

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة محمد البشير الإبراهيمي - برج بوعريريج

Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département Génie Civil

MÉMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

En : Génie Civil

Spécialité : (Structures)

Par : - Babouche Oussama

Sujet

Etude et expertise d'un bloc d'habitation (R+4) à Bordj Bou Arreridj -Etude d'un cas réel.

Soutenu publiquement, le / 06/2026 , devant le jury composé de :

M/Mme nom et prénoms	Grade	Univ-BBA	Président
M/Mme nom et prénoms	Grade	Univ-BBA	Examineur
Dr ZIANI Houcine	MCA	Univ-BBA	Encadrant
Dr LOUGZIT Naser	MCA	Univ-BBA	Co-Encadrant

Année Universitaire 2025/2026

Remerciements

Avant tout, nous remercions Allah le Tout-Puissant de nous avoir donné la santé, la volonté et la patience nécessaires pour mener à bien ce travail.

Nous exprimons notre profonde gratitude à mes encadreurs, M. ZIANI Houcine et M. LOUGZIT Naser, pour son accompagnement, ses conseils précieux, sa disponibilité et son soutien tout au long de la réalisation de ce mémoire.

Nous adressons également nos sincères remerciements aux membres du jury qui ont accepté d'évaluer ce travail et de l'enrichir par leurs remarques et recommandations.

Nos remerciements s'étendent à l'ensemble des enseignants du département de Génie Civil qui ont contribué à notre formation académique et technique durant notre parcours universitaire.

Nous tenons aussi à remercier les responsables et le personnel des organismes et laboratoires qui nous ont apporté leur aide et mis à notre disposition les informations et les moyens nécessaires à l'élaboration de cette étude.

Enfin, nous exprimons notre reconnaissance la plus sincère à nos parents, nos frères et sœurs, ainsi qu'à tous nos amis et collègues pour leur soutien moral, leurs encouragements permanents et leur confiance tout au long de nos études.

À tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail, nous adressons nos plus vifs remerciements.

Merci à tous.

Résumé

Cette étude porte sur l'expertise d'un bâtiment en béton armé (R+4) situé à Bordj Bou Arreridj, construit en 1994. L'inspection a révélé une **inclinaison importante** (≈ 12 cm vers l'Est et 5 cm vers le Sud), des **fissures évolutives**, des dégradations des dalles et des signes d'humidité généralisée. Les investigations ont mis en évidence plusieurs causes probables : **l'hétérogénéité du sol argileux**, les **fuites du réseau d'assainissement**, **l'accumulation des eaux pluviales**, ainsi que l'influence des **racines de FICUS** situées à proximité du bâtiment. Les analyses géotechniques montrent un sol plastique sensible aux phénomènes de retrait-gonflement, favorisant les **tassements différentiels**. Une simulation numérique réalisée sous Robot Structural Analysis confirme que la déformation observée est cohérente avec un sol partiellement dégradé. L'étude conclut que les désordres résultent d'une combinaison de facteurs géotechniques, hydriques et constructifs. Elle recommande des investigations complémentaires, la réparation des réseaux, l'amélioration du drainage et des travaux de confortement des fondations afin de garantir la stabilité et la durabilité de l'ouvrage.

Mots-clés : *Tassements différentiels, sol argileux, FICUS, inclinaison du bâtiment, fissures structurelles, réseau d'assainissement, drainage, confortement.*

Summary

This study presents a structural assessment of a reinforced concrete building (G+4) located in Bordj Bou Arreridj and constructed in 1994. Field inspections revealed significant **building inclination** (approximately 12 cm eastward and 5 cm southward), **progressive cracks**, slab deterioration, and widespread moisture-related damage. The investigation identified several contributing factors, including **heterogeneous clayey soil**, **sewer network leakage**, **rainwater accumulation**, and the influence of nearby **Ficus tree roots**. Geotechnical analyses showed that the soil is highly plastic and sensitive to shrink-swell behavior, leading to **differential settlements** beneath the foundations. Numerical modeling using Robot Structural Analysis demonstrated displacement values close to those observed on site, confirming the role of soil degradation and water infiltration. The study concludes that the structural disorders result from a combination of geotechnical, hydraulic, and construction-related deficiencies. It recommends additional investigations, drainage improvements, sewer repairs, and foundation strengthening measures to ensure the long-term safety and serviceability of the building.

Keywords: *Differential settlement, clayey soil, Ficus roots, building inclination, structural cracks, sewer leakage, drainage, foundation strengthening.*

المخلص

تتناول هذه الدراسة خبرة تقنية لمبنى من الخرسانة المسلحة مكوّن من طابق أرضي وأربعة طوابق بمدينة برج بوعريريج، أنجز سنة 1994. أظهرت المعاينة الميدانية وجود **ميلان ملحوظ للمبنى** (حوالي 12 سم نحو الشرق و5 سم نحو الجنوب)، إضافة إلى **تشققات متطورة** وتدهور في البلاطات الخرسانية وظهور آثار الرطوبة. بينت الدراسة أن الأسباب الرئيسية لهذه الأضرار تتمثل في **عدم تجانس التربة الطينية**، وتسربات **شبكة الصرف الصحي**، و**تجمع مياه الأمطار**، إلى جانب تأثير **جذور أشجار الفيكس (FICUS)** القريبة من المبنى. كما أظهرت التحاليل الجيوتقنية أن التربة ذات لدونة عالية وحساسية لظواهر الانكماش والانتفاخ، مما أدى إلى حدوث **هبوطات تفاضلية** في الأساسات. وأكدت النمذجة العددية باستخدام برنامج Robot Structural Analysis أن التشوهات المسجلة ميدانياً تتوافق مع تأثير تدهور التربة وتسرب المياه. خلصت الدراسة إلى أن الأضرار ناتجة عن تداخل عوامل جيولوجية ومائية وإنشائية، وأوصت بإجراء فحوصات إضافية، وإصلاح شبكات الصرف، وتحسين نظام تصريف المياه، وتدعيم الأساسات لضمان استقرار المبنى وسلامته على المدى الطويل.

الكلمات المفتاحية: *الهبوطات التفاضلية، التربة الطينية، جذور الفيكس، ميلان المبنى، التشققات الإنشائية، شبكة الصرف الصحي، تصريف المياه، تدعيم الأساسات.*

Sommaire

Chapitre I : Synthèse documentaire et états des lieux.

1. Introduction	5
2. Situation du projet	5
3. Information sur le projet.....	6
4. Description du bloc concerné	6
5. Etats des lieux	8
6. Conclusion.....	12

Chapitre II : Constats des désordres et causes probables.

1. Introduction	14
2. Diagnostique des ordres	14
3. Causes probables des désordres	14
3.1. Les arbres forestiers autour de bâtiment	14
3.2. Possibilité d'un dysfonctionnement du réseau d'assainissement	15
3.3. Possibilité d'erreur et d'exploitation des résultats du rapport de sol	17
3.4. Utilisation des matériaux de construction non requises	18
3.5. Erreur probable dans l'étude d'exécution	19
3.6. Accumulation des eaux pluviales à l'extérieur de l'immeuble du coté.....	19
4. Conclusion	20

Chapitre III : Analyse détaillée des causes des désordres.

1. Introduction	22
2. Présence des arbres FICUS.....	22
2.1. Caractéristiques du système racinaire du Ficus.....	22
2.2. Extension des racines dans le sol	22
2.3. Mode de croissance et déplacement des racines.....	23
2.4. Effets de l'arbre sur le bâtiment	23

3. Possibilité d'un dysfonctionnement du réseau d'assainissement	24
3.1. La configuration "Réseau à l'intérieur des fondations" est le facteur clé	24
3.2. Le mécanisme en deux phases : ramollissement puis lessivage	24
3.3. L'inclinaison mesurée (12 cm Est - 5 cm Sud) conforte l'hypothèse	25
3.4. Conséquences et gravité	26
3.5. Test de recherche de fuite.....	26
3.6. Sondages géotechniques ciblés.....	26
3.7. Arrêt temporaire de l'usage du réseau.....	27
3.8. Expertise structure.....	27
4. Possibilité d'erreurs et d'exploitation des résultats du rapport du sol.....	27
4.1. Synthèse des résultats géotechniques pertinents	27
4.2. Analyses des mécanismes pouvant expliquer l'inclinaison	28
4.3. Conclusion– rôle direct du sol dans l'inclinaison	29
4.4. Recommandations techniques immédiats	30
5. Accumulation des eaux pluviales à l'extérieur de l'immeuble du coté Est	30
6. Erreur probable dans l'étude d'exécution	31
6.1. Simulation numérique du bâtiment	31
6.1.1. Actions et combinaisons d'actions	31
6.1.1.2. Charges permanentes selon DTR B.C.2.2.....	31
6.1.1.3 Charges d'exploitation selon DTR B.C.2.2.....	32
6.1.1.4. Combinaisons d'actions (ELU et ELS).....	32
6.1.1.5. Combinaisons accidentelles selon RPA.....	33
6.2. Données sismiques du projet	33
6.3. Caractéristiques du site et résultats géotechniques	33
6.4. Estimation de la raideur de sol pour la modélisation des fondations	34
6.5. Modélisation de la structure sous Robot	34
6.6. Interprétation	47

7. Conclusion	48
---------------------	----

Chapitre IV : Conclusions et recommandations.

