



ETUDE

MESURES D'AMORTISSEMENT
DES BÂTIMENTS DE
GRANDE HAUTEUR EN 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.

MESURES D'AMORTISSEMENT DES BATIMENTS DE GRANDE HAUTEUR EN BOIS

L'association ADIVbois travaille depuis maintenant 4 ans pour accompagner l'émergence de Bâtiments en Bois de Grand Hauteur (BBGH) en France.

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 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.

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

Les deux premiers paramètres sont accessibles de façon plus ou moins immédiate à l'ingénieur. Par contre, pour l'amortissement, les informations disponibles sont assez limitées. Fort de ce constat, ADIVbois a lancé deux actions en parallèle :

- Une étude de benchmarking sur l'amortissement (se référer à l'étude « Amortissement et confort des bâtiments de moyenne et de grande hauteur »)
- Des mesures d'amortissement sur des immeubles en bois en construction

À la suite de l'appel d'offre, c'est l'École Supérieure du Bois (ESB) qui a mené à bien cette deuxième action.

Il est nécessaire de préciser que l'amortissement étudié dans cette étude correspond à l'amortissement défini par le décrétement logarithmique d'amortissement défini dans l'Eurocode 1 Partie 1-4 Annexe F.5 (amortissement élastique) ; à différentiel de l'amortissement visqueux défini par l'Eurocode 8.

Les essais ont été réalisés sous sollicitations environnementales, notamment charges horizontales dues au vent, aux utilisateurs, au trafic routier etc., sans besoin d'exciter les immeubles à mesurer. Les vibrations des immeubles ont été enregistrées par des accéléromètres, leurs positions dans l'immeuble permettent l'identification des modes de flexion et de torsion et la durée d'acquisition est suffisamment longue (30 minutes à minima) pour assurer la convergence des valeurs d'amortissement de l'immeuble. La méthode de l'Analyse Modale Opérationnelle (AMO) a été utilisée pour traiter les données expérimentales et ainsi obtenir les paramètres modaux de la structure.

Les mesures ont été réalisées sur les immeubles suivants :

1. Bâtiment Sensation (Strasbourg) : Immeuble composé de 3 plots de différentes hauteurs : Plot A en R+11 et Plots B et C en R+8. Cet immeuble est complètement en bois : façade porteuse et planchers en CLT sont associés à des murs de refend structuraux en CLT (Plot A) et à un système poteau-poutre en bois lamellé-collé (Plots B et C).

2. Bâtiment Pulse (St Denis) :

Immeuble R+7 à structure mixte bois-béton : le socle et les noyaux d'ascenseurs ainsi que la ceinture centrale (voiles et planchers) sont en béton armé, tandis que la structure des plateaux est en bois (planchers CLT et façade porteuse en poteau-poutre).

3. Bains Douches & Co (Paris 15ème) :

Immeuble complètement en bois. La structure est contreventée par une cage d'escalier et une gaine ascenseur en CLT, complétées par des murs de refend périphériques et centraux. Les planchers CLT sont appuyés sur les murs porteurs et un système poteau-poutre.

L'étude menée par l'ESB a abouti sur un livrable final organisé de la façon suivante :

- Première partie : définition de la méthode de mesure et d'analyse avec les conclusions issues des différentes campagnes de mesure
- Deuxième partie : détail des immeubles mesurés, des campagnes réalisées et des résultats obtenus pour chaque immeuble

À l'issue de cette étude, les constats suivants peuvent être faits :

- La méthode utilisée permet d'obtenir avec une faible dispersion la fréquence propre de l'immeuble (CV 0.46 %). La dispersion des résultats est plus importante en ce qui concerne l'amortissement (CV autour de 11 %)
- La variation de l'amortissement entre la situation chantier (avant les corps d'état architecturaux) et l'immeuble fini est faible et reste dans la tolérance de l'estimation de la valeur de l'amortissement
- Les mesures d'amortissement effectuées montrent des taux d'amortissement situés entre 1,5% et 1,7 % sous sollicitation ambiante (vitesse moyenne du vent de l'ordre de 3 à 6 m/s).
- Pour des vitesses plus importantes (v_{moy} 15.4 m/s) correspondant à des intensités proches des valeurs Eurocodes, l'amortissement peut être extrapolé à 2 % (extrapolation faite grâce à des études réalisées sur le bâtiment en bois de l'ESB)

Ces résultats sont une première étape pour diminuer l'incertitude concernant l'amortissement des structures en bois, qui seront à compléter dans les années à venir par d'autres études à plus grande échelle.

Actuellement, le programme DynaTTB (Dynamic Response of Tall Timber Building under Service Loads) réalisé par différents organismes européens, approfondit l'étude de l'amortissement. Ce programme prévoit rendre publiques ses travaux courant 2022.



ESSAI B2 – AMORTISSEMENT BGH BOIS

LIVRABLE FINAL

Rapport destiné à la société :

ADIVbois
120 avenue Ledru Rollin
75011 Paris

Contact :

Mme Caroline Aubry
E-mail : info@adivbois.org

Réf devis : FL1801bis

Date : 16 décembre 2019

Intervenant(s) :

Francesca LANATA ESB - LIMBHA, Enseignant-chercheur
francesca.lanata@ecoledubois.fr / 02 40 18 12 12

Clément BOUDAUD ESB - LIMBHA, Enseignant-chercheur
clement.boudaud@ecoledubois.fr / 02 40 18 12 12

Nombre de pages : 67

Bois HD est soutenue par :



L'Europe s'engage en Pays-de-la-Loire
avec le Fonds Européen de Développement Régional

Plateforme Régionale d'Innovation BOIS HD

C/S Ecole Supérieure du Bois - Atlanpôle – BP 10605 Rue Christian Pauc F – 44306 Nantes Cedex 3
T. +33 (0)2 40 18 12 33 F. +33 (0)2 40 18 12 00

contact@boishd.fr

SIRET : 784 521 304 00021 N° d'agrément de formation : 52 44 04 202 44

Table des matières

Partie I : Méthodes de mesure et d'analyse.....	4
1. Préambule.....	5
2. Méthode de mesure	5
2.1. Equipement.....	5
2.1. Mesures	6
3. Méthode d'analyse	7
3.1. Généralités.....	7
3.2. Etape 1 : Géométrie et assignation des ddl	7
3.3. Etape 2 : Prétraitement des signaux.....	8
3.4. Etape 3 : Estimation des paramètres modaux	11
4. Discussion sur la méthodologie	22
4.1. Amplitude des sollicitations	22
4.2. Estimation de l'incertitude.....	23
5. Conclusion	25
Références.....	27
Partie II : Bâtiment Sensation (Strasbourg).....	28
1. Bâtiments étudiés.....	29
2. Campagnes de mesures	33
2.1. Plot A	33
2.2. Plot C	34
3. Résultats bruts	34
4. Analyse des données	36
4.1. Plot A	36
4.2. Plot C	37
Partie III : Bâtiment Pulse (Saint Denis).....	39
1. Bâtiment étudié	40
2. Campagne de mesures	42
3. Analyse des données	44
Partie IV : Bains-Douches & Co (Paris, 15 ^e).....	46
1. Bâtiment étudié	47
2. Campagne de mesures	49
3. Analyse des données	50
Annexes	51
1. Bâtiments Sensation (Strasbourg).....	51
2. Bâtiments Pulse (Saint-Denis).....	60

3. Bains-Douches & Co (Paris, 15^e).....64

VERSION 1.0

Partie I : Méthodes de mesure et d'analyse

La première partie de ce rapport est générale, elle présente les moyens et les méthodes utilisées pour mesurer et analyser les données récoltées dans le cadre de cette prestation par Bois HD pour ADIVbois.

Les parties suivantes détaillent les résultats pour chacun des bâtiments étudiés.

VERSION 1.0

1. Préambule

ADIVbois a confié à l'ESB, à travers de son centre d'ingénierie BOIS HD, une mission visant à mesurer la période fondamentale et l'amortissement élastique de bâtiments en bois multi-étages. La mission a démarré en juin 2018 et concerne la mesure *in-situ* sur 3 bâtiments représentatifs des systèmes constructifs à étudier.

Plusieurs livrables sont prévus sur la durée de la mission :

- Un rapport de mesure et d'analyse pour chaque bâtiment objet des mesures, à rendre 2 mois après la réalisation des mesures ;
- Un rapport final de synthèse sur l'ensemble des bâtiments objet d'étude.

Cette première partie présente le détail de la méthodologie de mesure utilisée et de la méthode d'analyse employée pour l'identification des paramètres modaux objets de la mission.

2. Méthode de mesure

2.1. Equipement

Les mesures ont été réalisées avec des accéléromètres piézoélectriques reliés à une centrale d'acquisition, le Tableau 1 en détaille les principales données techniques.

Tableau 1 : Informations techniques sur le matériel de mesure

Matériels	Détails
Logiciel d'exploitation	LabVIEW Signal Express
Carte d'acquisition de données	Carte NI SCXI 1102 <ul style="list-style-type: none"> • Résolution 12 bits • Fréquence d'échantillonnage max de 333 kéch/s (soit 333 000 points/s)
Boîtier d'acquisition	NI SCXI 12100, 32 voies
Accéléromètre piézoélectrique	Accéléromètre uniaxial (PCB modèle 393B12) <ul style="list-style-type: none"> • Sensibilité 10 V/g (soit 1019,4 mV/(m/s²)) • Plage de mesure 0,5 g pk (4,9 m/s² pk)
Conditionneur signal accélération	Amplificateur PCB modèle 482C05/482C15

Pour les mesures à l'état Gros Œuvre, les supports des accéléromètres étaient vissés aux planchers (par l'intermédiaire de cubes métalliques (PCB 080 A57 - Figure 1)) pour limiter au maximum l'effet de filtrage entre le plancher et l'accéléromètre. A l'état Finition, il n'est évidemment plus possible d'utiliser ce type de fixation. Des platines métalliques ont été utilisées, elles ont trois points de contact avec le sol et sont suffisamment lourdes pour assurer un bon contact avec le sol (Figure 2).



Figure 1 : Fixation des accéléromètres via un cube métallique vissé au plancher

Figure 2 : Installation des accéléromètres via une platine métallique posée sur le plancher

2.1. Mesures

Les essais ont été réalisés sous sollicitation environnementale, notamment sous charges horizontales dues au vent, aux utilisateurs, au trafic routier, aux vibrations naturelles du sol, etc., sans besoin d'exciter le bâtiment de manière forcée. Ces mesures permettent de trouver les fréquences propres du bâtiment et l'amortissement associé.

Les vibrations du bâtiment sont enregistrées sur un temps suffisamment long pour que la méthode d'analyse des données fournisse des fréquences et des taux d'amortissements qui convergent vers une mesure ayant une erreur relative suffisamment petite [1]. Les données ont donc été acquises de manière continue sur une période allant jusqu'à 60 minutes pour les premières mesures, pour constater qu'une convergence satisfaisante est obtenue après 15-20 minutes d'acquisition. L'ensemble des mesures a donc été réalisé sur une période d'acquisition de 30 minutes.

Plusieurs mesures sont réalisées pour chaque immeuble, afin de couvrir l'ensemble du bâtiment, par étage et sur la hauteur. Entre les différentes configurations de mesure, au moins deux accéléromètres sont restés fixes, afin de pouvoir être utilisés comme points de référence (cf. §3.2). Pour un étage donné, les accéléromètres sont disposés aussi près que possible des façades, de manière à ne pas négliger d'éventuels modes de torsion. Sur la hauteur du bâtiment, les accéléromètres sont dans la mesure du possible alignés selon des axes parallèles aux façades, selon une trame qui reste fixe à chaque étage. Certains points de mesure ont été choisis pour avoir une redondance des mesures et permettre ainsi une meilleure caractérisation des propriétés modales du bâtiment.

Les données en sortie des accéléromètres sont des accélérations en m/s^2 . La fréquence d'acquisition utilisée, égale pour tous les essais réalisés, est de 100 Hz (cf. §3.3).

3. Méthode d'analyse

3.1. Généralités

La méthode de l'Analyse Modale Opérationnelle (AMO) est utilisée pour traiter les données expérimentales. Cette méthode vise à déterminer les paramètres modaux d'une structure pour laquelle les sollicitations ne sont pas contrôlées, ce qui correspond bien aux mesures ambiantes réalisées (les sources de vibrations étant nombreuses : vent, utilisateurs, trafic routier, etc.). La méthode en elle-même est relativement récente et fait l'objet de beaucoup de publications depuis le début des années 2000, parmi toutes celles-ci on notera le livre « Operational modal analysis of civil structures » [2], particulièrement détaillé et complet.

Le traitement des données est réalisé sur le logiciel ARTeMIS [3], spécifiquement développé pour ce type d'applications, il est régulièrement cité dans la littérature pour l'analyse modale de bâtiments (grande hauteur ou non, en bois ou non) [1] [4] et [5]. Les parties suivantes décrivent les étapes du traitement des données.

3.2. Etape 1 : Géométrie et assignation des ddl

L'AMO permet de traiter les données d'une mesure (**une mesure = enregistrements des signaux de k capteurs sur un temps fixé**), mais sa puissance réside aussi dans sa capacité à corréliser plusieurs mesures, ce qui est particulièrement pratique dans le cas d'un bâtiment. Il faudrait en effet placer des dizaines d'accéléromètres, répartis dans la structure, pour réaliser une mesure suffisamment riche en informations et en déduire les paramètres modaux du bâtiment. L'AMO permet d'enchaîner plusieurs mesures (en faisant varier les positions des accéléromètres de manière à couvrir le bâtiment dans sa globalité), tant qu'au minimum deux capteurs sont restés fixes (pour servir de référence). L'AMO peut, en effet, inclure un traitement cherchant la corrélation entre les enregistrements de chaque capteur dans chaque mesure.

Pour réaliser cela, il faut néanmoins définir la géométrie du bâtiment, plus exactement les coordonnées des points de mesure et les directions mesurées. Il suffit donc d'une géométrie simplifiée du bâtiment et de définir les degrés de liberté (ddl), sur lesquels seront appliqués les signaux mesurés. La Figure 3 montre les coordonnées des points de mesure et le 3D mettant en évidence les ddl pour l'un des bâtiments analysés.

Global #	X	Y	Z
^ Ground			
1	0	0	0
2	15.18	0	0
3	15.18	9.37	0
4	0	9.37	0
^ R+2			
7	0	0	6.39
8	15.18	0	6.39
9	15.18	9.37	6.39
10	0	9.37	6.39
^ R+5			
13	0	0	15.06
14	15.18	0	15.06
15	15.18	9.37	15.06
16	0	9.37	15.06
^ R+7			
19	0	0	20.84
20	15.18	0	20.84
21	15.18	9.37	20.84
22	0	9.37	20.84

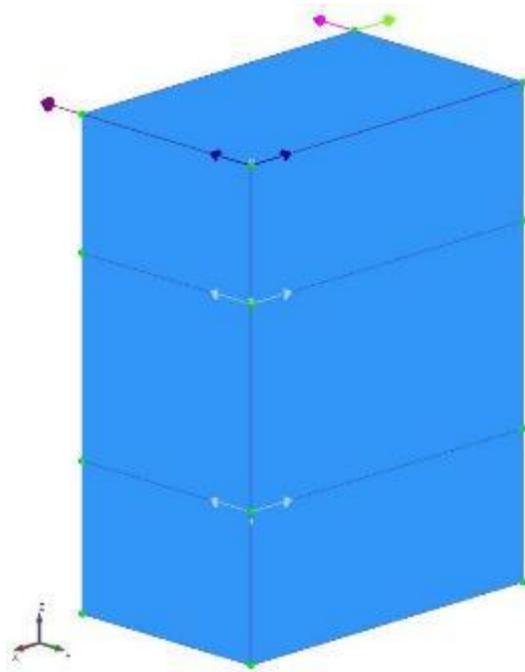


Figure 3 : Géométrie et ddl pour un bâtiment type

Dans l'exemple de la Figure 3, deux mesures ont été réalisées. Pour la première, 3 points de mesure sont placés sur le plancher du R+7. Pour la seconde, un point de mesure reste au R+7 pour servir de référence (flèches bleues sur la Figure 3), un point est placé au R+5 et un autre au R+2 (flèches blanches). Un point de mesure peut être constitué d'un ou deux accéléromètres.

3.3. Etape 2 : Prétraitement des signaux

Les signaux enregistrés peuvent être prétraités, de manière à filtrer certains phénomènes pouvant perturber ou alourdir l'analyse à suivre. Il peut s'agir de filtres passe-bas, de réduction de la fréquence d'échantillonnage ou encore de *detrending*.

Detrending

Il s'agit d'un traitement du signal consistant à lui retirer sa valeur moyenne et toute évolution linéaire éventuellement présente. Une évolution linéaire peut être due à un déplacement du point de mesure ou être liée à la fréquence de coupure des accéléromètres. Un polynôme d'ordre 1 est calé sur le signal et ensuite retiré. Le *detrending* permet donc de retirer d'un signal les informations liées à des phénomènes tellement lents qu'il s'agit en fait de phénomènes statiques. Puisqu'une évolution linéaire peut perturber l'analyse modale, le *detrending* est systématiquement appliqué aux signaux.

Décimation

Par défaut, pour un signal enregistré sur une fréquence d'échantillonnage de 100 Hz, l'analyse dans le domaine spectral est réalisée sur un intervalle allant jusqu'à la fréquence de Nyquist, c'est-à-dire 0 à 50 Hz. Il est possible de gagner en efficacité et précision d'analyse si l'on connaît l'ordre de grandeur des fréquences propres d'intérêt. Dans le cas des bâtiments bois grande hauteur, le livrable 1 de l'étude de benchmarking sur l'amortissement commandée par ADIVbois [6] montre que les premières fréquences propres sont toujours inférieures à 10 Hz.

La décimation consiste donc à réduire l'intervalle des fréquences à un intervalle d'intérêt, en redéfinissant l'échantillonnage du signal, tel que l'illustre la Figure 4. Le signal est plus « léger » et l'analyse plus rapide (ce qui n'a que peu d'intérêt car les temps de calculs sont de l'ordre de la seconde), mais cela a aussi un impact sur l'estimation des propriétés modales (cf. §3.4). En effet, la densité spectrale est tracée à partir d'un nombre fixé de valeurs discrètes (cf. §Résolution de l'estimation de la densité spectrale). Une densité spectrale représentée entre 0 et 50 Hz apparaît donc beaucoup plus lissée que si elle est tracée uniquement entre 0 et 10 Hz, comme le montre les Figure 5 et Figure 6.

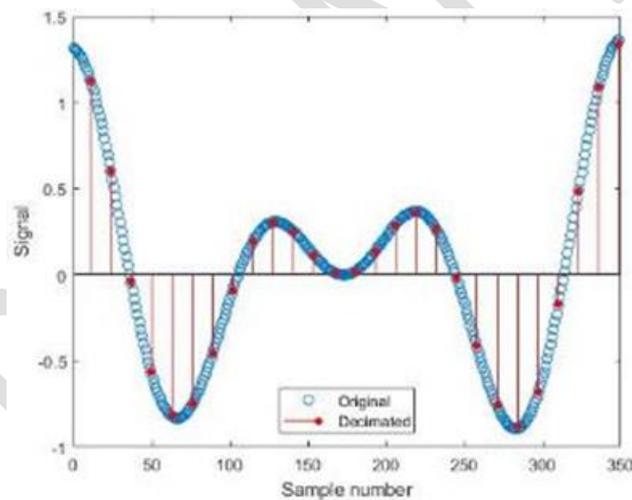


Figure 4 : Décimation d'un signal

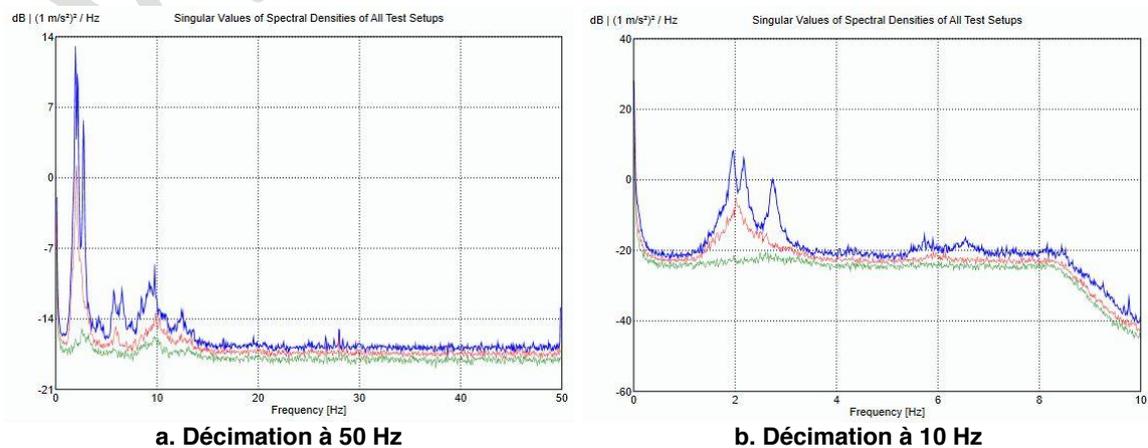


Figure 5 : Densité spectrale de signaux décimée à des fréquences différentes

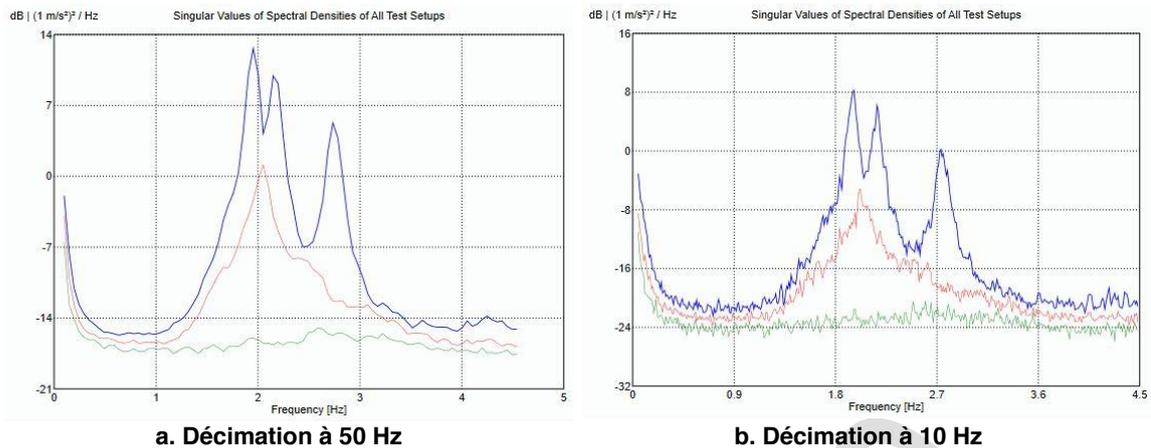


Figure 6 : Zoom sur les premiers modes propres de signaux décimés à des fréquences différentes

Une bonne résolution au niveau des pics est nécessaire pour assurer une bonne estimation des paramètres modaux. Le choix de la décimation va de pair avec le paramètre de résolution de l'estimation de densité spectrale (cf. §Résolution de l'estimation de la densité spectrale). C'est la combinaison des deux qui doit assurer une précision suffisante des pics. Cela se vérifie en étudiant la stabilité des paramètres modaux (amortissement principalement, car les fréquences sont très stables) en fonction des paramètres de décimation et de résolution. Sur les bâtiments analysés dans cette étude, les résultats sont stables pour une décimation à 10 Hz et une valeur de résolution de l'estimation spectrale à 2048 points.

