUE	14
11	RÉSULTATS D'ESSAIS	16
11.1	ANALYSE MODALE EXPERIMENTALE	16
11.2	ESSAIS DE REPONSE IMPULSIONNELLE	18
11.3	ESSAIS SISMIQUES	22
ANNEXE 1 : PLANS DE LA MAQUETTE D'ESSAI FOURNIS PAR ELIOTH		28
ANNEXE 2 : PLANS DES ASSEMBLAGES FOURNIS PAR ELIOTH		35

Client : M. David Charvet
Kaufman & Broad
30 Allée de Tourny
33000 BORDEAUX

Contact au FCBA : Jean-Charles Duccini
FCBA – Laboratoire Mécanique
Allée de Boutaut – BP 227
33028 Bordeaux Cedex

1 CONTEXTE

À l'occasion du congrès WOODRISE, le FCBA a réalisé des essais vibratoires et sismiques afin de caractériser le comportement dynamique et sous chargement sismique du système constructif de la tour SILVA de KAUFMAN et BROAD.

L'essai sismique est réalisé sur une maquette à l'échelle 1:3 représentant trois étages du système constructif de la tour SILVA.

Ce rapport présente les résultats des mesures et essais réalisés soit :

- Essais de réponse impulsionnelle
- Analyse modale expérimentale
- Essais sismiques

2 RECEPTION DE LA MAQUETTE :

La maquette d'essai est conçue et calculée par le bureau d'étude ELIOTH selon un cahier des charges élaboré par FCBA et sous sa direction.

Les plans de la maquette sont donnés en annexe 1.

Les éléments bois sont fabriqués par la société SACBA.

Les ferrures sont fabriquées par la société SIMPSON STRONG TIE.

Les éléments bois ont été reçus le 06/07/2017.

Les ferrures ont été reçues le 24/07/2017.

Ils ont été référencés sous le N° de laboratoire : 403-17-6929.

3 BANC D'ESSAIS

3.1 Table de vibration

Les essais ont été réalisés sur une table sismique uni-axiale horizontale dont les caractéristiques et performances sont définies ci-dessous.

Table sismique uni axiale :

Dimensions : 6 m × 6 m

Masse : 5.5 tonnes

Déplacement max : ±125 mm

Vitesse max : 0.7 m/s

Accélération max : 4g table nue

Gamme de fréquences : 0 - 30 Hz

Vérin servohydraulique :

Capacité 250 kN

Course 250 mm

Pilotage Contrôleur MTS



Photo 1 : Table sismique

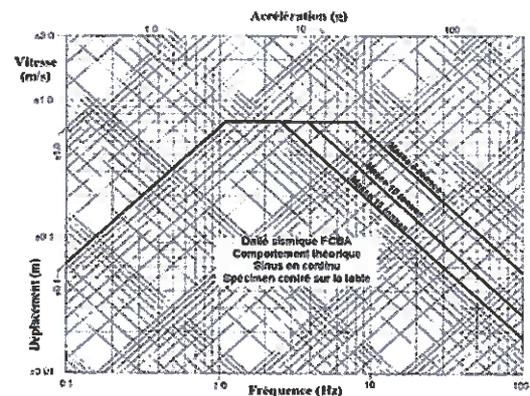


Figure 1 : Courbes de performances de la table sismique

3.2 Matériel de mesure

Accéléromètres :

Accéléromètres PCB modèle 3711, capacité 10g.

Module de conditionnement Bruël & Kjaer Lan XI.

Logiciel de traitement Bruël & Kjaer Pulse, Bruël & Kjaer Reflex et Matlab.

La fréquence d'échantillonnage des signaux temporels est 4 096Hz.

Capteur vérin :

Cellule de force MTS 250 kN statique.

Capteur de déplacement LVDT RDP 300mm.

Module de conditionnement MTS Flextest 60.

Capteurs de déplacement :

Capteur à fil Phimesure Modèle CD 150 – 400 mm.



Photo 2 : accéléromètre tri-axe positionné sur un nœud de la maquette

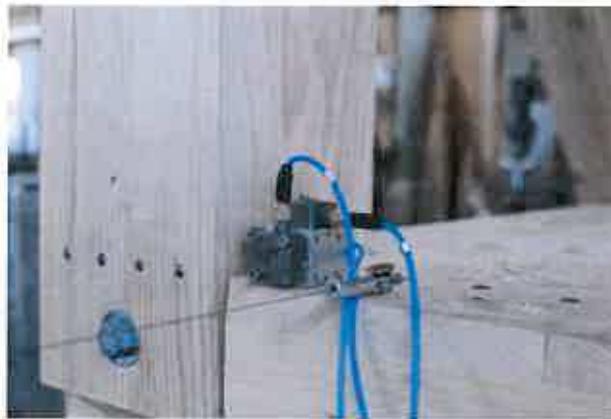


Photo 3 : accéléromètre tri-axe et extrémité de capteur de déplacement à fil fixés sur un plancher



Photo 4 : Potence support de capteurs à fil et station d'acquisition de données

4 SIMILITUDE

4.1 Principe

Le paramètre principal d'une maquette est son échelle. Son échelle peut s'exprimer de la façon suivante :

$$\frac{L_p}{L_m} = S_L$$

Où :

L_p est la mesure d'une longueur sur l'élément à l'échelle 1

L_m est la mesure de cette même longueur sur l'élément d'échelle réduite.

S_L est le facteur d'échelle de la maquette.

Cependant, le facteur d'échelle représente le ratio entre deux longueurs, il existe des facteurs de similitude pour chaque dimension de même unité.

4.2 Variables d'intérêt

Afin de pouvoir traiter les données de l'échelle réduite et d'extrapoler le comportement dynamique de la structure à taille réelle, nous avons choisi de fixer les facteurs de similitude suivants à 1 :

- Gravité
- Accélération
- Matériaux
- Contraintes
- Déformations

4.3 Expression des facteurs de similitude

Le facteur de similitude d'une quantité physique s'exprime à l'aide d'équations physiques liant cette quantité à une autre dont le facteur de similitude est connu ou imposé.

Exemple :

Concernant l'accélération son facteur de similitude est :

$$a_p = \frac{\partial^2 x_p}{\partial t_p^2} = \frac{S_x}{S_t^2} \frac{\partial^2 x_m}{\partial t_m^2} = \frac{S_x}{S_t^2} a_m \Rightarrow S_a = \frac{S_x}{S_t^2}$$

Le facteur de similitude sur l'accélération étant imposé, cela implique que le facteur de similitude sur le temps est : $S_t = \sqrt{S_x}$.

4.4 Masse additionnelle

Les valeurs des facteurs de similitude sur l'accélération et les contraintes étant imposés à 1, on arrive à une contradiction physique concernant le facteur de similitude de la masse. En effet, il est soit égal à S^2 si l'on respecte la similitude sur les contraintes, soit égal à S^3 si l'on respecte le facteur d'échelle.

Afin de palier à ce problème, il est nécessaire d'ajouter des masses supplémentaires à la structure afin que les variables d'intérêt soient conservées. L'expression de la masse additionnelle est :

$$S^3 M_m = S^2 (M_m + M_a) \Rightarrow M_a = M_m (S - 1)$$

Sur la maquette, seul le poids propre des éléments de structure est considéré. A l'échelle 1:3, il est nécessaire d'ajouter une masse additionnelle égale au double de la masse de la maquette. Le poids propre de la maquette est de 4,5 tonnes. La masse à ajouter est de 9 tonnes.

Cette masse est répartie uniformément sur les planchers sous forme de de blocs de béton 20 cm x 20 cm x 50 cm de 17,5 kg chaque posés sur les planchers et maintenus par des lisses bois. Le plan de répartition des blocs sur chaque plancher est présenté ci-dessous. Le nombre encadré est le nombre de parpaings par groupe.

Nombre total de blocs : 516 ; masse 9000 kg

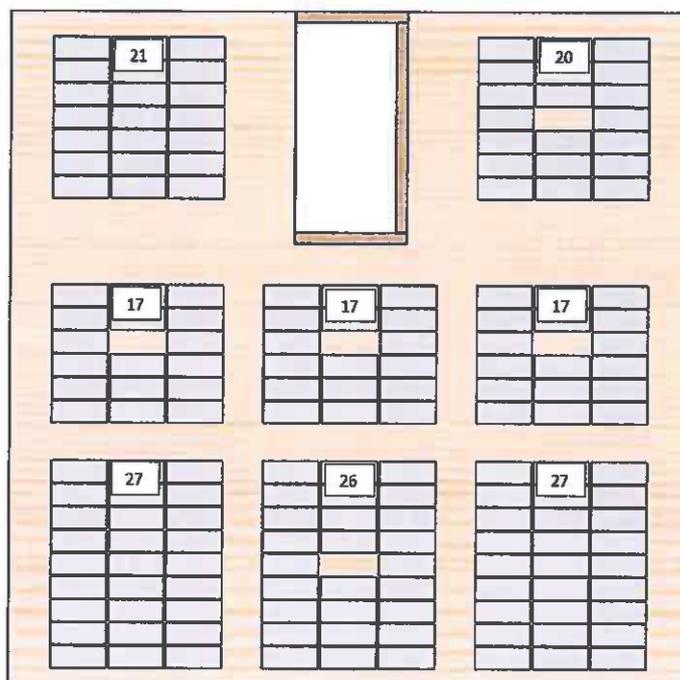


Figure 2 : Vue de dessus du positionnement des blocs de béton sur les trois planchers de la maquette. Encadrés : nombre de blocs dans chaque groupe.

4.5 Tableau récapitulatif

Le tableau suivant récapitule les facteurs de similitude de la loi utilisée pour les essais (Cauchy- Froude):

Quantité	Dimensions	Facteurs de similitude
Accélération	LT^{-2}	1
Contrainte	$ML^{-1}T^{-2}$	1
Allongement relatif	/	1
Module de Young	$ML^{-1}T^{-2}$	1
Déformation statique	L	S
Section	L^2	S^2
Volume	L^3	S^3
Temps	T	$S^{1/2}$
Fréquence	T^{-1}	$S^{-1/2}$
Vitesse	LT^{-1}	$S^{1/2}$
Masse	M	S^2
Force	MLT^{-2}	S^2
Raideur statique	MT^{-2}	S
Frottement visqueux	MT^{-1}	$S^{3/2}$

Tableau 1 : Paramètres de la loi de similitude

5 MONTAGE DE LA MAQUETTE

L'assemblage de la maquette sur la table sismique de FCBA est réalisé par la société IBS entre le 24/07/2017 et le 04/08/2017.



Photo 5 : Maquette d'essai assemblée sur la table sismique



Photo 6 : Maquette avec masse additionnelle par blocs de béton

6 CONDITIONS LIMITES

La maquette est fixée à la table par l'intermédiaire de ferrures acier en pieds de poteaux et à la base du noyau CLT, elles-mêmes fixées à la table par des vis M16. Les plans de détail des ferrures d'ancrage sont présentés en annexe 2.



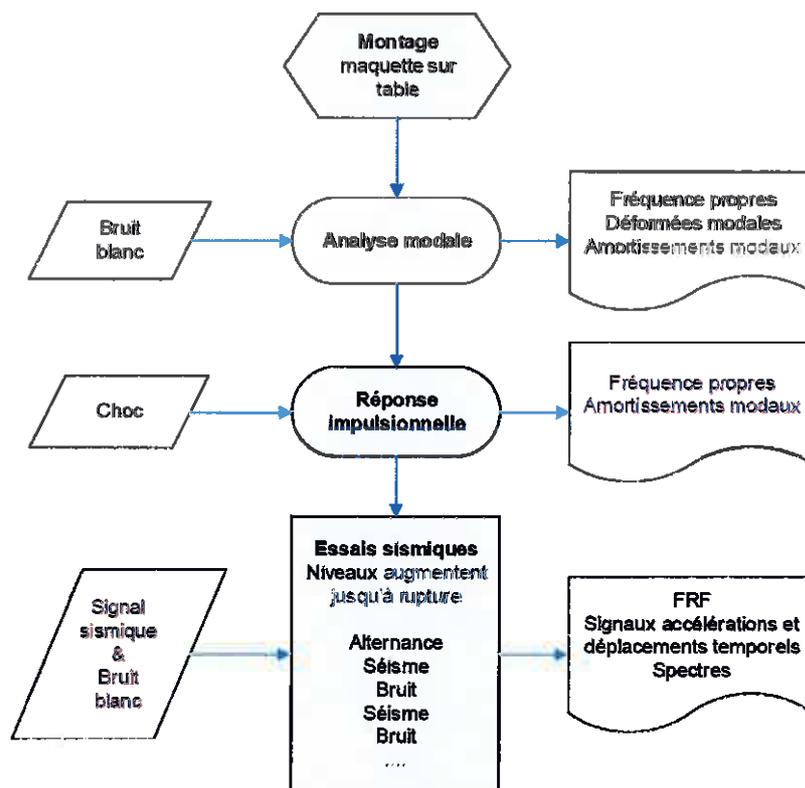
Photo 7 : Ferrures d'ancrage de pied de poteau



Photo 8 : Ferrures d'ancrage noyau CLT

7 PROGRAMME D'ESSAIS

Le programme des essais est schématisé ci-dessous :



Sont réalisés successivement sur la maquette :

- 1/ Une analyse modale complète
- 2/ Des essais de réponse impulsionnelle
- 3/ Des essais sismiques

8 PROCEDURE D'ANALYSE MODALE

Les analyses modales expérimentales (AME) permettent la détermination des fréquences propres, amortissements et déformées modales associées.

8.1 Principe

Un bruit blanc de faible intensité est envoyé en commande à la table. La maquette est modélisée et des accéléromètres sont positionnés à chaque nœud du modèle. Les valeurs de la cellule de force en tête de vérin ainsi que les accélérations aux différents nœuds de la structure sont enregistrées sur une durée de 1 minute.