1. Rappel du contexte et des objectifs	50
2. Synthèse des causes des désordres	50
2.1. Causes géotechniques et hydriques (facteurs déclencheurs principaux)	50
2.2. Causes liées aux études et à l'exécution	50
2.3. Conséquences sur l'ouvrage	51
3. Évaluation de la gravité et de l'urgence	51
4. Recommandations finales	51
4.1. Investigations complémentaires (à réaliser sous 1 à 2 mois)	51
4.2. Mesures curatives (à court terme, 3 à 6 mois).....	52
4.3. Actions structurelles durables (moyen terme, 6 à 18 mois)	52
4.4. Préconisations pour la gestion du bâtiment	53
5. Conclusion générale	53
Références bibliographiques	54

Liste des Figures

Figure I.1 : Extrait du Google Earth, Localisation du projet.....	5
Figure I.2 : Vue en plan du bloc d'étude.....	7
Figure I.3 : Coupe en élévation du bloc d'étude.....	7
Figure I.4 : Façade Est du bâtiment concerné, fissure verticale entre la cage d'escalier et le reste du bloc.....	8
Figure I.5 : Les arbres forestiers coupées.....	9
Figure I.6 : Propagation d'une fissure verticale au niveau de la façade Sud du bâtiment.....	9
Figure I.7 : Ouverture du joint entre éléments structuraux de 10 cm.....	10
Figure I.8 : Eclatement du mortier et apparition des fissures au niveau du mur en maçonnerie.....	10
Figure I.9 : Fissure traversante de 6 à 8 mm évolutive dans le mur intérieur de la chambre du 4eme étage.....	11
Figure I.10 : Eclatement de la dalle au niveau de 4eme étage (Ouverture de la fissure de 10 cm).....	11
Figure II.1 : Racines de FICUS localisée près du bloc d'étude.....	15
Figure II.2 : Intervention et réparation du système d'eau pluviale au pied de l'ouvrage.....	16
Figure II.3 : Accumulation des eaux pluviales du côté est du bâtiment.....	19
Figure III.1: Reprise des réseaux d'assainissement et d'AEP.....	25
Figure III.2 : reprise et chemisage en sous ouvre.....	29
Figure III.3 : Vue de la structure.....	35
Figure III.4 : Vue en plan Fondations (Dimension en entre axes) - sol homogène, $\sigma_{adm} = 2$ bars.....	35
Figure III.5 : Vue en plan étage courant.....	36
Figure III.6 : Maillage de la structure.....	36
Figure III.7 : Moment au niveau des semelles sous ELU.....	37
Figure III.8 : Moment au niveau des semelles sous ELS.....	37
Figure III.9 : Moment max au niveau des semelles sous les combinaisons accidentelles.....	38
Figure III.10 : Déplacement suivant -Z sous ELU.....	38
Figure III.11 : Déplacement suivant -Z sous ELS.....	39
Figure III.12 : Déplacement max sous les combinaisons accidentelles.....	39
Figure III.13 : Réaction du sol en ELU.....	40
Figure III.14 : Réaction du sol en ELS.....	40

Figure III.15 : Réaction du sol max sous les combinaisons accidentelles.....	41
Figure III.16 : Une partie des fondations fondée sur un sol de 2 bars et une partie sur un sol de 1 bar.....	41
Figure III.17 : Moment au niveau des semelles sous ELU.....	42
Figure III.18 : Moment au niveau des semelles sous ELS.....	42
Figure III.19 : Moment max au niveau des semelles sous les combinaisons accidentelles....	43
Figure III.20 : Déplacement suivant -Z sous ELU.....	43
Figure III.21 : Déplacement suivant -Z sous ELS.....	44
Figure III.22 : Déplacement max sous les combinaisons accidentelles.....	44
Figure III.23 : Réaction du sol en ELU.....	45
Figure III.24 : Réaction du sol en ELS.....	45
Figure III.25 : Réaction du sol max sous les combinaisons accidentelles.....	46
Figure III.26 : Vue en 3D de déplacement max en tête du bâtiment sous la combinaison ACC 6.....	46
Figure III.27 : Vue en plan de déplacement max en tête du bâtiment sous la combinaison ACC 6.....	47

Liste des Tableaux

Tableau III.1 : Analyse des désordres résultant de l'humidification du sol des fondations..	26
Tableau III.2 : résultats des paramètres géotechniques du sol.....	27
Tableau III.3 : Mécanismes responsables de désordres dans le sol.....	29
Tableau III.4 : Analyse de l'influence de l'accumulation des eaux.....	30
Tableau IV.1 : Investigations complémentaires à réaliser.....	52

Introduction Générale

Le patrimoine bâti constitue un enjeu majeur de développement économique et social, particulièrement dans un pays comme l'Algérie, où la demande en logements ne cesse de croître. Face à l'urgence de loger une population en expansion, des constructions ont été érigées à un rythme soutenu, parfois au détriment d'une prise en compte rigoureuse de tous les paramètres, notamment ceux liés à la géotechnique et à l'environnement immédiat. Avec le temps, et sous l'effet de sollicitations naturelles et anthropiques, certains ouvrages présentent des désordres structurels qui mettent en péril leur pérennité et la sécurité de leurs occupants. C'est dans ce contexte que s'inscrit la présente expertise, consacrée à un bâtiment emblématique des défis de la construction en Algérie.

La problématique à laquelle ce travail se propose de répondre est celle de l'origine et de la gravité des désordres observés sur un immeuble en béton armé de type R+4, situé à Bordj Bou Arreridj et construit en 1994. Les constats visuels sont alarmants : une inclinaison significative (12 cm vers le Sud et 5 cm vers l'Est), des fissures traversantes et évolutives atteignant jusqu'à 10 cm d'ouverture, ainsi qu'une dégradation avancée des dalles au dernier étage. Face à cette situation, le diagnostic doit dépasser le simple constat pour identifier les mécanismes complexes à l'œuvre, allant des propriétés du sol d'assise à l'impact des facteurs extérieurs comme la végétation ou les réseaux enterrés. Cette recherche a donc pour objectif principal de déterminer les causes probables de ces désordres et de proposer des solutions de confortement adaptées pour la sauvegarde de l'ouvrage.

Pour mener à bien cette investigation, une approche méthodologique rigoureuse et pluridisciplinaire a été adoptée. Le travail s'articule en quatre chapitres complémentaires. Le premier chapitre est consacré à une synthèse documentaire et à un état des lieux détaillé, posant le cadre de l'étude. Le deuxième chapitre établit un premier constat des désordres et explore les causes probables sur la base d'une analyse préliminaire. Le troisième chapitre approfondit l'analyse de chaque facteur suspecté (racines de FICUS, fuites du réseau d'assainissement, erreurs d'exécution) et la confronte à une simulation numérique sous logiciel Robot, permettant de modéliser les tassements différentiels. Enfin, le quatrième chapitre propose des recommandations techniques concrètes et hiérarchisées, allant des investigations complémentaires aux solutions de confortement durable.

La complexité des causes potentielles, qu'elles soient géotechniques, hydriques ou liées à la conception, justifie pleinement cette approche approfondie. En effet, l'origine de l'inclinaison d'un bâtiment et de ses fissures est rarement unique ; elle résulte le plus souvent d'une combinaison de facteurs qu'il convient de démêler. Les conséquences d'une telle dégradation peuvent être dramatiques, allant de coûts de maintenance exorbitants à un risque d'effondrement partiel. Au-delà de l'aspect technique, cette étude revêt une dimension sociale et économique importante. Elle vise à contribuer à la préservation du patrimoine bâti, à la sécurité des citoyens, et à l'amélioration des pratiques de construction pour éviter que de tels désordres ne se reproduisent à l'avenir.

Ainsi, à travers l'analyse d'un cas réel et concret, ce travail ambitionne d'apporter une contribution utile au diagnostic des pathologies du bâtiment et à la compréhension des

interactions entre une structure, son sol et son environnement. Il se veut un outil d'aide à la décision pour les acteurs techniques et les maîtres d'ouvrage confrontés à des défis similaires, en mettant en lumière l'importance cruciale d'une approche intégrée dès la conception et d'une maintenance préventive rigoureuse.

Chapitre I

Synthèse

documentaire

et états des lieux.

1. Introduction :

Ce chapitre présente le contexte et l'état actuel d'un bâtiment en béton armé (R+4) situé à Bordj Bou Arreridj, construit en 1994. Une inspection réalisée le 18 février 2026 révèle des désordres structuraux graves : inclinaison de 10 cm vers le sud et 5 cm vers l'est, fissures traversantes évolutives (jusqu'à 10 cm d'ouverture), éclatement du mortier et des dalles, notamment au 4ème étage. La présence d'arbres coupés à proximité suggère une possible modification du drainage des sols, pouvant entraîner des tassements différentiels. L'absence de reprise des fondations et l'inefficacité du joint de séparation (5 cm) aggravent la vulnérabilité de l'ouvrage. Ce constat justifie une analyse approfondie pour proposer des solutions de confortement adaptées.

2. Situation du projet :

Le projet en question est un bâtiment en Béton armé, faisant partie du bloc 74/750 logements, situé au nord de la ville de Bordj Bou Arreridj, sur la route reliant BBA à MEDJANA, en face du lycée SAID BOUALI. Voir figure ci-dessous.

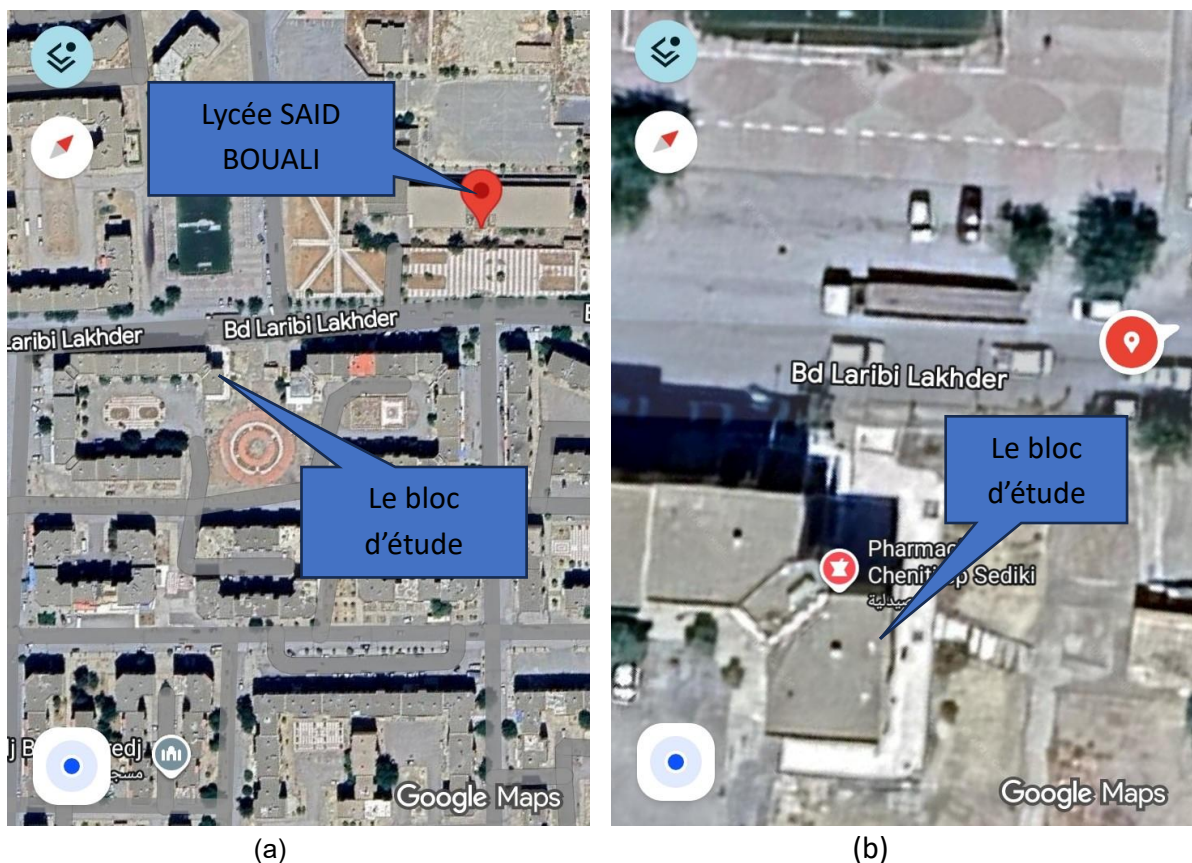


Figure I.1 : Extrait du Google Earth, Localisation du projet.