Filtrage

Un filtre passe-bas, passe-bande, coupe-bande ou passe-haut peut être appliqué au signal. Contrairement à la décimation, un filtre ne coupe pas les fréquences non voulues, mais les atténue (-3 dB). La méthode de filtrage est celle de Butterworth, dont l'ordre peut être choisi. Il n'est pas conseillé d'utiliser de filtre en première approche, afin d'observer la densité spectrale dans son ensemble. Un filtre peut être utilisé ensuite pour focaliser l'étude sur certaines parties de la densité spectrale, ou pour se retirer des effets parasites. Dans cette étude, un filtre est utilisé pour atténuer les densités spectrales « non physiques » qui apparaissent quand les fréquences tendent vers zéro (filtre passe haut, ordre 1, fréquence de coupure 0,5 ou 1 Hz selon les cas).

Résolution de l'estimation de la densité spectrale

Il s'agit du nombre de valeurs discrètes utilisées pour tracer la densité spectrale. Une valeur élevée engendre un spectre visuellement « bruité » alors qu'une valeur faible lissera trop la courbe et cachera certains phénomènes. Dans un cas comme dans l'autre, l'identification des fréquences et l'estimation des amortissements seront perturbées. Comme expliqué ci-dessus, une valeur de 2048 points est utilisée pour l'ensemble de l'étude.

Correction des données

Les mesures sous sollicitations ambiantes peuvent être facilement perturbées par des chocs/impacts proches des capteurs. Ces perturbations engendrent des pics d'accélération importants (pouvant amener à la saturation du capteur), dont l'amplitude est bien au-delà de la moyenne du signal. Pour retirer ces perturbations, le signal est borné par une valeur min et une valeur max d'accélération (traits horizontaux en vert sur la Figure 7) et les valeurs non contenues dans l'intervalle sont repérées (traits verticaux en vert sur la Figure 7). Les points sont ensuite retirés du signal, ainsi que dans les signaux des autres capteurs contenus dans la même mesure (enregistrés en même temps) afin de ne pas désynchroniser les signaux.

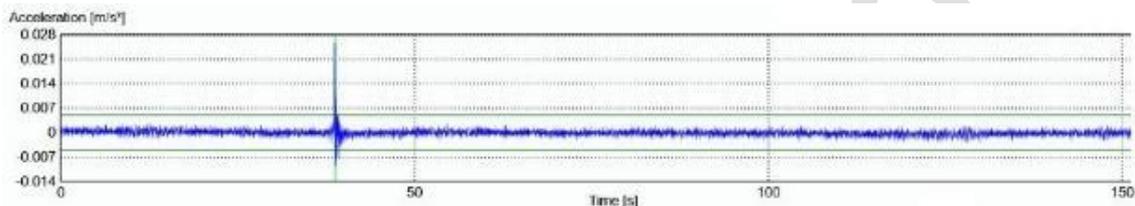


Figure 7 : Correction de perturbations d'enregistrement

3.4. Etape 3 : Estimation des paramètres modaux

L'AMO est le nom donné à la méthode générale de traitement de mesures vibratoires *in-situ* (à sollicitations non contrôlées) pour estimer les paramètres modaux. Dans le détail, l'estimation des paramètres modaux peut être obtenue selon des méthodes regroupées dans deux familles : les *Frequency Domain Decomposition* (FDD) et les *Stochastic Subspace Identification* (SSI). Certaines seront plus adaptées que d'autres, soit en fonction du système étudié, soit des réponses recherchées (fréquences, amortissements, déformées modales).

L'étude comparative des méthodes FDD et SSI [1] montre (sur le cas d'un bâtiment en béton de 48 étages) qu'il n'y a pas plus de 1,5% d'écart entre les fréquences propres estimées. La comparaison des amortissements modaux n'apporte pas d'éléments supplémentaires, en effet la méthode SSI ne semble pas adaptée à l'exemple traité, car là où les coefficients d'amortissement valent entre 0,4 et 1,9% (pour des Coefficients de Variation (CV) entre 20 et 50%) pour la méthode EFDD (variante de la FDD, voir ci-dessous), ils valent entre 0,4 et 14,2% ($50 < CV < 100\%$) pour la méthode SSI. Avec de telles variations, la comparaison directe des valeurs d'amortissement n'a pas de sens.

On utilise dans notre cas les méthodes FDD. La méthode standard FDD ne permet pas l'estimation de l'amortissement modal, il faut pour cela utiliser des variantes de cette méthode, soit la *Enhanced Frequency Domain Decomposition* (EFDD) soit la *Curve-fit Frequency Domain Decomposition* (CFDD).

Frequency Domain Decomposition (FDD)

Une description vulgarisée de la méthode consiste à dire que le contenu fréquentiel d'une mesure permet de construire une matrice, dont les valeurs propres permettent l'identification des modes et de leurs propriétés. Les étapes sont décrites de manière plus détaillée ci-dessous.

1. Matrices de densités spectrales [7]

Les données d'entrée sont les mesures (une au minimum), chacune composée des enregistrements de plusieurs accéléromètres. Chaque enregistrement est donc un signal temporel de l'accélération d'un point de la structure (coordonnées connues) dans une direction particulière (connue), on les note $\mathbf{a}_{1,x}(\mathbf{t}), \mathbf{a}_{1,y}(\mathbf{t}) \dots \mathbf{a}_{n,x}(\mathbf{t}), \mathbf{a}_{n,y}(\mathbf{t})$.

La première étape consiste à calculer la FFT (transformée de Fourier rapide) de chaque signal, que l'on notera $\mathbf{a}_{1,x}(\mathbf{f}), \mathbf{a}_{1,y}(\mathbf{f}) \dots \mathbf{a}_{n,x}(\mathbf{f}), \mathbf{a}_{n,y}(\mathbf{f})$. Une FFT étant nécessairement calculée sur un signal borné dans le temps, la méthode de Welch est utilisée (découpage de chaque signal $\mathbf{a}_{i,x}(\mathbf{t})$ en plusieurs intervalles, chacun recouvrant à 66% ses intervalles voisins) avec une fenêtre de Hann (souvent appelée Hanning pas abus de langage). Les signaux obtenus sont les composantes d'un vecteur, qui, multiplié par son conjugué transposé et normalisé par $1/\Delta f$ (Équation 1, l'exposant * désigne le conjugué), permet d'obtenir une matrice de densités spectrales $\mathbf{DS}(\mathbf{f})$ (Équation 2).

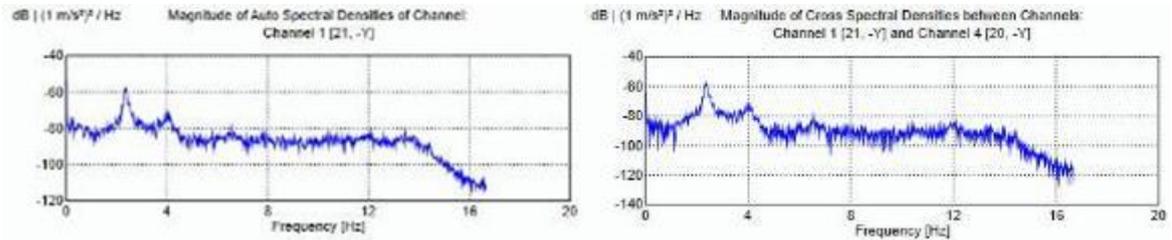
$$DS(\mathbf{f}) = \begin{bmatrix} a_{1,x}(\mathbf{f}) \\ a_{1,y}(\mathbf{f}) \\ \vdots \\ a_{n,x}(\mathbf{f}) \\ a_{n,y}(\mathbf{f}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{1,x}^*(\mathbf{f}) & a_{1,y}^*(\mathbf{f}) & \dots & a_{n,x}^*(\mathbf{f}) & a_{n,y}^*(\mathbf{f}) \end{bmatrix} \quad \text{Équation 1}$$

$$DS(\mathbf{f}) = \begin{bmatrix} a_{1,x}^2(\mathbf{f}) & a_{1,x}(\mathbf{f})a_{1,y}^*(\mathbf{f}) & \dots & a_{1,x}(\mathbf{f})a_{n,x}^*(\mathbf{f}) & a_{1,x}(\mathbf{f})a_{n,y}^*(\mathbf{f}) \\ a_{1,y}(\mathbf{f})a_{1,x}^*(\mathbf{f}) & a_{1,y}^2(\mathbf{f}) & \dots & a_{1,y}(\mathbf{f})a_{n,x}^*(\mathbf{f}) & a_{1,y}(\mathbf{f})a_{n,y}^*(\mathbf{f}) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ a_{n,x}(\mathbf{f})a_{1,x}^*(\mathbf{f}) & a_{n,x}(\mathbf{f})a_{1,y}^*(\mathbf{f}) & \dots & a_{n,x}^2(\mathbf{f}) & a_{n,x}(\mathbf{f})a_{n,y}^*(\mathbf{f}) \\ a_{n,y}(\mathbf{f})a_{1,x}^*(\mathbf{f}) & a_{n,y}(\mathbf{f})a_{1,y}^*(\mathbf{f}) & \dots & a_{n,y}(\mathbf{f})a_{n,x}^*(\mathbf{f}) & a_{n,y}^2(\mathbf{f}) \end{bmatrix} \quad \text{Équation 2}$$

Les termes diagonaux sont les Densités Spectrales de Puissance (DSP) et les termes hors diagonale les Densités Spectrales Croisées (DSC). Les DSP sont les données principales de l'analyse du signal à leur point de mesure, les DSC décrivent les relations entre deux points et/ou deux directions de mesure (déphasage pas exemple).

Par exemple, le terme $a_{1,x}(\mathbf{f})a_{1,y}^*(\mathbf{f})$ décrit la relation entre les mesures en \mathbf{x} et \mathbf{y} au point 1, c'est-à-dire la dynamique locale au niveau du point de mesure 1, ce qui n'est guère pertinent pour l'étude de la dynamique globale du bâtiment. Ce type de terme sera donc peu pondéré dans la suite de la méthode. A contrario, d'autres termes DSC décrivant les relations entre des

points de mesure différents, par exemple $a_{1,x}(f)a_{3,x}^*(f)$, seront pondérés plus fortement car ils décrivent un comportement plus global. Pour l'illustration, la Figure 8 montre une DSP (aussi appelé autospectre) et une DSC.



a. Densité Spectrale de Puissance

b. Densité Spectrale Croisée

Figure 8 : Signaux contenus dans une matrice de densité spectrale

Une matrice de densités spectrales concentre ainsi l'ensemble des données mesurées et permet un premier niveau d'analyse par observation des pics des signaux. Cependant cela reste local (ou entre uniquement deux points de la structure), et si m mesures ont été réalisés, il y a m matrices différentes. L'étape suivante de la méthode FDD consiste donc à dégager de ces matrices les « tendances principales » qu'elles contiennent.

2. Décomposition en valeurs singulières

De manière vulgarisée, les « tendances principales » d'informations contenues dans une matrice sont ses valeurs propres. Les matrices de densités spectrales n'étant pas nécessairement normales (au sens mathématique du terme), c'est une généralisation de cette notion qui est employée, la décomposition en valeurs singulières (Singular Value Decomposition (SVD), en anglais).

Chaque valeur singulière est donc une Densité Spectrale de Puissance. Le nombre de valeurs singulières dépend de la taille de la matrice, donc du nombre de signaux enregistrés à chaque mesure. Néanmoins, les premières valeurs singulières (SVD) concentrent l'essentiel de l'information spectrale, les dernières ne « pesant » que peu sur le comportement global de la structure. Cela permet d'alléger la suite du travail, en se concentrant sur l'analyse d'une partie seulement des valeurs singulières.

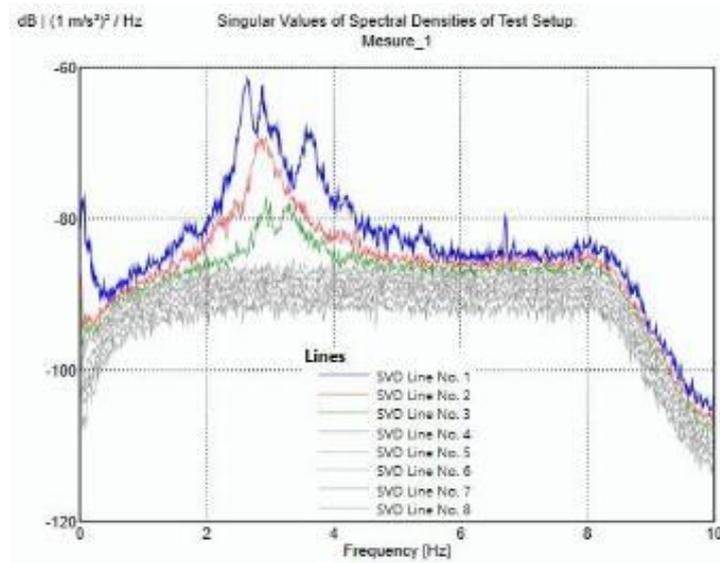


Figure 9 : Décomposition en valeurs singulières (SVD)

C'est ce que montre la Figure 9 dans le cas d'une mesure comportant huit signaux enregistrés, car des huit SVD, les trois premières suffisent à identifier le comportement modal de la structure (les SVD 4 à 8 étant « plates » sur l'intervalle des fréquences étudiées). On ne se contentera pas non plus d'analyser uniquement la courbe SVD 1, notamment si elle présente des modes proches, car les courbes SVD 2 et/ou les suivantes permettront de préciser la dépendance ou non de ces modes.

Pour une étude basée sur m mesures, les décompositions en valeurs singulières des m matrices de densités spectrales sont réalisées. La moyenne des valeurs singulières de chaque ordre est alors calculée (la moyenne de la première valeur singulière de chacune des m matrices donne la première valeur singulière globale, et ainsi de suite pour les $k-1$ autres valeurs singulières).

La décomposition en valeurs singulières permet l'obtention d'un nombre limité de Densités Spectrales de Puissance néanmoins représentatives des données mesurées. L'étape suivante consiste donc à identifier les modes, ce qui est décrit ci-dessous.

3. Identification des modes

Les modes du bâtiment sont identifiés à partir des pics visibles sur les courbes SVD, néanmoins en observant la Figure 9, il est clair que ces courbes possèdent en réalité une multitude de pics, donc une analyse des maxima locaux serait trop simpliste pour identifier les modes. Leur estimation suit une autre méthode, définie en deux temps : d'abord *l'identification du domaine modal* permet de se concentrer sur un plus petit nombre de pics, ensuite *l'analyse de la corrélation des déformées modales* permet de « tester » chacun des pics pour estimer s'il s'agit réellement de modes de la structure.

a. Identification du domaine modal

Pour chaque fréquence f , le vecteur propre (normalisé) de la SVD correspondante est calculé. Il faut noter que ce vecteur représente en fait la déformée modale du mode qui aurait une fréquence f . Pour des fréquences aux abords d'un pic (c'est-à-dire au niveau d'un mode), ce vecteur est « dominant », par rapport aux vecteurs issus de fréquences éloignées des pics, puisque l'on est au voisinage d'une vraie déformée modale de la structure, ce qui peut être démontré (voir §4.4.2 de [2]). Cette « dominance » est quantifiée en calculant la cohérence modale, c'est-à-dire le produit scalaire du vecteur propre à la fréquence f avec les x vecteurs propres des fréquences voisines de f (x à gauche de f et x à droite de f). Le nombre de décalage pour la corrélation modale x est un paramètre ajustable, plus il est élevé, plus la cohérence modale est lissée. La cohérence modale tend vers 1 au niveau d'un mode et vers 0 en dehors.

Une valeur seuil est fixée afin de repérer dans le domaine spectral les intervalles pour lesquels la cohérence modale est suffisante pour y chercher un mode et ses caractéristiques. Par défaut, les valeurs utilisées sont $x = 6$ et un seuil de 0,3. Le nombre de pics à analyser est donc réduit, car des zones entières des courbes SVD sont en dessous du seuil de cohérence modale. C'est ce qu'illustre la Figure 10, pour laquelle seuls quatre intervalles de cohérence modale sont déterminés¹, soit simplement quatre pics à analyser pour la suite.

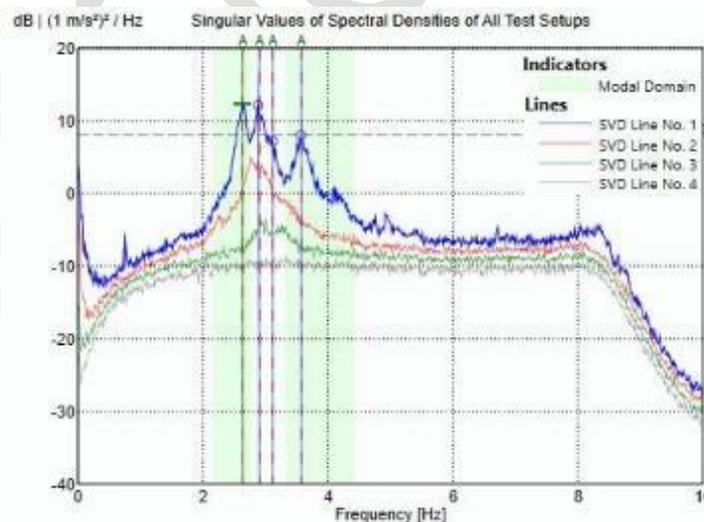


Figure 10 : Détermination des intervalles de cohérence modale (zones colorées) et identification des pics associés

¹ On notera que les domaines des pics 2 et 3 sont très fins, et difficilement visibles sur la figure, contrairement aux domaines des pics 1 et 4, particulièrement larges.

b. Analyse de la corrélation des déformées modales

Dans chaque intervalle de cohérence modale suffisante (cf. paragraphe précédent), une analyse de la corrélation des déformées modales est réalisée afin d'identifier formellement les modes de la structure. Un critère statistique (MAC) est utilisé pour réaliser cette comparaison.

Le critère MAC (Modal Assurance Criteria) permet de comparer deux modes pour évaluer leur similarité. C'est un nombre entre 0 et 1, calculé par le produit scalaire normalisé² entre deux déformées modales. Il vaut donc 1 en cas de modes parfaitement identiques, et tend vers 0 pour des modes complètement différents (même si c'est un indice fort, cela ne signifie pas forcément qu'ils sont orthogonaux, car les matrices de masses et de rigidités ne font pas partie de cette analyse).

La comparaison de modes peut être utilisée dans plusieurs contextes et fait apparaître des termes spécifiques. On en définit deux ci-dessous :

- **AutoMAC** : Les modes identifiés à partir d'un spectre peuvent être comparés les uns aux autres pour évaluer leur dépendance, notamment en cas de modes proches.
- **CrossMAC** : Il s'agit de comparer des modes identifiés sur des spectres différents. Cela permet par exemple de comparer un mode identifié sur une mesure à un mode identifié sur une autre mesure (on comparerait dans ce cas le mode 1 de la mesure 1 au mode 1 de la mesure 2, pour vérifier s'il s'agit du même mode). Dans d'autres situations, le CrossMAC permet de comparer un mode identifié expérimentalement à un mode issu d'un modèle (analytique ou numérique).

Dans notre cas, c'est l'AutoMAC qui est utilisé. Chaque pic est successivement comparé aux autres en calculant à chaque fois le critère MAC. C'est ce que montre la Figure 11.a, quand un mode est comparé à lui-même le critère vaut évidemment 1, mais on observe aussi que les modes 2 et 3 sont assez similaires, de même les 1 et 4 ne sont pas complètement différents.

² Il existe en fait de nombreuses variantes pour calculer le critère MAC [9].

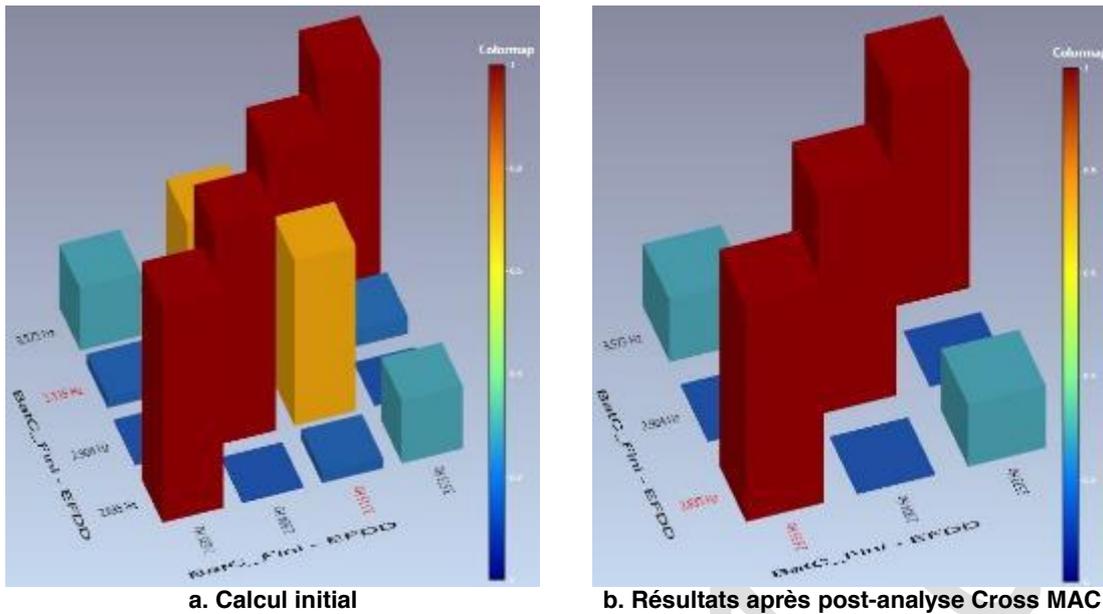


Figure 11 : Visualisation des critères MAC pour la sélection des modes de la structure

La Figure 11 est l'illustration de la corrélation des déformées modales, deux pics trop fortement corrélés ne représentant pas deux modes distincts. Une post-analyse appelée « Cross MAC³ » est réalisée pour faire le tri. Il s'agit de définir un seuil de MAC admissible entre deux pics distincts. Au-delà de ce seuil, on considère que ces deux pics sont liés au même mode et seul l'un des deux est retenu (on utilise pour cela les courbes SVD suivantes). C'est le cas des pics 2 et 3 de la Figure 11.a, dont les déformées modales sont effectivement assez similaires (Figure 12.b et c).