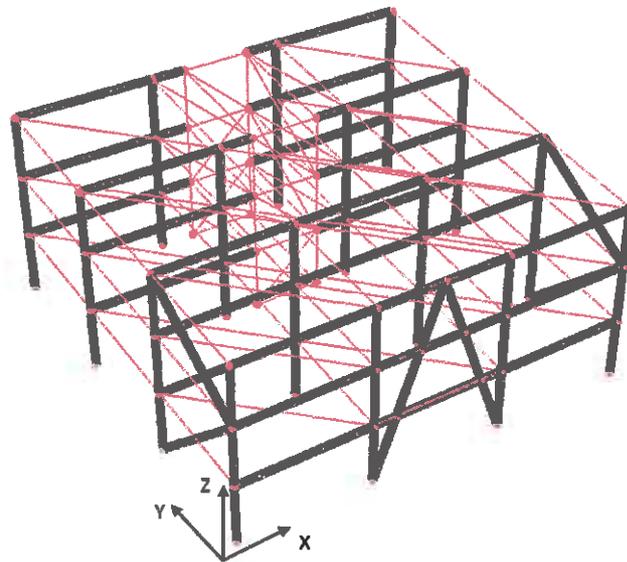


Figure 3 : Modélisation de la structure pour l'analyse modale expérimentale. Les mesures sont effectuées aux nœuds du modèle (points rouges).

L'Analyse modale est réalisée en post traitement par calcul des fonctions de réponse en fréquence (FRF).

La FRF est la représentation fréquentielle du rapport entre l'accélération en un point de la structure sur l'accélération de la table. L'algorithme d'estimation de FRF utilisé dans tous les traitements est le H1, soit $H_1(f) = \frac{G_{XY}(f)}{G_{XX}(f)}$ avec $G_{XY}(f)$ l'interspectre de X et Y ; $G_{XX}(f)$ l'autospectre de X.

Ces FRF sont condensées en une courbe caractérisant le comportement dynamique de la structure : la « Complex Mode Indicator Function » (CMIF). Enfin par ajustement d'un modèle mathématique sur la CMIF, les modes propres et leurs caractéristiques sont affichés.

8.2 Paramètres du bruit blanc utilisés

L'asservissement est réalisé en déplacement sur une gamme de fréquence [0 25] Hz avec une amplitude de 0.5 mm RMS pondérée par $1/f^2$ résultant en une accélération de 0.03 g RMS.

8.3 Acquisition par séquence

Le système de conditionnement Bruël & Kjaer Lan XI dispose de 12 voies d'acquisition ce qui n'est pas suffisant pour enregistrer les accélérations de tous les points simultanément. Des séquences de mesures ont donc été réalisées.

9 PROCEDURE D'ESSAI DE RÉPONSE IMPULSIONNELLE

9.1 Principe

Les essais de réponse impulsionnelle consistent à enregistrer la réponse en accélération et en déplacement au niveau des planchers associée au relâchement soudain d'un câble tendu provoquant une déviation initiale à partir de la position d'équilibre de la structure.

Ils permettent de déterminer la 1ère fréquence propre et le taux d'amortissement de la structure sur chaque plancher par analyse des signaux issus des accéléromètres et des capteurs de déplacement à fil. L'amortissement est calculé par la méthode du décrétement logarithmique.

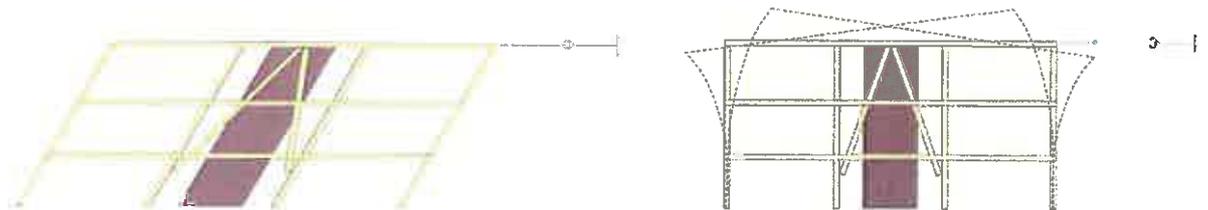


Figure 4 : Principe de tension et de largage pour un essai de vibration libre

9.2 Conditions limites & paramètres d'essai

La table vibrante bloquée en position neutre par sa commande hydraulique. Les accéléromètres et les capteurs à fils sont positionnés sur les faces extérieures de la maquette au niveau des 3 planchers selon les positions décrites ci-dessous.

La force de déviation est appliquée sur le plancher supérieur de la maquette dans un premier temps selon X puis selon Y.

Suite à des essais préliminaires, la valeur de déviation initiale imposée sur le plancher supérieur à la maquette avant le relâchement a été fixé à 1.2mm.

- **Capteurs et orientation**

Les schémas ci-dessous positionnent la structure dans un repère d'essai et présentent la disposition des accéléromètres et des capteurs à fil de déplacements tout autour de la structure pour les essais de vibration libre.

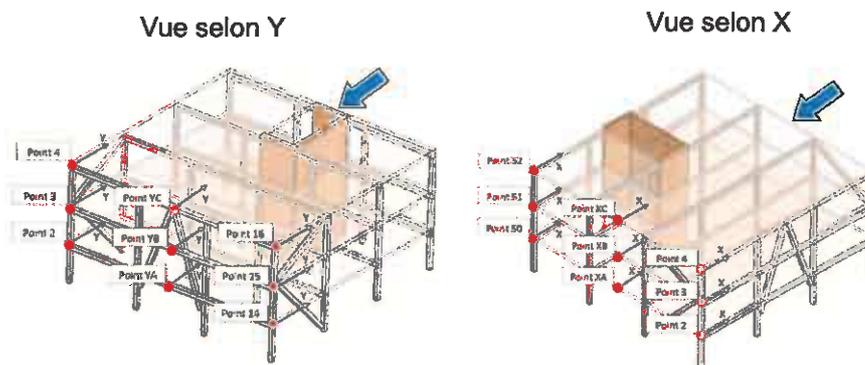


Figure 5 : Représentation schématique de la structure et de la position des instruments de mesure (accélération et déplacement, direction de la sollicitation en bleu)

Les marqueurs rouges matérialisent la position des capteurs sur la structure. Les capteurs sont positionnés dans un plan normal à la direction mesurée. Ils sont repérés dans l'étude par un numéro (ou une lettre) et par une direction. Par exemple l'accéléromètre 16Y mesure l'accélération au point numéro 16 selon la direction Y.

10 PROCEDURE D'ESSAI SISMIQUE

La procédure d'un essai sismique est composée de deux phases :

- Bruit blanc à faible niveau afin d'extraire les caractéristiques dynamiques de la structure que l'on teste (fréquence propre, déformées modales associées et amortissement).
- Signal sismique à un niveau donné (certain pourcentage en amplitude de ce signal).

Ces phases sont réitérées en incrémentant le niveau du signal sismique jusqu'à arriver à la ruine de la structure ou aux limites physiques de la table.

10.1 Signal sismique

Le signal sismique choisi est le signal « lointain » dont les caractéristiques sont les suivantes :

- Peak Ground Acceleration : 0,33 g
- Issu du séisme de Miyagi (Japon 2003), Station K-Net, calé sur un spectre de séisme (Guadeloupe subduction) avec la relation de Youngs et al.
- Représentatif du scénario aléa fort, sol B et de l'Eurocode 8 (BRGM, projet SISBAT 2009-2014)

Ce signal étant la référence pour l'échelle 1, pour respecter les lois de similitudes il est donc contracté dans le temps d'un facteur $\sqrt{3}$. Son contenu fréquentiel ainsi que le déplacement induit sont modifiés cependant l'accélération reste la même.

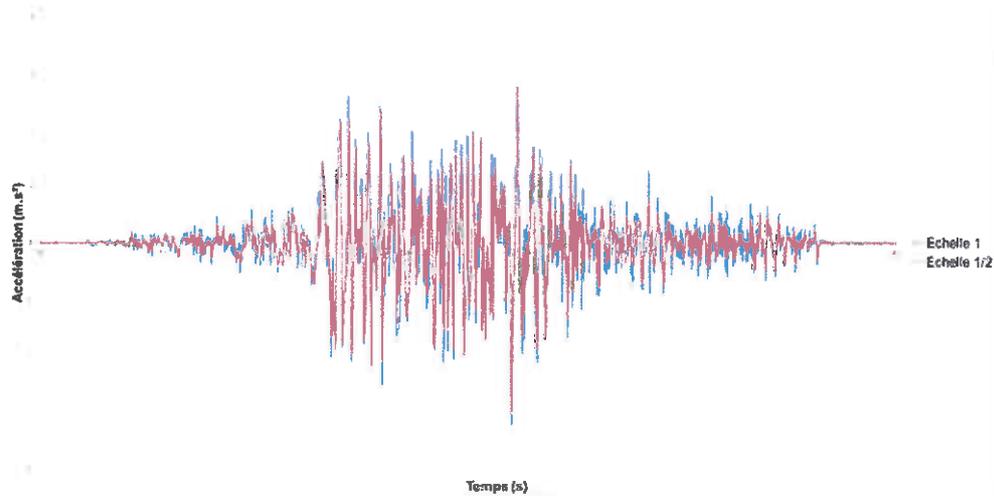


Figure 6 : Accélération de la table pour le signal lointain 100%

Les accélérations crêtes maximales sont respectivement de 0,3g pour l'échelle 1 et 0,29g pour l'échelle 1/2.

11 RÉSULTATS D'ESSAIS

11.1 Analyse modale expérimentale

Sollicitations :

Signal aléatoire modulé en amplitude $1/f^2$; 0,5mm RMS ; [0 -25] Hz

3 capteurs d'accélération 3 axes

1 capteur force table

Modèle 86 nœuds

Résultats :

Mode	Fréq.	Amortissement	Description
1	4,8 Hz	3,1 %	Déformation en parallélogramme des sections dans le plan YZ
2	6,2 Hz	4,5 %	Rotation d'axe vertical passant par le contreventement en « A »
3	8,2 Hz	4,3 %	Rotation d'axe vertical passant par le noyau
Modes supérieurs			Déphasages entre planchers

Les trois premiers modes sont illustrés ci-dessous. L'échelle de couleur est proportionnelle au déplacement du noir (nul) au jaune (maximal).

1^{er} mode : 4,8Hz - Déformation en parallélogramme des sections dans le plan YZ.
Valeur d'amortissement : 3,1%

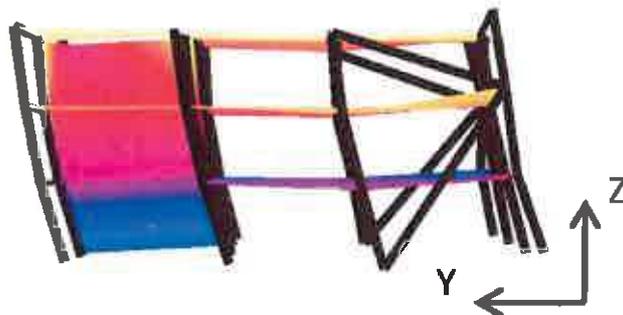


Figure 7 : Déformée modale, mode 1

Mode 2 : 6,2Hz – Rotation d'axe vertical passant par le contreventement en « A ».
Valeur d'amortissement : 4,5%

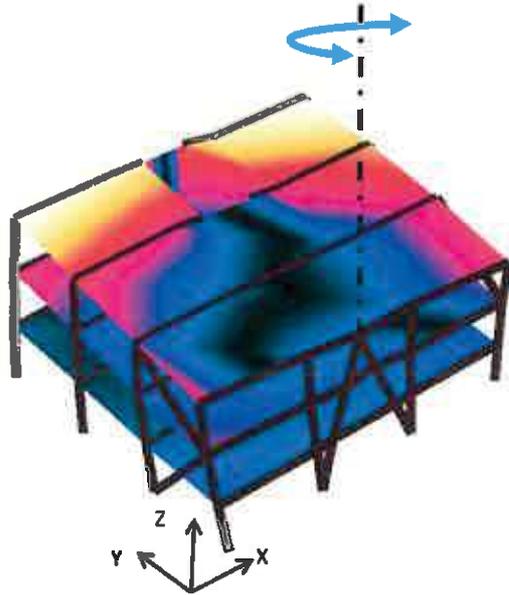


Figure 8 : Déformée modale, mode 2

Mode 3 : 8,2Hz – Rotation d'axe vertical passant par le noyau, amortissement 4,3%

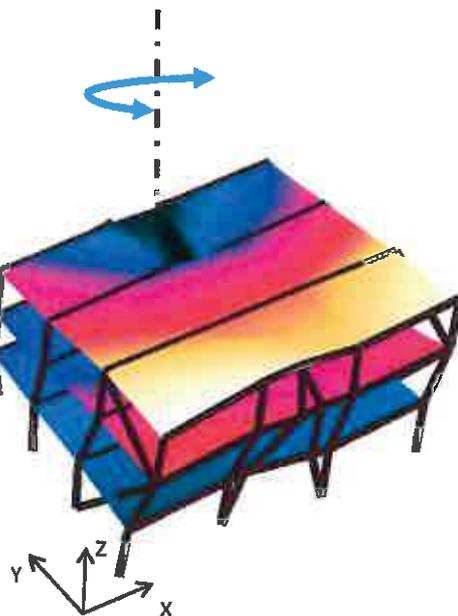


Figure 9 : Déformée modale, mode 3

11.2 Essais de réponse impulsionnelle

11.2.1 Traitement des signaux

Le traitement porte sur les signaux de réponse accélération et déplacement enregistrés sur la maquette.

Les signaux ont été filtrés avant analyse par un filtre passe bas afin de réduire le bruit. L'analyse porte sur le premier mode de résonance de la maquette. Suite à des essais préliminaires, la fréquence de résonance du premier mode a été identifiée au voisinage de 5 Hz. Un filtre passe bas ayant une fréquence de coupure de 10 Hz est appliqué.