(a) : Situation globale.

(b) : Situation du bloc concerné.

3. Information sur le projet :

Le projet de notre étude entre dans le cadre de construction de logement d'habitation à caractère locatif, réalisé en 1994, au profit OPGI de BBA. Par la suite les informations clefs du projet sont présentées.

- ✓ PROJET : 74/750 Logements (LSL).
- ✓ CLIENT : OPGI de BBA
- ✓ SITE : Route de Medjana – Wilaya BBA
- ✓ Contrôle technique : CTC BBA.
- ✓ Etude de sol : « Laboratoire National de l'Habitat et de la Construction », LNHC, Direction régionale centre (Unité : BOUIRA)
- ✓ Entreprise de réalisation : Bouras/BOUIRA.

4. Description du bloc concerné :

Dans le cadre de notre projet d'expertise, et aux fins purement pédagogiques, nous avons effectué une visite d'inspection en date du 18/02/2026, pour examiner l'état des lieux.

Il s'agit d'un bâtiment auto stable (R+4), d'une longueur 11,75 m, de largeur 7,90 m, et de hauteur totale de 18.30 m, soit avec une hauteur d'étage de 3.06 m, dont le rez-de-chaussée est de dotation commerciale. Chaque étage du bloc concerné comporte une superficie de 88.75 m², répartie sur deux logements de type F3. Voir figures 2 et 3.

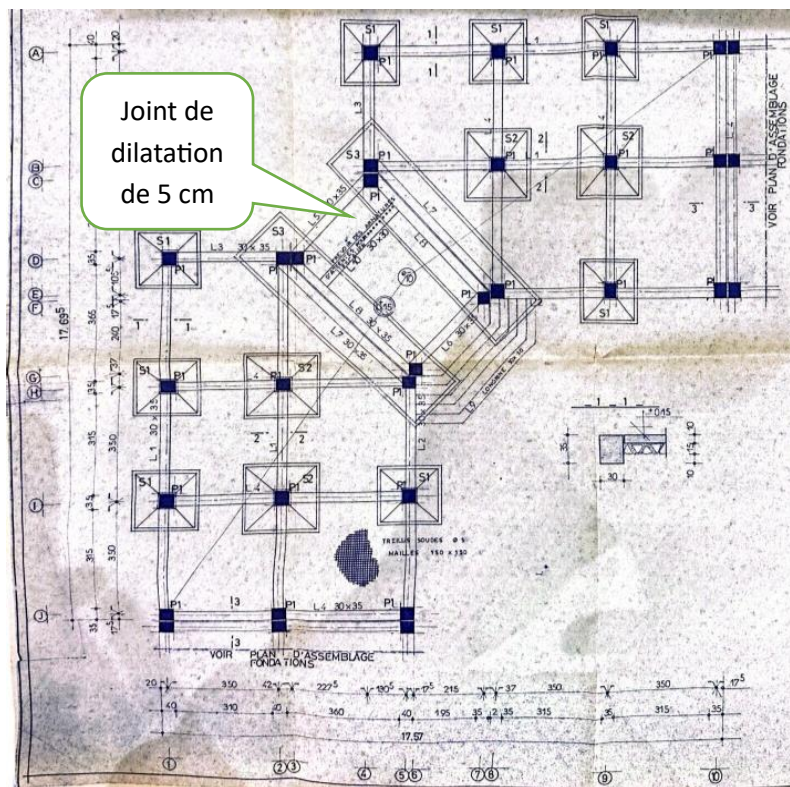


Figure I.2 : Vue en plan du bloc d'étude.

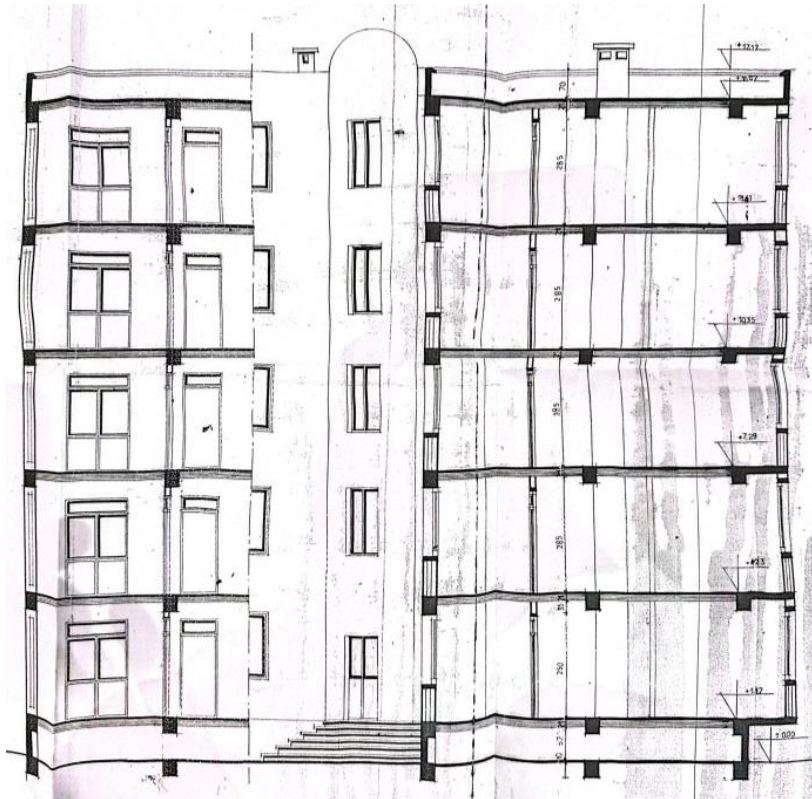


Figure I.3 : Coupe en élévation du bloc d'étude.

5. Etats des lieux :

Le bloc, objet de notre étude est isolé par un joint d'épaisseur de 5 cm (voir figure 3) par rapport aux blocs mitoyens. Ce joint prend naissance à partir du niveau supérieur des fondations.

Il y a des arbres forestiers coupés autour de bâtiment.

-Ce bâtiment est incliné de 12 cm vers le Sud et 5 cm vers l'Est avec présence des fissures entre les murs et entre les blocs et entre les étages.



Figure I.4 : Façade Est du bâtiment concerné, fissure verticale entre la cage d'escalier et le reste du bloc.



Figure I.5 : Les arbres forestiers coupés.



Figure I.6 : Propagation d'une fissure verticale au niveau de la façade Sud du bâtiment.



Figure I.7 : Ouverture du joint entre éléments structuraux de 10 cm.



Figure I.8 : Eclatement du mortier et apparition
des fissures au niveau du mur en maçonnerie.



Figure I.9 : Fissure traversante de 6 à 8 mm évolutive dans le mur intérieur
de la chambre du 4eme étage.



Figure I.10 : Eclatement de la dalle au niveau de 4eme étage

(Ouverture de la fissure de 10 cm).

6. Conclusion :

La synthèse documentaire et l'état des lieux réalisés dans le cadre de cette expertise mettent en évidence des désordres structurels préoccupants sur le bâtiment étudié (bloc R+4, situé à Bordj Bou Arreridj). Les investigations menées lors de la visite d'inspection du 18 février 2026 révèlent une inclinaison anormale de l'ouvrage (10 cm vers le sud et 5 cm vers l'est), associée à des fissurations multiples, évolutives et traversantes, notamment au niveau des murs porteurs, des joints structurels et des dalles du 4ème étage, où une ouverture de 10 cm a été constatée.

Par ailleurs, la présence d'arbres forestiers coupés à proximité immédiate du bâtiment soulève l'hypothèse d'une modification des conditions de drainage des sols, susceptible d'avoir induit des tassements différentiels. L'absence apparente de reprise des fondations, conjuguée à l'âge du bâtiment (construit en 1994) et à l'inefficacité du joint de 5 cm entre blocs mitoyens, aggrave la vulnérabilité de la structure.

Ainsi, ce premier chapitre confirme la nécessité d'une analyse approfondie des causes (géotechniques, hydriques ou liées à la qualité des matériaux) et justifie

pleinement la poursuite de l'étude par un diagnostic structurel détaillé, en vue de proposer des solutions de confortement adaptées et durables.

Chapitre II

**Constats des désordres
et causes probables.**

1. Introduction :

Ce chapitre analyse les désordres structurels d'un bâtiment (fissures, déformations, humidité), qui s'aggravent avec la hauteur de l'ouvrage. Les causes probables identifiées sont : la présence d'arbres FICUS aux racines invasives, des dysfonctionnements du réseau d'assainissement, des fuites d'eau, des erreurs possibles dans les études de sol, l'utilisation de matériaux non conformes, et une accumulation des eaux pluviales côté Est. L'objectif est de poser un diagnostic technique préliminaire pour orienter les investigations et les solutions de remédiation.

2. Diagnostique des ordres :

Ouverture des fissures entre les blocs, d'une épaisseur estimée à 1 cm au premier étage, jusqu'à 5 cm au quatrième étage, et une épaisseur entre les étages mesuré de 3 à 4 cm , en plus des fissures dans les murs à environ 1 à 2 cm, en plus d'une déformation dans le mur.

3. Causes probables des désordres :

3.1. Les arbres forestiers autour de bâtiment :

La présence d'arbres forestiers aux abords du bâtiment laisse supposer une possible extension de leurs racines jusqu'aux fondations de l'ouvrage, Il s'agit très probablement d'un FICUS, catégorie d'arbre, dont les caractéristiques sont les suivantes :

-Les racines de FICUS : s'endente horizontalement sur de grandes distances (environ 5 à 15 mètres ou plus) ; ne sont pas très profondes, mais elles sont puissantes et superficielles ; dangereux près des bâtiments, puisque ses racines sont agressives et absorbent l'eau, ce qui induit le soulèvement du carrelage et trottoirs, endommagement des sols et canalisations (voir figure II.1.



Figure II.1 : Racines de FICUS localisée près du bloc d'étude.

3.2. Possibilité d'un dysfonctionnement du réseau d'assainissement :

Les canalisations du réseau d'assainissement du bloc objet de notre expertise passent à l'intérieur des fondations de la bâtisse, voir la figure ci-dessous.

L'équipe de réparation a constaté la présence d'humidité ainsi que des perforations réparties sur toute la longueur des canalisations d'assainissement, ce qui provoque le transport des particules fines du sols et création des vides sous les fondations du bâtiment par la propagation du phénomène de l'érosion interne.