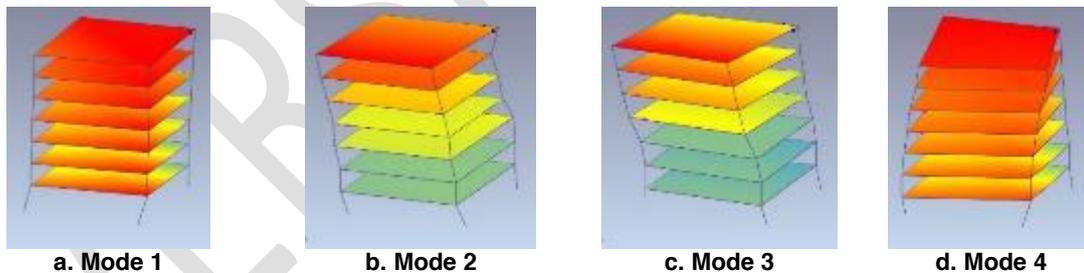


Figure 12 : Visualisation des modes repérés avant post-analyse cross MAC (cf. Figure 11.a)

Par défaut, cette post-analyse est réalisée automatiquement sur la base d'un seuil valant 0,4. Dans le cas de l'exemple illustré ici, trois modes sont donc retenus, comme l'illustre la Figure 11.b (après post-analyse cross MAC).

³ Cette post-analyse « Cross MAC » est basée sur des critères AutoMAC (puisque l'on compare des pics issus du même spectre), à ne pas confondre donc avec des critères CrossMAC (comparaison de pics issus de spectres différents).

La *Frequency Domain Decomposition* (FDD), c'est-à-dire la procédure d'identification des modes décrite ci-dessus se conclue par la connaissance des fréquences propres et des déformées modales. L'estimation de l'amortissement modal nécessite en revanche un travail supplémentaire, pouvant être mené par *Enhanced Frequency Domain Decomposition* (EFDD) ou par *Curve-fit Frequency Domain Decomposition* (CFDD).

Enhanced Frequency Domain Decomposition (EFDD)

Dans un intervalle autour d'un pic, une fonction SVD représente la Densité Spectrale de Puissance d'un système à un degré de liberté (Single Degree Of Freedom : SDOF) ayant la même fréquence propre et le même amortissement que le bâtiment étudié. Ce lien entre la SVD de la structure et un SDOF est démontré [8], à condition de vérifier certaines hypothèses :

- Excitation par un bruit blanc, ce qui correspond à l'hypothèse de base des analyses de mesures ambiantes.
- Amortissement faible, ce qui est vrai pour les bâtiments étudiés, puisque l'on parle de quelques pourcents, très loin d'un amortissement critique (100%).
- Déformées modales orthogonales, ce qui fait partie de l'analyse de la corrélation des déformées modales décrite auparavant.

La détermination précise de « l'intervalle autour d'un pic » se base à nouveau sur un critère MAC. Dans ce cas, la déformée modale du pic de fréquence f_i est comparée à la déformée modale des fréquences f voisines de f_i . Au voisinage du pic le critère MAC est proche de 1, mais plus les fréquences f sont éloignées de f_i , plus celui-ci diminue. En posant un seuil limite (par défaut 0,8), on définit un intervalle autour du pic (Figure 13) au sein duquel les déformées modales sont globalement celles du mode i . Sur cet intervalle, la courbe SVD a une forme de cloche (d'où le nom en anglais : *Bell function*). Il est important de vérifier visuellement la forme de cette courbe pour chaque mode. L'exemple de la Figure 13 montre que la *Bell function* du 1^{er} mode est satisfaisante, mais qu'il ne faudrait pas élargir l'intervalle vers la droite, au risque d'inclure du bruit non désiré. Ce serait donc une erreur, dans ce cas, de diminuer le seuil de MAC de réjection.

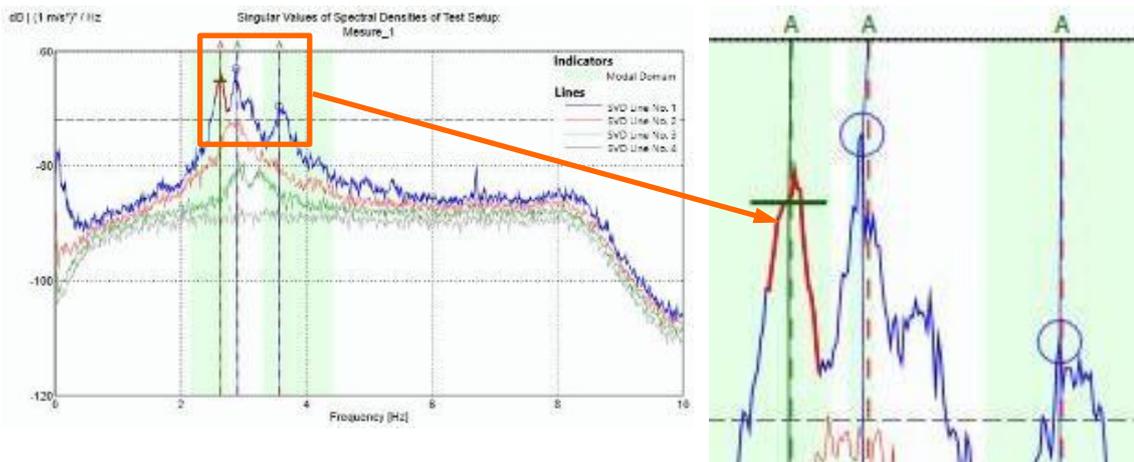


Figure 13 : *Bell function* du mode 1 (en surbrillance rouge sur la première courbe SVD)

L'analyse de la *Bell function* permet d'obtenir ou de préciser plusieurs résultats :

- Améliorer la précision de la déformée modale.
- Améliorer la précision de la fréquence propre.
- Déterminer l'amortissement modal.

A ce point de l'analyse, la déformée modale du mode i est le vecteur propre correspondant à la fréquence f_i . Une déformée modale plus précise est obtenue en récupérant chacun des vecteurs propres des fréquences f de la *Bell function*. Une moyenne pondérée de ces vecteurs est alors calculée. La pondération est basée sur la valeur de la *Bell function* à la fréquence f considérée, le pic à f_i est donc dominant (mais plus seul) dans le résultat.

L'analyse pour la fréquence et l'amortissement peut être faite selon deux méthodes, on présente dans cette partie la méthode EFDD. La seconde méthode (CFDD) est présentée au paragraphe suivant.

La *Bell function* subit une transformée de Fourier inverse, afin d'établir sa fonction de corrélation normalisée pour un système à un degré de liberté (Figure 14), c'est-à-dire son équivalence direct dans le domaine temporel. Seul un intervalle de cette courbe sera utilisé pour estimer ξ_i et f_i , celui-ci est défini à partir de deux seuils (min et max). Par défaut, ces seuils valent 0,95 (pour évacuer de probables bruits à large bande au début du signal) et 0,3 (car l'incertitude augmente avec la durée du signal). Cet intervalle est visible sur la Figure 14. On notera que pour obtenir des valeurs d'amortissement ξ_i et de fréquence f_i fiables par la méthode qui va suivre, il est nécessaire que la résolution du signal fréquentiel soit suffisamment élevée pour que la fonction de corrélation décroisse jusqu'à des valeurs proches de zéro (ce qui est le cas de l'exemple présenté en Figure 14).

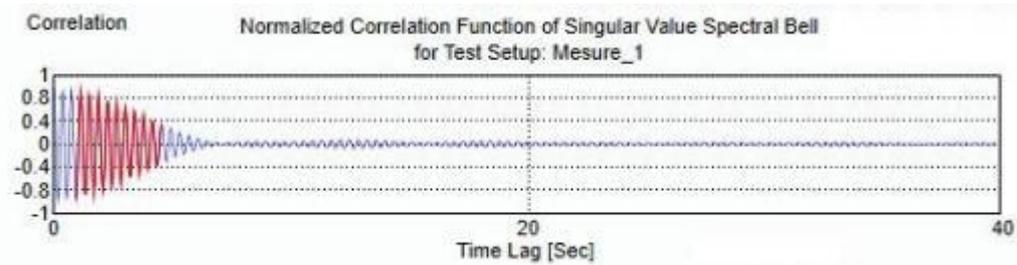


Figure 14 : Fonction de corrélation normalisée d'un SDOF (passage au domaine temporel)

L'intérêt de ce signal temporel est de pouvoir déterminer son amortissement et de préciser sa fréquence. Pour l'amortissement, la méthode consiste à identifier tous les pics (positifs et négatifs) de la fonction de corrélation et à tracer la courbe du logarithme de leurs valeurs absolues. Pour un système linéaire possédant un amortissement visqueux on obtient une droite sur laquelle le coefficient d'amortissement peut être obtenu par régression linéaire. La Figure 15 montre que le résultat n'est pas une droite. Les parties non-linéaires doivent donc être exclues de l'analyse, ce qui est normalement assuré car la régression linéaire est limitée à l'intervalle prédéfini (trait rouge sur la Figure 15). Le coefficient directeur de cette régression permet le calcul du coefficient d'amortissement modal ξ_i . Une vérification visuelle de cette régression, couplée à l'observation de l'incertitude affichée, doit être réalisée par l'opérateur, afin de modifier les seuils de l'intervalle si nécessaire.

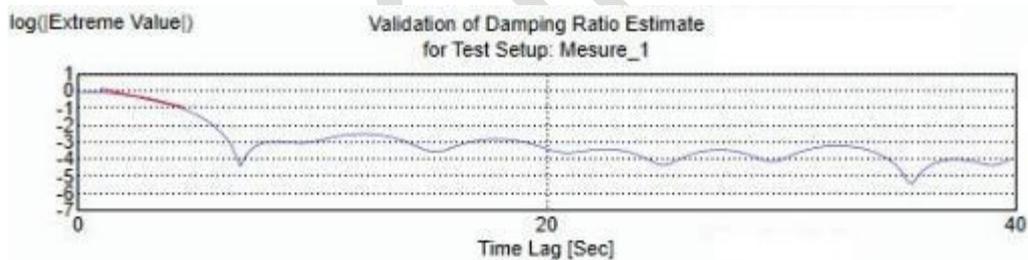


Figure 15 : Logarithme des valeurs absolues des pics de la fonction de corrélation

Une démarche assez similaire est utilisée pour préciser la valeur de la fréquence propre. Le nombre de fois où le signal temporel (la fonction de corrélation) passe par zéro est compté et représenté sur un graphique en fonction du temps. Un système linéaire devrait engendrer une droite, ce qui n'est pas parfaitement le cas, même si cela est très peu visible sur la Figure 16. Le coefficient directeur de la régression linéaire sur cette courbe est la fréquence propre f_i du mode.

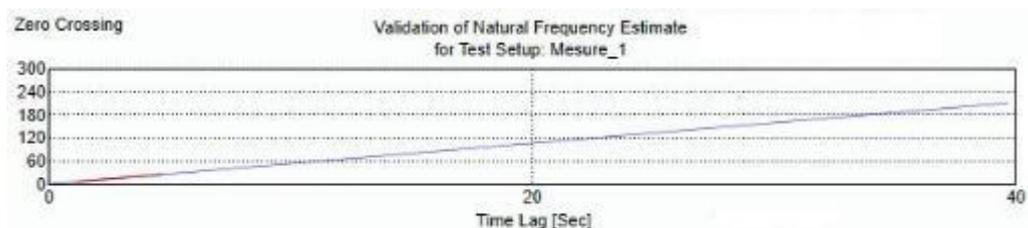


Figure 16 : Nombre de passages par zéro de la fonction de corrélation

L'ensemble de la méthode EFDD décrite ci-dessus n'est pas réalisée à partir de la courbe SVD moyenne des m mesures. Elle est réalisée pour chaque mesure, donnant ainsi m valeurs pour chaque fréquence propre, coefficient d'amortissement et déformée modale. Le résultat final de l'analyse est, pour chaque donnée, la valeur moyenne de ces m valeurs.

Curve-fit Frequency Domain Decomposition (CFDD)

Cette méthode se base sur la *Bell function* de chacun des modes, la première étape est donc exactement la même que pour la EFDD décrite ci-dessus. Ensuite, plutôt que de passer cette fonction dans le domaine temporel (EFDD), c'est la fonction d'un SDOF de paramètres f_i et ξ_i qui est calibrée par la méthode des moindres carrés sur la *Bell function* de la courbe SVD. C'est ce qu'illustre la Figure 17 pour le 1^{er} mode.

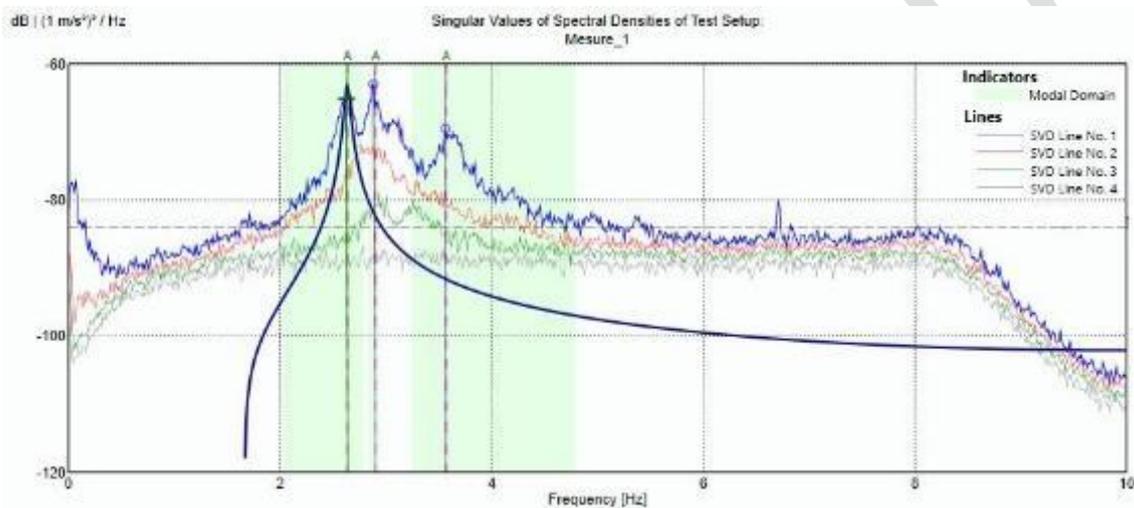


Figure 17 : Calibration de la fonction d'un SDOF sur la *Bell function* de la courbe SVD

La calibration des courbes analytiques sur les courbes SVD nécessite une validation visuelle. Une calibration plus fine pouvant être obtenue en modifiant le seuil MAC de réjection (qui permet la définition de la *Bell function*).

4. Discussion sur la méthodologie

En parallèle des trois bâtiments grande hauteur mesurés dans le cadre de cette prestation (cf. Parties II, III et IV), un 4^{ème} bâtiment a fait l'objet de mesures, mais pour une durée d'acquisition beaucoup plus importante. Il s'agit du bâtiment formation de l'ESB à Nantes. Ce R+2 est composé d'une structure en treillis (exosquelette) de 40 m de long, dont 10 en porte-à-faux à une extrémité. Les mesures ont été réalisées le 7 juin 2019 (jour de fort vent) et en continu du 29 juillet au 2 août 2019 ; dans les deux cas le bâtiment était vide.

4.1. Amplitude des sollicitations

L'étude de benchmarking [6] a identifié dans la littérature que des phénomènes non linéaires peuvent apparaître très tôt dans le comportement d'un bâtiment. Le principal impact est que l'amortissement tend à augmenter avec l'amplitude des sollicitations (principalement le vent dans ce cas d'étude). Cette tendance a été observée dans plusieurs travaux différents, mais les données restent assez limitées et il n'existe pas à notre connaissance de méthode de détermination de l'amortissement en fonction de l'amplitude des sollicitations à partir d'un amortissement connu à une amplitude donnée.

Les mesures réalisées à l'ESB ont consisté à enregistrer en continu les vibrations du bâtiment (accéléromètres) et la vitesse du vent (anémomètre) pendant 5 jours (plus trois mesures le 7 juin). L'étude se concentre sur des fenêtres de 30 minutes, afin de garantir la stabilité de la valeur de l'amortissement (cf. §2.1). Pour chaque fenêtre (plus d'une cinquantaine ont été analysées) :

- La vitesse de vent moyenne V_{moy} est calculée (l'échantillonnage de l'anémomètre est de 1 min). Cet indicateur rend compte de la sollicitation du vent.
- Les signaux mesurés par les accéléromètres sont observés. La moyenne RMS de chaque signal (Root Mean Square) est calculée, et la plus grande, notée $Arms$, sert à l'analyse. Cet indicateur rend compte de l'amplitude de la vibration du bâtiment.
- L'AMO est réalisée et la fréquence et l'amortissement servent à l'analyse.

Les données disponibles permettent d'observer les valeurs de la fréquence et de l'amortissement pour des fenêtres de 30 min pour lesquelles le vent moyen va de 0 à 9,0 m/s, avec une vitesse de pic de 12,5 m/s. La Figure 18 présente l'ensemble des résultats. On observe que pour des vents ayant une vitesse moyenne inférieure à environ 5 m/s, l'amplitude des vibrations du bâtiment ($Arms$) et l'amortissement croissent linéairement avec la vitesse du vent moyenne. Au-delà de 5 m/s, l'amortissement continue sur la même tendance linéaire, au contraire de $Arms$, qui augmente selon une loi puissance (la courbe de tendance est de degré

3). Ces données permettent par exemple d'observer qu'un amortissement de 2% serait atteint par extrapolation pour $V_{moy} = 15,4$ m/s.

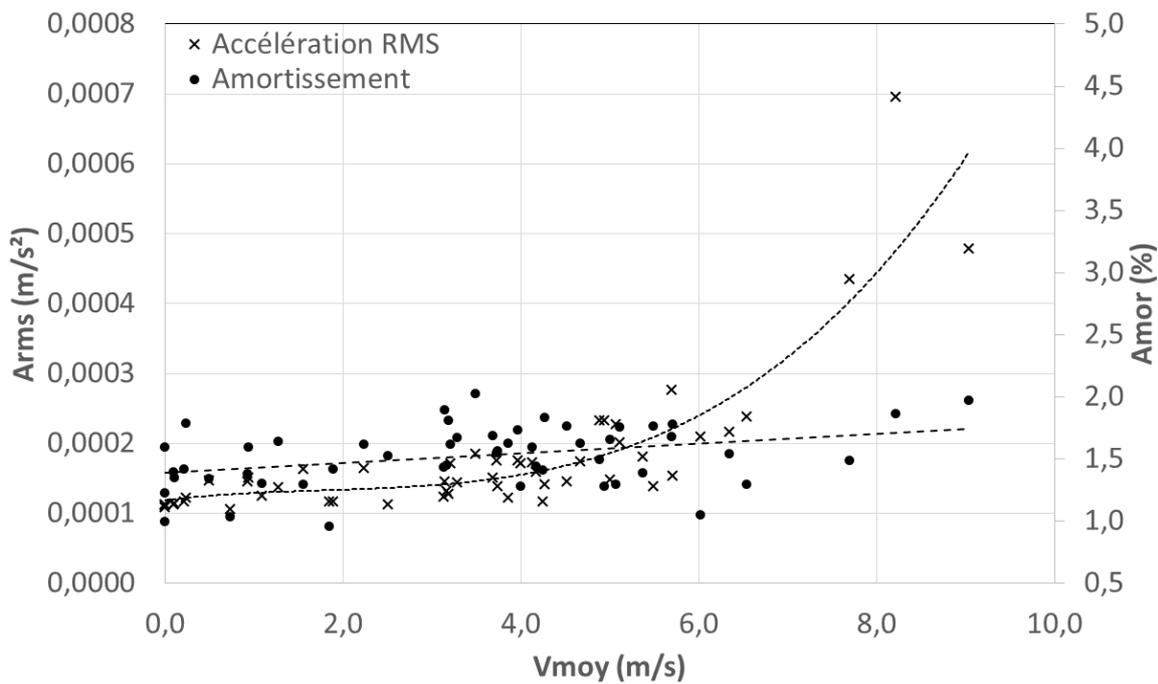


Figure 18 : Accélération RMS et amortissement du bâtiment en fonction de la vitesse moyenne du vent

Cette analyse confirme la corrélation amortissement/vent identifiée dans la littérature par l'étude de benchmarking [6]. Elle permet de plus, grâce aux nombreux points de mesures, de caractériser un peu plus finement cette corrélation (que l'on pourrait qualifier de linéaire, à coefficient directeur faible mais non négligeable). Les limites de cette étude sont :

- le nombre de points pour des V_{moy} élevées est faible,
- l'incertitude sur l'estimation de l'amortissement n'est pas négligeable (cf. §4.2),
- le bâtiment étudié est en structure porteuse en bois, mais pas de grande hauteur (R+2).

4.2. Estimation de l'incertitude

Sur un même bâtiment, on peut comparer les résultats pour des fenêtres d'enregistrement différentes. Avec plus de 50 résultats comparés, la dispersion des résultats peut être statistiquement évaluée.

En première analyse, on néglige tous les effets pouvant impacter les mesures (température, humidité, vent, etc.), on fait donc l'hypothèse que les résultats devraient être identiques à chaque mesure. Les résultats montrent que le coefficient de variation (CV) de la fréquence est de 0,46% (ce qui est tout à fait négligeable). Pour l'amortissement il est de 15,9%, ce qui n'est pas négligeable (mais cohérent avec la littérature, cf. §3.4).

En seconde analyse, on considère le fait que l'amortissement n'est pas indépendant de la vitesse du vent, pour voir si, pour une vitesse de vent donnée, la dispersion n'est pas plus petite ou grande. On utilise la formule de Sturges pour estimer le nombre de classes pour découper l'intervalle des vitesses moyennes (de 0 à 9,0 m/s). On obtient 7 classes et le CV de l'amortissement est calculé pour chaque classe de vent. Le Tableau 2 montre que les CV varient entre 11,5 et 18,2%, sans corrélation avec la vitesse du vent. Cela n'apporte donc pas réellement d'information supplémentaire en termes d'incertitude sur l'estimation de l'amortissement. Pour les deux dernières classes de vent, le CV n'est pas calculé pour le faible nombre de mesures dans chaque classe.

Tableau 2 : Dispersion de l'amortissement en fonction de la vitesse moyenne du vent V_{moy}

Vent	m/s	0 - 1,3	1,3 - 2,6	2,6 - 3,9	3,9 - 5,1	5,1 - 6,4	6,4 - 7,7	7,7 - 9
Amor	CV (%)	14,4	18,1	11,5	14,9	18,2	-	-

En dernière analyse, il est important de préciser qu'un amortissement est calculé pour chaque mesure effectuée (cf. définition d'une mesure au §3.2, page 7). Or, plusieurs mesures sont effectuées pour chaque bâtiment étudié dans le cadre de cette prestation. L'amortissement donné pour un bâtiment est donc une moyenne sur m mesures (cf. page 21). L'incertitude sur cette valeur est donc plus faible, le Tableau 3 présente le coefficient de variation d'un amortissement estimé à partir de m mesures.

Tableau 3 : Coefficient de variation pour un amortissement estimé à partir de m mesures

m mesures	CV (%)
1	15,9
2	12,1
3	10,9
4	9,8

Pour faciliter la lecture des résultats de ce rapport, le Tableau 4 précise le nombre de mesures réalisées pour chaque bâtiment (ces informations sont aussi données dans les parties concernées).