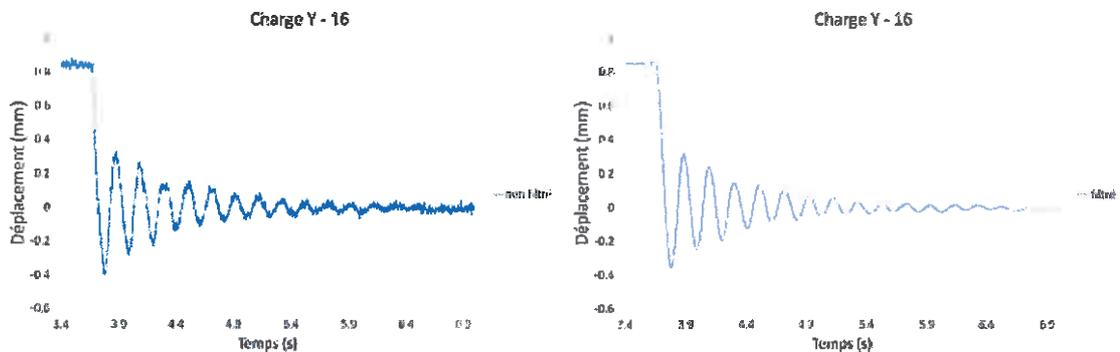


Figure 10: Exemple d'un signal réponse filtré

11.2.2 Calcul de l'amortissement

L'amortissement est calculé expérimentalement par la méthode du décrément logarithmique, qui est la suivante.

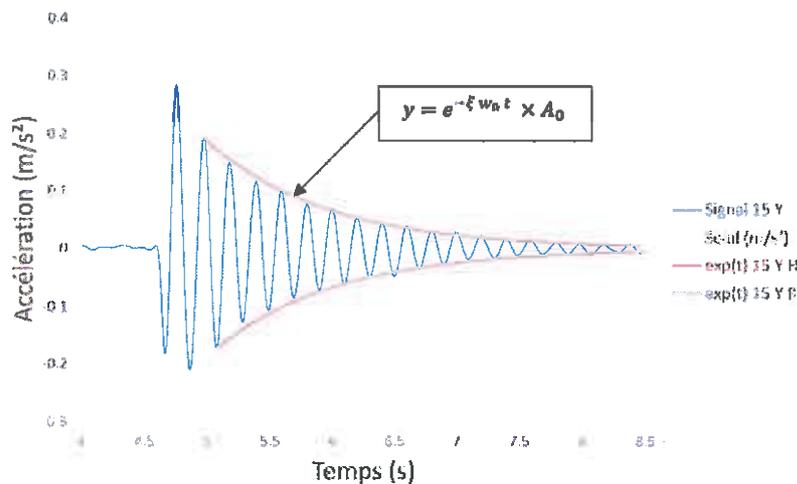


Figure 11 : Réponse temporelle d'un oscillateur simple amorti

Le mouvement temporel (accélération, vitesse ou déplacement) de l'oscillateur simple amorti peut être enveloppé par la courbe d'équation :

$$y(t) = A_0 e^{-\xi \omega_0 t} \quad (1)$$

Avec :

A_0 l'amplitude initiale

ω_0 la pulsation propre

ξ le taux d'amortissement

Il s'ensuit que le taux d'amortissement peut s'écrire :

$$\xi = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{4\pi^2}{\delta^2}}}$$

Avec δ le décrément logarithmique :

$$\delta = \frac{1}{n} \ln\left(\frac{A_0}{A_n}\right) \quad (2)$$

Où

A_0 est l'ordonnée du point maximal de la première crête

A_n est l'ordonnée du point maximal de la nième crête

n est le nombre de crêtes entre A_0 et A_n

Les valeurs de A_n et A_0 sont lues sur la courbe. n est choisi arbitrairement en fonction de l'allure de l'enveloppe de la courbe.

Dans l'exemple ci-dessous, $n = 12$; $A_0 = 0.193$; $A_n = 0.016$

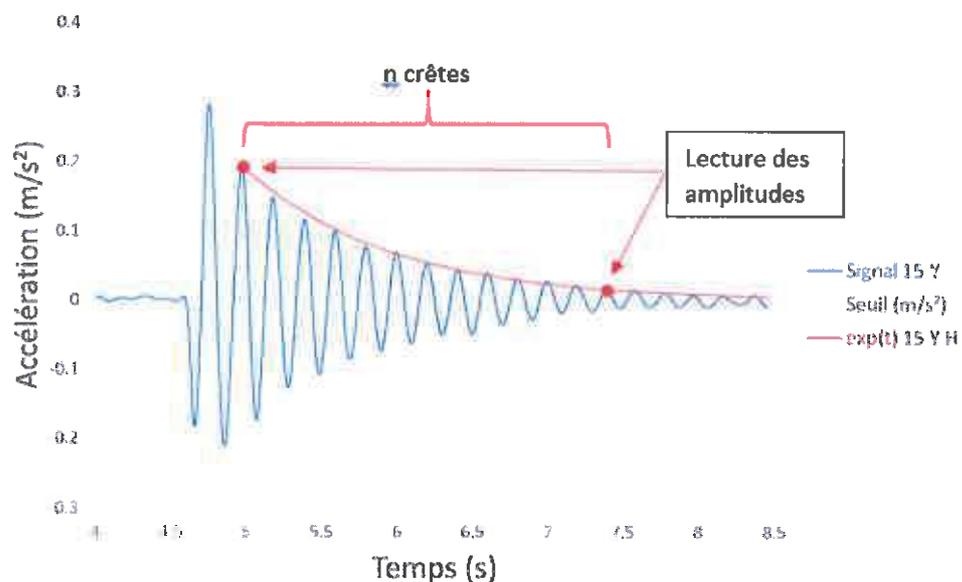


Figure 12 : exemple de lecture des valeurs

Le calcul de l'amortissement est réalisé sur les crêtes positives et négatives.

Sur un signal expérimental, des valeurs d'amortissements différentes peuvent être calculées en fonction du nombre de crêtes choisies et de l'amplitude initiale choisie. Il convient de calculer l'amortissement sur le plus grand nombre de crêtes possible et à partir d'une amplitude inférieure ou égale à un seuil choisi en fonction des hypothèses de calcul de la tour réelle.

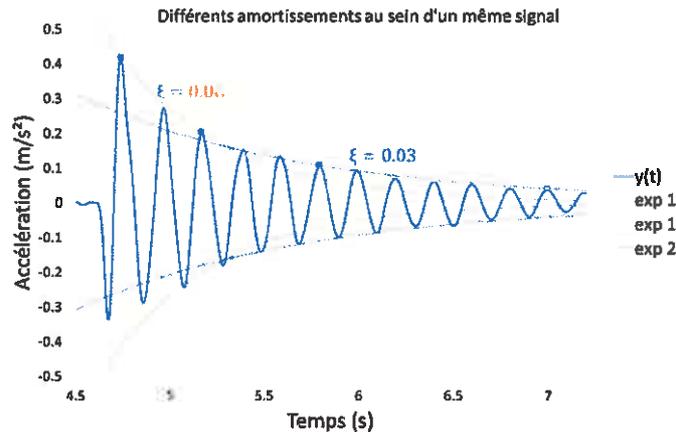


Figure 13 : exemple de calcul d'amortissement en fonction des choix des crêtes

Pour être représentatif d'une sollicitation causée par le vent, les amortissements sont calculés à partir d'un **seuil d'accélération de $0.2m/s^2$** . Ce seuil a été choisi à la demande du bureau d'étude Elioth.

La courbe enveloppe théorique peut être au besoin ajustée afin de se rapprocher au mieux de la courbe expérimentale. Les résultats rapportés dans ce rapport présentent la courbe enveloppe qui approche le mieux le signal d'essai dans la zone d'intérêt.

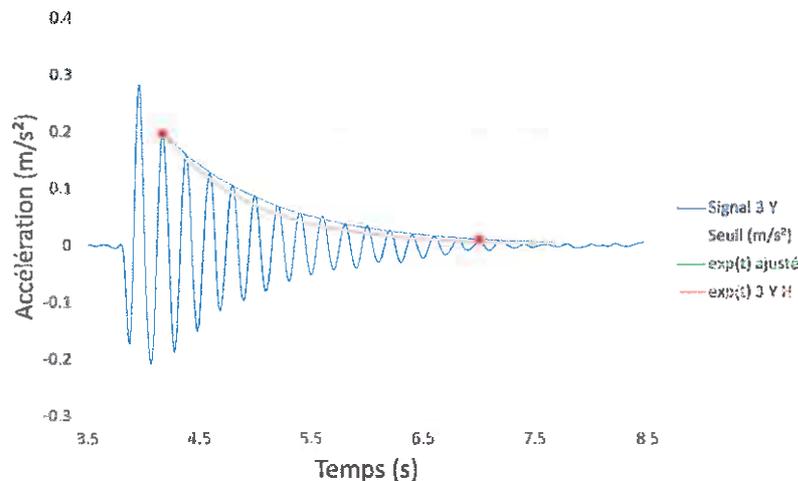


Figure 14 : exemple d'ajustement de la courbe enveloppe

Tableaux de synthèse des résultats d'essais de réponse impulsionnelle :

Les signaux réponses obtenus lors des essais dans la direction X présentent des amplitudes trop faibles pour être traités et appliquer correctement la méthode du décrément et n'ont pas pu être exploités. Donc sont présentés ci-dessous uniquement les résultats des essais effectués dans la direction Y.

Synthèse des signaux de réponse accélérations :

Point	Position	n (nombre de crêtes)	A ₀ (m/s ²)	A _n (m/s ²)	f ₀ (Hz)	Amortissement (%)	Amortissement moyen (%)
Y2	haut	11	0.143	0.013	4.92	3.47	3.54
	bas	10	0.135	0.014	4.95	3.60	
Y3	haut	14	0.198	0.006	4.95	3.25	3.29
	bas	12	0.186	0.015	4.94	3.34	
Y4	haut	10	0.168	0.025	4.95	3.03	3.03
	bas	12	0.206	0.021	4.91	3.03	
Y14	haut	12	0.135	0.016	4.92	3.25	3.21
	bas	10	0.117	0.016	4.95	3.16	
Y15	haut	12	0.193	0.016	4.96	3.30	3.45
	bas	10	0.173	0.018	4.95	3.60	
Y16	haut	12	0.174	0.013	4.98	3.44	3.42
	bas	11	0.191	0.022	4.95	3.40	
YA	haut	11	0.175	0.021	4.91	3.30	3.45
	bas	11	0.168	0.014	4.93	3.59	
YB	haut	11	0.179	0.022	4.93	3.03	3.10
	bas	10	0.168	0.023	4.92	3.16	
YC	haut	10	0.185	0.028	4.95	3.00	3.20
	bas	11	0.178	0.017	4.95	3.40	

Moyennes					4.94		3.30
-----------------	--	--	--	--	-------------	--	-------------

Synthèse des signaux de réponse déplacements :

Signal	Position	n (nombre de crêtes)	A ₀ (m/s ²)	A _n (m/s ²)	f ₀ (Hz)	Amortissement (%)	Amortissement moyen (%)
Y2	haut	11	0.219	0.033	4.89	2.75	2.63
	bas	11	0.276	0.056	4.89	2.50	
Y3	haut	12	0.246	0.027	4.92	2.94	2.42
	bas	11	0.255	0.069	4.92	1.89	
Y4	haut	12	0.160	0.016	4.92	3.04	2.52
	bas	10	0.095	0.033	4.92	2.00	
YC	haut	8	0.264	0.037	4.8	3.90	4.51
	bas	8	0.288	0.218	4.8	5.12	
Y16	haut	7	0.227	0.023	4.8	5.19	4.95
	bas	7	0.258	0.032	4.8	4.71	

Moyennes					4.87		3.41
-----------------	--	--	--	--	-------------	--	-------------

11.3 Essais sismiques

Les essais sismiques ont été réalisés les 8, 15 et 25 septembre 2017.

Localisations des capteurs :

Durant les signaux sismiques et les bruits blancs, les grandeurs suivantes sont enregistrées :

- Accélération et déplacement de la table, mesuré à la connexion vérin.
- Déplacement de la structure en 9 points selon une direction.
- Accélération de la structure en 4 points selon deux directions.

La localisation et l'orientation des capteurs sur la structure sont représentés ci-dessous :

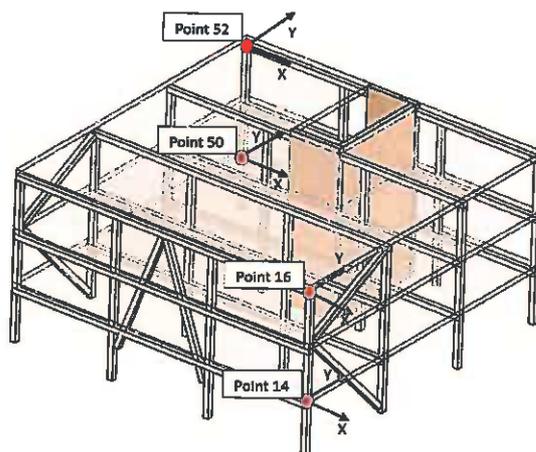


Figure 15 : Localisation et orientation des accéléromètres lors des essais sismiques

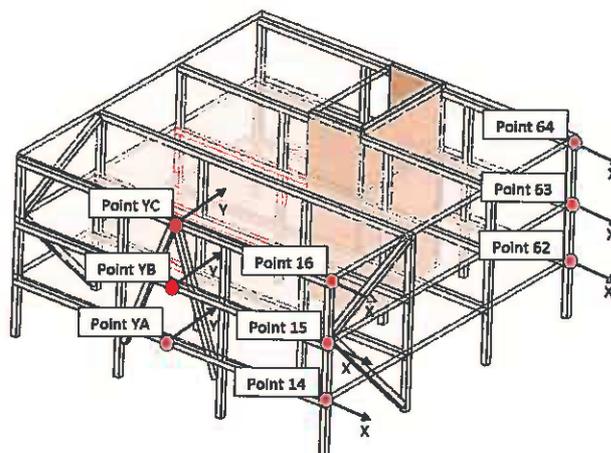


Figure 15 : Localisation et orientation des capteurs de déplacements lors des essais sismiques

Essais effectués et observations :

Le pourcentage du signal sismique réalisé ainsi que les observations faites sont reportés dans le tableau ci-dessous. Un bruit blanc a été réalisé au début de la procédure, entre chaque signal sismique et à la fin de procédure. Ses caractéristiques sont les suivantes :

- 0,5 mm RMS pondéré par $1/f^2$
- Gamme de fréquence [0 25Hz]

Essai	Date	Signal	Observations
1	8-09-2017	10%	Aucun dommage observable
2	8-09-2017	50%	Aucun dommage observable
3	8-09-2017	100%	Aucun dommage observable
4	15-09-2017	50%	Aucun dommage observable
5	15-09-2017	100%	Aucun dommage observable
6	15-09-2017	150%	Aucun dommage observable
7	15-09-2017	200%	Aucun dommage observable
8	25-09-2017	300%	Rupture audible. Visualisation du soulèvement du noyau CLT sur enregistrement vidéo.
9	25-09-2017	100%	Essai de réplique sismique. Aucun dommage supplémentaire observé.