En plus on a constaté des fuites d'eau qui provoquent de l'humidité dans les murs et les plafonds, avec apparition de taches et dégradation de la peinture.

Les fissures dans le bâtiment sont le résultat des infiltrations d'eau qui peuvent affaiblir le sol sous les fondations. Avec le temps, cela peut entraîner un tassement ou une légère inclinaison.



Figure II.2 : Intervention et réparation du système d'eau pluviale au pied de l'ouvrage.

3.3. Possibilité d'erreur et d'exploitation des résultats du rapport de sol :

Les erreurs courantes dans les études géotechniques des bâtiments sont nombreuses, et certaines peuvent provoquer des fissures, des tassements, un basculement de la construction ou même des problèmes graves au niveau des fondations ; parmi les erreurs les plus fréquentes :

- Nombre insuffisant de sondages :

Se limiter à un ou deux sondages pour un grand bâtiment, cela peut empêcher de connaître la variation des couches de sol sur l'ensemble du site.

- Profondeur insuffisante des sondages :

Arrêter les investigations avant d'atteindre la véritable couche portante, le bâtiment peut alors être fondé sur un sol faible sans que cela soit détecté.

- Mauvais prélèvement et transport des échantillons de sol :

Détérioration ou mélange des couches lors du prélèvement, cela entraîne des résultats de laboratoire inexacts.

- Erreurs dans les essais de laboratoire :

Mauvaise mesure de l'humidité, des limites d'Atterberg ou de la densité, cela gonfle ou du tassement du sol.

- Négligence de l'effet de l'eau :

Absence d'étude du niveau de la nappe phréatique ou de des variations saisonnières, l'eau peut provoquer :

- Une diminution de la capacité portante du sol.
- La dégradation des fondations.
- Le gonflement des sols argileux.

- Absence d'étude des sols argileux :

Certains types d'argile se dilatent avec l'eau et se rétractent en période sèche, cela provoque des fissures et des tassements différentiels.

- Choix inadapté du type de fondation.

- Absence de suivi pendant les travaux :

Le sol rencontré pendant l'excavation peut différer des résultats initiaux de l'étude, l'absence de mise à jour de l'étude peut entraîner des erreurs d'exécution.

- Manque de coordination entre l'étude géotechnique et l'étude structurelle :

Les fondations sont parfois conçues sans prendre pleinement en compte les recommandations du rapport géotechnique. Les conséquences de ces erreurs apparaissent souvent sous forme de :

- Fissures dans les murs.
- Inclinaison du bâtiment.
- Affaissement des planchers.
- Humidité et infiltrations.
- Séparation entre les éléments structurels.
- Détérioration des réseaux d'assainissement.

3.4. Utilisation des matériaux de construction non requises :

La mauvaise qualité des matériaux entraîne une diminution de la résistance et de la durabilité de l'ouvrage, ainsi que l'apparition de désordres structurels et de dégradations prématurées.

- Faible résistance du bâtiment aux charges et aux séismes.
- Apparition précoce de fissures de dégradations.
- Détérioration du béton et corrosion des armatures.
- Infiltrations d'eau et humidité à l'intérieur du bâtiment.
- Diminution de la qualité et de durabilité de l'ouvrage.
- Réduction de la durée de vie du bâtiment.
- Augmentation des coûts d'entretien et de réparation.
- Risque d'effondrement partiel dans les cas graves.

3.5. Erreur probable dans l'étude d'exécution :

Les erreurs dans les études du bureau d'ingénierie civile peuvent entraîner plusieurs problèmes graves selon la nature du projet et le type d'erreur commise, notamment :

- Tassement induisant l'inclinaison du bâtiment due à une mauvaise interprétation du rapport géotechnique.
- Apparition de fissures dans les murs, les poteaux ou les dalles.
- Faible résistance de la structure aux séismes ou aux charges.
- Infiltrations d'eau et humidité dues à des erreurs dans l'étude du drainage et de l'échanchéité.
- Déformations des éléments en béton causées par des calculs structurels imprécis.
- Augmentation des coûts en raison des travaux de réparation et de renforcement ultérieurs.
- Retard ou arrêt du projet suite à la découverte de défauts techniques.
- Réduction de la durée de vie de l'ouvrage.

3.6. Accumulation des eaux pluviales à l'extérieur de l'immeuble du côté

Est :

La présence et l'accumulation d'eau superficielle proche du bloc peut entraîner des infiltrations d'eau provoquent ainsi un changement dans les propriétés chimico-physiques du sol des fondations. Voir figure II.3.



Figure II.3 : Accumulation des eaux pluviales du côté est du bâtiment.

Ce phénomène entraîne :

- Saturation du sol autour des fondations.
- Apparition d'un affaiblissement ou d'un tassement du sol d'assise.
- Augmentation du risque d'inclinaison du bâtiment ou de tassements différentiels.
- Infiltration d'humidité dans les murs et les fondations.
- Apparition de fissures et dégradation des éléments de construction.
- Détérioration du béton et corrosion des armatures de la structure.
- Aggravation des problèmes d'humidité et d'assainissement à l'intérieur du bâtiment.

4. Conclusion :

En synthèse, l'analyse des désordres observés sur le bâtiment met en évidence une combinaison de facteurs naturels, techniques et humains. Les investigations ont confirmé le rôle prépondérant des racines de FICUS, dont l'extension horizontale et la puissance ont généré des fissures croissantes du premier au quatrième étage, ainsi que des déformations des murs. Parallèlement, les fuites relevées sur le réseau d'assainissement, doublées d'une mauvaise gestion des eaux pluviales côté Est, ont favorisé l'érosion interne du sol d'assise et l'apparition de vides sous les fondations. Les essais de laboratoire ont par ailleurs caractérisé un sol fin, plastique à très plastique, moyennement agressif vis-à-vis du béton (classe XA2), mais non organique.

Toutefois, des lacunes potentielles dans les études géotechniques initiales, ainsi que le recours à des matériaux de construction possiblement non conformes aux normes en vigueur, semblent avoir aggravé la vulnérabilité de l'ouvrage. Dès lors, la dégradation prématurée du béton, la corrosion des armatures, la réduction de la durabilité et l'augmentation des coûts de maintenance constituent des conséquences directes de cette situation. Il apparaît indispensable de procéder à une reprise approfondie des études de sol, à un diagnostic structurel complet, et à la mise en place d'un système de drainage efficace, afin de garantir la pérennité du bâtiment et la sécurité de ses occupants.

Chapitre III

Analyse détaillée des causes des désordres.

1. Introduction :

Le chapitre précédent a identifié plusieurs causes probables des désordres du bâtiment (présence de FICUS, dysfonctionnements de l'assainissement, insuffisances géotechniques, défauts d'exécution, accumulation d'eaux pluviales). Cependant, l'origine exacte de l'inclinaison (12 cm Est, 5 cm Sud) et des fissures évolutives reste à confirmer.

L'objectif de ce troisième chapitre est double :

1. Examiner en détail chaque facteur suspecté (racines de FICUS, fuites d'assainissement, erreurs d'interprétation géotechnique, eaux pluviales côté Est).
2. Présenter une simulation numérique sous Robot, comparant deux scénarios de sol (homogène vs hétérogène), pour confronter les déplacements calculés aux mesures réelles et identifier le mécanisme dominant des tassements différentiels.

2. Présence des arbres FICUS :

Le FICUS est un arbre à feuillage persistant largement utilisé dans les zones urbaines pour la décoration et l'ombrage.

Cependant, cette espèce possède un système racinaire puissant et à croissance rapide, pouvant engendrer des effets négatifs sur les constructions voisines, notamment en présence de sols argileux ou de fondations superficielles.

2.1. Caractéristiques du système racinaire du Ficus :

Le système racinaire de cet arbre se caractérise par :

- Des racines puissantes et à croissance rapide.
- Une large propagation horizontale dépassant parfois le diamètre de la couronne de l'arbre.
- Une forte capacité à rechercher l'humidité et les sources d'eau souterraines.
- Une capacité de pénétration dans les fissures et les vides présents dans le sol ou dans les réseaux d'assainissement.

2.2. Extension des racines dans le sol :

Les racines de Ficus peuvent s'étendre sur des distances importantes :

- L'extension horizontale des racines peut atteindre environ 10 à 20 mètres selon l'âge de l'arbre et la nature du sol.
- La majorité des racines se développe à des profondeurs comprises entre 0.5 et 2 mètres.
- Certaines racines peuvent atteindre des profondeurs plus importantes à la recherche d'eau ou de fuites souterraines.

Concernant l'épaisseur des racines :

- Les racines principales peuvent atteindre une épaisseur de 20 à 50 cm avec le vieillissement de l'arbre.

2.3. Mode de croissance et déplacement des racines :

Les racines se développent progressivement dans le sol en fonction de plusieurs facteurs notamment :

- La direction de l'humidité.
- La présence d'eau ou des fuites.
- La nature et la compacité du sol.
- L'existence de fissures ou de vides souterrains.

Les racines se dirigent généralement vers les zones humides telles que :

- Les réseaux d'assainissement.
- Les fuites d'eau.
- Les zones à forte humidité situées à proximité des fondations.

2.4. Effets de l'arbre sur le bâtiment :

La Ficus peut provoquer plusieurs désordres au niveau des constructions voisines, particulièrement lorsque la distance entre l'arbre et le bâtiment est faible, parmi les principaux effets :

- a) Effets sur le sol :
 - Absorption importante d'eau.
 - Retrait des sols argileux dû à la perte d'humidité.
 - Apparition de tassements différentiels des fondations.
- b) Effets sur les fondations :
 - Augmentation des contraintes non uniformes sur les fondations.
 - Apparition de fissures dans les murs et les éléments structurels.
 - Possibilité d'un basculement partiel du bâtiment.
- c) Effets sur les réseaux enterrés :
 - Détérioration des canalisations d'assainissement.
 - Obstruction des conduites par l'intrusion des racines.
 - Formations de vides dans sol à la suite des infiltrations d'eau.

Dans notre cas, les arbres Ficus sont distantes de 4 à 5 mètres du bloc concerné, cette distance est considérée comme insuffisante pour ce genre d'arbres, notamment dans les cas suivants :

- Présence d'un sol argileux sensible au retrait et au gonflement.
- Existence de fondations superficielles.
- Présence de fuites d'eau ou de réseaux d'assainissement à proximité.

- Grande taille et âge avancé de l'arbre.

Dans ce cas, les racines peuvent atteindre la zone des fondations et influencer la stabilité du sol entourant le bâtiment.