Tableau 4 : Nombre de mesures réalisées par bâtiment

Lieu	Bâtiment	Etat	m mesures
Strasbourg	Plot A	Gros Œuvre	1
		Finition	3
	Plot C	Gros Œuvre	2
		Finition	3
Saint-Denis	Pulse	Finition	4
Paris	Bains & Douches	Finition	4

La dispersion dans l'estimation de l'amortissement est donc non négligeable. Selon l'hypothèse d'une dispersion des amortissements suivant une loi normale, un amortissement estimé de 1,5% pour un bâtiment ayant fait l'objet de 3 mesures signifie que :

- 68% des valeurs d'amortissement sont comprises entre $1,5 \pm 0,17\%$
- 95% des valeurs d'amortissement sont comprises entre $1,5 \pm 0,33\%$

Il faut prendre en compte cet intervalle de confiance pour l'analyse des résultats présentés dans les parties suivantes. Des estimations plus précises des amortissements des bâtiments mesurés auraient nécessité des mesures sur de longues périodes (tel que réalisé sur le bâtiment de l'ESB), ce qui n'était pas envisageable en période de chantier ou de livraison des bâtiments.

5. Conclusion

A l'issue des mesures effectuées sur les trois bâtiments grande hauteur missionnés par ADIVbois et sur le bâtiment de formation de l'ESB, un tableau de synthèse a été réalisé et présenté en Tableau 5. La variabilité des résultats a été estimée sur le bâtiment de l'ESB et transposée aux bâtiments objet d'étude. L'estimation de la fréquence se montre précise (CV de 0,46% pour 1 mesure), au contraire de celle de l'amortissement (CV de 10,9% pour 3 mesures). Le tableau montre que la différence entre état Gros Œuvre (GO) et état Finitions (FI) est de l'ordre de 5-10% pour les fréquences, mais cela reste à l'intérieur de l'intervalle de confiance pour l'amortissement.

Une valeur d'amortissement autour de 1,5% à 1,7% est à considérer pour le niveau de sollicitation observé. Un amortissement de 2% serait atteint par extrapolation pour $V_{moy} = 15,4$ m/s.

Tableau 5 : Synthèse des résultats sur les trois bâtiments objet d'étude

Bâtiment	Hauteur	Structure porteuse	Noyau	Plancher	Modes	Fréquence (Hz)	Coeff amortissement (%)	Vent V_{moy} (m/s)
Sensation Plot A	R+11	CLT	CLT	CLT avec chape	Flexion E/O	2,01 ± 0,01	1,78 ± 0,28	2,8 (GO) 2,7 (FI)
		- Murs périphériques			Flexion N/S	2,30 ± 0,01	1,69 ± 0,27	
		- Cloisons			Torsion	-	2,74 ± 0,01	
Sensation Plot C	R+8	CLT	CLT	CLT avec chape	Flexion E/O	2,36 ± 0,01	1,53 ± 0,19	5,0 (GO) 6,6 (FI)
		- Murs périphériques			Flexion N/S	2,54 ± 0,01	1,55 ± 0,19	
		Poteau-poutre			Torsion	-	3,57 ± 0,02	
Pulse	R+7	Poteau-poutre	Béton armé	CLT	Flexion N/S	1,70 ± 0,01	1,49 ± 0,15	5,5
		Voiles béton			Torsion	2,18 ± 0,01	1,08 ± 0,11	
					Flexion E/O	2,47 ± 0,01	1,64 ± 0,16	
Bains-douches	R+8	CLT	CLT	CLT avec chape	Flexion N/S	2,65 ± 0,01	1,72 ± 0,17	3,0

Note : les écarts types sont calculés à partir du coefficient de variation estimé sur le bâtiment de l'ESB (intervalle de confiance à 68%)

Références

- [1] C. Ventura, J.-F. Lord et R. Simspon, «Effective use of ambient vibration measurements for modal updating of a 48 storey building in Vancouver,» chez *International Conference on Structural Dynamics Modeling*, Madeira, 2002.
- [2] C. Rainieiri et G. Fabbrocino, *Operational modal analysis of civil engineering structures*, Springer, 2014.
- [3] S. V. Solutions, «ARTEMIS Modal,» [En ligne]. Available: <http://www.svibs.com>. [Accès le 03 04 2019].
- [4] I. Mugabo, A. Barbosa et M. Riggio, «Modal identification study of a four-story mass-timber building,» chez *World Conference on Timber Engineering*, Seoul, 2018.
- [5] R. Cantieni, «Experimental methodes used in system identification of civil engineering structures,» chez *Problemi di vibrazioni nelle strutture e nelle costruzioni meccaniche*, Perugia, 2004.
- [6] K. Mam, F. Consigny, L. Lemagourou, P. Garcia et S. Leneve, «Rapport de l'étude bibliographique sur l'amortissement des bâtiments bois de grande hauteur,» 2018.
- [7] L. Martin et S. Schneider, «Spectral density matrices used to characterize vibration environments,» *Sound & Vibrations*, 2017.
- [8] R. Brincker, L. Zhang et P. Andersen, «Modal identification from ambient responses using frequency domain decomposition,» chez *IMAC XVIII*, San Antonio, 2000.
- [9] R. Allemang, «The modal assurance criterion - Twenty years of use and abuse,» chez *IMAC XX*, Los Angeles, 2002.

Partie II : Bâtiment Sensation (Strasbourg)

Cette partie présente les résultats obtenus sur deux bâtiments du projet Sensations à Strasbourg (Plot A et Plot C). Le tableau ci-dessous montre une synthèse des résultats en fréquence et coefficient d'amortissement pour les deux bâtiments en l'état Gros Œuvre (GO) et en l'état Finition (FI). Les écarts types sont calculés à partir du coefficient de variation estimé sur le bâtiment de l'ESB avec un intervalle de confiance à 68%.



Source : Bouygues Immobilier

Bâtiment	Hauteur	Structure porteuse	Noyau	Plancher	Modes	Fréquence (Hz)		Coeff amortissement (%)		Vent V_{moy} (m/s)
Sensation Plot A	R+11	CLT - Murs périphériques - Cloisons	CLT	CLT avec chape	Flexion E/O	$2,01 \pm 0,01$	$1,96 \pm 0,01$	$1,78 \pm 0,28$	$1,57 \pm 0,17$	2,8 (GO) 2,7 (FI)
					Flexion N/S	$2,30 \pm 0,01$	$2,17 \pm 0,01$	$1,69 \pm 0,27$	$1,49 \pm 0,16$	
					Torsion	-	$2,74 \pm 0,01$	-	$1,80 \pm 0,20$	
Sensation Plot C	R+8	CLT - Murs périphériques Poteau-poutre	CLT	CLT avec chape	Flexion E/O	$2,36 \pm 0,01$	$2,64 \pm 0,01$	$1,53 \pm 0,19$	$1,66 \pm 0,18$	5,0 (GO) 6,6 (FI)
					Flexion N/S	$2,54 \pm 0,01$	$2,91 \pm 0,01$	$1,55 \pm 0,19$	$1,36 \pm 0,15$	
					Torsion	-	$3,57 \pm 0,02$	-	$1,77 \pm 0,19$	

1. Bâtiments étudiés

Le premier bâtiment objet d'étude fait partie de l'îlot bois Sensations construit à Strasbourg. Le projet se compose de 146 logements et commerces répartis sur 3 bâtiments (Plots) : le Plot A en R+11 et les Plots B et C en R+8 (Figure 19). Il s'agit du plus haut immeuble aujourd'hui construit en France 100% bois : reposant sur un socle en béton, les planchers, les façades, les noyaux d'ascenseur et d'escaliers sont entièrement en bois. La structure est constituée d'une façade porteuse et de planchers en CLT, associés à un système poteau-poutre en bois lamellé-collé. L'épaisseur des panneaux des murs se réduit avec la hauteur des bâtiments. L'îlot se trouve en zone sismique.

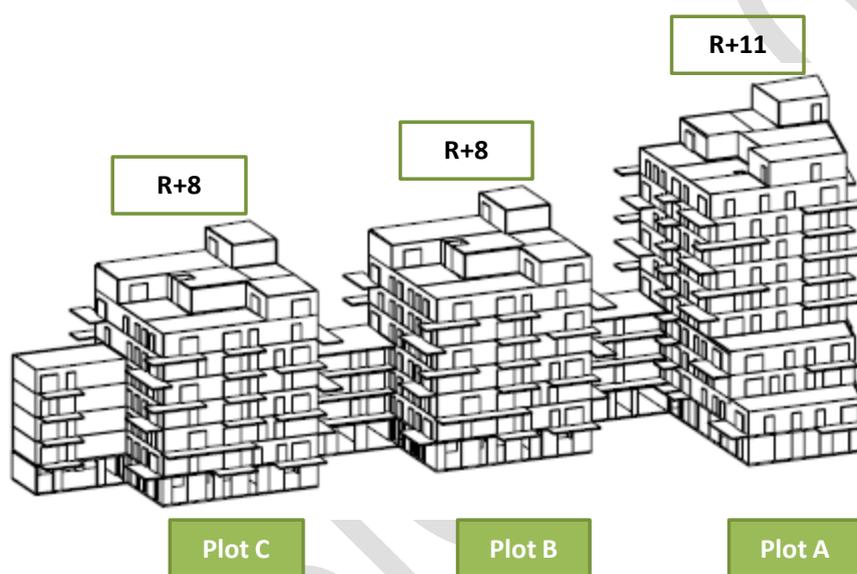


Figure 19 : Vue d'ensemble des 3 bâtiments constituant l'îlot bois

Le bâtiment initialement identifié pour les mesures in-situ était le Plot A, car le plus haut, avec une hauteur de 38 m. Le bâtiment étant en construction, la mission prévoyait une mesure intermédiaire en phase chantier, idéalement à la fin du montage du Gros Œuvre bois seul (état GO), et une deuxième à la fin de la réalisation du second œuvre, avant livraison (état FI (Finition)).

Suite à une première analyse des plans, à une visite sur place et aux échanges avec les responsables du projet, des différences significatives ont été mises en évidence entre le Plot A et le Plot C (Tableau 6).

Tableau 6 : Description des structures des plots A et C

Plot A	Plot C
<p><i>Plan et élévation</i> : bâtiment en R+11 de plan trapézoïdal (Figure 20) et surfaces se réduisant en élévation (Figure 21). Sa forme et sa hauteur ont donc nécessité l'ajout de cloisons internes porteuses en CLT afin de conférer au bâtiment une raideur suffisante</p>	<p><i>Plan et élévation</i> : bâtiment en R+8 de forme rectangulaire (Figure 22) et se réduisant en surface uniquement au dernier étage. Le plan reste ainsi libre de cloisons porteuses</p>
<p><i>Principe constructif</i> : constitué d'une façade porteuse, d'un noyau central, de cloisons porteuses et de planchers en CLT</p>	<p><i>Principe constructif</i> : constitué d'une façade porteuse, d'un noyau central et de planchers en CLT, associés à un système poteau-poutre à l'intérieur (Figure 23)</p>

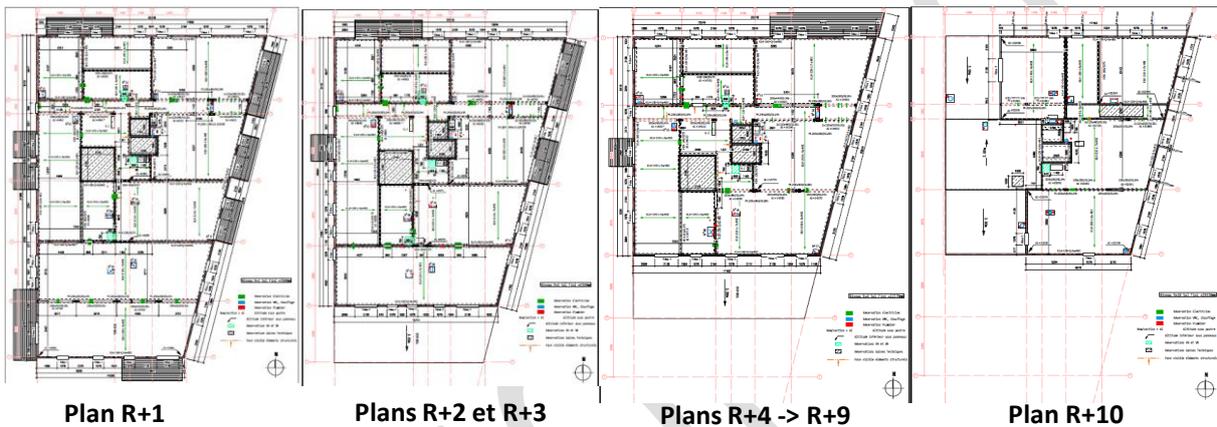


Figure 20 : Plans des différents étages du Plot A montrant la forme trapézoïdale du bâtiment, ainsi que la surface se réduisant du RDC au R+10 (Source : DCE)



Figure 21 : Coupe du Plot A montrant l'irrégularité en élévation (Source : AltBois)

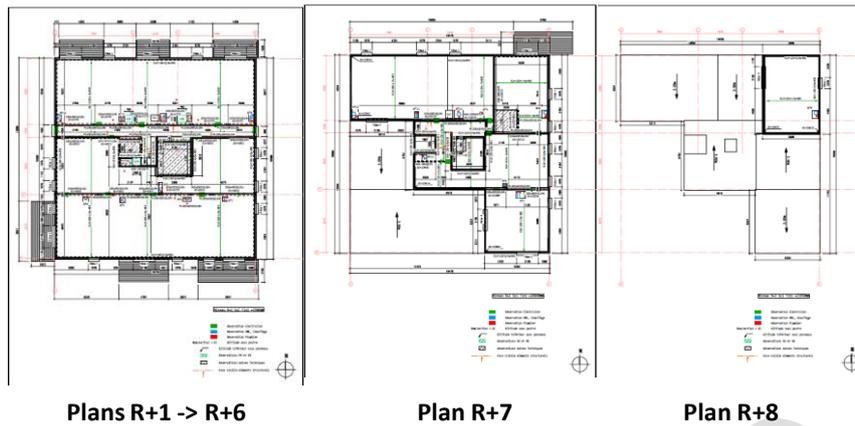


Figure 22 : Plans des différents étages du Plot C montrant la forme trapézoïdale du bâtiment, ainsi que la surface se réduisant du RDC au R+8 (Source : DCE)



Figure 23 : Système poteau-poutre entre façade et noyau utilisé pour le Plot C (Source : Bois HD)

Le Tableau 7 présente les états d'avancement du Plot A aux deux périodes auxquelles ont été réalisées les mesures.

Tableau 7 : Etat d'avancement du chantier aux moments des mesures (Plot A)

Etat GO : Juillet 2018 (Figure 24)	Etat FI : Mai 2019 (Figure 25)
<ul style="list-style-type: none"> • Second œuvre posé du R+1 au R+6 ; • Chape en béton des planchers pas coulée ; • Platinas d'assemblage extérieures, nécessaires pour assurer la liaison entre les panneaux de CLT, en cours d'installation ; • Balcons posés ; • Bardage extérieur et isolation pas posés. 	<ul style="list-style-type: none"> • Bâtiment fini du R+1 au R+11 ; • RDC encore ouvert ; • Finitions en cours (peinture, sols, etc.).



Figure 24 : Etat d'avancement du chantier du Plot A en juillet 2018 (Source : Bois HD)



Figure 25 : Etat d'avancement du chantier du Plot A en mai 2019 (Source : Bois HD)

Le Tableau 8 présente les états d'avancement du Plot C aux deux périodes auxquelles ont été réalisées les mesures.

Tableau 8 : Etat d'avancement du chantier aux moments des mesures (Plot C)

Etat GO : Juillet 2018 (Figure 26)	Etat FI : Mai 2019 (Figure 27)
<ul style="list-style-type: none"> • Second œuvre pas posé ; • Chape en béton des planchers pas coulée ; • Platines d'assemblage extérieures nécessaires pour assurer la liaison entre les panneaux de CLT, en cours d'installation ; • Balcons pas posés ; • Bardage extérieur et isolation pas posés. 	<ul style="list-style-type: none"> • Second œuvre posé ; • Chape en béton des planchers coulée ; • Platines d'assemblage extérieures installées ; • Balcons posés ; • Bardage extérieur et isolation posés ; • Sols pas posés ; • Peintures en cours.



Figure 26 : Etat d'avancement du chantier du Plot C en juillet 2018 (Source : Bois HD)



Figure 27 : Etat d'avancement du chantier du Plot C en mai 2019 (Source : Bois HD)

Les mesures ont concerné le Plot A et le Plot C, contrairement à ce qui était initialement prévu par la mission ADIVbois. En effet, l'avancement des travaux sur le Plot A et son système constructif « hybride » avec des cloisons porteuses, à cause de son hauteur et sa forme, le rendaient moins adapté à une extrapolation des données visant à donner des préconisations d'ordre générale sur des bâtiments similaires. Bois HD a ainsi considéré plus opportun de réaliser les mesures aussi sur le Plot C, plus bas mais jugé plus représentatif du comportement d'un bâtiment en noyau et façades en CLT en gros œuvre bois complété, ce qui correspondait plus à la configuration en phase chantier demandée. Cette décision a été au préalable soumise à la Commission Technique d'ADIVbois pour validation.

2. Campagnes de mesures

Chacun des bâtiments a fait l'objet de deux campagnes de mesures. La première en juillet 2018 lorsque le Gros Œuvre (GO) était terminé. La seconde en mai 2019 lorsque les Finitions (FI) étaient en cours de finalisation, peu de temps avant la livraison des bâtiments. On utilise dans la suite GO et FI pour décrire ces deux états. Toutes les mesures ont été réalisées avec une fréquence d'échantillonnage de 100 Hz.

Un anémomètre a été installé sur la toiture du R+10. Lors des mesures de juillet 2018 (GO), sa fréquence d'échantillonnage était de 1 Hz, ce qui fournit des données suffisamment riches pour en déduire la vitesse moyenne (V_{moy}), la direction dominante ($DirD$), la vitesse maximale (V_{pic}) et la direction correspondant à V_{pic} ($DirP$). Lors des mesures de mai 2019 (FI), la fréquence d'échantillonnage était de 0,1 Hz. En élargissant la fenêtre d'étude à environ une heure, on peut estimer une valeur de V_{moy} , mais pas les autres paramètres.

2.1. Plot A

Le Tableau 9 liste l'ensemble des mesures réalisées sur le Plot A en précisant les dates, heures (de début) et durées de chaque mesure, ainsi que les caractéristiques de l'effort du vent agissant sur le bâtiment lors des mesures. Pour ne pas alourdir la lecture du rapport, les figures illustrant les positions des accéléromètres pour chaque mesure sont proposées en Annexe 1 (page 51).

Tableau 9 : Conditions des mesures réalisées sur le Plot A

Etat	Mesure	Date	Heure	Durée	V_{moy}	$DirD$	V_{pic}	$DirP$	Figure	Note
GO	1	09/07/18	21h02	36	2,8	ESE	7,3	OSO	Figure 46	a
FI	1	13/05/19	20h54	30	2,5	-	-	-	Figure 47	b
	2	14/05/19	09h41	30	3,0	-	-	-	Figure 48	c
	3	14/05/19	12h05	30	-	-	-	-	Figure 49	d

Durée en minutes ; V_{moy} : vitesse moyenne (m/s) ; **DirD**: direction dominante (points cardinaux, ex ESE = Est-Sud Est) ; V_{pic} : vitesse au pic, en rafale (m/s) ; **DirP**: direction lors de V_{pic} .

Observations complémentaires :

- Bâtiment non occupé
- Bâtiment non occupé
- Bâtiment occupé (peintres, plombiers et aménagements intérieurs divers) sauf au R+6 et R+9 qui ont été condamnés le temps de la mesure
- Bâtiment non occupé (pause déjeuner)

2.2. Plot C

Sur le même modèle que pour le Plot A, le Tableau 10 reprend les informations pour les mesures sur le Plot C.

Tableau 10 : Conditions des mesures réalisées sur le Plot C

Etat	Mesure	Date	Heure	Durée	V_{moy}	DirD	V_{pic}	DirP	Figure	Note
GO	1	10/07/18	12h59	48	5,0	ESE	17,3	ONO	Figure 50	a
	2	10/07/18	18H41	60	5,0	SE	15,1	ENE	Figure 51	b
FI	1	13/05/19	12h40	30	6,6	-	-	-	Figure 52	c
	2	13/05/19	18h26	30	7,3	-	-	-	Figure 53	d
	3	13/05/19	15h36	30	6,3	-	-	-	Figure 54	e

Cf. Tableau 9 pour la légende

Observations complémentaires :

- Bâtiment non occupé (pas de travaux), passages occasionnels de personnes
- Bâtiment non occupé
- Bâtiment non occupé (pause déjeuner)
- Bâtiment non occupé
- Bâtiment occupé (carreleurs, plaquistes et électriciens) au R+2, 3, 4 et 5. Les pièces contenant les accéléromètres étaient condamnées le temps de la mesure

3. Résultats bruts

Les résultats bruts sont des accélérogrammes présentant de très faibles amplitudes, ce qui correspond bien à des sollicitations ambiantes. Pour l'illustration, la Figure 28 montre l'ensemble des accélérogrammes d'une des mesures sur la durée d'acquisition de 30 min. On observe néanmoins que même si le signal est visuellement très bruité (ce qui est normal en

mesure ambiante), des tendances plus marquées peuvent apparaître. C'est le cas des voies 1 et 2 après 1600 s, de la voie 4 sur toute la longueur mais quasiment pas le cas de la voie 5.

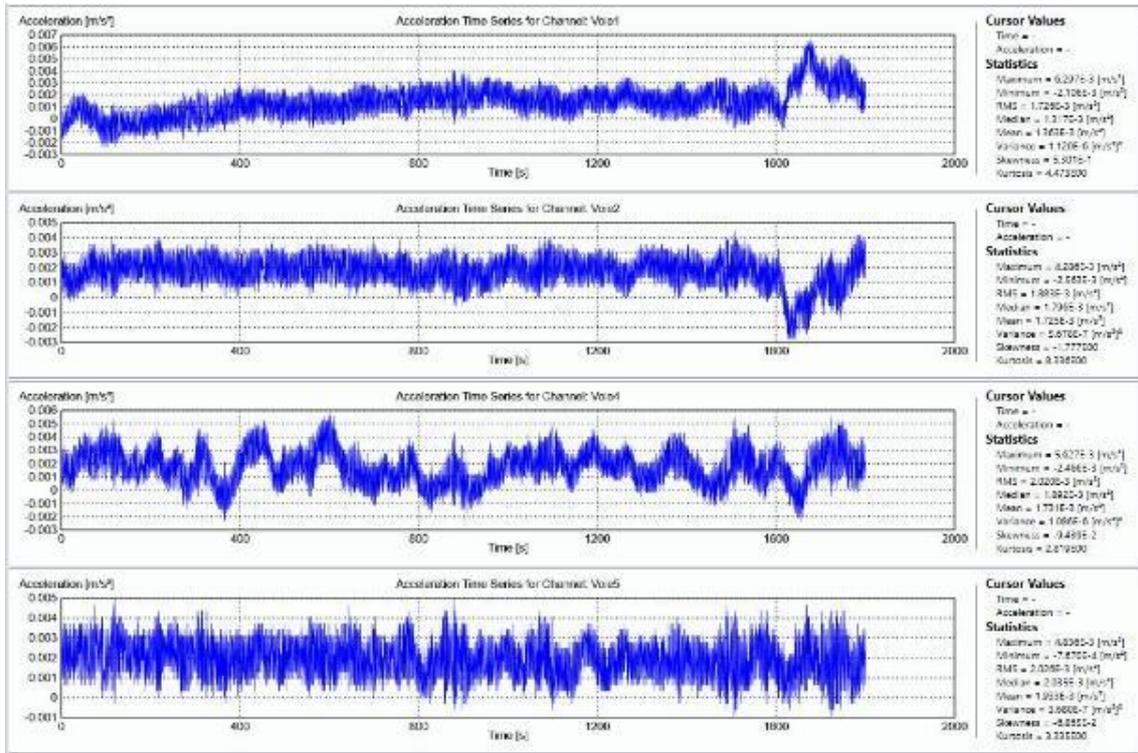


Figure 28 : Mesures brutes des voies 1, 2, 4 et 5 de la mesure Bâtiment A, FI, Mesure 2

Pour limiter les effets indésirables dus à ces tendances (pour la stabilité des méthodes d'analyses qui suivront), le *detrending* (page 8) a servi de prétraitement. La résolution des signaux n'est pas modifiée (page 10). La Figure 29 montre les signaux de la Figure 28 après *detrending*.