Tableau 2 : Essais sismiques réalisés et observations

Suite au démontage de la maquette d'essai, les endommagements suivants ont été constatés :

- Rupture en traction des vis d'ancrage du noyau CLT
- Déformation plastique de certaines broches des ferrures d'extrémités des pièces diagonales.



Photo 9 et Photo 10 : Rupture des vis d'ancrage du noyau CLT (gauche) et broche déformée (droite)

Déplacements maximaux :

Le tableau suivant présente l'accélération maximale de la table ainsi que les déplacements maximaux enregistrés au cours des essais sismiques. Les déplacements sont relatifs de la charpente par rapport à la table.

Les données ont été filtrées à l'aide d'un filtre passe-bas dont la fréquence de coupure est 12Hz.

Niveau d'essai	Maximum					
	Accélération (m/s ²)			Déplacement relatif (mm)		
	Table	Point 52 direction X	Point 52 direction Y	Point 64 direction X	Point 16 direction X	Point YC direction Y
10%	0.28	1.50	0.62	1.79	0.81	0.17
50%	2.50	9.21	5.23	13.89	5.32	2.47
100%	3.96	10.37	6.08	19.42	8.56	3.07
50%	2.32	7.05	4.17	11.16	5.5	1.93
100%	4.06	9.89	5.63	18.69	8.18	2.84
150%	---	---	---	---	---	---
200%	6.57	14.63	6.56	25.33	9.52	3.65
300%	12.38	26.02	15.35	65.66	27.24	7.81
100%	4.48	9.06	7.74	31.45	14.82	4.66

Tableau 3 : Récapitulatif des déplacements et accélérations maximaux

Analyse de l'endommagement de la maquette durant la procédure d'essai :

Une analyse de l'endommagement de la structure d'essai peut être effectuée en calculant les fonctions de réponse en fréquence (FRF) entre les réponses des points de mesures sur la structure et les entrées à la table. À partir des FRF est ensuite tracée une fonction CMIF de l'ensemble des FRF suivant la même procédure que lors des analyses modales (voir par.8.1).

Les calculs sont faits sur les mesures lors des sollicitations sismiques et lors des bruits blancs effectués entre chaque niveau de sollicitation sismique.

On observe une diminution des fréquences propres au cours de la procédure d'essai puis un changement de comportement à partir du niveau 300% du séisme. Ce changement de comportement indique une altération de la structure.

CMIF des réponses aux bruits blancs effectués entre les essais sismiques :

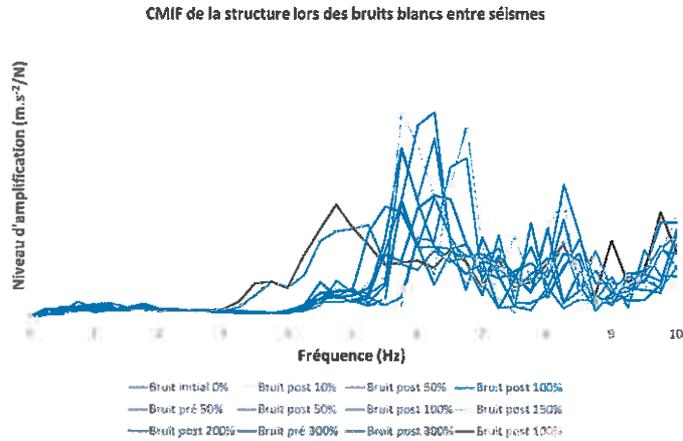


Figure 16 : Evolution des CMIF lors des bruits blancs entre les essais sismiques

Réponses bruits blancs	Fréquence (Hz)	Amortissement (%)
Niveau		
Bruit initial 0%	4,75	3,25
Bruit post 10%	4,75	3,16
Bruit post 50%	4,5	---
Bruit post 100%	4,65	---
Bruit post 50%	4,7	---
Bruit post 100%	4,75	---
Bruit post 150%	4,6	---
Bruit post 200%	4,5	3,03
Bruit post 300%	3,75	---
Bruit post 100%	3,6	3,8

Tableau 4 : Synthèse des fréquences propres et amortissements lors des bruits blancs entre les essais sismiques

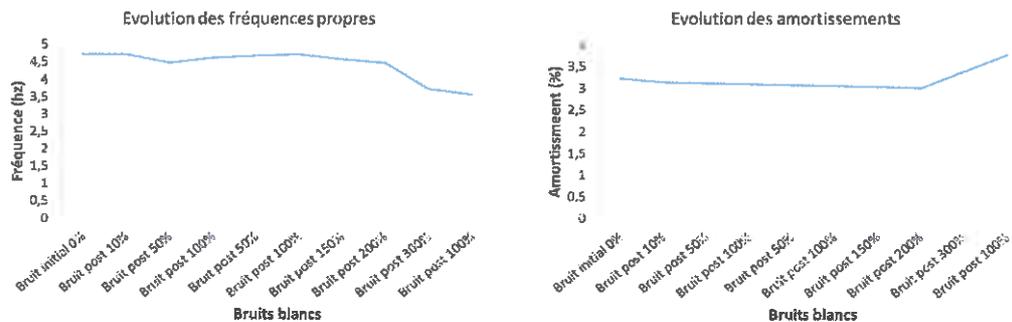


Figure 17 et Figure 18: Evolution des fréquences propres et amortissements lors des bruits blancs entre les essais sismiques

CMIF sur les réponses mesurées durant les essais sismiques :

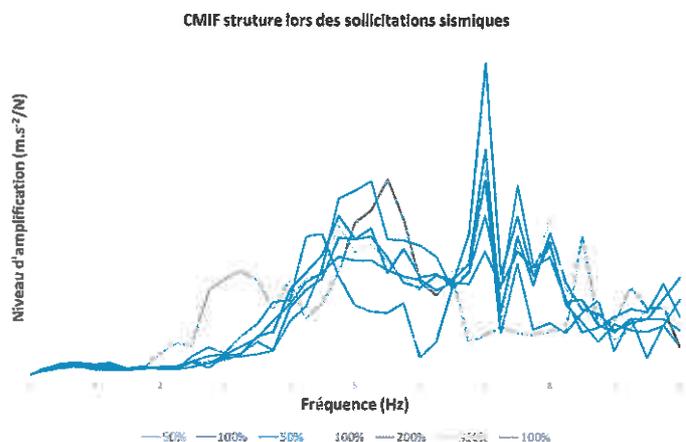


Figure 19 : Evolution des CMIF durant les essais sismiques

Réponses sismiques	Fréquence (Hz)	Amortissement (%)
Niveau		
50%	4,8	10,5
100%	4,61	13,1
50%	4,72	8,93
100%	4,62	12,5
150%	---	---
200%	4,41	17,3
300%	---	---
100%	3,1	9,2

Tableau 5 : Synthèse des fréquences propres et amortissements durant les essais sismiques

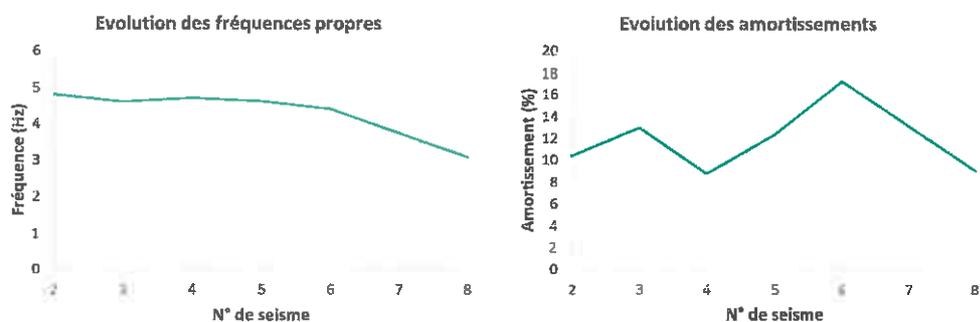


Figure 20 et Figure 21 : Evolution des fréquences propres et amortissements durant les essais sismiques