3. Possibilité d'un dysfonctionnement du réseau d'assainissement :

Vu les constats faits in situ on a observé de l'humidité sur la périphérie des canalisations des eaux usées dans plusieurs endroits des canaux, ce qui laisse à penser de la présence d'un désordre au niveau des canalisations d'assainissement, provoquent ainsi l'altération du sol et l'attaque chimique du béton des fondations.

3.1. La configuration "Réseau à l'intérieur des fondations" est le facteur clé :

Cela signifie que les canalisations (eaux usées, eaux vannes) traversent et reposent dans le sol situé sous le dallage et à l'intérieur du périmètre des fondations (semelles filantes ou radier).

Toute fuite est donc invisible (pas d'eau en surface) et se produit directement dans la zone de sol la plus sollicitée mécaniquement sous le bâtiment.

3.2. Le mécanisme en deux phases : ramollissement puis lessivage :

- Phase 1 : Ramollissement (perte de portance) : Les fuites d'eau, même faibles mais continues, induisent une saturation totale ou partiel selon le type du sol en place. Cet état de cause déstabilise les fondations par la réduction des paramètres des cisaillement (la cohésion et l'angle de frottement interne).
- Phase 2 : Lessivage (création de vides) : puisque notre sol contient des fines (rapport géotechnique), l'eau transporte les particules fines vers l'aval de l'écoulement souterrain. Ce phénomène d'érosion interne crée des vides par la rupture des liaisons, et change la matrice intergranulaire du sol, ce qui déstabilise les fondations.



Figure III.1: Reprise des réseaux d'assainissement et d'AEP.

3.3. L'inclinaison mesurée (12 cm Est - 5 cm Sud) conforte l'hypothèse :

- 12 cm vers l'Est : C'est un tassement différentiel important. Cela signifie que le côté Est du bâtiment a tassé 12 cm de plus que le côté Ouest.
- 5 cm vers le Sud : Le côté Sud a tassé 5 cm de plus que le côté Nord.
- Inclinaison résultante : Le bâtiment penche vers le Sud-Est.
- Corrélation avec une fuite : Il est très probable que la fuite (ou l'accumulation des fuites) se situe du côté Sud-Est des fondations. Le sol sous cette zone est dégradé, tandis que les côtés Nord-Ouest (moins affectés) créent le point de rotation.

Pour un diagnostic complet, on devra éliminer ou confirmer les causes suivantes, parfois concomitantes :

Tableau III.1 : Analyse des désordres résultant de l'humidification du sol des fondations.

Cause probable	Conséquence	Possibilité
Réseau d'eaux pluviales (gouttières, caniveaux) défectueux	Infiltration massive d'eau autour des fondations.	L'eau provient de l'extérieur, pas de l'intérieur.
Fuite du réseau d'eau potable (sous le dallage)	Même mécanisme (ramollissement/lessivage).	La fuite est continue (pression du réseau), donc souvent plus dévastatrice, et l'eau est propre (lessive mieux que les eaux usées chargées).
Comportement du sol des fondations (sécheresse/réhydratation)	Tassement différentiel (retrait-gonflement).	L'inclinaison serait souvent réversible (varie avec les saisons) et affecterait plutôt les façades légères.

3.4. Conséquences et gravité :

Pour un R+4, une inclinaison de 12 cm est significative (environ 0,5% à 1% de degré selon la largeur). Elle peut déjà générer :

- Désordres structurels :

Fissures dans les murs porteurs, descentes de charges modifiées, risques pour les planchers.

- Désordres aux réseaux :

Les canalisations internes sont désaxées, ce qui peut aggraver les fuites.

En l'absence de confirmation finale concernant les causes des désordres, il est impératif d'engager un diagnostic approfondi pour déterminer les causes les plus probables pour y engager des solutions envisageables. Le diagnostic peut comporter .

3.5. Test de recherche de fuite :

Faites réaliser une mise en pression du réseau d'assainissement (sous eau, avec traceur ou caméra endoscopique). Une fuite sous dalle se repère parfois à l'humidimètre ou au gaz traceur.

3.6. Sondages géotechniques ciblés :

Réalisez des carottages ou des pénétromètres dynamiques du côté Sud-Est (là où l'inclinaison est maximale) pour mesurer la compacité et la teneur en eau du sol. Comparez avec le côté Nord-Ouest.

3.7. Arrêt temporaire de l'usage du réseau :

Si la fuite est avérée, couper l'évacuation des eaux usées pour stabiliser le phénomène (toilettes, douches reportées).

3.8. Expertise structure :

Faites calculer par un ingénieur structure si les contraintes dans les poteaux/poutres restent acceptables. Une reprise en sous-œuvre (injection de résine expansive ou micro-béton sous les fondations) pourrait être nécessaire.

Un dysfonctionnement du réseau d'assainissement interne est une cause très probable de l'inclinaison, via le double effet ramollissement + lessivage du sol porteur sous les fondations. Une investigation géotechnique et une recherche de fuite sont indispensables pour confirmer et traiter la cause avant d'envisager de redresser le bâtiment.

4. Possibilité d'erreurs et d'exploitation des résultats du rapport du sol :

4.1. Synthèse des résultats géotechniques pertinents :

Selon le rapport géotechnique, les essais réalisés sur les 4 puits (0 – 1,40 m de profondeur) indiquent les valeurs citées sur le tableau ci-dessous :

Tableau III.2 : résultats des paramètres géotechniques du sol

Paramètre	Puits 01	Puits 02	Puits 03	Puits 04	Interprétation
Passant à 80 µm	63,33 %	61,33 %	64,67 %	83,33 %	Sol fin à très fin
Passant à 2 µm	45 %	46 %	48 %	62 %	Fraction argileuse élevée
WL (%)	42,53	Non mesuré	39,56	Non mesuré	Limite de liquidité moyenne
Ip (%)	20,57	Non mesuré	17,35	Non mesuré	Plasticité moyenne à forte
Teneur en eau W (%)	11,54	10,51	12,87	15,44	Hétérogène
Sulfates SO_4^{2-}	Traces	–	1,15 %	–	Agressivité chimique moyenne (XA2)
Carbonates CaCO_3	14,28 %	–	42,84 %	–	Présence de calcaire actif

4.2. Analyses des mécanismes pouvant expliquer l'inclinaison :

Inclinaisons mesurées :

- ✓ 12 cm vers l'Est
- ✓ 5 cm vers le Sud

Soit une inclinaison résultante ≈ 13 cm sur une hauteur R+4 (≈ 12 m), soit un déplacement horizontal relatif $\approx 1/90$, ce qui est significatif.

- Tassements différentiels d'origine lithologique :
 - ✓ Le passant à 80 μm varie de 61 % à 83 % entre sondages.
 - ✓ Le passant à 2 μm (argile) varie de 45 % à 62 %.
 - ✓ Une hétérogénéité latérale de la fraction argileuse est clairement établie : les zones plus argileuses (P04 : 62 % d'argile) tasseront davantage sous charge que les zones moins argileuses (P02 : 46 %).

Conséquence :

Sous notre bloc la contrainte admissible du sol a été réduite par la présence de l'eau en permanence, un gradient de teneur en argile génère des tassements différentiels, donc une rotation de la structure.

- Retrait/gonflement – un facteur aggravant :
 - ✓ I_p moyen ≈ 19 % (plastique à très plastique).
 - ✓ Sols argileux sensibles aux variations de teneur en eau.
 - ✓ W mesurée : 10,5 % à 15,4 % – proche de la limite de retrait possible.
 - ✓ En climat méditerranéen (BBA), alternance sécheresse/pluie $\rightarrow$ cycles retrait/gonflement.
- ✓ Une hétérogénéité spatiale de l'indice de plasticité (17,35 % vs 20,57 %) et de la teneur en eau initiale entraîne des mouvements verticaux différentiels d'un côté du bâtiment à l'autre, surtout si les fondations sont superficielles.
- Agressivité chimique – effet indirect à long terme :
 - ✓ Puits 03 : 1,15 % de sulfates $\rightarrow$ sol moyennement agressif (XA2).
 - ✓ Présence de carbonates (jusqu'à 42,8 %).
- ✓ Une dégradation des bétons de fondation (sans ciment spécifique XA2) peut entraîner une perte de rigidité locale, modifiant la répartition des contraintes et aggravant les tassements différentiels sur plusieurs années. Cela correspond bien à une évolution lente et progressive de l'inclinaison.



Figure III.2 : reprise et chemisage en sous oeuvre.

4.3. Conclusion– rôle direct du sol dans l'inclinaison :

Les caractéristiques du sol sont très probablement la cause principale, voire unique, des inclinaisons constatées.

Trois mécanismes conjugués, tous objectivés par les essais, expliquent l'inclinaison de 12 cm Est + 5 cm Sud :

Tableau III.3 : Mécanismes responsables de désordres dans le sol

Mécanisme	Confirmation par le rapport
Hétérogénéité de la fraction argileuse (tassements différentiels)	✓ Passant à 2 μm : 46 % à 62 %
Plasticité moyenne à forte ($I_p > 17$) et variations de teneur en eau $\rightarrow$ retrait/gonflement différentiel	✓ I_p : 17,35 % – 20,57 %
Dégradation chimique lente des fondations (sulfates)	✓ 1,15 % SO_4^{2-} (P03) – classe XA2

- ✓ L'inclinaison vers l'Est et le Sud est cohérente avec une répartition non uniforme des argiles plastiques et/ou une exposition différenciée à l'eau et aux sulfates sous la surface du bâtiment.

4.4. Recommandations techniques immédiats :

1. Vérifier la profondeur réelle des fondations – si $< 1,50$ m, elles sont dans la zone active de retrait/gonflement.
2. Réaliser deux essais complémentaires :
 - Pressiomètre sous le bâtiment (pour mesurer le module de déformation réel).
 - Gonflement libre sur carottes prélevées sous semelles (pour quantifier l'amplitude potentielle)
3. Inspection de l'étanchéité périphérique – des infiltrations localisées peuvent aggraver les mouvements différentiels.
4. Prévoir un diagnostic de structure : la rotation actuelle peut avoir généré des fissures en façade et des déversements de planchers.

5. Accumulation des eaux pluviales à l'extérieur de l'immeuble du côté Est :

Le tableau suivant (Tableau 2), résume l'incidence de l'accumulation des eaux pluviales sur désordres constatés.

Tableau III.4 : Analyse de l'influence de l'accumulation des eaux.

Facteur	Incidence sur l'inclinaison Est (12 cm)	Incidence sur l'inclinaison Sud (5 cm)
Eaux stagnantes côté Est	Ramollissement du sol → tassement différentiel côté Est	Faible incidence
Sol argileux / limoneux sensible à l'eau	Perte de portance	/
Eaux également côté Sud	/	Propagation au fil du temps de l'Est vers le Sud
Drainage insuffisant du terrain	Aggrave mais n'est pas cause principale	Partiellement

L'accumulation de la majorité des eaux pluviales au côté Est peut-être l'origine de la magnitude l'inclinaison Est (10 à 12 cm). Cependant l'inclinaison de 5 cm vers le Sud indique les causes probables suivantes :

- Une stagnation d'eau également côté Sud.
- Soit une hétérogénéité naturelle du sol (couche compressible plus épaisse sous le côté Sud-Est).
- Soit un défaut de fondation indépendant.