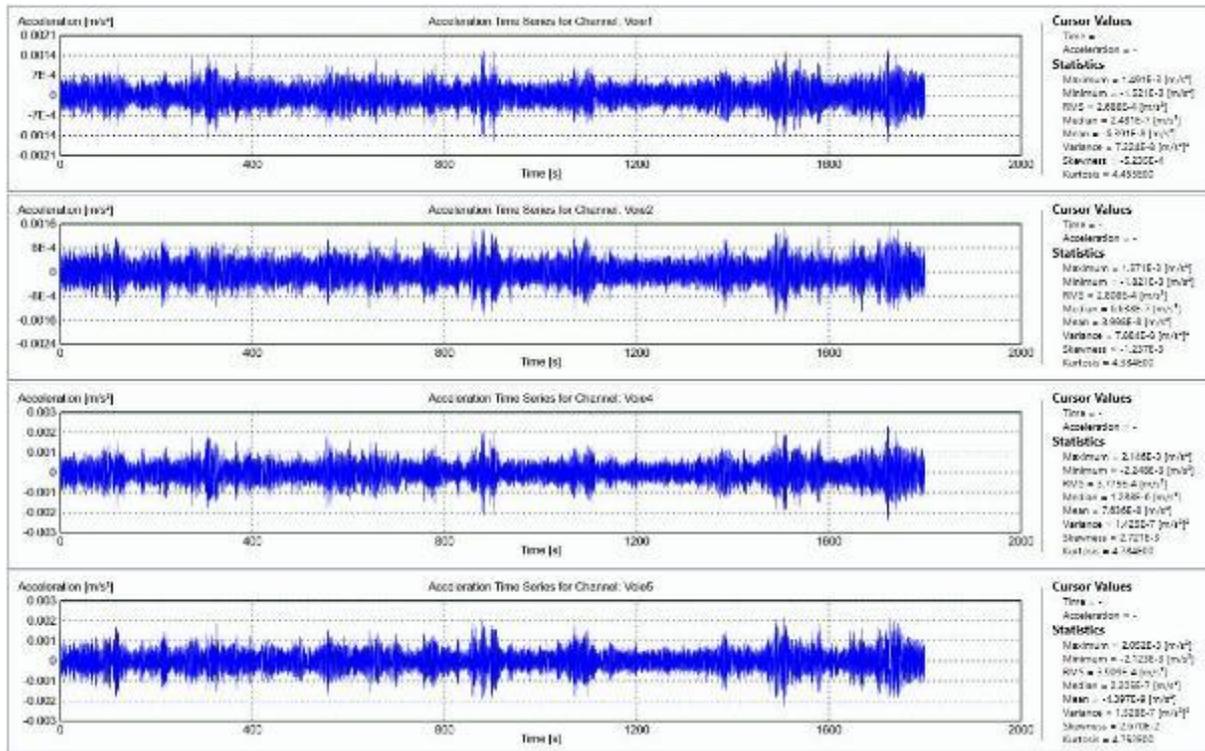


Figure 29 : Mesures prétraitées des voies 1, 2, 4 et 5 de la mesure Bâtiment A, FI, Mesure 2

L'observation de ces signaux montre que, hors pics dus à des chocs à proximité d'un point de mesure (notamment dans les cas où les bâtiments ne sont pas vides lors des mesures), les accélérations ne dépassent pas $0,0044 \text{ m/s}^2$.

4. Analyse des données

4.1. Plot A

Les fréquences propres du Plot A sont données dans le Tableau 11. Les deux premiers modes sont des modes de flexion, dans des directions « environ » orthogonales (visuellement en tout cas). Le 3^{ème} mode n'est détectable que sur le bâtiment fini, il s'agit d'un mode de torsion. Les Figure 30 et Figure 31 permettent de mieux se représenter ces modes.

Tableau 11 : Fréquences propres pour le Plot A

Mode	Déformée	Gros Œuvre (Hz)	Finition (Hz)
1	Flexion Est/Ouest	2,01	1,96
2	Flexion Nord/Sud	2,30	2,17
3	Torsion	-	2,74

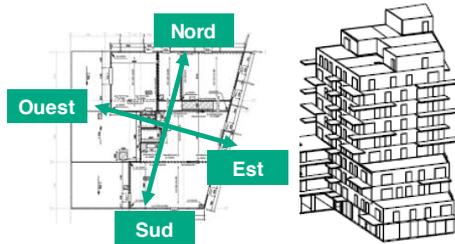


Figure 30 : Points cardinaux

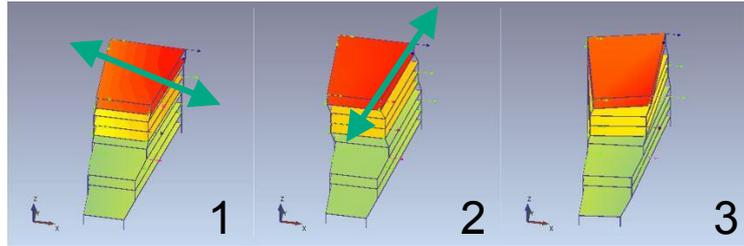


Figure 31 : Visualisations des déformées modales

Les coefficients d'amortissement sont estimés selon les deux méthodes dérivées de la FDD, l'EFDD et la CFDD. Le Tableau 12 montre que, même si toutes les valeurs sont différentes, l'ordre de grandeur est le même. On ne distingue pas de tendance entre les deux méthodes d'analyse, l'une sous ou surestime en fonction des cas.

Tableau 12 : Coefficients d'amortissement pour le Plot A

Mode	Méthode	Gros Œuvre (%)	Finition (%)
1	EFDD	1,78	1,57
	CFDD	1,37	1,27
2	EFDD	1,69	1,49
	CFDD	1,34	1,42
3	EFDD	-	1,80
	CFDD	-	1,36

4.2. Plot C

Les fréquences propres du Plot C sont données dans le Tableau 13. Comme pour le Plot A, les deux premiers modes sont des modes de flexion, dans des directions « environ » orthogonales (visuellement en tout cas). Le 3^{ème} mode n'est détectable que sur le bâtiment fini, il s'agit d'un mode de torsion.

Tableau 13 : Fréquences propres pour le Plot C

Mode	Déformée	Gros Œuvre (Hz)	Finition (Hz)
1	Flexion Est/Ouest	2,36*	2,64
2	Flexion Nord/Sud	2,54*	2,91
3	Torsion	-	3,57

* : Voir commentaires ci-dessous.

Les Figure 32 et Figure 33 permettent de mieux se représenter ces modes, ces figures correspondent à l'état FI. En effet, il est à noter que les mesures à l'état GO étaient les toutes premières réalisées. On peut voir en Annexe 1 (Figure 50 et Figure 51, pages 55 et 56) que le point de mesure servant de référence a été légèrement déplacé entre les deux mesures (pour des raisons de longueur de câbles) ; cet écart n'est pas pris en compte dans la géométrie servant de base pour l'analyse. De plus, les signaux en eux-mêmes présentent des tendances fortes, que le prétraitement standard réalisé dans cette étude (cf. §3, page 34) ne suffit pas à

corriger. Pour cette raison, les résultats pour l'état GO sont à prendre avec précaution, car leurs déformées modales présentent en certains cas des incohérences (déformation des diaphragmes horizontaux importante sur les modes de flexion). On pourra observer néanmoins que les valeurs de fréquences et d'amortissement ne semblent pas pour autant incohérentes, en tout cas en termes d'ordre de grandeur. Les coefficients d'amortissement sont donnés dans le Tableau 14. Le coefficient d'amortissement pour le mode 2, sur l'état FI avec la méthode CFDD n'a pas pu être identifié. En effet, cette méthode est très sensible à la forme de la *Bell function*, et sur ce cas particulier, aucun *fitting* satisfaisant n'a pu être trouvé, quel que soit la valeur du nombre MAC utilisé pour définir l'intervalle *Bell function*.

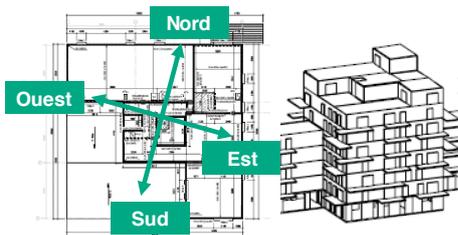


Figure 32 : Points cardinaux

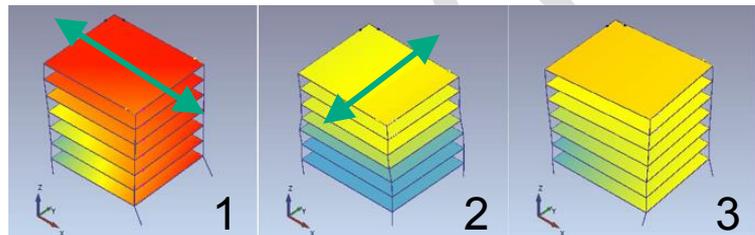


Figure 33 : Visualisations des déformées modales

Tableau 14 : Coefficients d'amortissement pour le Plot C

Mode	Méthode	Gros Œuvre (%)	Finition (%)
1	EFDD	1,53*	1,66
	CFDD	1,14*	2,24
2	EFDD	1,55*	1,36
	CFDD	1,30*	1,60
3	EFDD	-	1,77
	CFDD	-	2,13

* : Voir commentaires précédent.

Partie III : Bâtiment Pulse (Saint Denis)

Cette partie présente les résultats obtenus sur le bâtiment Pulse, en synthèse dans le tableau ci-dessous. Les écarts types sont calculés à partir du coefficient de variation estimé sur le bâtiment de l'ESB avec un intervalle de confiance à 68%.



Source : Bois HD

Bâtiment	Hauteur	Structure porteuse	Noyau	Plancher	Modes	Fréquence (Hz)	Coeff amortissement (%)	Vent V_{moy} (m/s)
Pulse	R+7	Poteau-poutre Voiles béton	Béton armé	CLT	Flexion N/S	1,70 ± 0,01	1,49 ± 0,15	5,5
					Torsion	2,18 ± 0,01	1,08 ± 0,11	
					Flexion E/O	2,47 ± 0,01	1,64 ± 0,16	

1. Bâtiment étudié

L'immeuble Pulse, réalisé à Saint-Denis (93), a été livré en décembre 2018. Il se compose de deux niveaux en sous-sol (parking) et de 7 niveaux, chacun ayant une surface d'environ 3900 m². Il est destiné à accueillir des bureaux, avec des plateaux libres de cloisons pour favoriser les aménagements évolutifs par les utilisateurs (Figure 34). L'immeuble a une empreinte au sol d'environ 100 m x 60 m, ce qui en fait le plus grand immeuble de bureaux ayant reçu le label pilote BBCA. A l'intérieur du bâtiment un atrium ouvert crée un puits de lumière et des espaces dédiés aux services pour le bien-être des utilisateurs (Figure 35).



Figure 34 : Vue d'un étage type de l'immeuble Pulse (Source : Bois HD)



Figure 35 : Vue de l'atrium intérieur (Source : Bois HD)

Il s'agit d'un bâtiment à structure mixte bois-béton : le socle, ainsi que les noyaux d'ascenseur et d'escaliers (en nombre de 4) et la ceinture les reliant sont réalisés en béton (voile et plancher), tandis que les murs extérieurs et les planchers des plateaux sont réalisés en bois (Figure 36). La structure bois est constituée d'une façade porteuse en poteau-poutre (trame de 1,35 m) et de planchers en CLT (portée environ 6 m).

A partir du R+2, sur la façade Nord s'ouvre une grande terrasse (Figure 36) qui casse la régularité en plan du bâtiment et coupe la continuité de la façade. De la même manière, au R+7 uniquement les locaux techniques au-dessus de la ceinture en béton et une salle de réunion sur le côté Nord-Ouest de l'immeuble constituent des surfaces couvertes, le reste de l'espace étant une terrasse et un potager partagés. Pour la réalisation des mesures, on peut donc considérer que le bâtiment est un R+6, avec une petite surface au R+7.

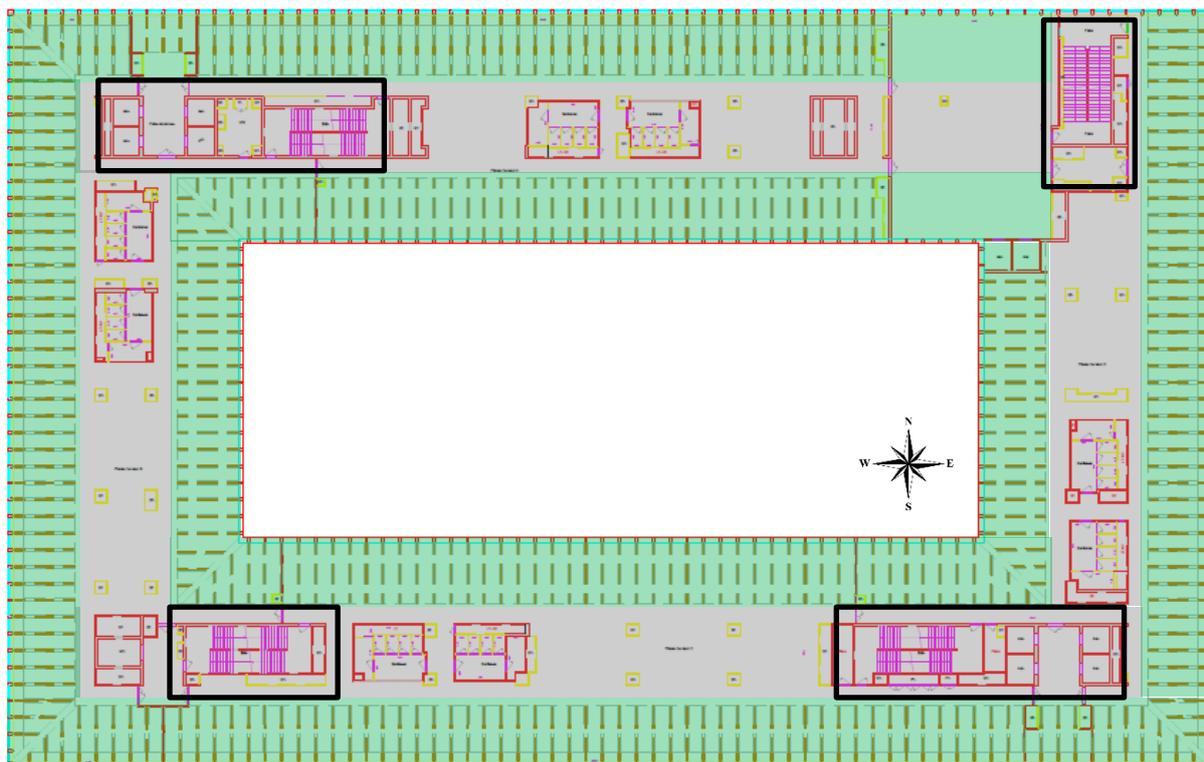


Figure 36 : Plan général d'un étage type avec les noyaux béton en encadré noir, les parties béton en gris et les parties bois en vert (Source : Icade)

Le bâtiment, en raison de ses dimensions importantes, est divisé en 4 parties à travers de joints de dilatation, positionnés à moitié de chaque façade. Chaque partie est dotée d'un noyau en béton armé (cage ascenseur et escaliers) et est structurellement indépendante des autres. Cette hypothèse a été faite pour la réalisation des mesures et a été ensuite confirmée par les résultats de l'analyse (cf. Partie III, §3). Le joint de dilatation est réalisé sur les façades intérieure (Figure 37) et extérieure (Figure 38), ainsi que sur le plancher et sur le plafond, à chaque étage. Sur la façade intérieure côté atrium, un deuxième joint de dilatation a été observé, à gauche du précédent (Figure 37). Ce deuxième joint n'est pas continu sur toute la section, il est arrêté au niveau de la ceinture centrale en béton, côté atrium (Figure 39). Dans le cadre de cette mission, il n'a pas donc été considéré comme joint de dilatation d'un point de vue structurel.

Sur le plancher en CLT aucune chape en béton n'est coulée. En effet, le sol de chaque étage est réalisé en plancher flottant, laissant ainsi directement accessible le panneau de CLT lors des mesures.

Le bâtiment était livré au moment de la prise de contact par ADIVbois, mais pas encore en exploitation. Une seule campagne de mesure a donc été organisée à bâtiment fini.



Figure 37 : Vue du joint de dilatation côté atrium
(Source : Bois HD)



Figure 38 : Vue du joint de dilatation façade
extérieure (Source : Bois HD)



Figure 39 : Vue de l'interruption du deuxième joint de dilatation au
niveau de la ceinture centrale en béton côté atrium (Source : Bois HD)

2. Campagne de mesures

Les mesures ont été réalisées le 18 juillet 2019. Le bâtiment était fini (gros œuvre et finition), et complètement vide car pas encore en exploitation. Quatre mesures ont été réalisées dans la journée. Toutes les mesures ont été réalisées avec une fréquence d'échantillonnage de 100 Hz.

Les platines métalliques (Figure 2) ont été utilisées pour la réalisation des mesures en contact direct avec le plancher après avoir retiré le plancher flottant autour des zones de mesures.

En considérant l'hypothèse d'indépendance des 4 parties du bâtiment, les mesures se sont focalisées uniquement sur l'une des 4 parties, celle considérée la plus régulière en plan et en élévation. La Figure 40 montre la maquette 3D de l'immeuble avec la partie Sud-Ouest qui a fait l'objet de l'analyse. La surface couverte par les mesures est d'environ 30 m x 50 m, sur une hauteur de 6 étages.

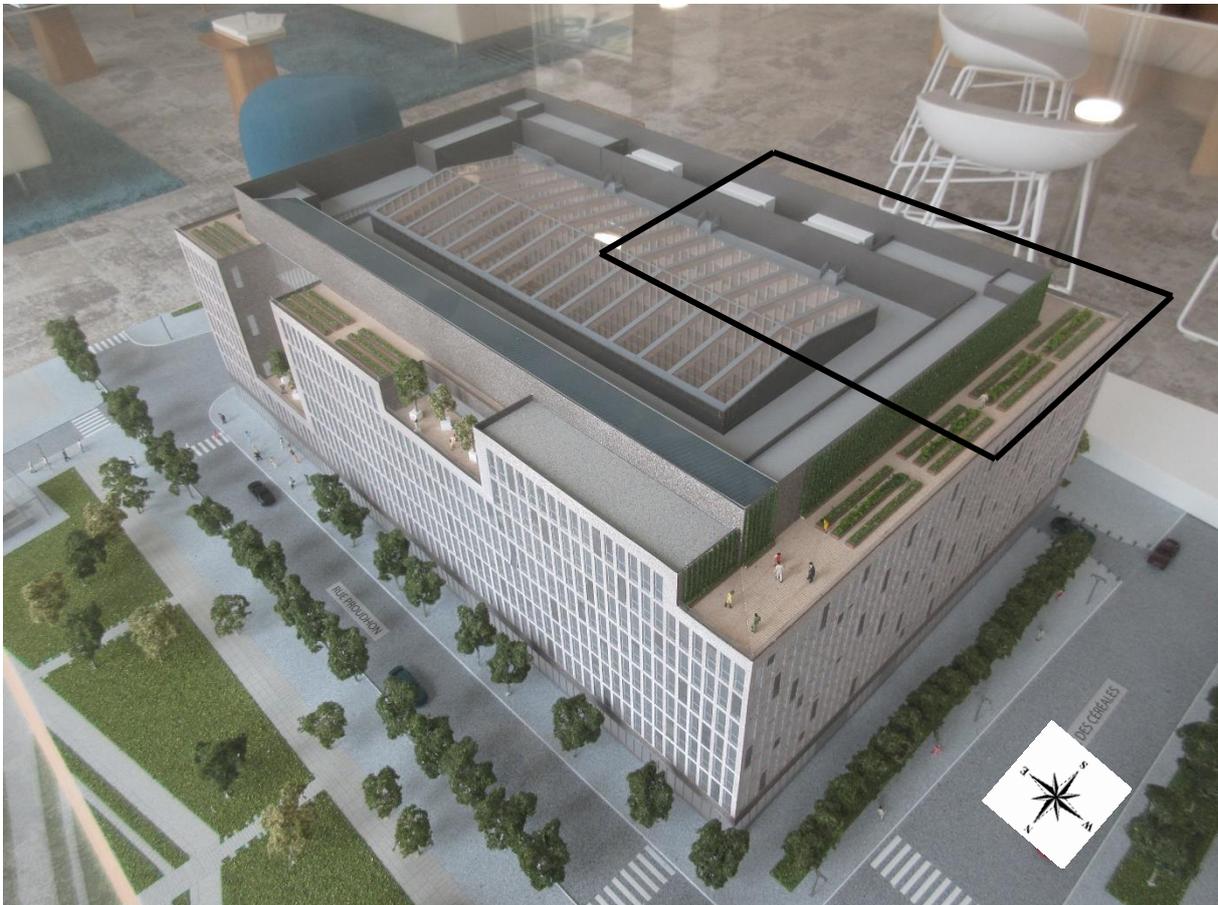


Figure 40 : Photo de la maquette 3D du bâtiment avec positionnement de la zone instrumentée (Source : Bois HD)

Les accéléromètres ont été positionnés sur la partie bois mais aussi sur la partie en béton, afin de pouvoir capter des éventuelles différences de rigidité et avoir une meilleure représentation des déformées modales. Les figures illustrant les positions des accéléromètres pour chaque mesure sont proposées en Annexe 2 (page 60).

Les informations concernant l'effort du vent agissant lors des mesures ont été extraites de la station météo de Le Bourget (93)⁴, située à environ 10 km de distance au Nord-Est du bâtiment. La station météo fournit la vitesse moyenne sur 30 minutes (V_{moy}), qui correspond à la durée d'acquisition des mesures, ainsi que la direction dominante (*DirD*) et la vitesse

⁴ <https://www.infoclimat.fr/observations-meteo/archives/18/juillet/2019/le-bourget/07150.html?metar>

maximale (V_{pic}). L'installation d'un anémomètre sur le toit de l'immeuble n'a pas été considérée nécessaire en raison de la proximité de cette station.