Laurent MUNIER
Nicolas MAGNE



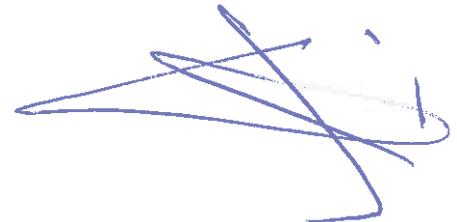
Techniciens d'essais

Jean-Baptiste CASTAING



Chargé d'Essais

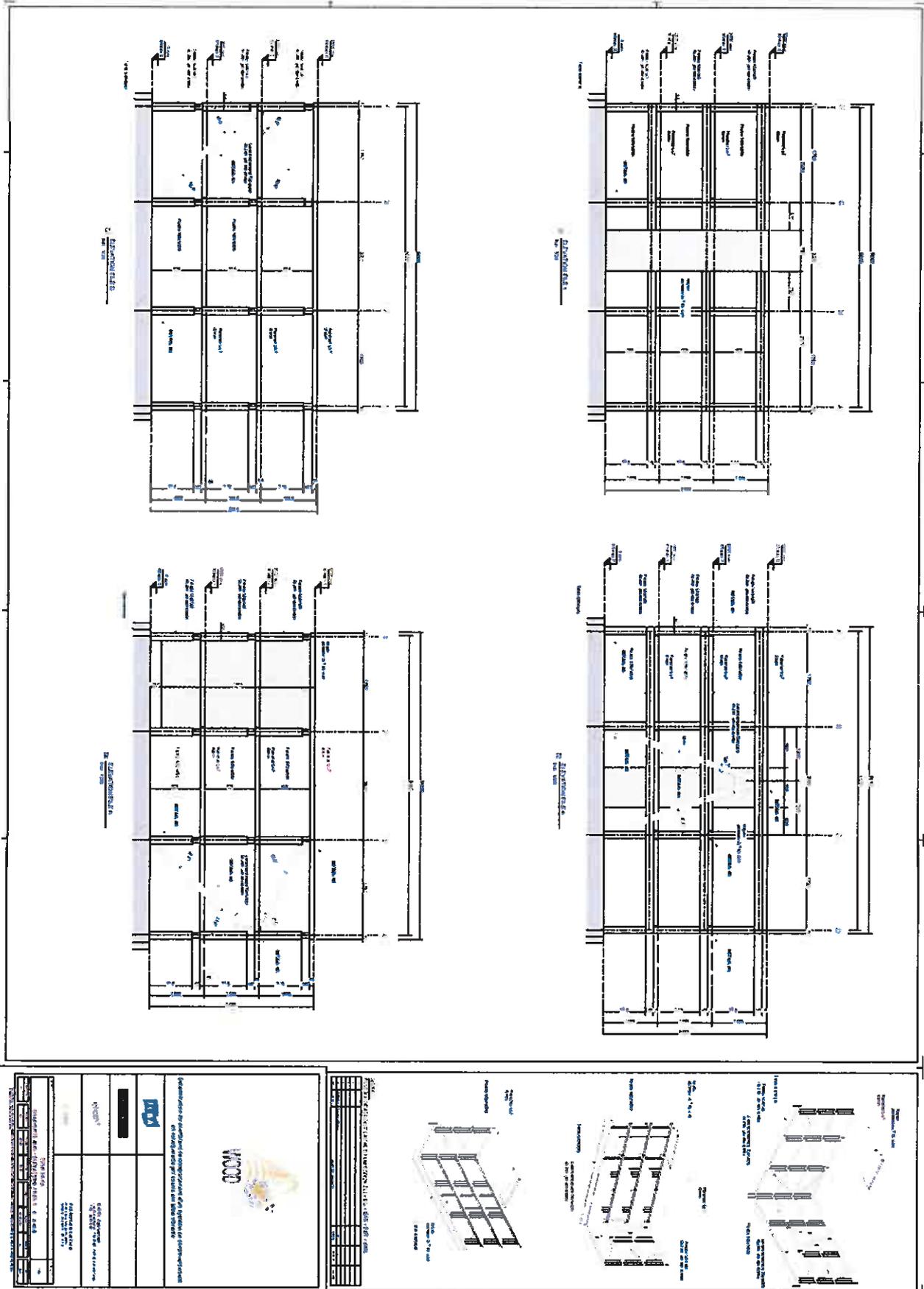
Jean-Charles DUCCINI

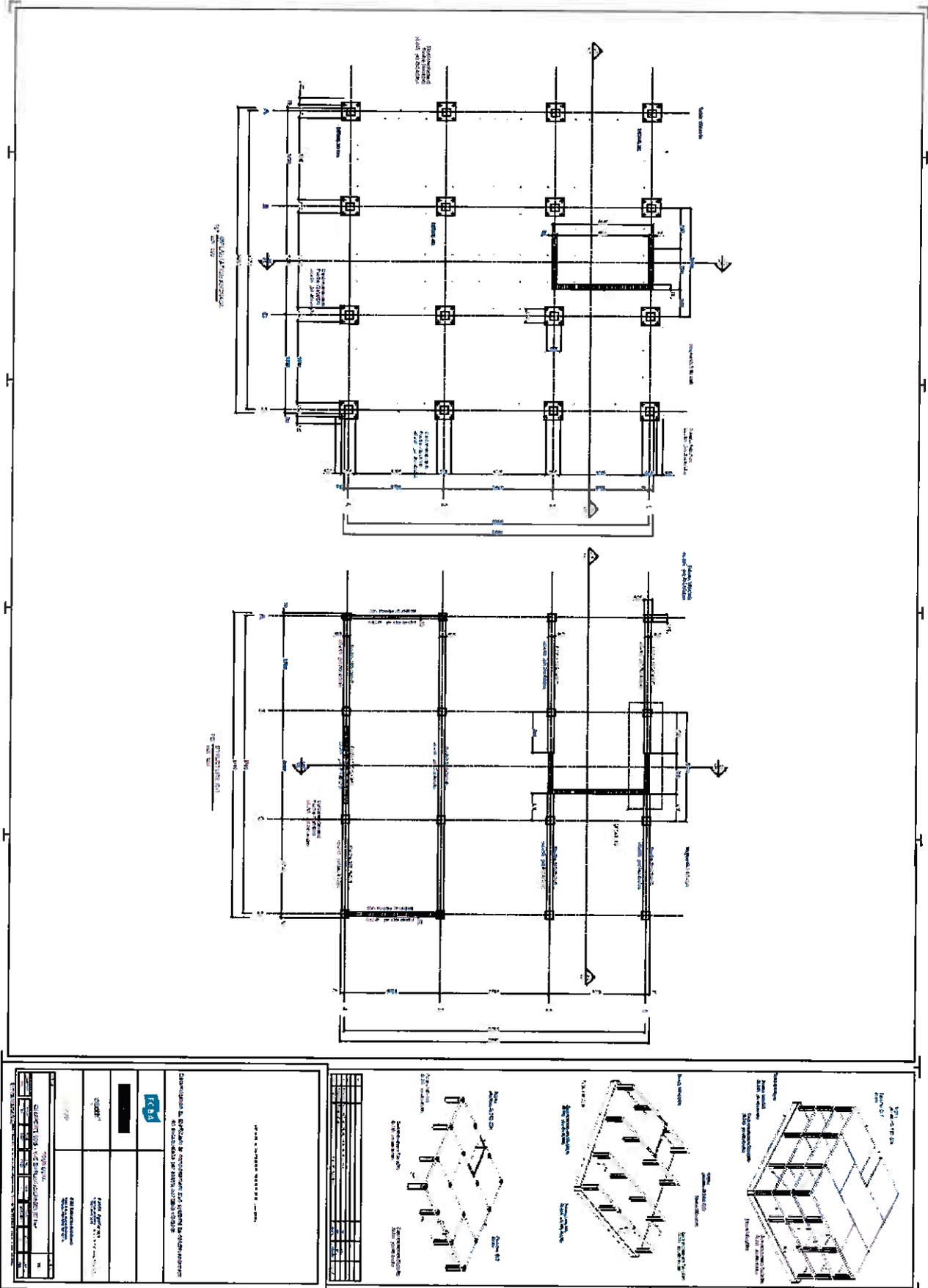


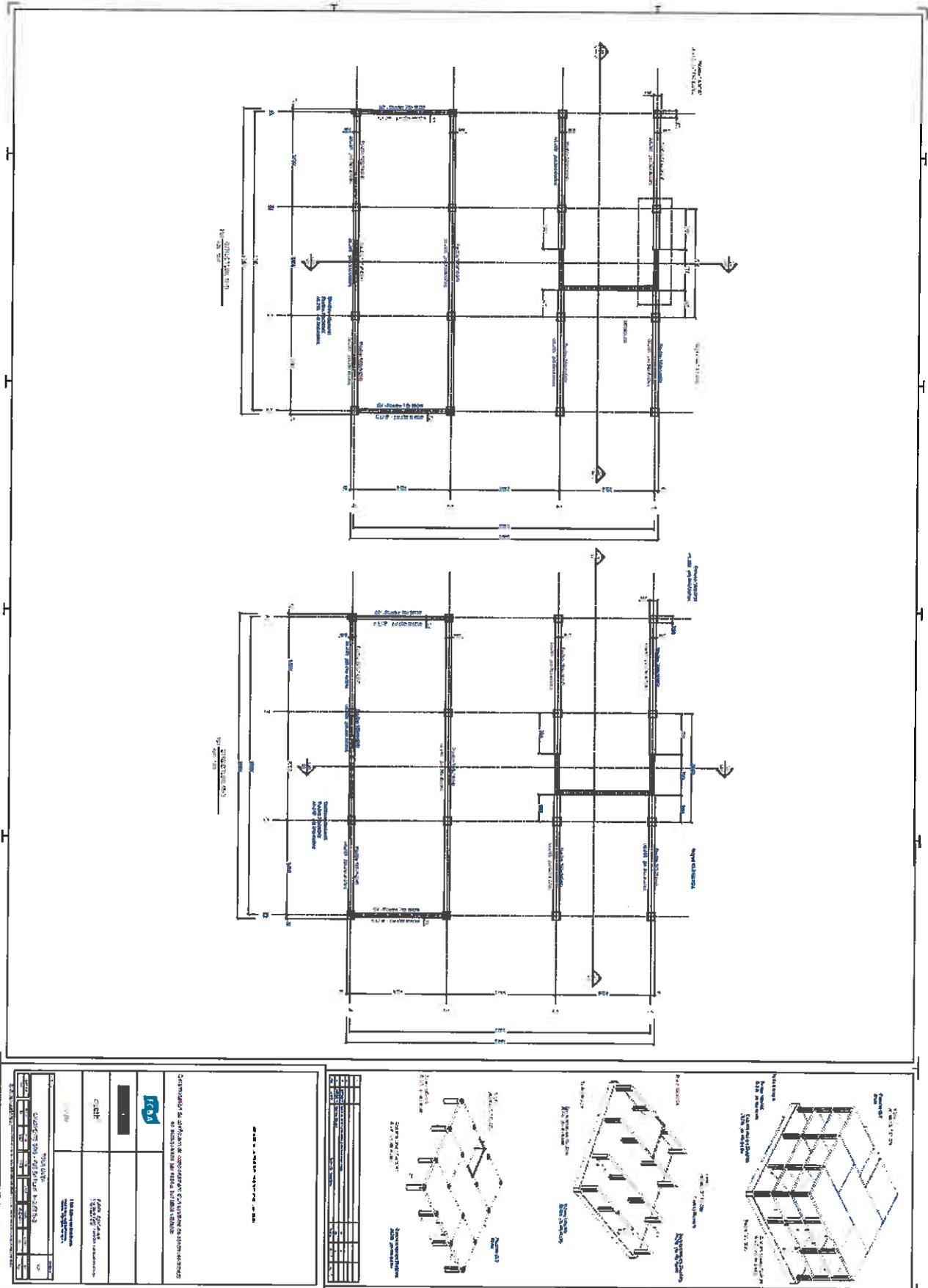
Responsable Technique
Mécanique et Sismique