L'accumulation d'eau pluviale à l'Est est une cause plausible de l'inclinaison Est, mais elle n'explique pas les 5 cm vers le Sud sans une stagnation similaire au Sud. L'hypothèse la plus cohérente est un tassement différentiel affectant la zone Sud-Est du bâtiment, les eaux à l'Est n'étant qu'un facteur aggravant ou révélateur, non exclusif.

6. Erreur probable dans l'étude d'exécution :

Nous avons utilisé le logiciel (Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2021), il est le plus utilisé par les bureaux d'études en Algérie.

6.1. Simulation numérique du bâtiment :

6.1.1. Actions et combinaisons d'actions :

6.1.1.2. Charges permanentes selon DTR B.C.2.2 :

✓ Plancher terrasse inaccessible en corps creux :

Corps creux 16 + 4	Pris par le logiciel	
Enduit en plâtre 1,5 cm	0,15	[KN/m ²]
Forme de pente 5 cm au moyenne	1,25	[KN/m ²]
Isolation thermique	0,05	[KN/m ²]
Etanchéité	0,15	[KN/m ²]
Couche de gravillon	0,40	[KN/m ²]
Total:	G₁	= 2,85

[KN/m²].

✓ Plancher étage courant en corps creux :

Corps creux 16 + 4	Pris par le logiciel	
Enduit en plâtre 1,5 cm	0,15	[KN/m ²]
Carrelage + mortier de pose	1,40	[KN/m ²]
Total:	G₂	= 1,55 [KN/m ²].

✓ Dalle pleine 15:

Dalle en béton armé épaisseur 15 cm Pris par le logiciel

Enduit en plâtre 1,5 cm 0,15 [KN/m²]

Carrelage + mortier de pose 1,40 [KN/m²]

Total: **G₂ = 1,55** [KN/m²].

✓ Parois en brique creuse 10 cm :

Brique de 10 cm 0,90 [KN/m²]

Enduit en ciment 2 cm 0,38 [KN/m²]

Total: **G₃ = 1,28** [KN/m²].

✓ Parois en brique creuse 20 cm :

Brique de 20 cm 1,75 [KN/m²]

Enduit en ciment 2 cm 0,38 [KN/m²]

Total : **G₄ = 2,13** [KN/m²].

6.1.1.3 Charges d'exploitation selon DTR B.C.2.2 :

✓ La charge d'exploitation pour une terrasse inaccessible est de : $Q_1 = 1 \text{ KN/m}^2$.

✓ La charge d'exploitation pour le plancher courant (Habitation) : $Q_2 = 1,5 \text{ KN/m}^2$.

✓ La charge d'exploitation pour L'escalier est de : $Q_3 = 2,5 \text{ KN/m}^2$.

✓ La charge d'exploitation pour les balcons est de : $Q_4 = 3,5 \text{ KN/m}^2$.

6.1.1.4. Combinaisons d'actions (ELU et ELS) :

✓ ELU : $1,35 G + 1,5 Q$.

✓ ELS : $G + Q$.

6.1.1.5. Combinaisons accidentelles selon RPA :

✓ $G + Q + E$

✓ $0.8 G + E$

✓ $G + Q + 1.2 E$.

a) Charges introduites au Robot :

Cas	Type de charge	Liste	Valeurs de la charge (m) (kN) (Deg)
1:G0	poids propre	1A9 13A32 34A37 39A103	'PZ Moins Coef=1,00
2:G1	(EF) surfacique uniforme	109 461 484 488	'PZ=-2,85[kN/m2]
3:G2	(EF) surfacique uniforme	105A108 457A460	'PZ=-1,55[kN/m2]
3:G2	(EF) surfacique uniforme	479A483 485A487	'PZ=-1,55[kN/m2]
4:G34	(EF) surfacique uniforme	105A108 457A460	'PZ=-1,70[kN/m2]
5:Q1	(EF) surfacique uniforme	109 461 484 488	'PZ=-1,00[kN/m2]
6:Q2	(EF) surfacique uniforme	105A108 127 390 457A460	'PZ=-1,50[kN/m2]
7:Q3	(EF) surfacique uniforme	480A483	'PZ=-2,50[kN/m2]
8:Q4	(EF) surfacique uniforme	479 485A487	'PZ=-3,50[kN/m2]
*			

b) Combinaisons de charges introduites au Robot :

Combinaison	Nom	Type d'analyse	Type de la	Nature du cas	Définition
14 (C)	ELU	Combinaison lin	ELU	Structurelle	$(1+2+3+4)*1.35+(5+6+7+8)*1.50$
15 (C)	ELS	Combinaison lin	ELS	Structurelle	$(1+2+3+4+5+6+7+8)*1.00$
16 (C) (CQC)	ACC 1	Combinaison lin	ELU	Structurelle	$(1+2+3+4)*1.35+(5+6+7+8)*1.50+12*1.00$
17 (C) (CQC)	ACC 2	Combinaison lin	ACC	Structurelle	$(1+2+3+4+5+6+7+8+13)*1.00$
18 (C) (CQC)	ACC 3	Combinaison lin	ELU	Structurelle	$(1+2+3+4)*0.80+12*1.00$
19 (C) (CQC)	ACC 4	Combinaison lin	ELU	Structurelle	$(1+2+3+4)*0.80+13*1.00$
20 (C) (CQC)	ACC 5	Combinaison lin	ACC	Structurelle	$(1+2+3+4+5+6+7+8)*1.00+12*1.20$
21 (C) (CQC)	ACC 6	Combinaison lin	ACC	Structurelle	$(1+2+3+4+5+6+7+8)*1.00+13*1.20$

6.2. Données sismiques du projet :

NB : Le site de la ville de BBA se trouve dans une zone de sismicité IIa d'après la classification de l'RPA 99.

Groupe d'usage : 2.

Coefficient de comportement $R = 5$.

Coefficient de qualité $Q = 1$.

6.3. Caractéristiques du site et résultats géotechniques :

Le site de construction est localisé à la vaille de BBA. En se basant sur la nature du sous-sol ainsi que les résultats des essais In-situ et au laboratoire, ces sols peuvent développer des contraintes admissibles minimales de de l'ordre de 2 Bars retenues sur une profondeur d'ancrage de 2 m au minimum.

Le site du projet est localisé dans la catégorie : S3 (sol meuble), d'après la classification du RPA 99.

Les analyses chimiques du sol montrent un milieu agressif, ce qui implique l'utilisation d'un ciment spéciale du type CRS.

6.4. Estimation de la raideur de sol pour la modélisation des fondations :

La raideur est la caractéristique qui indique la résistance à la déformation élastique d'un sol, traduit par un coefficient donné par la formule de BOWLES :

$$K = 40 \cdot F_s \cdot Q_{adm}$$

- ✓ Avec F_s : coefficient de sécurité pris égale à 3
- ✓ 40 : est un facteur traduisant un tassement fixé arbitrairement à 25 mm ($1/0.025=40$)
- ✓ Q_{adm} : contrainte admissible du sol égale à 0.150 MPa
- ✓ $K = 40 \times 3 \times 0.150$

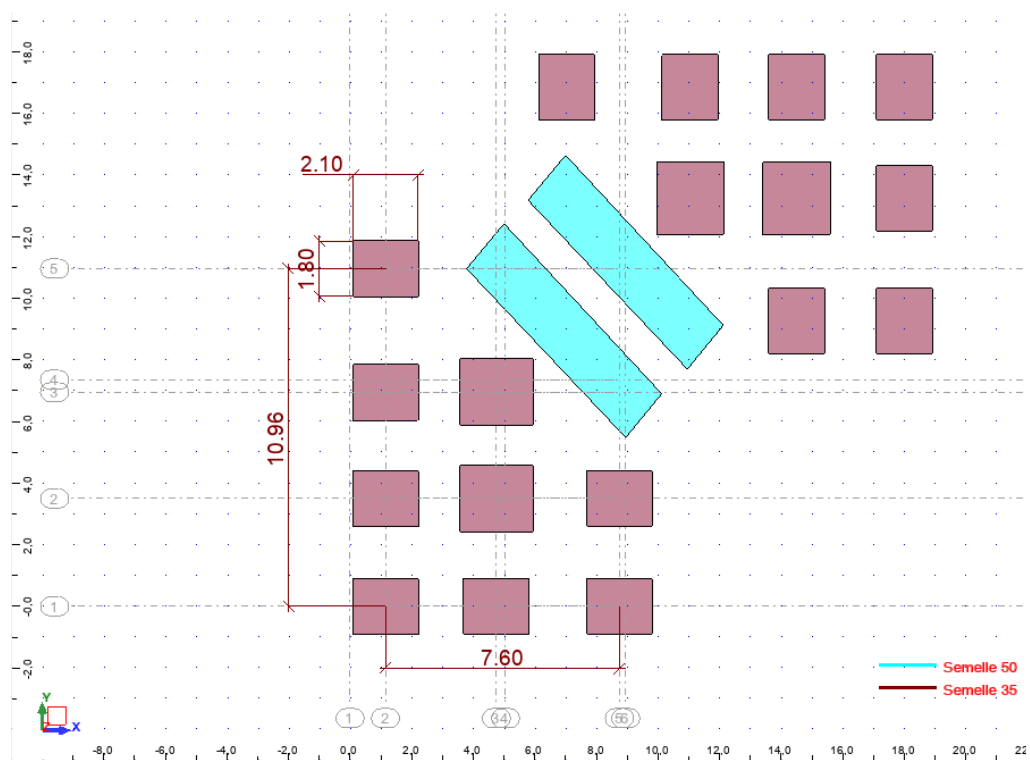
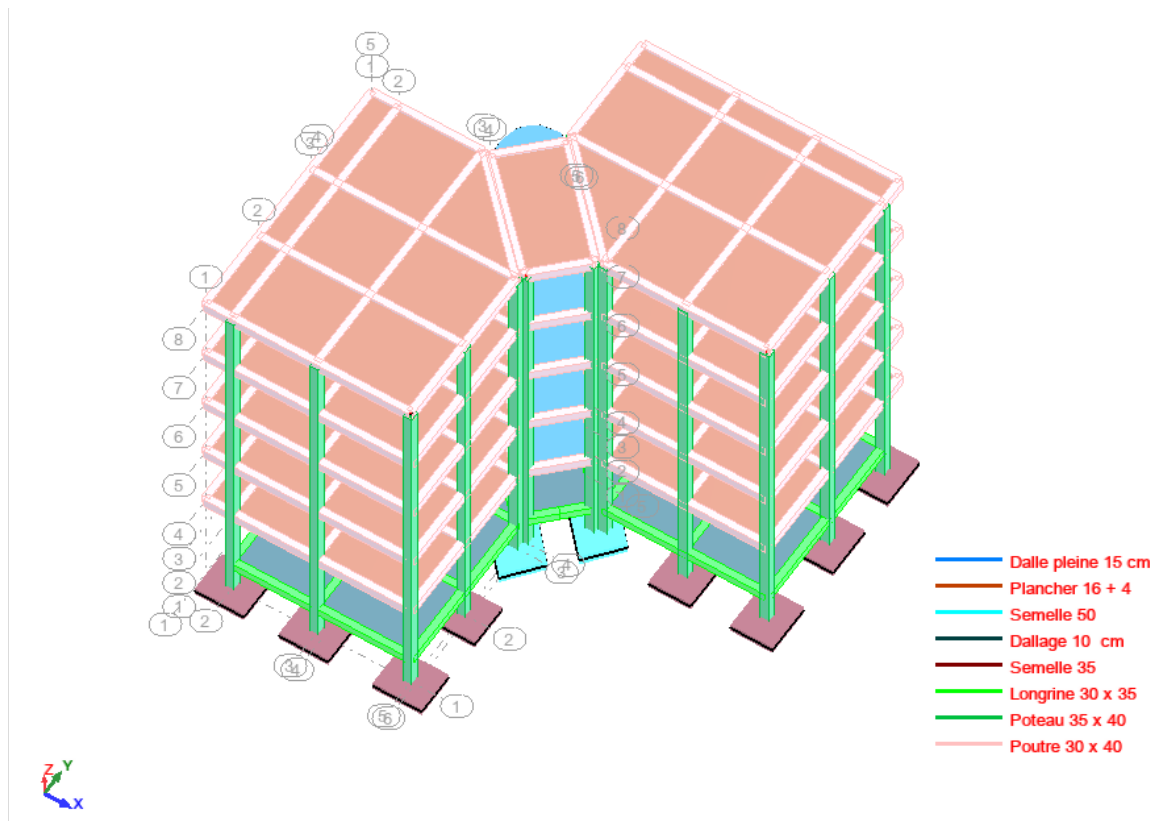
$$K = 1800 \text{ T/m}^3$$