Le Tableau 15 liste l'ensemble des mesures réalisées sur l'immeuble Pulse en précisant les dates, heures (de début) et durées de chaque mesure, ainsi que les caractéristiques de l'effort du vent agissant sur le bâtiment lors des mesures.

Tableau 15 : Conditions des mesures réalisées sur l'immeuble Pulse

Mesure	Date	Heure	Durée	V_{moy}	$DirD$	V_{pic}	Figure	Note
1	18/07/19	11h27	30	5,0	SO	10,0	Figure 55	a
2	18/07/19	13h23	30	6,1	SO	12,0	Figure 56	b
3	18/07/19	15h03	30	7,8	O	-	Figure 57	c
4	18/07/19	16h39	30	3,1	O	8,0	Figure 58	d

Durée en minutes ; V_{moy} : vitesse moyenne (m/s) ; $DirD$: direction dominante (points cardinaux, ex ESE = Est-Sud Est) ; V_{pic} : vitesse au pic, en rafale (m/s).

Observations complémentaires :

- Bâtiment non occupé, uniquement deux personnes au R+6 avec chariot
- Bâtiment non occupé
- Bâtiment non occupé
- Bâtiment non occupé

3. Analyse des données

Les fréquences propres sont données dans le Tableau 16. Le premier est un mode de flexion dans la direction de la faible inertie du bâtiment (Nord/Sud), le second est un mode de torsion et le troisième est en flexion dans la direction de l'axe d'inertie fort (Est/Ouest). La Figure 41 permet de mieux se représenter ces modes. L'observation du mode de torsion permet de valider l'hypothèse que les 4 parties du bâtiment sont structurellement indépendantes. Aucune différence significative n'a été observée entre le comportement dynamique des parties bois et celui des parties en béton. D'un point de vue dynamique, le bâtiment se comporte donc comme un corps rigide.

Tableau 16 : Fréquences propres et coefficient d'amortissement modal (Pulse)

Mode	Déformée	Fréquence (Hz)	Coef. Amor. (%)
1	Flexion Nord/Sud	1,70	1,49
2	Torsion	2,18	1,08
3	Flexion Est/Ouest	2,47	1,64

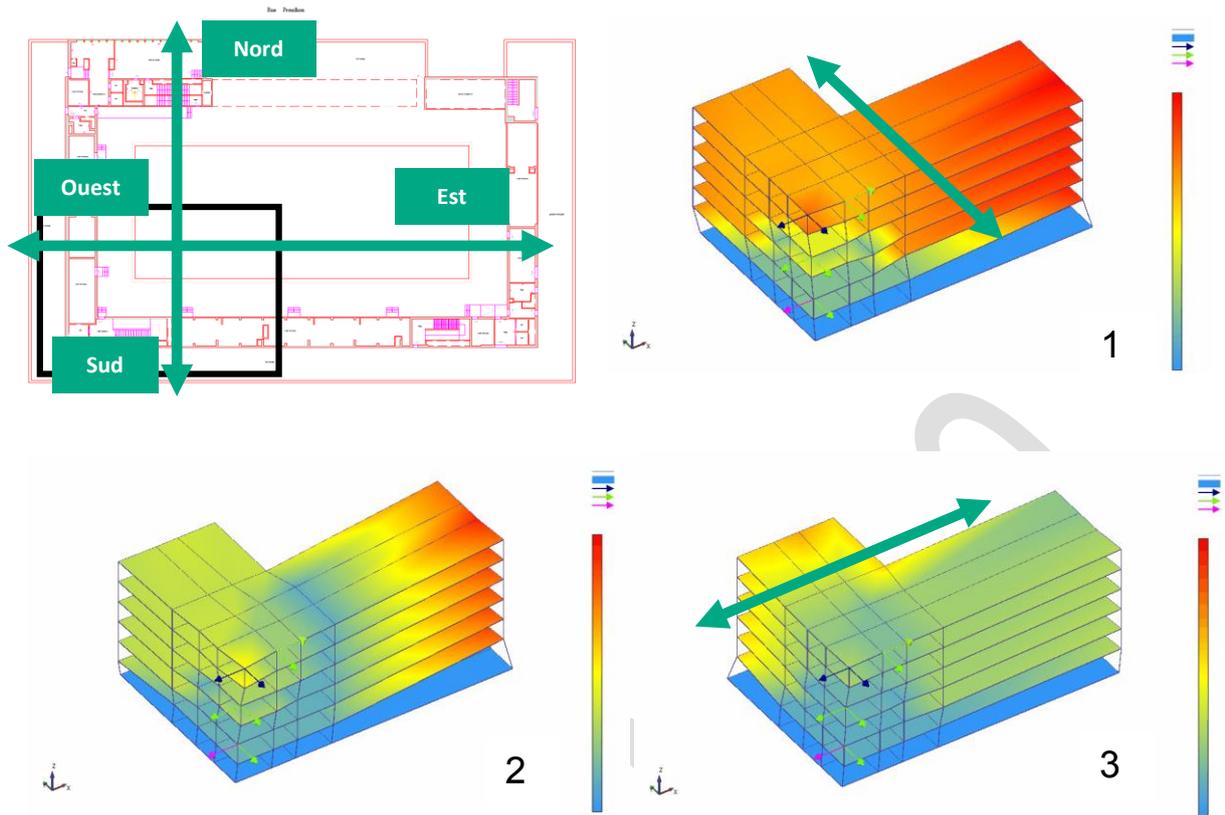


Figure 41 : Points cardinaux et visualisations des déformées modales

Partie IV : Bains-Douches & Co (Paris, 15^e)

Cette partie présente les résultats obtenus sur le bâtiment Bains-Douches & Co situé à Paris (15^e arrondissement), en synthèse dans le tableau ci-dessous. Les écarts types sont calculés à partir du coefficient de variation estimé sur le bâtiment de l'ESB avec un intervalle de confiance à 68%.



Source : Red Architectes

Bâtiment	Hauteur	Structure porteuse	Noyau	Plancher	Modes	Fréquence (Hz)	Coeff amortissement (%)	Vent V_{moy} (m/s)
Bains-douches	R+8	CLT - Murs périphériques Poteau-poutre	CLT	CLT avec chape	Flexion N/S	2,65 ± 0,01	1,72 ± 0,17	3,0

1. Bâtiment étudié

L'immeuble Bains-douches Castagnary, réalisé à Paris dans le 15^e arrondissement, est un projet associant un ancien bâtiment des années '30 en proue de la parcelle et un programme neuf sur son arrière (Figure 42). Ce bâtiment arrière sera dévolu à de la colocation, tandis que l'édifice historique maintenu sera transformé en espaces tertiaires (coworking). L'immeuble de logements est réalisé en bois, pour un total de 1700 m² de surface, répartie en 17 logements totalisant 56 chambres. Il se compose de deux niveaux en sous-sol (parking) et de 8 niveaux de logements. Le bâtiment est en livraison pour fin 2019.



Figure 42 : Photo de l'ensemble du programme, l'ancien bâtiment en briques et l'immeuble en bois à l'arrière (Source : Bois HD)

Le principe constructif utilisé consiste en l'emploi de panneaux massifs de CLT pour la réalisation des murs extérieurs, de la cage ascenseur et escaliers et des planchers, du R+1 au R+8, sur un socle en béton. Complète la structure porteuse un système poteau-poutre en bois lamellé-collé à l'intérieur du bâtiment, avec des sections se réduisant avec la hauteur (Figure 43). L'ajout de murs porteurs et des poutres supplémentaires à l'intérieur du bâtiment a été nécessaire pour supporter les charges issues de la réduction de surface de plancher aux étages supérieurs (Figure 44). Une chape en béton (non collaborant) vient compléter le complexe de plancher.



Figure 43 : Photo du système poteau-poutre visible dans les logements (Source : Bois HD)

Le bâtiment s'intègre dans une parcelle en dent creuse, ce qui est à l'origine de la forme assez particulière en plan du bâtiment. Comme le montre la Figure 44, le bâtiment a une forme de « V » en plan et il est irrégulière en élévation, la surface de chaque étage se réduisant à partir du R+6.

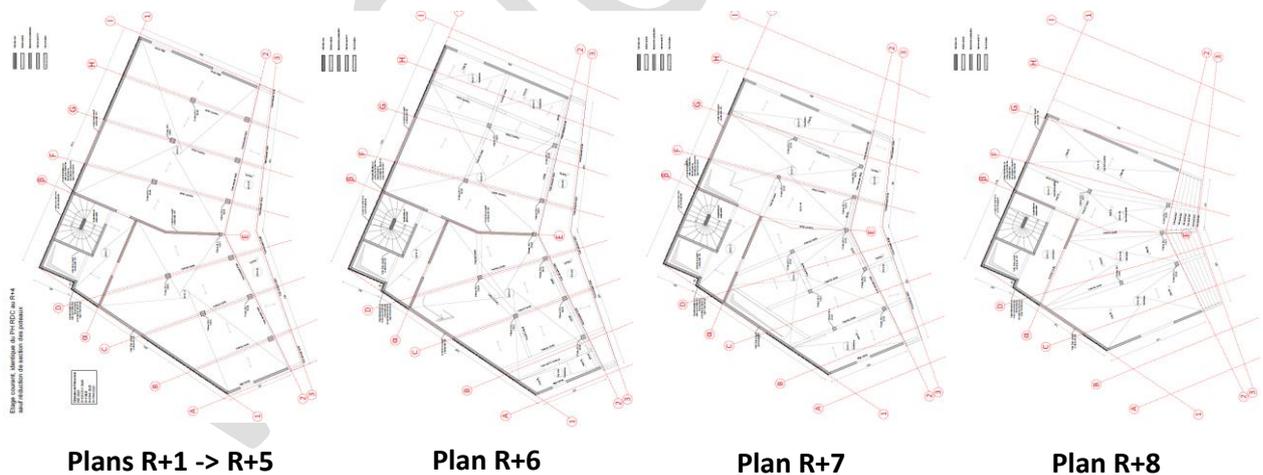


Figure 44 : Plans des différents étages du bâtiment Bains-douches montrant la forme en « V » du bâtiment, ainsi que la surface se réduisant du RDC au R+8 (Source : RED-architectes)

La géométrie du bâtiment a donc nécessité une attention particulière dans le positionnement des points de mesure, pour essayer d'identifier les mouvements du bâtiment autour du noyau rigide central. L'hypothèse de départ est que le bâtiment est structurellement indépendant de l'immeuble existant à l'arrière sur lequel il s'adosse (du côté cage d'escalier). En effet, le Bureau d'études en charge du projet a assuré qu'un joint de désolidarisation est présent entre

les deux bâtiments. Il n'a pas été possible de constater la présence de ce joint sur chantier car il n'était plus visible lors de la première visite.

Le bâtiment était en cours de livraison au moment de la réalisation des mesures, avec une présence de quelques ouvriers pour les finitions. Une seule campagne de mesure a été organisée à bâtiment globalement fini.

2. Campagne de mesures

Les mesures ont été réalisées le 17 juillet 2019. Le bâtiment était à la fin de la phase de finition, il était principalement occupé par des peintres et des électriciens au moment des mesures. Quatre mesures ont été réalisées dans la journée. Toutes les mesures ont été réalisées avec une fréquence d'échantillonnage de 100 Hz.

Les platines métalliques (Figure 2) ont été utilisées pour la réalisation des mesures en contact direct du sol fini.

Les figures illustrant les positions des accéléromètres pour chaque mesure sont proposées en Annexe 3 (page 64).

Les informations concernant l'effort du vent agissant lors des mesures ont été extraites de la station météo de Montsouris (75)⁵, située à environ 3 km de distance au Sud-Est du bâtiment. La station météo fournit la vitesse moyenne sur 1 heure (V_{moy}), ainsi que la direction dominante ($DirD$) et la vitesse maximale (V_{pic}). L'installation d'un anémomètre sur le toit de l'immeuble n'a pas été considérée nécessaire en raison de la proximité de cette station et du faible effet du vent dans une catégorie de terrain de type IV (zone urbaine comprenant des bâtiments avec hauteur moyenne supérieure à 15 m).

Le Tableau 17 liste l'ensemble des mesures réalisées sur l'immeuble Bains-douches Castagnary en précisant les dates, heures (de début) et durées de chaque mesure, ainsi que les caractéristiques de l'effort du vent agissant sur le bâtiment lors des mesures.

Tableau 17 : Conditions des mesures réalisées sur l'immeuble Bains-douches Castagnary

Mesure	Date	Heure	Durée	V_{moy}	$DirD$	V_{pic}	Figure	Note
1	17/07/19	15h56	30	3,1	ONO	10,0	Figure 59	a
2	17/07/19	11h28	30	1,9	N	6,0	Figure 60	b
3	17/07/19	13h55	30	3,9	O	8,0	Figure 61	c
4	17/07/19	17h07	30	3,1	ONO	9,0	Figure 62	d

⁵ <https://www.infoclimat.fr/observations-meteo/archives/17/juillet/2019/paris-montsouris/07156.html>

Durée en minutes ; V_{moy} : vitesse moyenne (m/s) ; **DirD**: direction dominante (points cardinaux, ex ESE = Est-Sud Est) ; V_{pic} : vitesse au pic, en rafale (m/s).

Observations complémentaires :

- Bâtiment non occupé au R+6 (étage de mesures), travaux au R+7 sur escalier et plancher
- Bâtiment occupé au R+6 (escalier). Les pièces contenant les accéléromètres au R+4 et R+8 étaient condamnées le temps de la mesure. Ressenti de vibration (trafic/météo)
- Bâtiment non occupé, travaux de pelle mécanique au RDC (extérieur). Les pièces contenant les accéléromètres au R+2, 4 et 6 étaient condamnées le temps de la mesure
- Bâtiment non occupé

3. Analyse des données

Les fréquences propres sont données dans le Tableau 18. Un seul mode est identifié sur ce bâtiment. Sur la Figure 45 (qui illustre sa déformée modale) la flèche légèrement arrondie désigne le fait qu'il s'agit principalement d'un mode de flexion mais que l'on distingue aussi une légère torsion. La direction de ce mode est relativement proche de la direction Est-Ouest.

Tableau 18 : Fréquences propres coefficient d'amortissement modal (Bains-Douches)

Mode	Déformée	Fréquence (Hz)	Coef. Amor. (%)
1	Flexion Nord/Sud	2,65	1,72

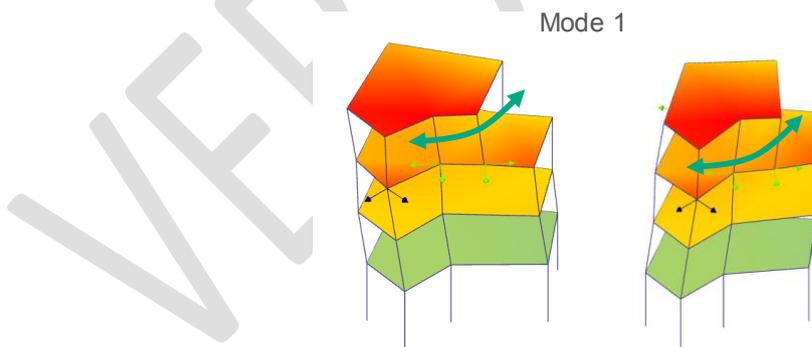


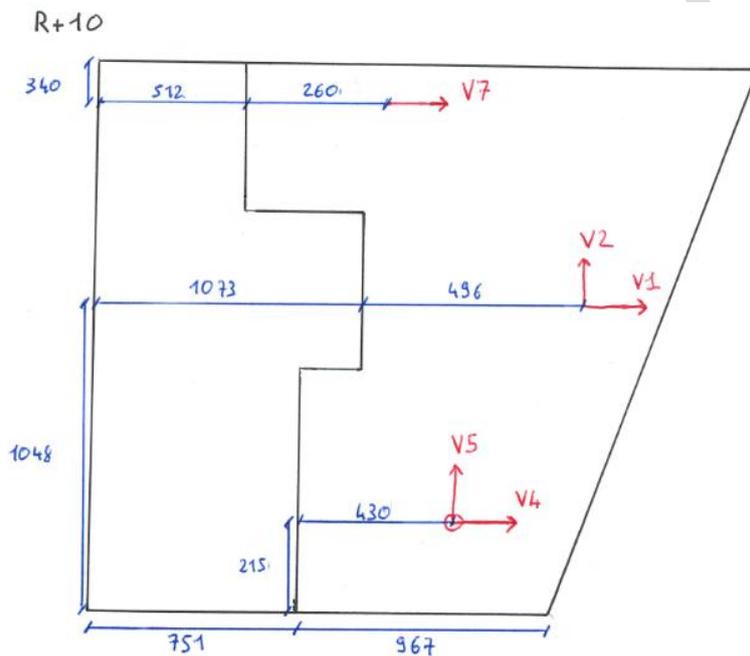
Figure 45 : Visualisation de la déformée modale du 1^{er} mode (2 positions extrêmes représentées)

Il n'a pas été possible d'identifier d'autres modes sur ce bâtiment, probablement en raison de sa géométrie. Les autres pics identifiables manuellement ne sont pas associés à des formes modales cohérentes.

Annexes

1. Bâtiments Sensation (Strasbourg)

Les figures ci-dessous schématisent les positions des accéléromètres pour chacune des mesures réalisées sur les bâtiments A et C. Un accéléromètre est représenté par une flèche, noté Vx, x représentant le numéro de la voie du système d'acquisition (lorsque présent, les termes Ax, Sx et Tx donnent des informations sur les accéléromètres ou les câbles utilisés, ces informations ne sont pas détaillées ici). Pour chaque schéma, les dimensions sont en centimètres.