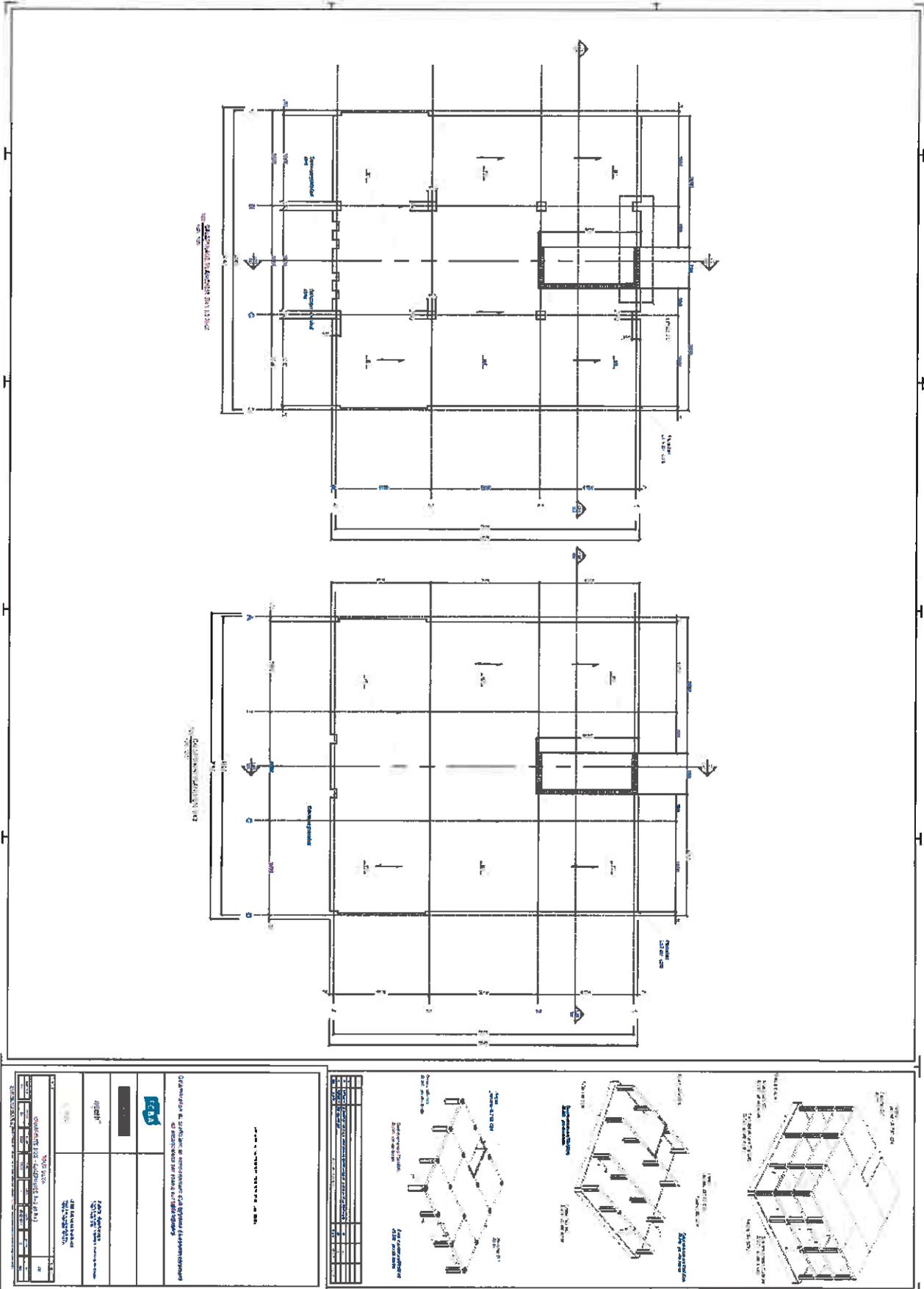
ANNEXE 1

PLANS DE LA MAQUETTE D'ESSAI FOURNIS PAR ELIOTH









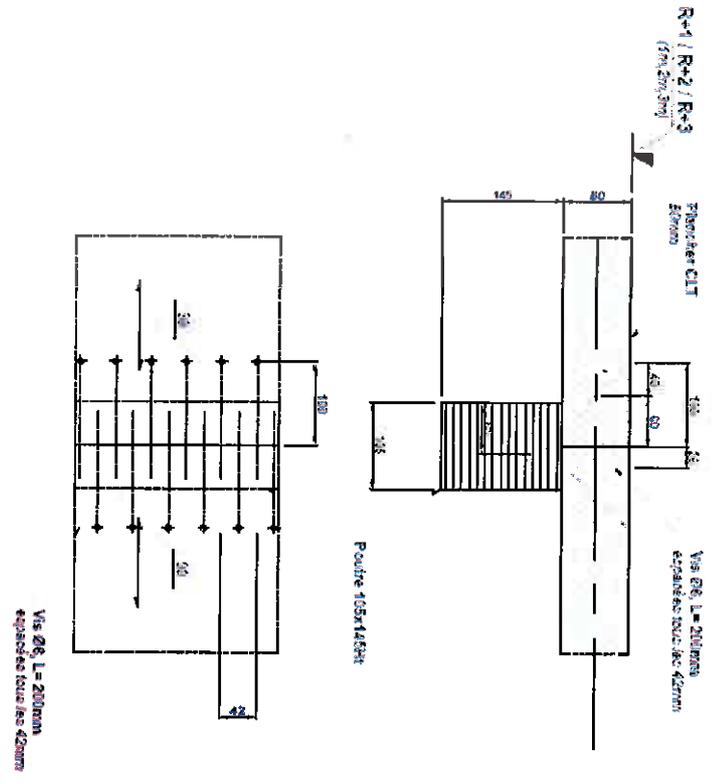
ANNEXE 2

PLANS DES ASSEMBLAGES FOURNIS PAR ELIOTH

elioph
Eclairage | éclairage | eclairage

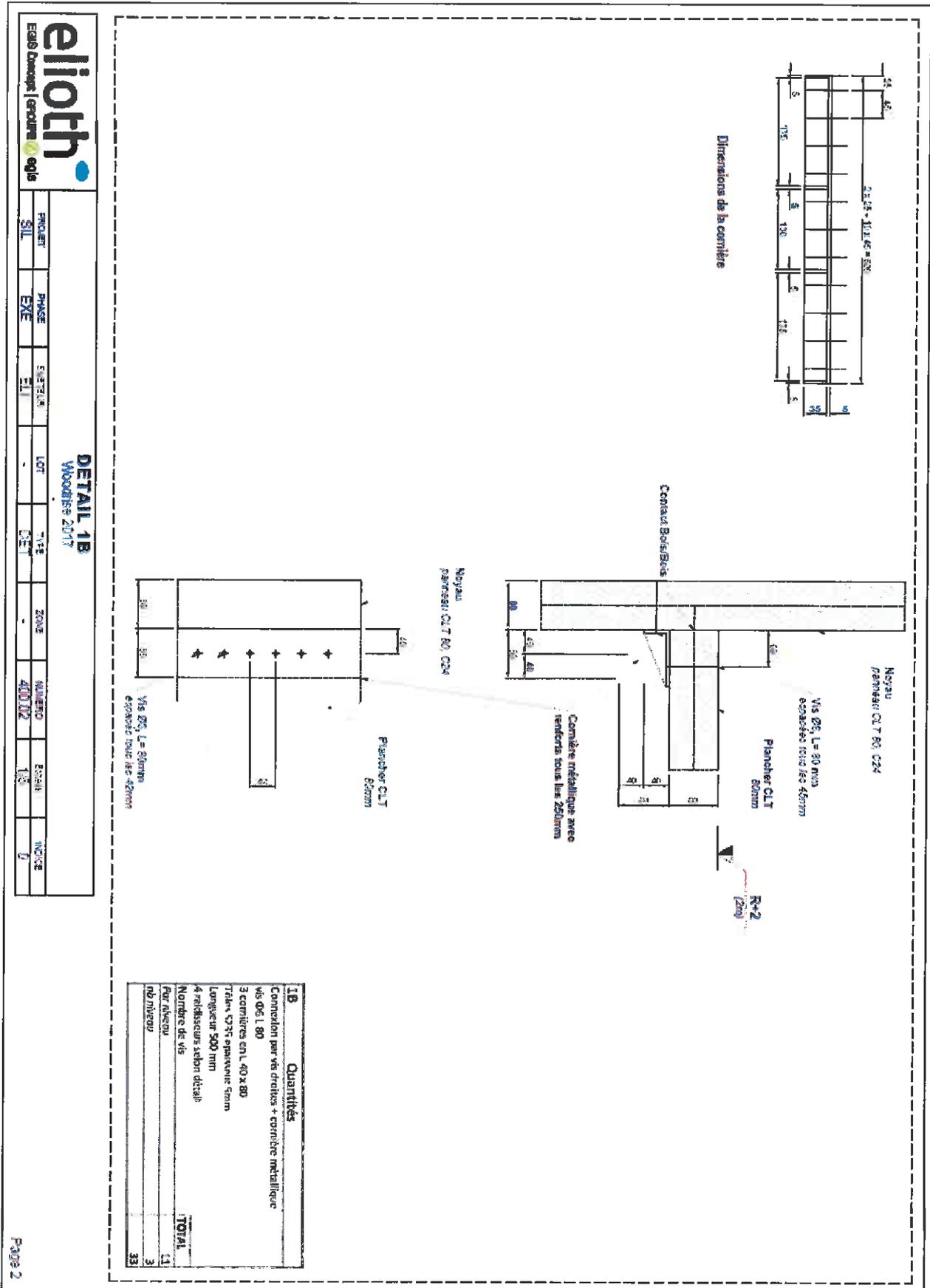
DETAIL 1A
Moodrise 2017

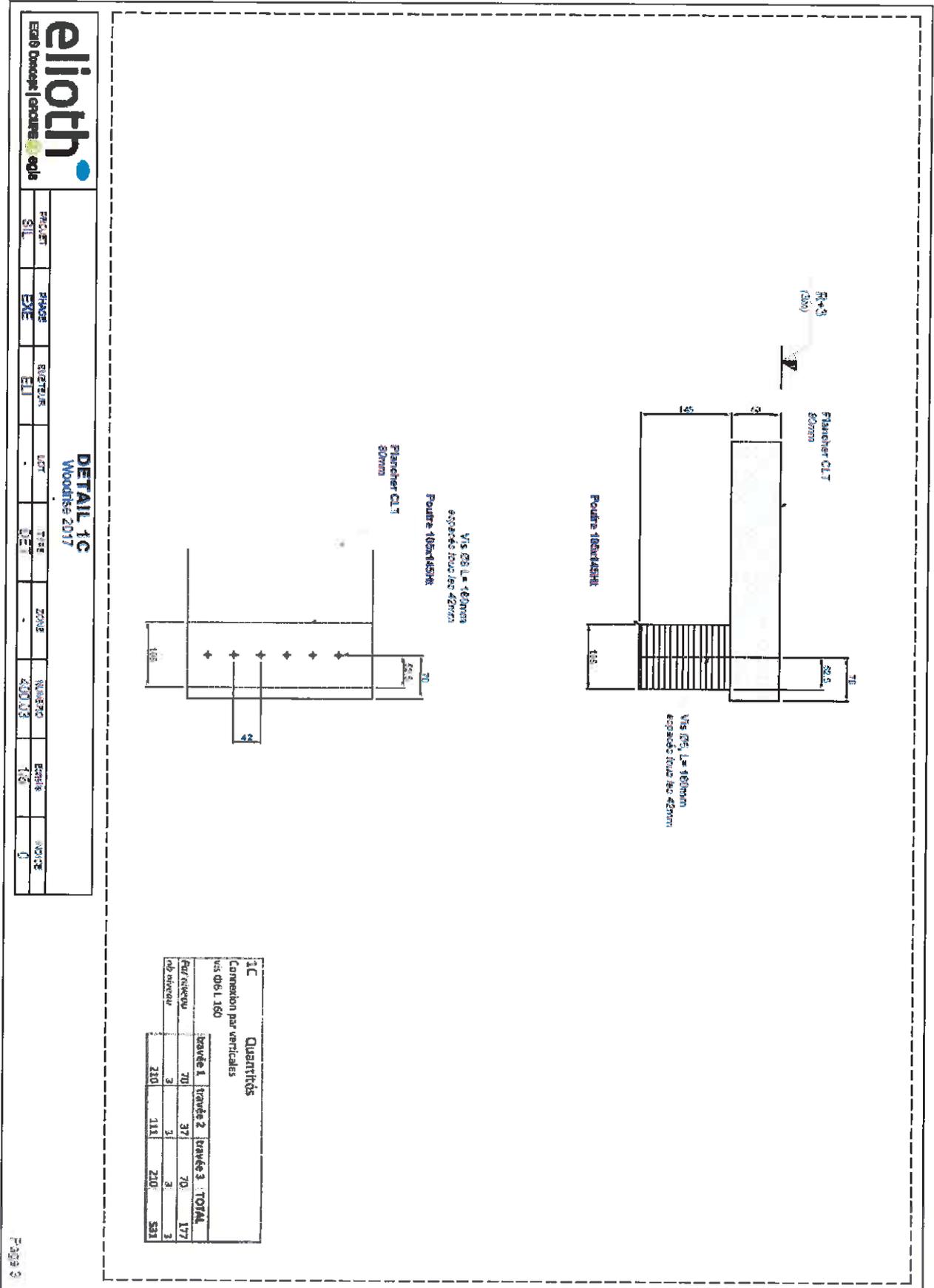
PROJET	PROJETS	DATE	REV	ZONE	NUMERO	ETAT	INDICE
SIL	EXE	EJ	-	-	40001	1/2	0

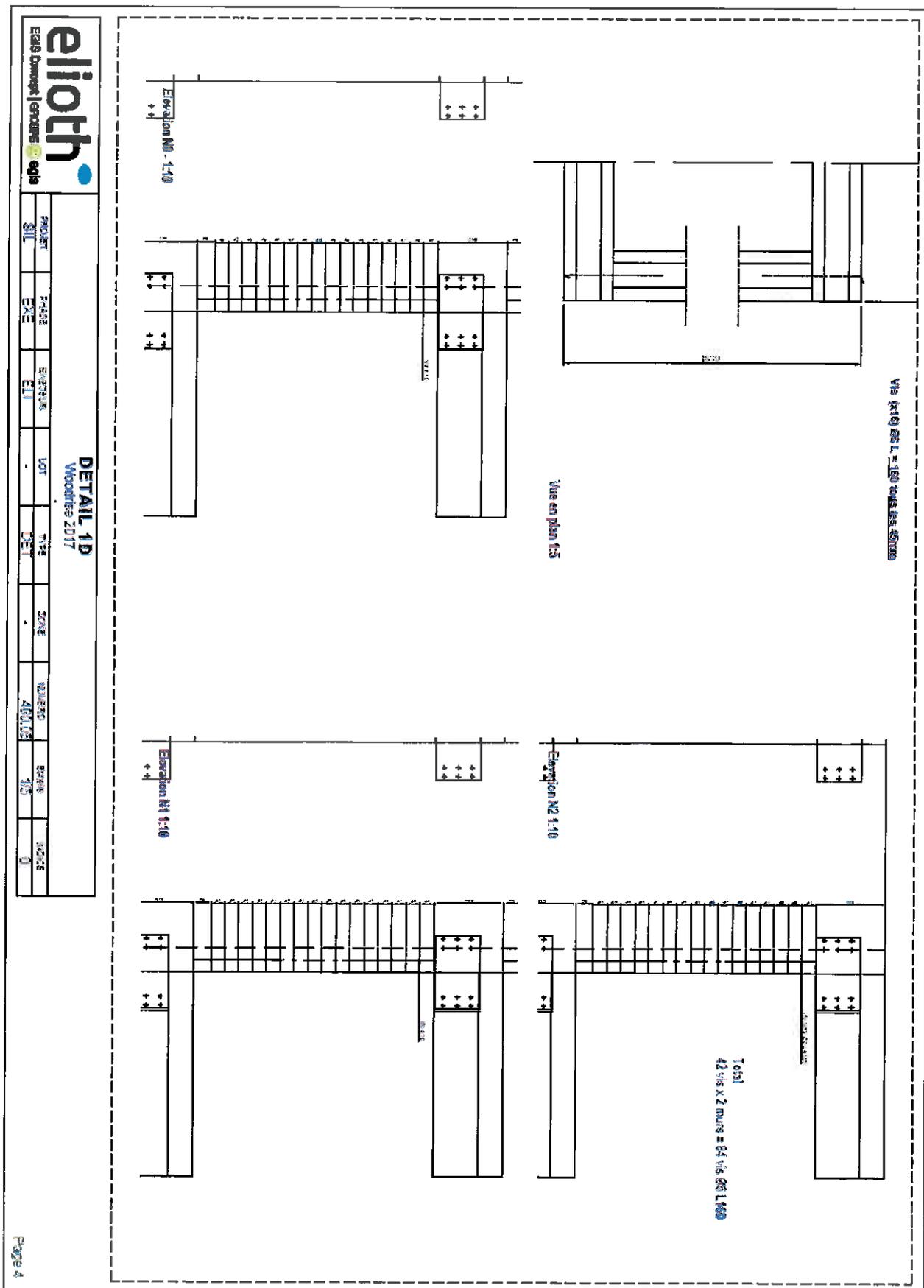


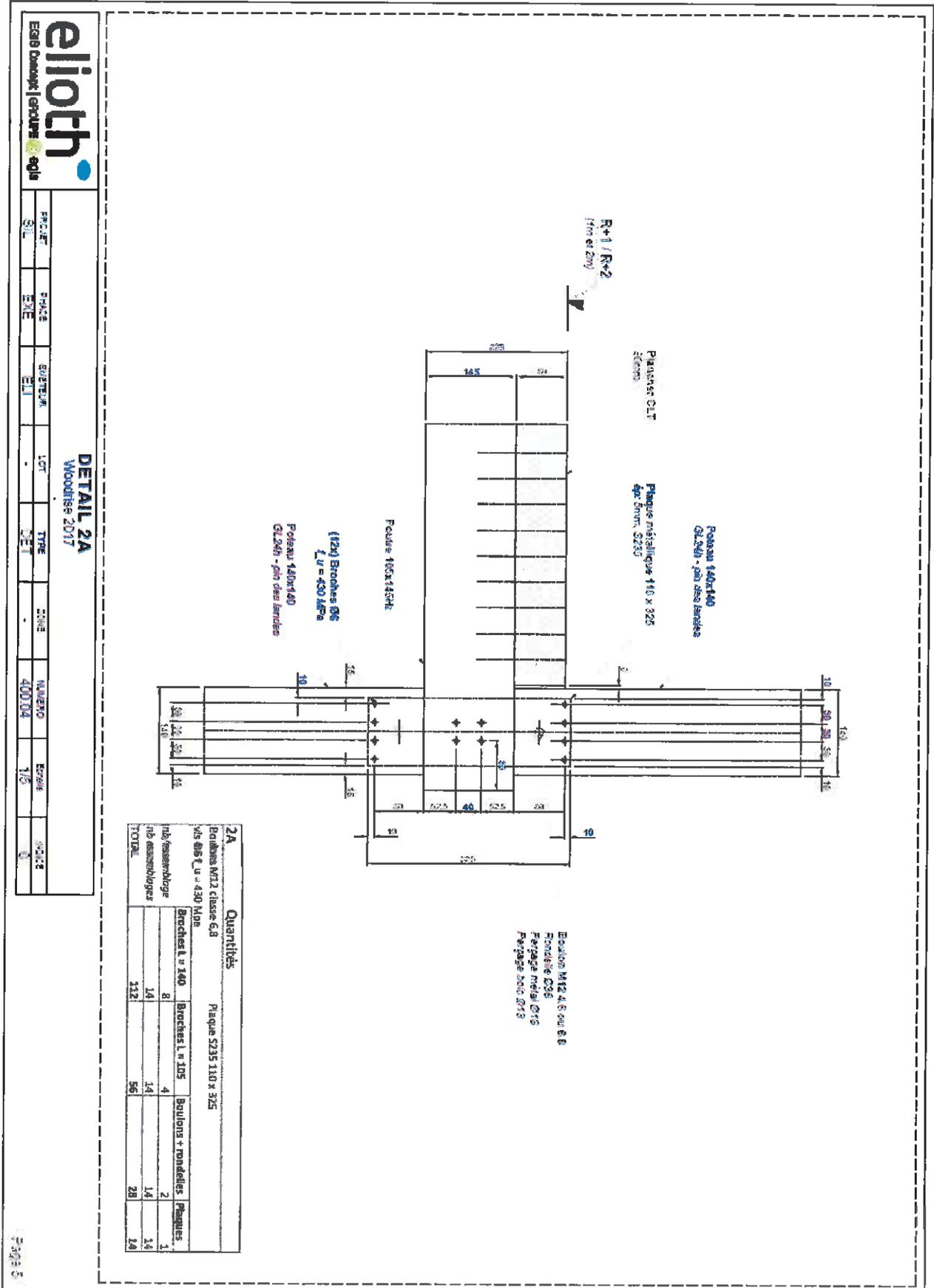
1A Quantités
Compteur par les tranches de 65° cyclotex