- Pour une contrainte admissible du sol de 2 bars, $K = 24000 \text{ KN/m}^3$.
- Pour une contrainte admissible du sol de 1 bars (mauvais sol : MS), $K = 12000 \text{ KN/m}^3$.

6.5. Modélisation de la structure sous Robot :

Nous prenons pour une première simulation une contrainte admissible du sol de 2 bars répartie sur toute la surface de l'ouvrage.

Par la suite, un scénario d'un sol hétérogène est imaginé, c'est-à-dire, une partie de la surface de l'ouvrage est fondée sur un sol avec 2 bars, et la deuxième partie avec un sol de 1 bar (mauvais sol).



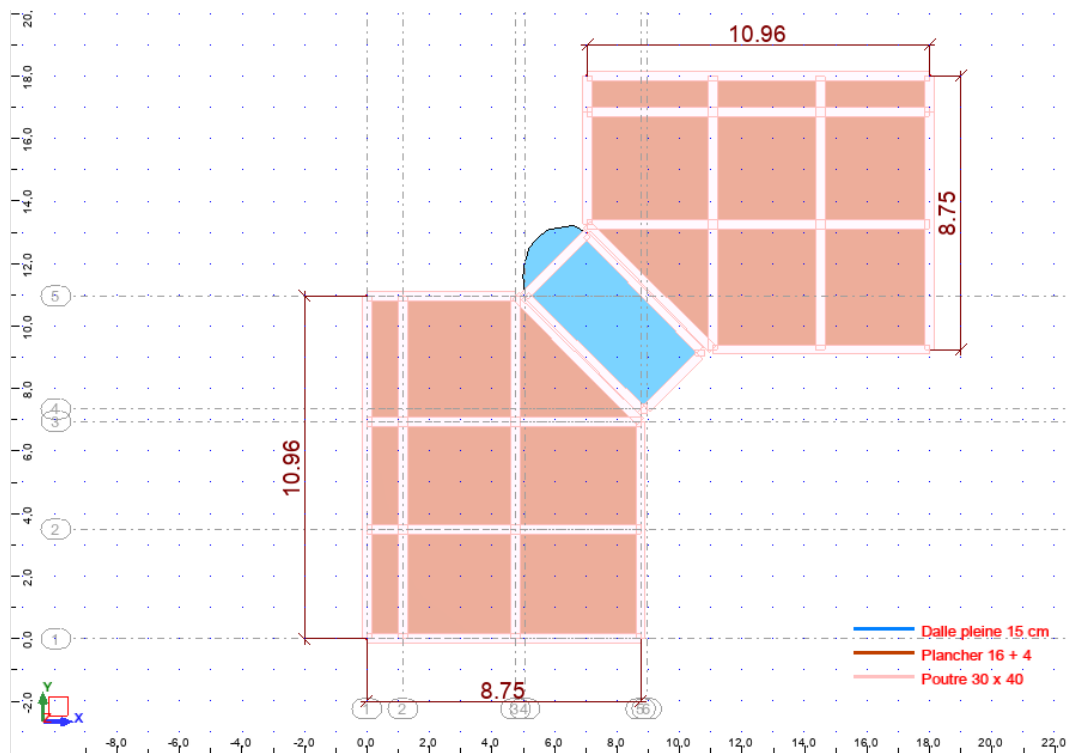


Figure III.5 : Vue en plan étage courant

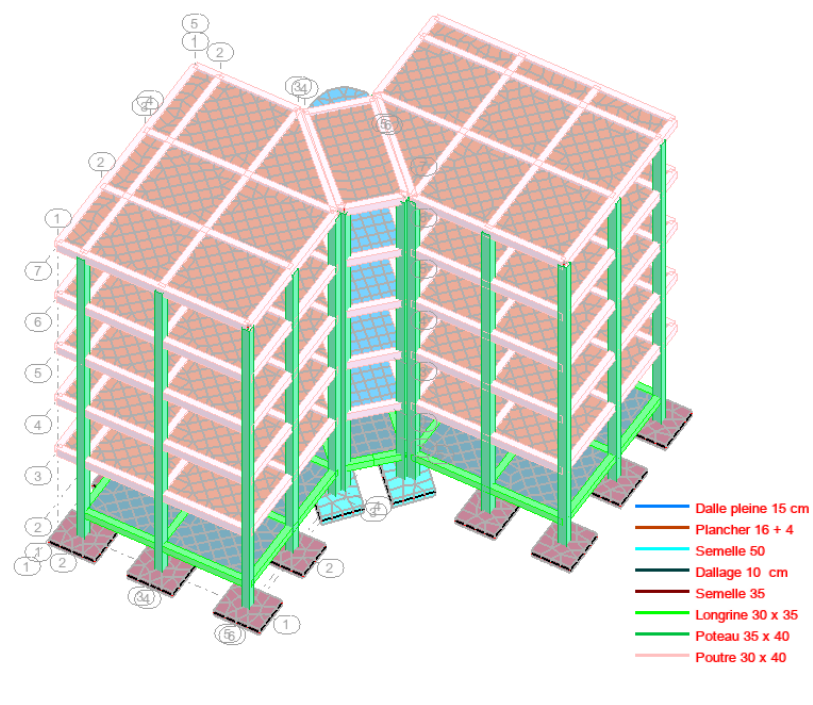


Figure III.6 : Maillage de la structure.

a) Résultats avec sol homogène, $\sigma_{adm} = 2$ bars :

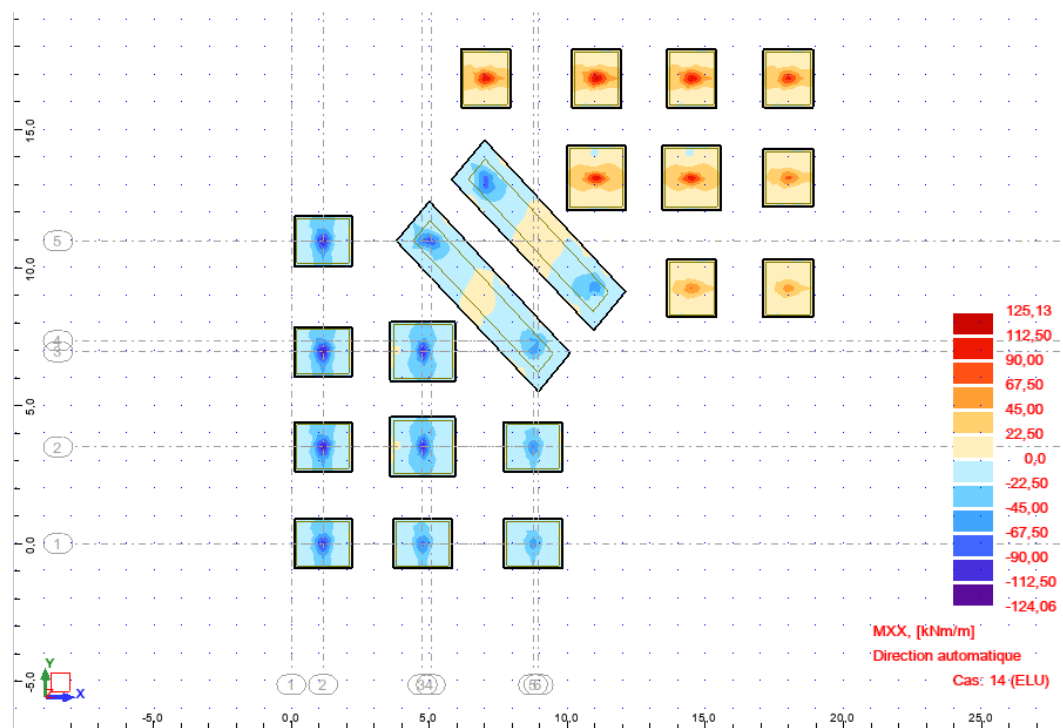


Figure III.7 : Moment au niveau des semelles sous ELU.