V7

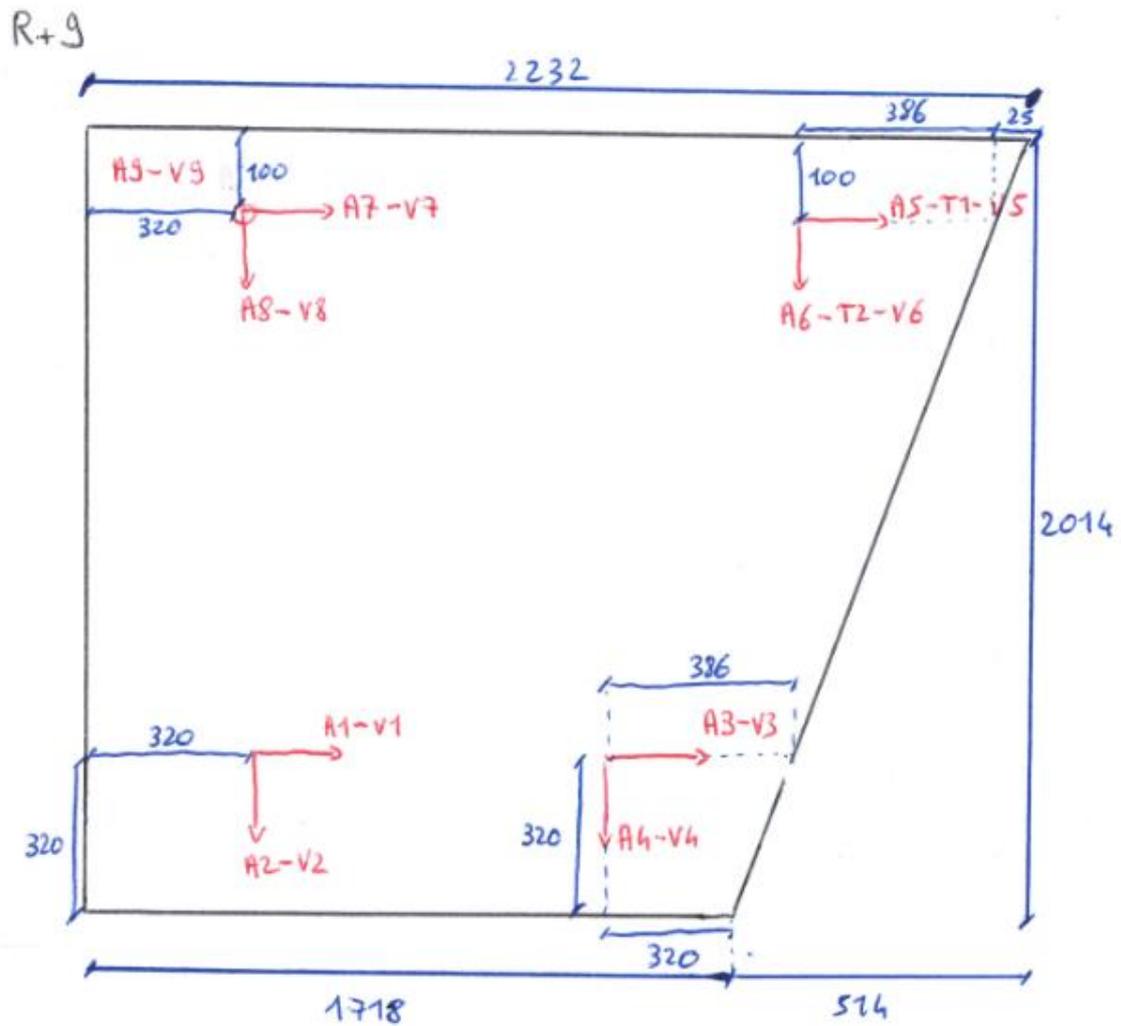


V1-V2



V4-V5

Figure 46 : Bâtiment A, Gros Œuvre, Mesure 1



V7-V8



V5-V6

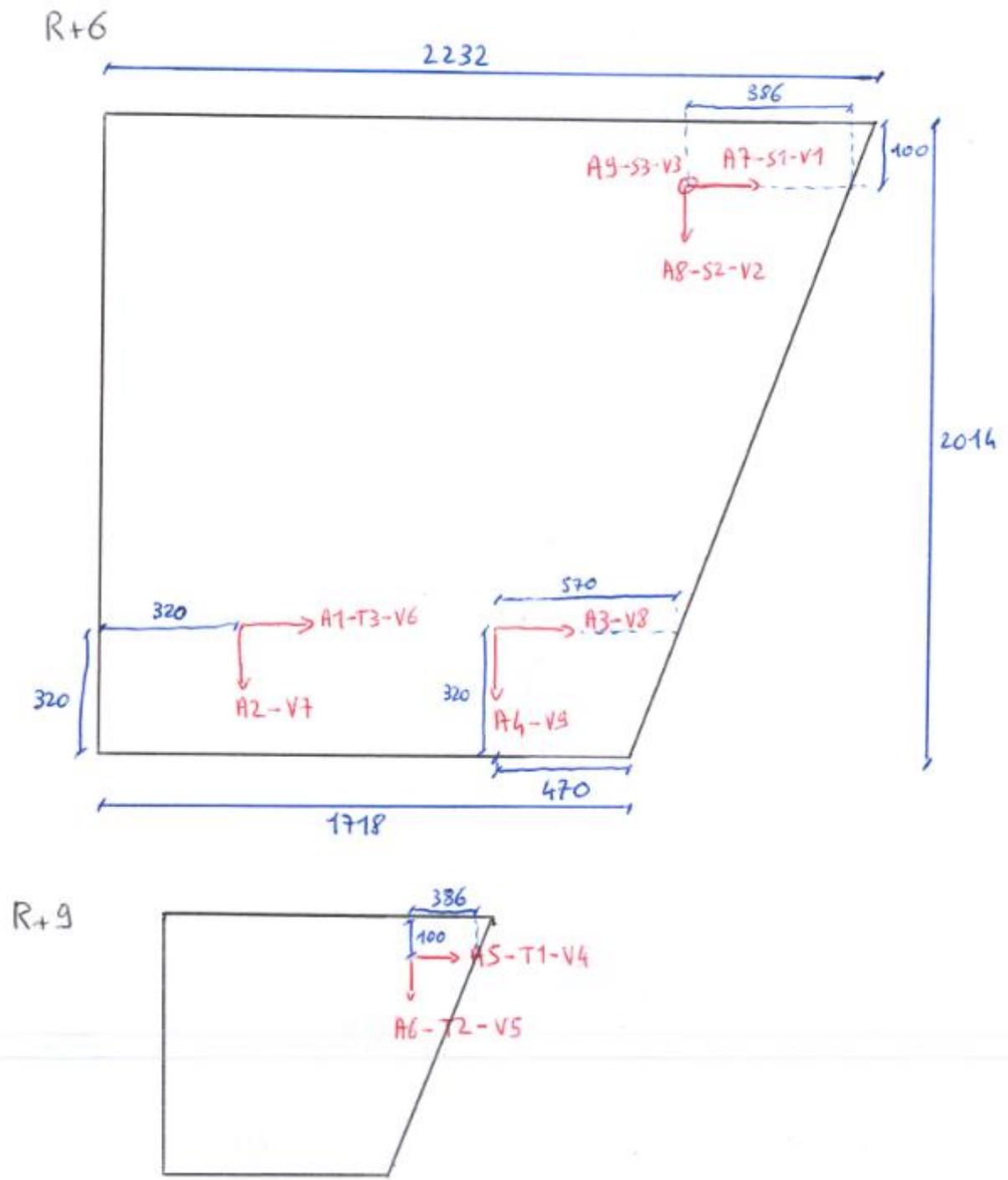


V3-V4



V1-V2

Figure 47 : Bâtiment A, Finition, Mesure 1



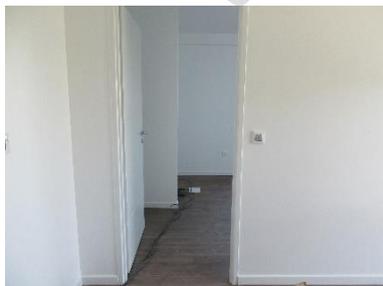
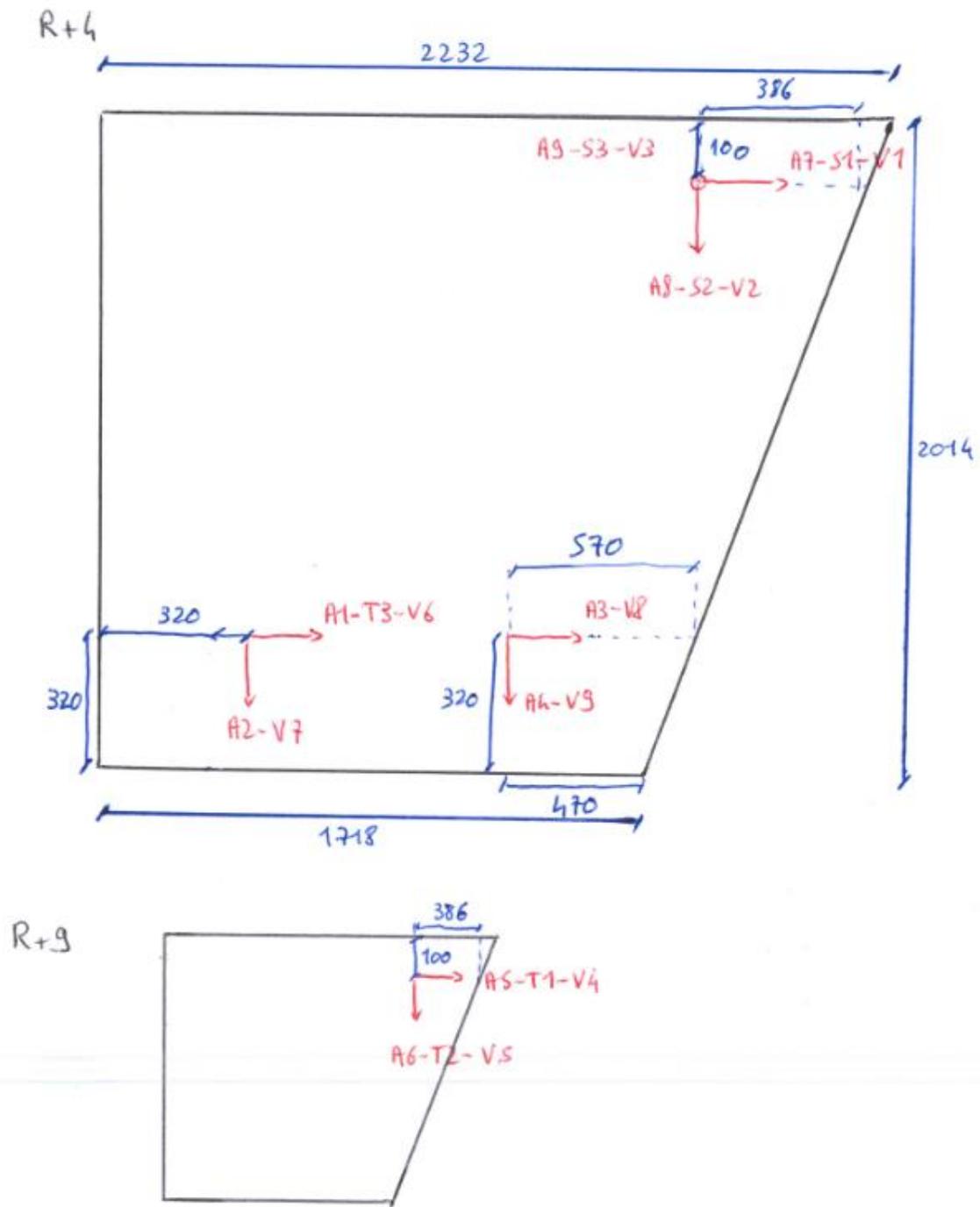
V1-V2

V8-V9

V6-V7

V4-V5

Figure 48 : Bâtiment A, Finition, Mesure 2



V1-V2

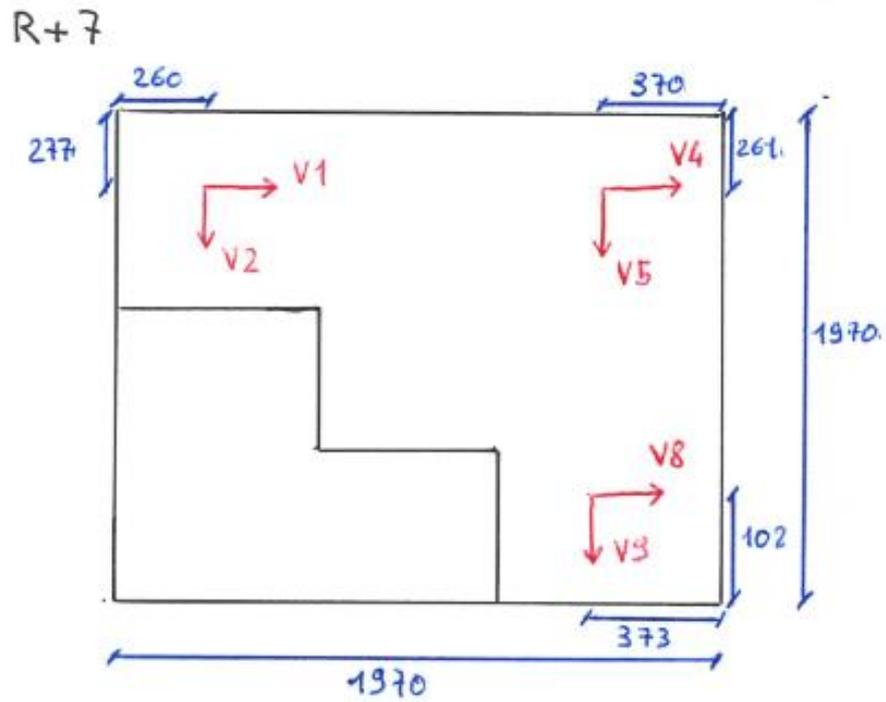


V8-V9



V6-V7

Figure 49 : Bâtiment A, Finition, Mesure 3



V1-V2



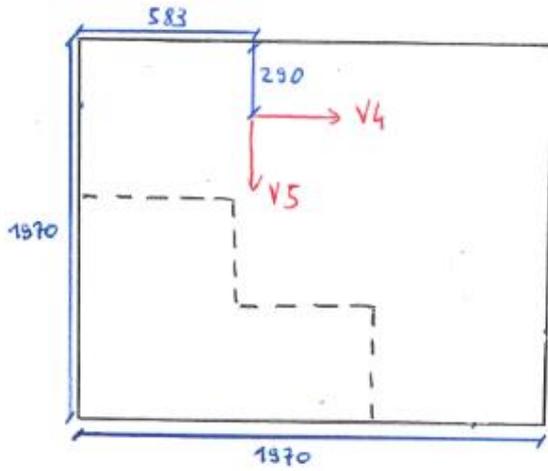
V4-V5



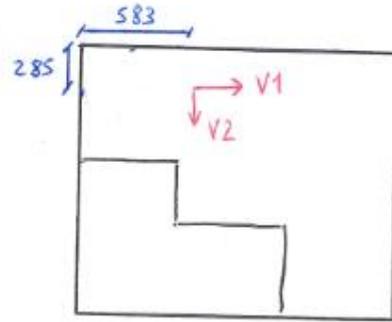
V8-V9

Figure 50 : Bâtiment C, Gros Œuvre, Mesure 1

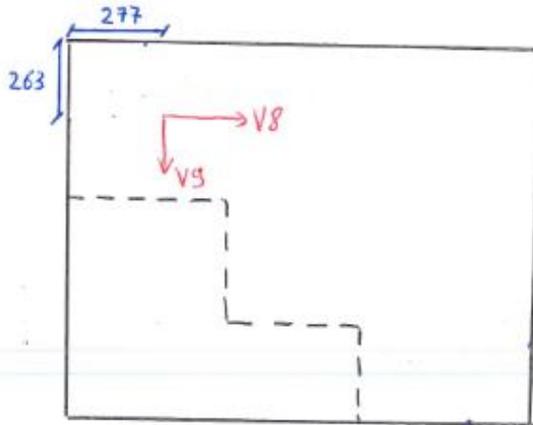
R+5



R+7 (Référence)



R+2



V1-V2



V4-V5

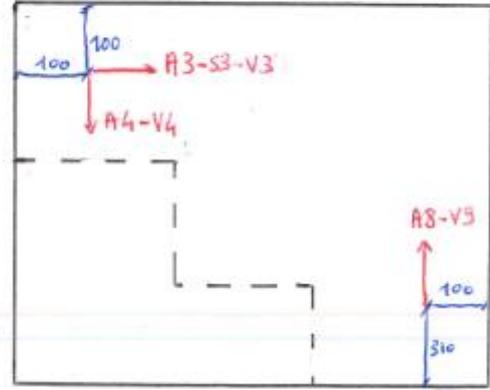
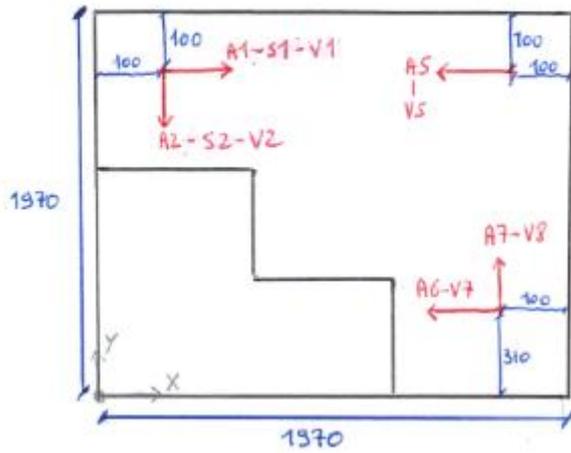


V8-V9

Figure 51 : Bâtiment C, Gros Œuvre, Mesure 2

R+7:

R+6 :



V1-V2



V5



V7-V8



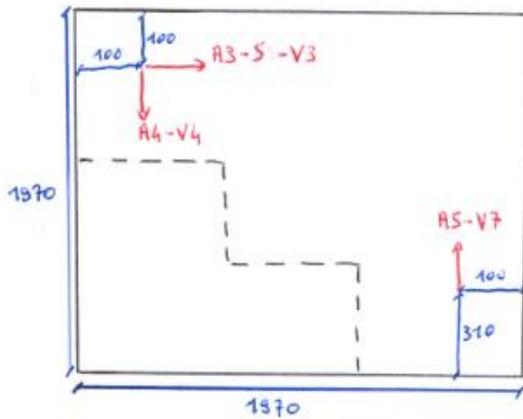
V3-V4



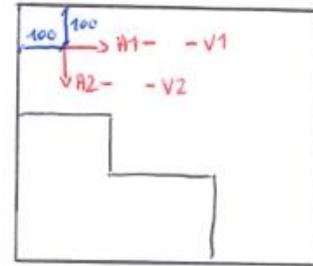
V9

Figure 52 : Bâtiment C, Finition, Mesure 1

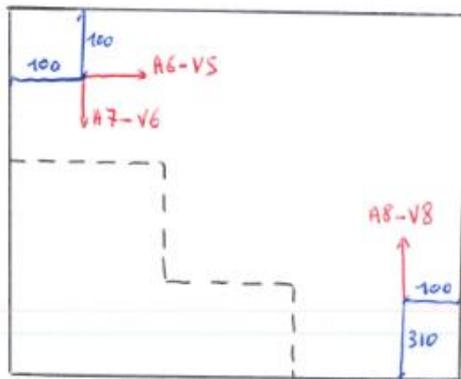
R+5



R+7 (Référence)



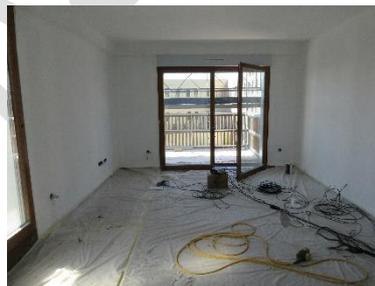
R+4



V5-V6



V7



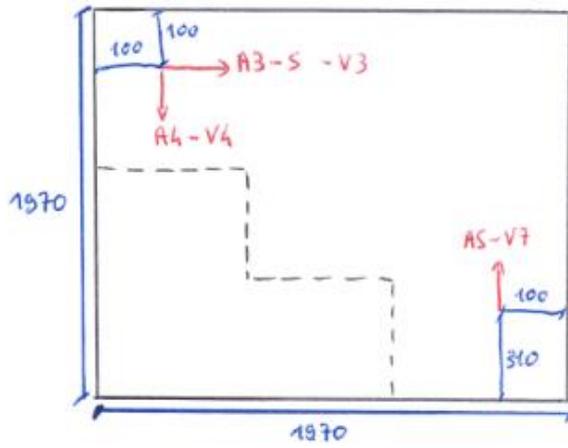
V3-V4



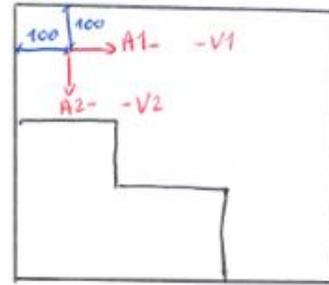
V8

Figure 53 : Bâtiment C, Finition, Mesure 2

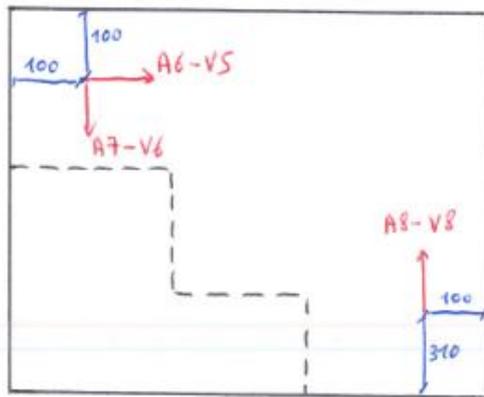
R+3



R+7 (Référence)



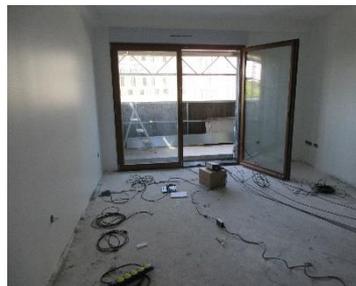
R+2



V5-V6



V7



V3-V4



V8

Figure 54 : Bâtiment C, Finition, Mesure 3

2. Bâtiments Pulse (Saint-Denis)

Les figures ci-dessous schématisent les positions des accéléromètres pour chacune des mesures réalisées sur l'immeuble Pulse. Un accéléromètre est représenté par une flèche, noté Vx, x représentant le numéro de la voie du système d'acquisition (lorsque présent, les termes Ax, Sx et Tx donnent des informations sur les accéléromètres ou les câbles utilisés, ces informations ne sont pas détaillées ici). Pour chaque schéma, les dimensions sont en mètres.

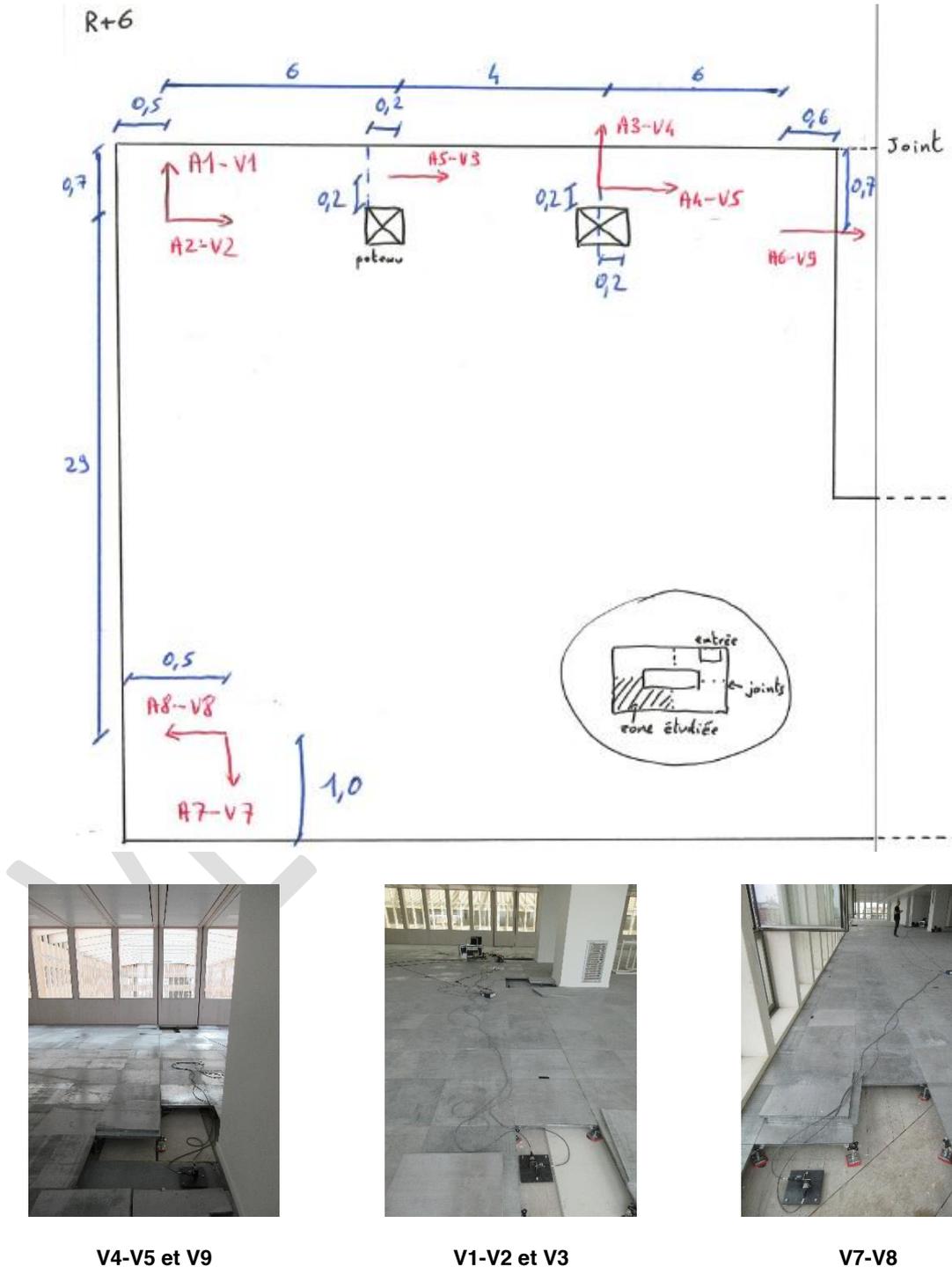
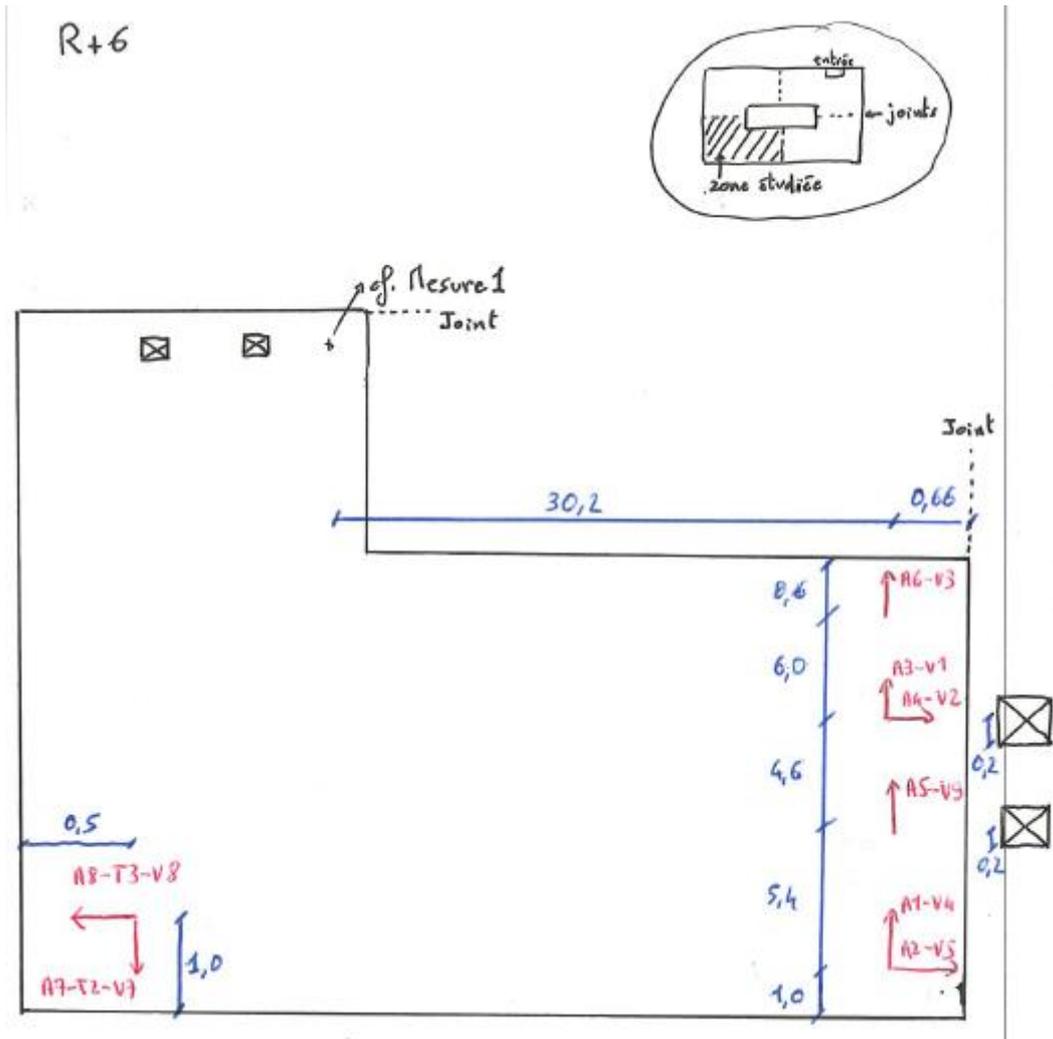