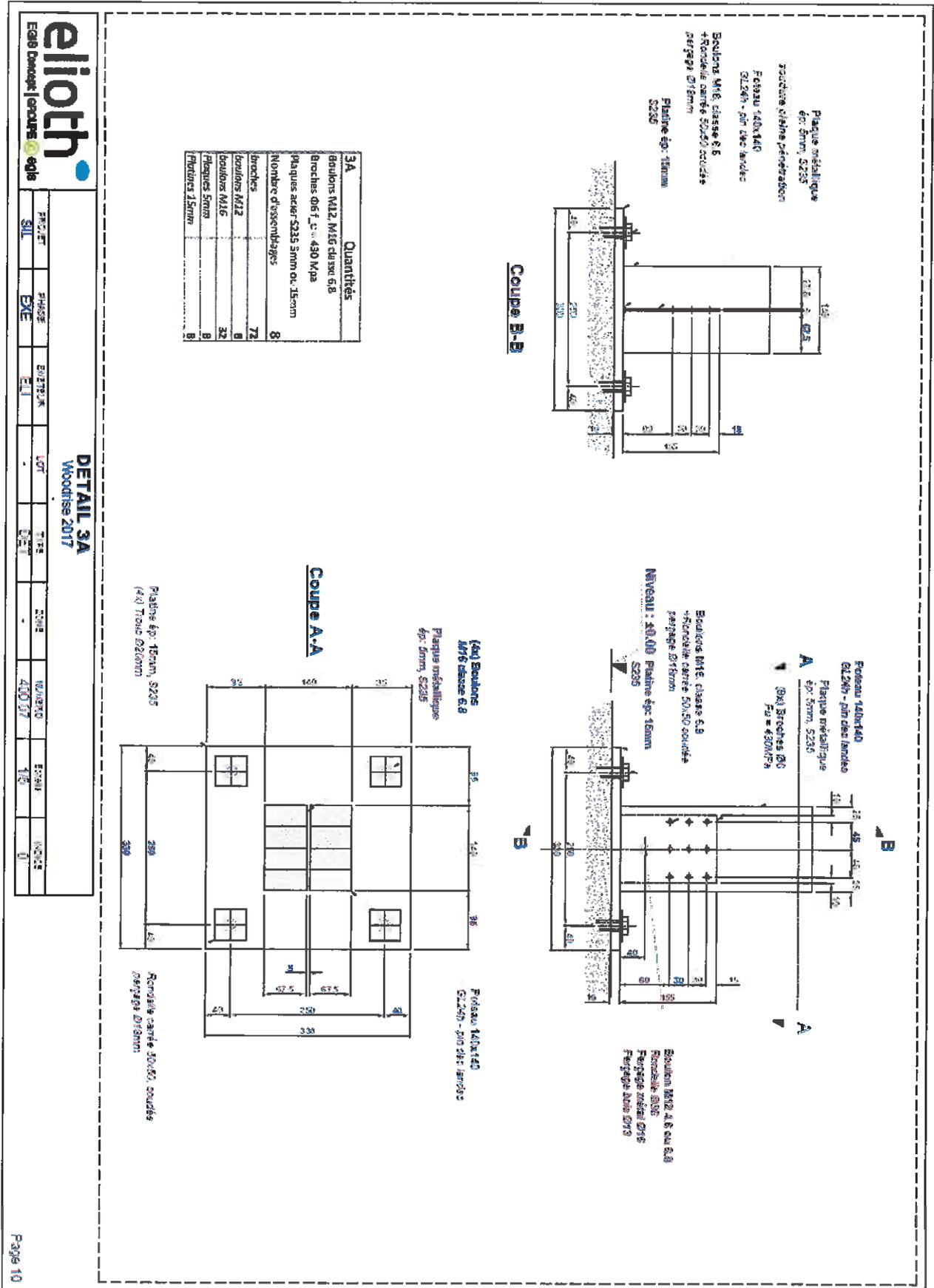
Par niveau	tranche 1	tranche 2	tranche 3	TOTAL
tranche 1	140	116	240	396
tranche 2	3	3	3	3
tranche 3	420	348	420	1188