Figure 55 : Pulse, Mesure 1



V7-V8



V4-V5 et V9

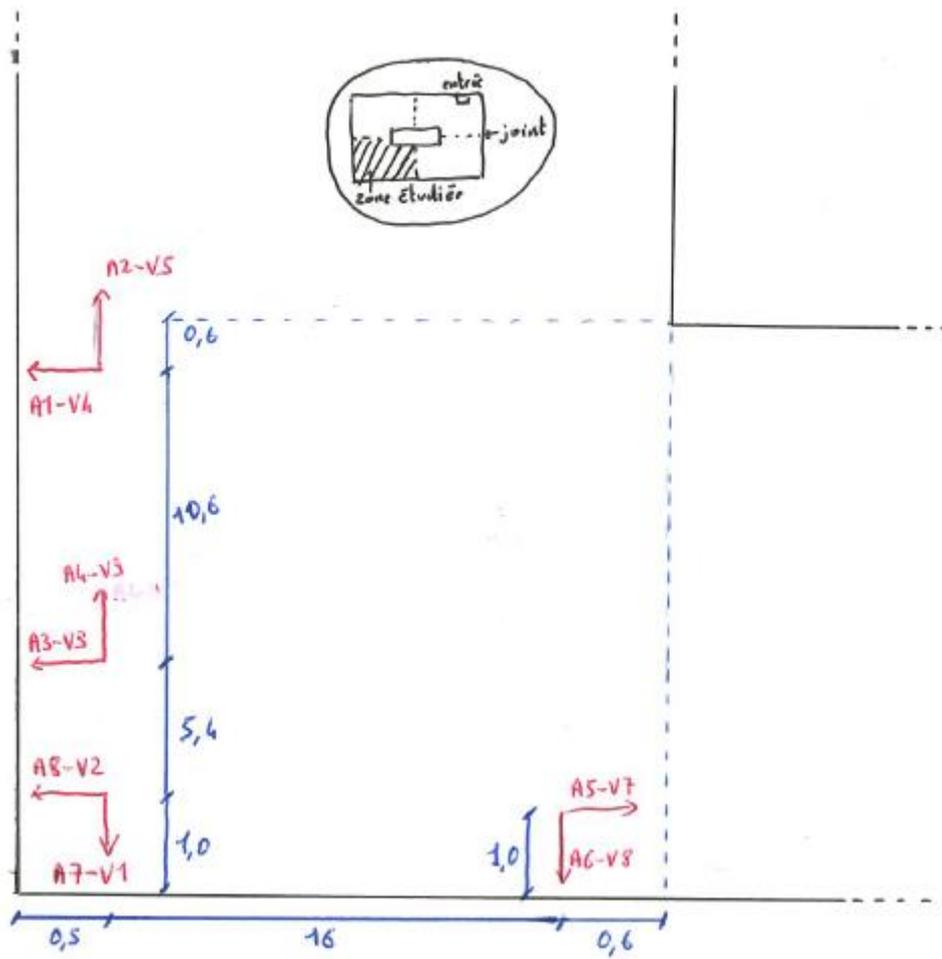


V6



V9 et V1-V2

Figure 56 : Pulse, Mesure 2



V3-V9



V4-V5



V7-V8

Figure 57 : Pulse, Mesure 3

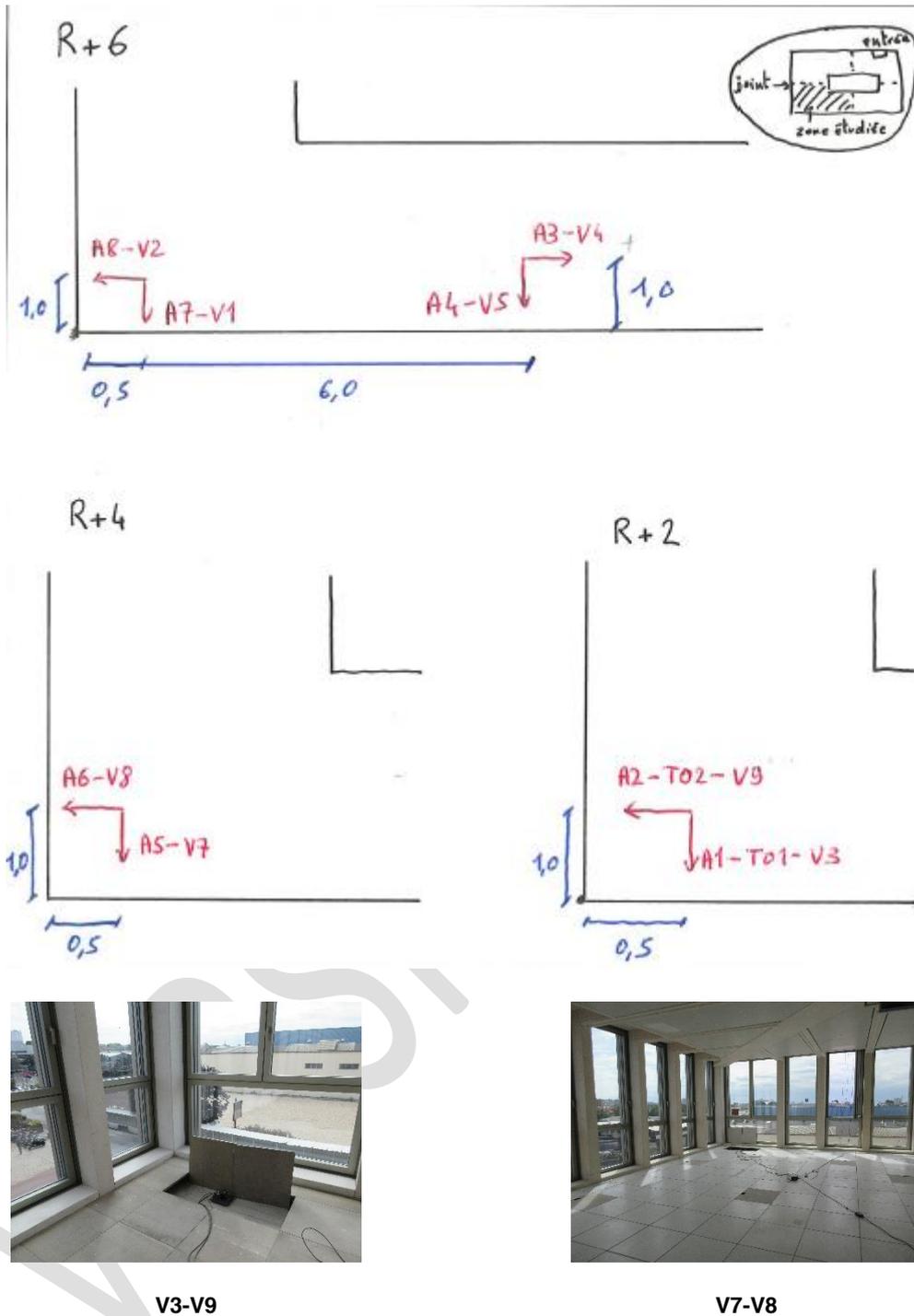


Figure 58 : Pulse, Mesure 4

3. Bains-Douches & Co (Paris, 15^e)

Les figures ci-dessous schématisent les positions des accéléromètres pour chacune des mesures réalisées sur l'immeuble Pulse. Un accéléromètre est représenté par une flèche, noté Vx, x représentant le numéro de la voie du système d'acquisition (lorsque présent, les termes Ax, Sx et Tx donnent des informations sur les accéléromètres ou les câbles utilisés, ces informations ne sont pas détaillées ici). Pour chaque schéma, les dimensions sont en mètres.

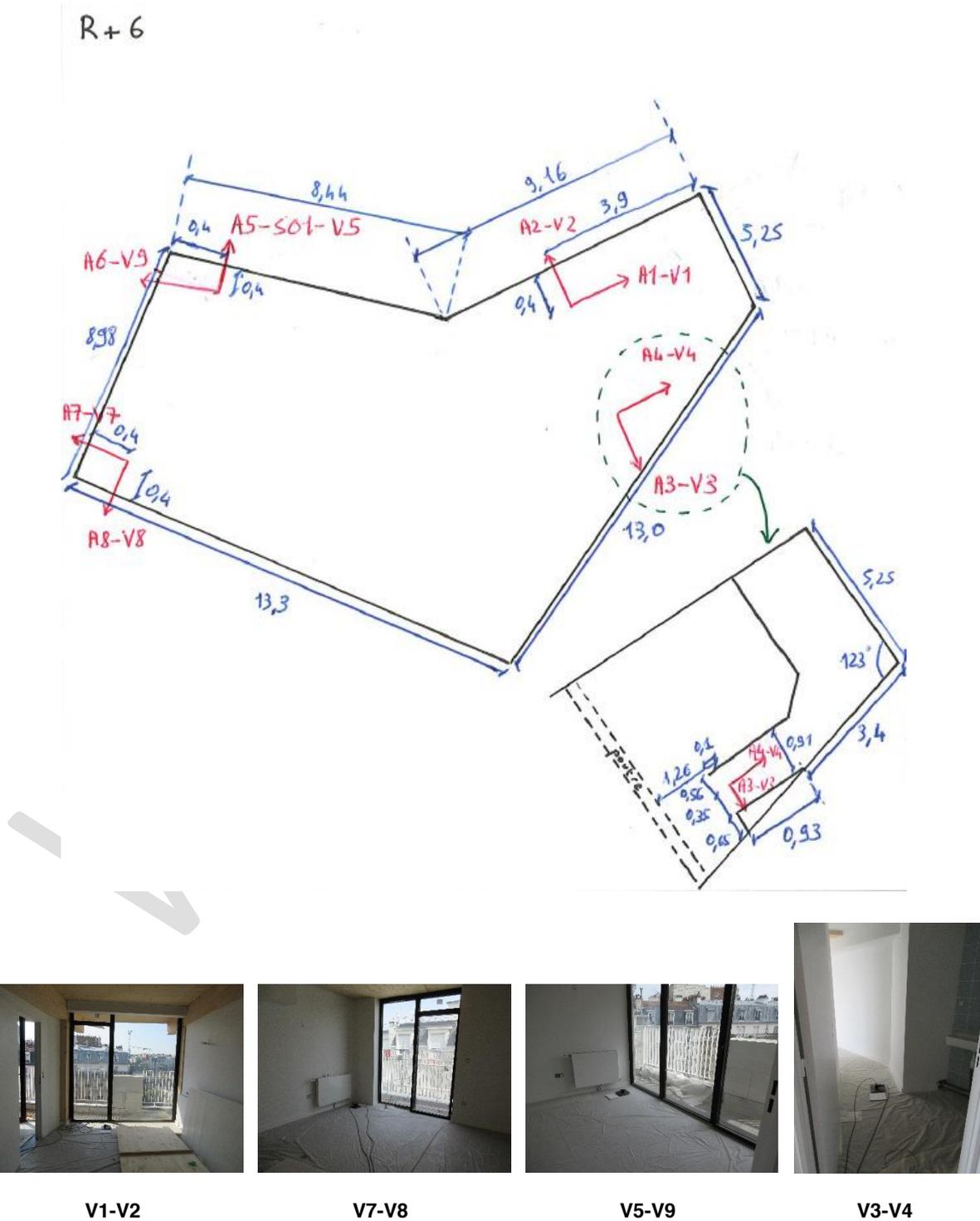
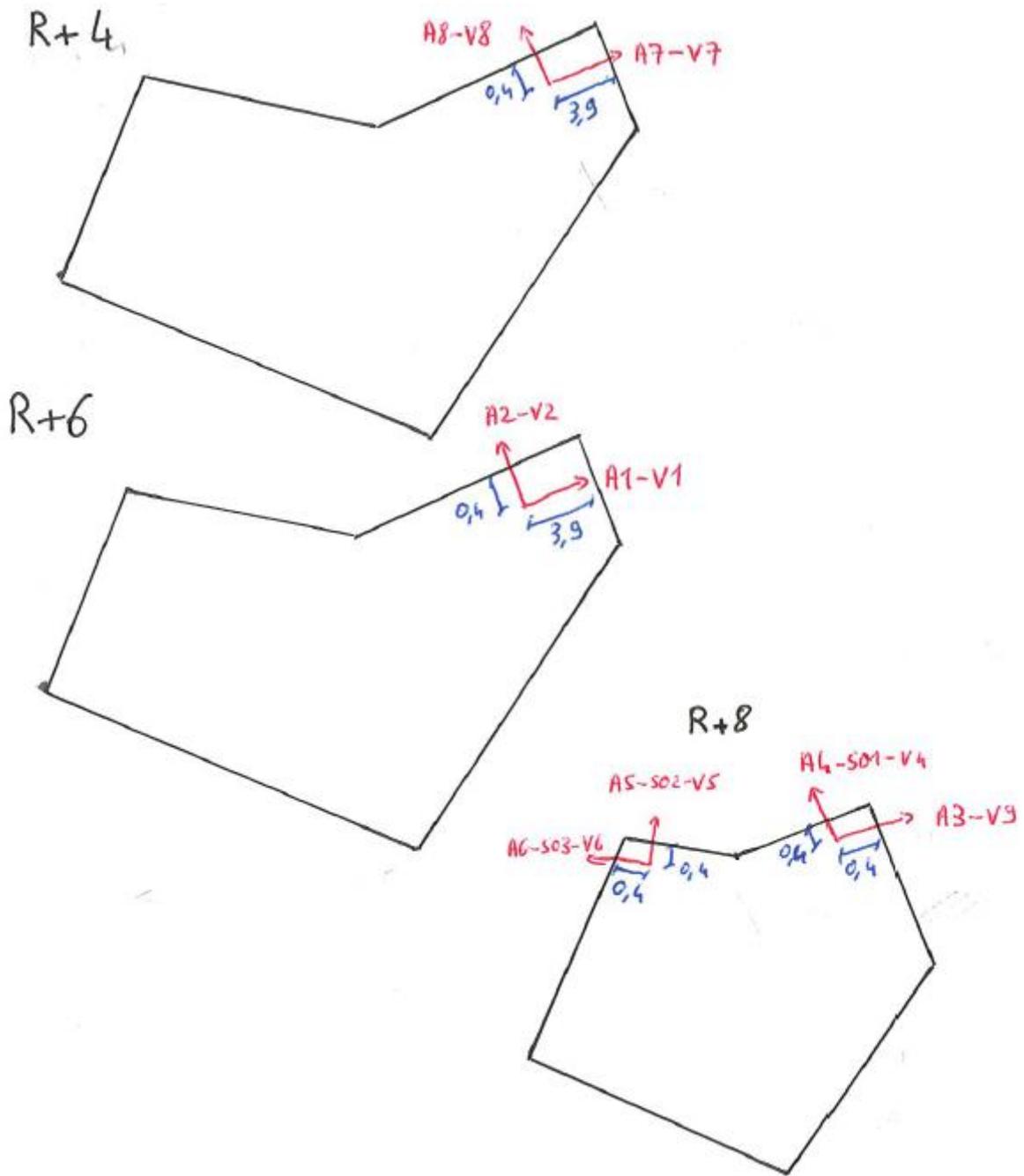


Figure 59 : Bains-Douches, Mesure 1



V7-V8

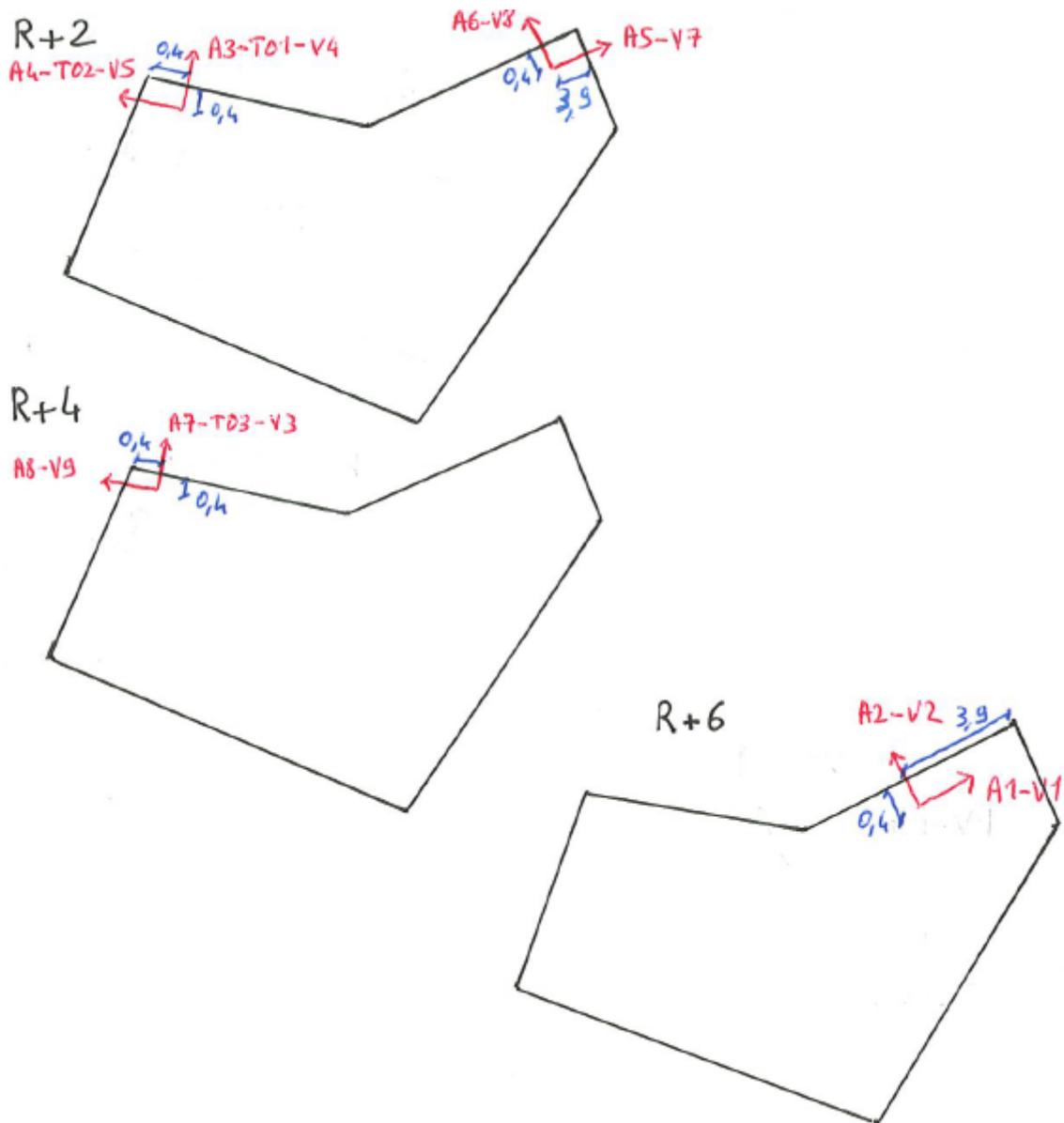


V5-V6



V4-V9

Figure 60 : Bains-Douches, Mesure 2



V4-V5



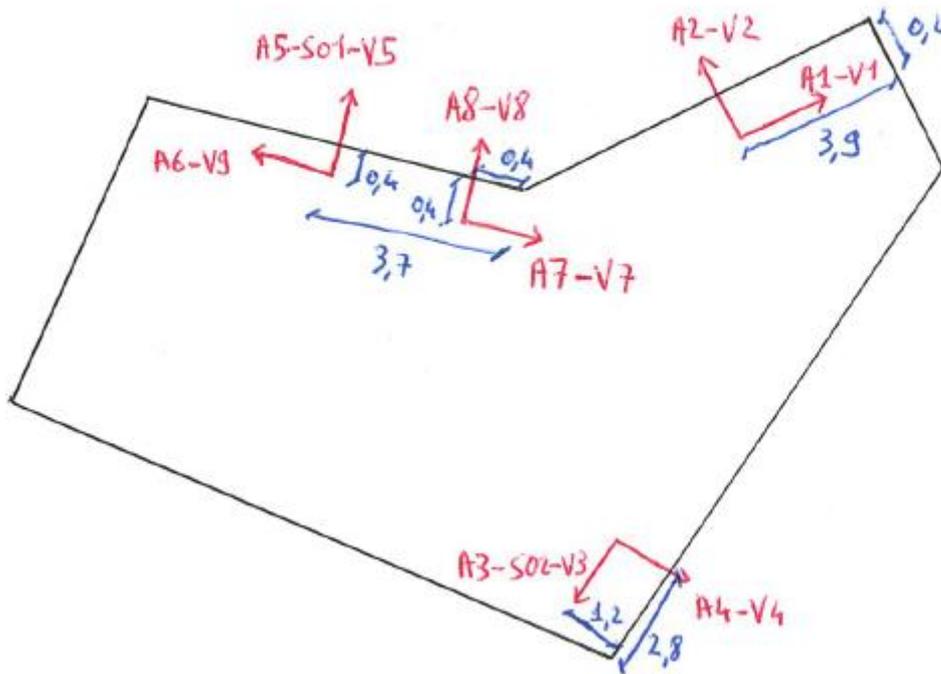
V7-V8



V3-V9

Figure 61 : Bains-Douches, Mesure 3

R+6



V5-V9



V5-V9 et V7-V8



V3-V4

Figure 62 : Bains-Douches, Mesure 4



A D I V B O I S
www.ativbois.org