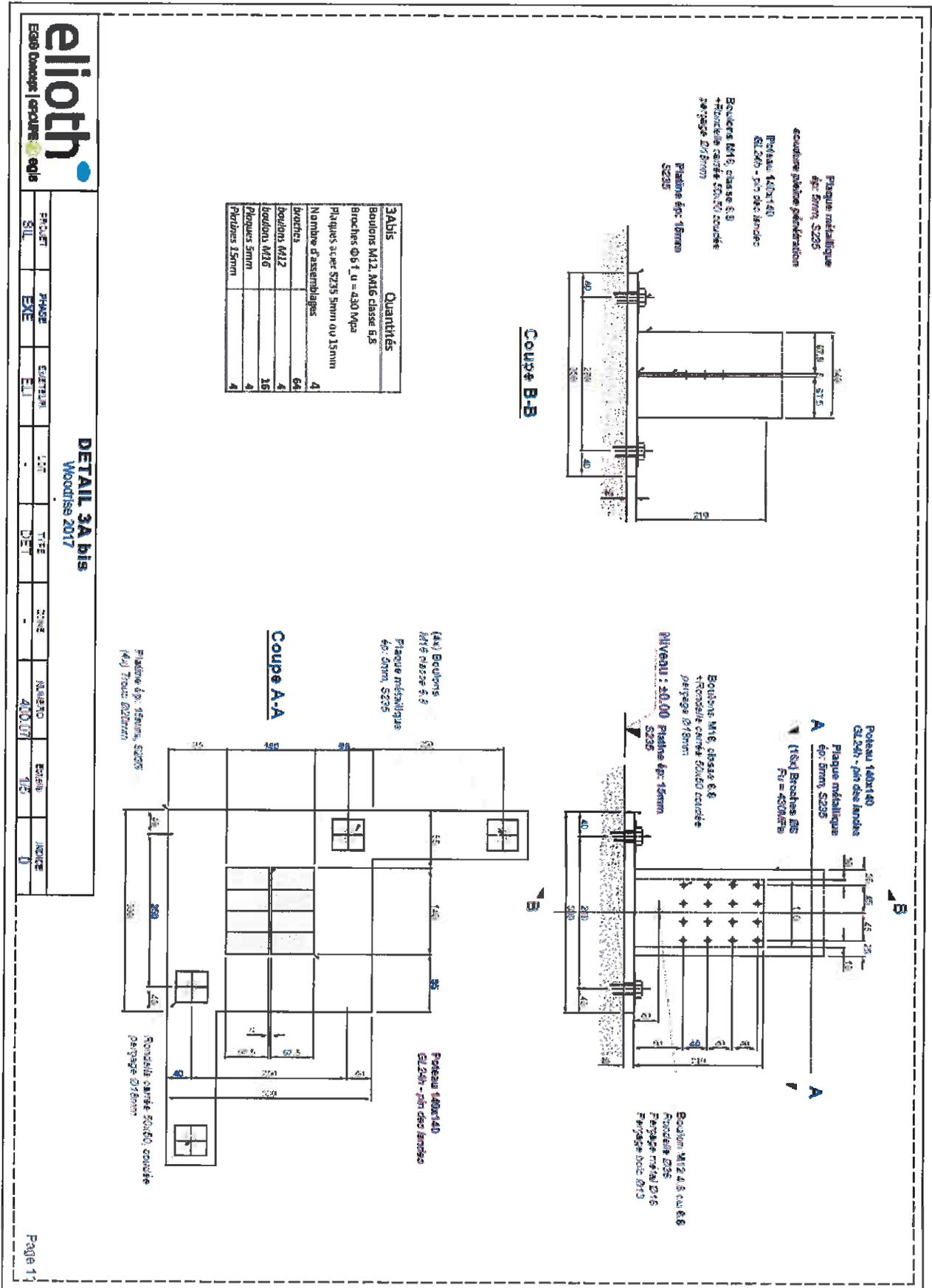


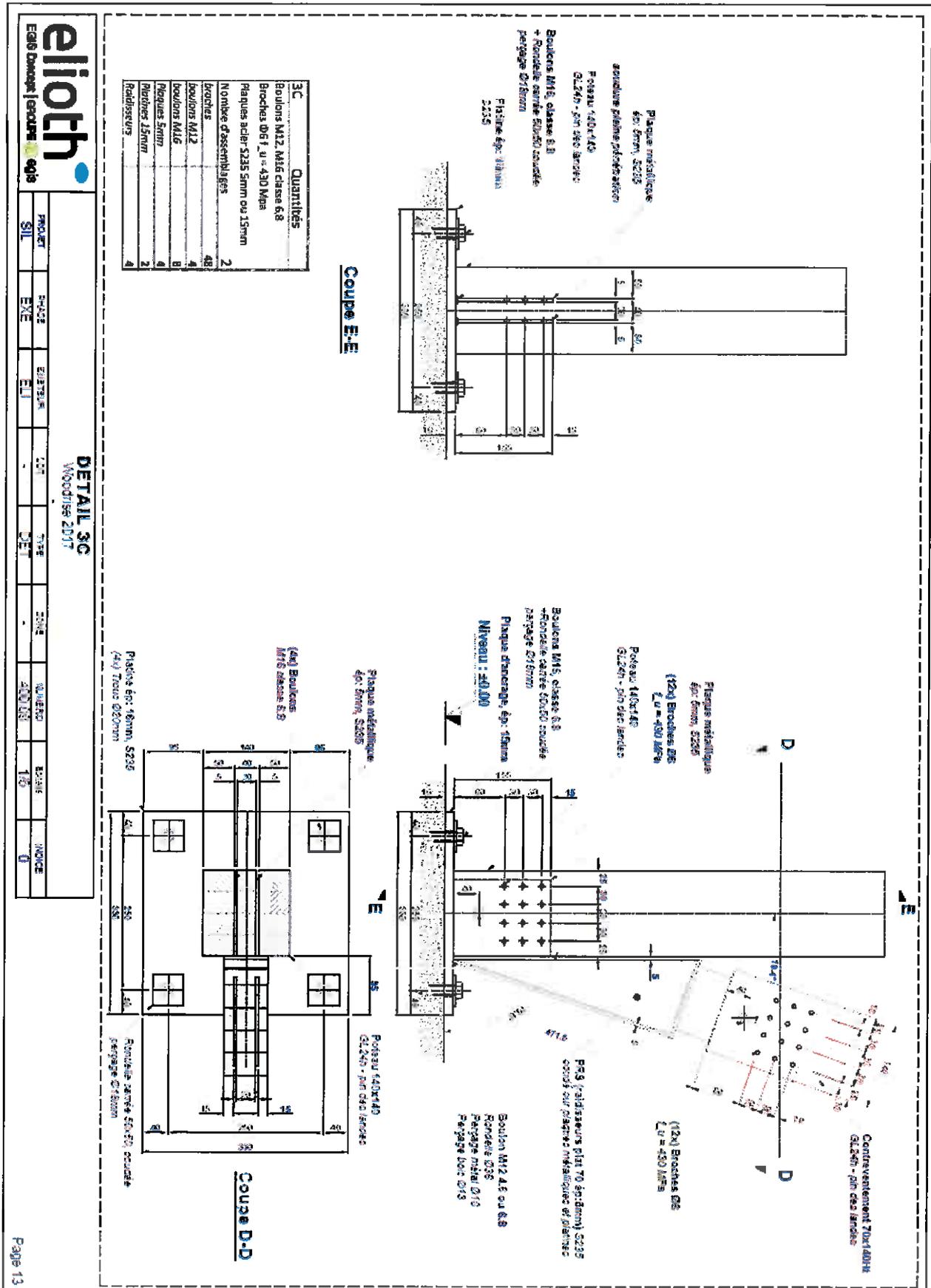






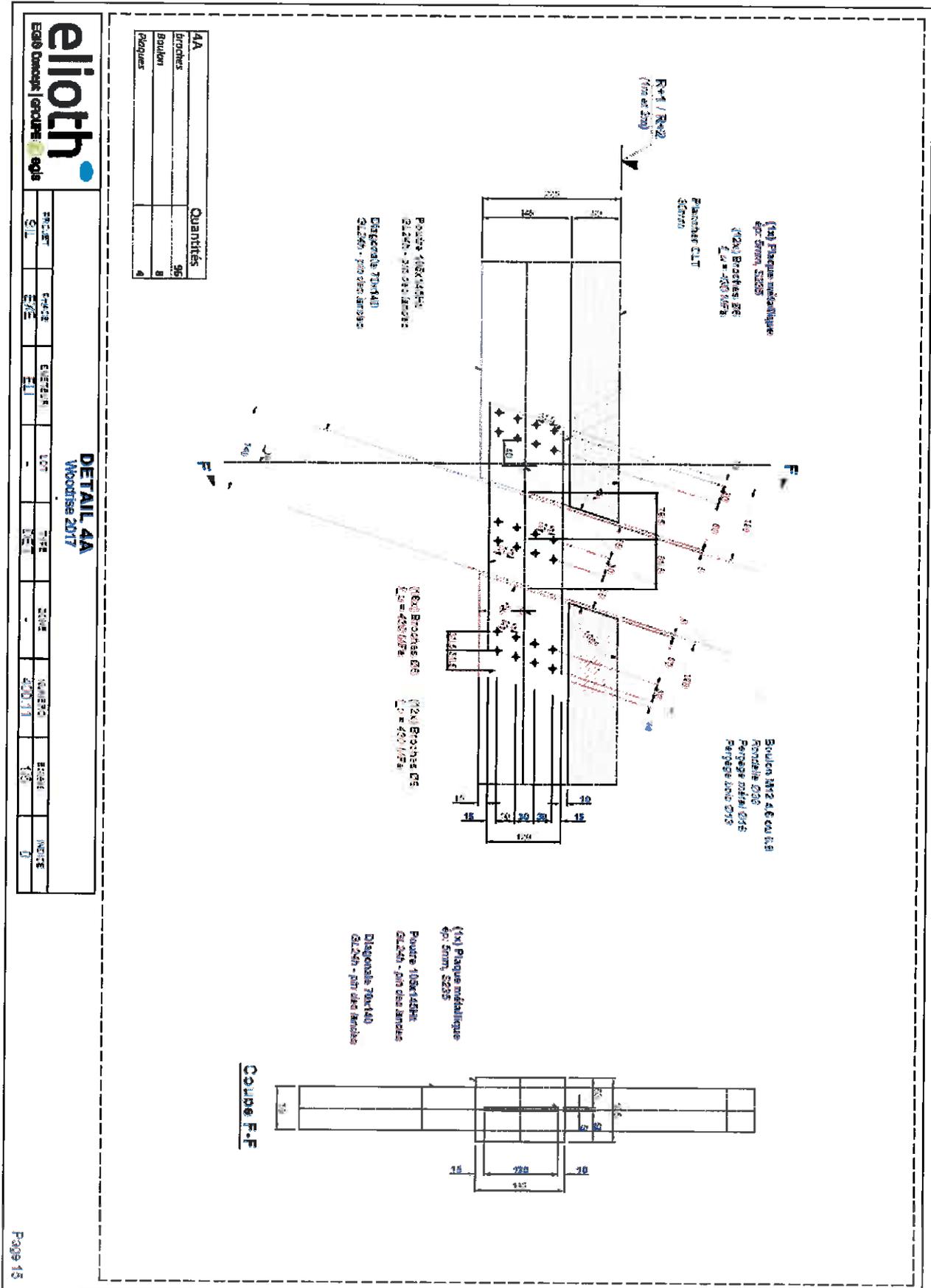


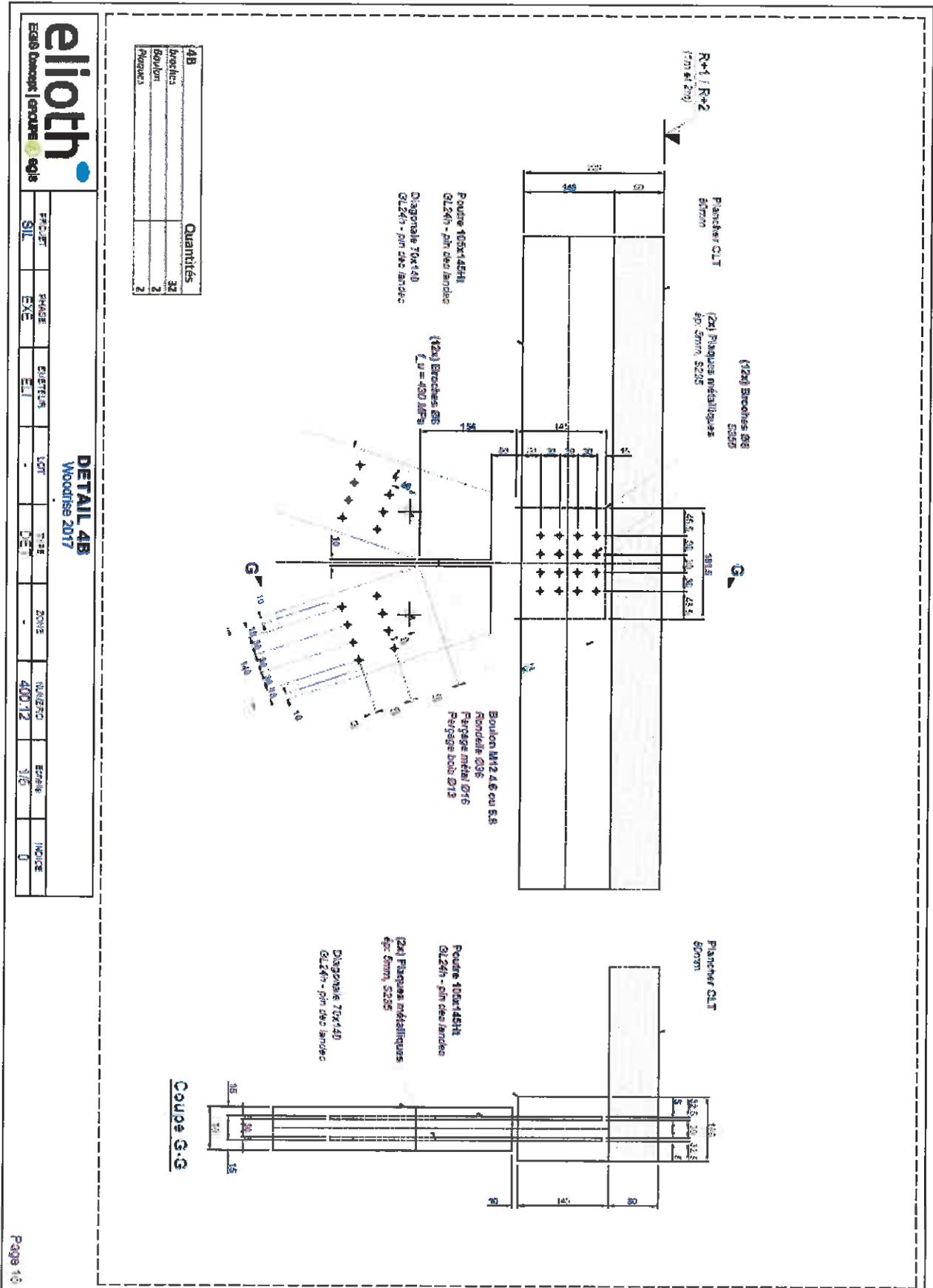


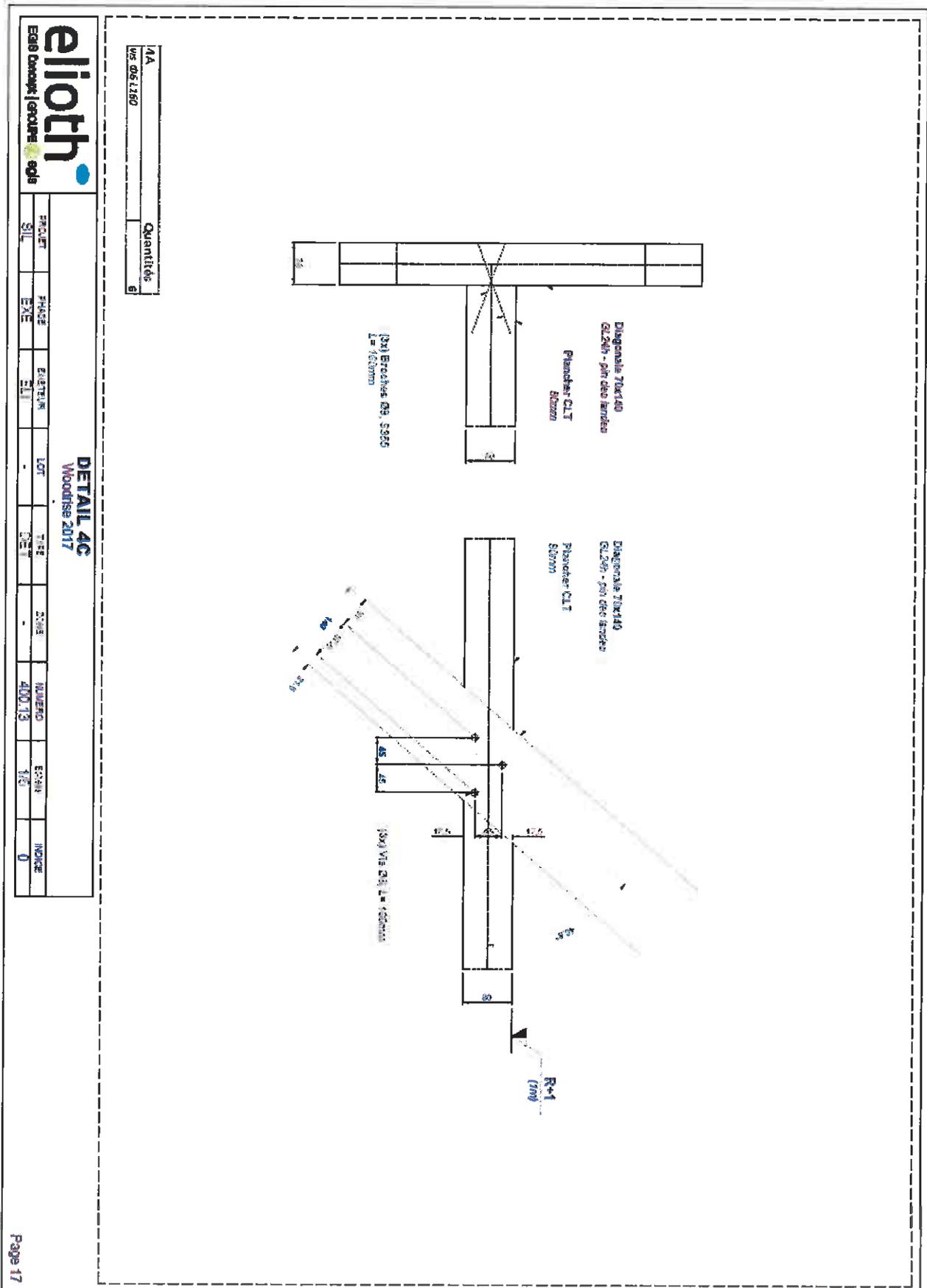


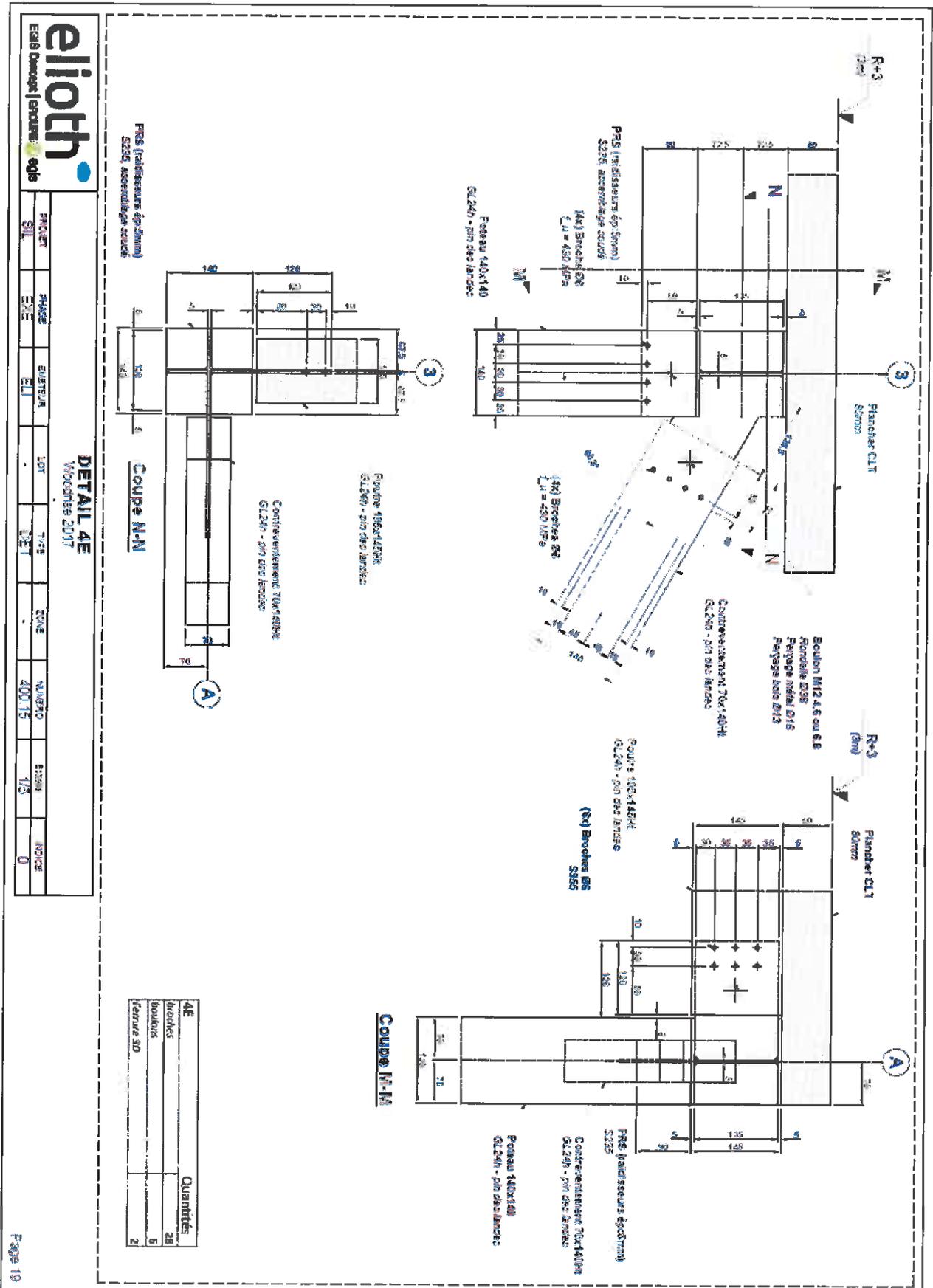
eliioth
Eats Damage | enrou | eqs

PROJET	SIL	ETAT	EXE	ELI	DET	2017	2017	2017	2017	2017	2017
DETAIL 3C											
Woodrise 2DVT											
PROJET	SIL	ETAT	EXE	ELI	DET	2017	2017	2017	2017	2017	2017
PROJET	SIL	ETAT	EXE	ELI	DET	2017	2017	2017	2017	2017	2017
PROJET	SIL	ETAT	EXE	ELI	DET	2017	2017	2017	2017	2017	2017
PROJET	SIL	ETAT	EXE	ELI	DET	2017	2017	2017	2017	2017	2017
PROJET	SIL	ETAT	EXE	ELI	DET	2017	2017	2017	2017	2017	2017
PROJET	SIL	ETAT	EXE	ELI	DET	2017	2017	2017	2017	2017	2017
PROJET	SIL	ETAT	EXE	ELI	DET	2017	2017	2017	2017	2017	2017
PROJET	SIL	ETAT	EXE	ELI	DET	2017	2017	2017	2017	2017	2017











A D I V B O I S

www.adivbois.org

CODIFAB

comité professionnel de développement
des industries françaises de l'ameublement et du bois