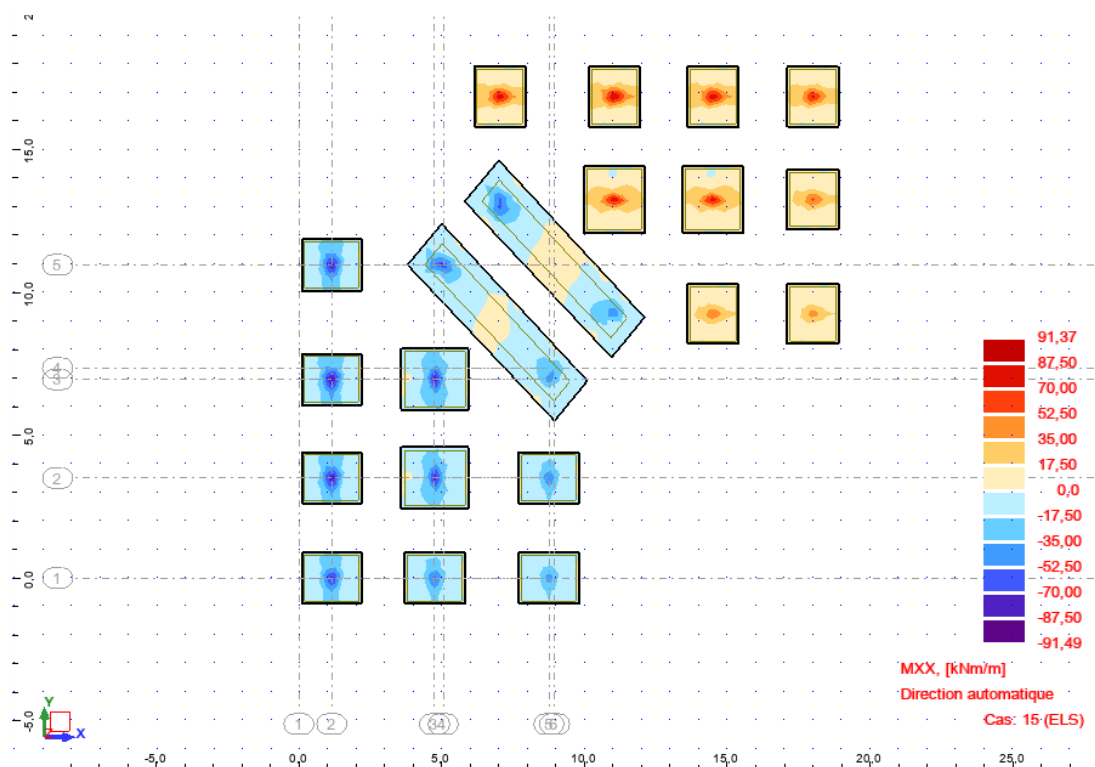


Figure III.8 : Moment au niveau des semelles sous ELS.

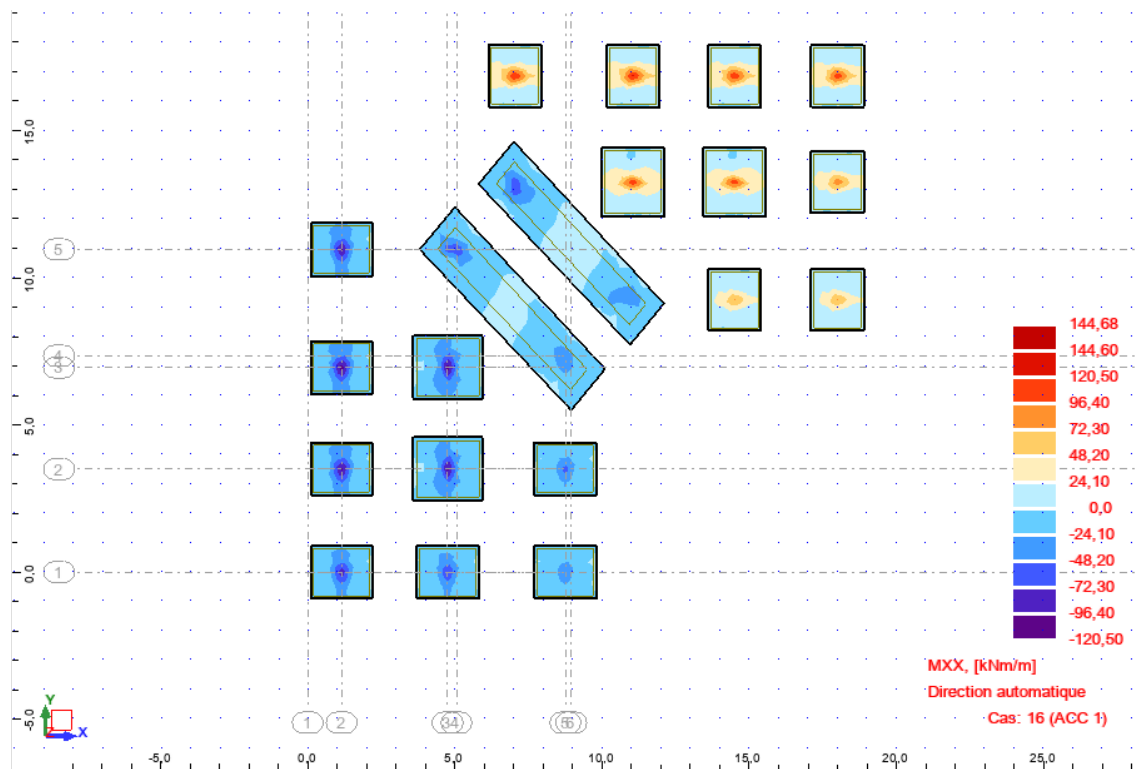


Figure III.9 : Moment max au niveau des semelles sous les combinaisons accidentelles.

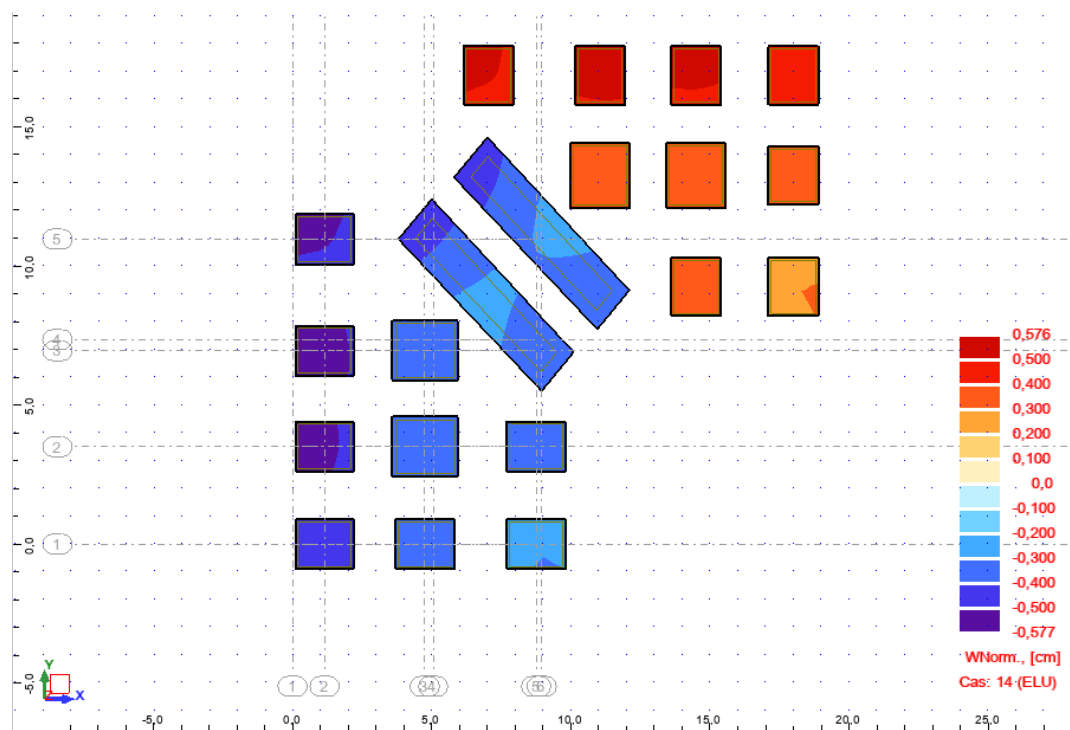


Figure III.10 : Déplacement suivant -Z sous ELU.

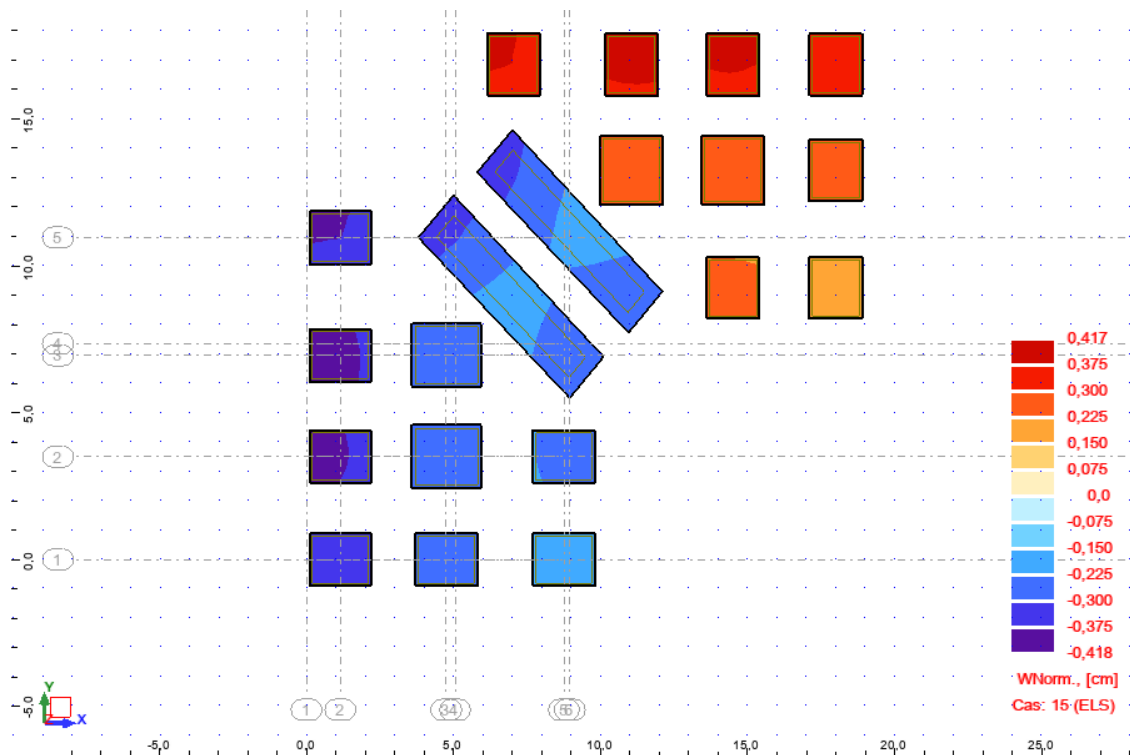


Figure III.11 : Déplacement suivant -Z sous ELS.

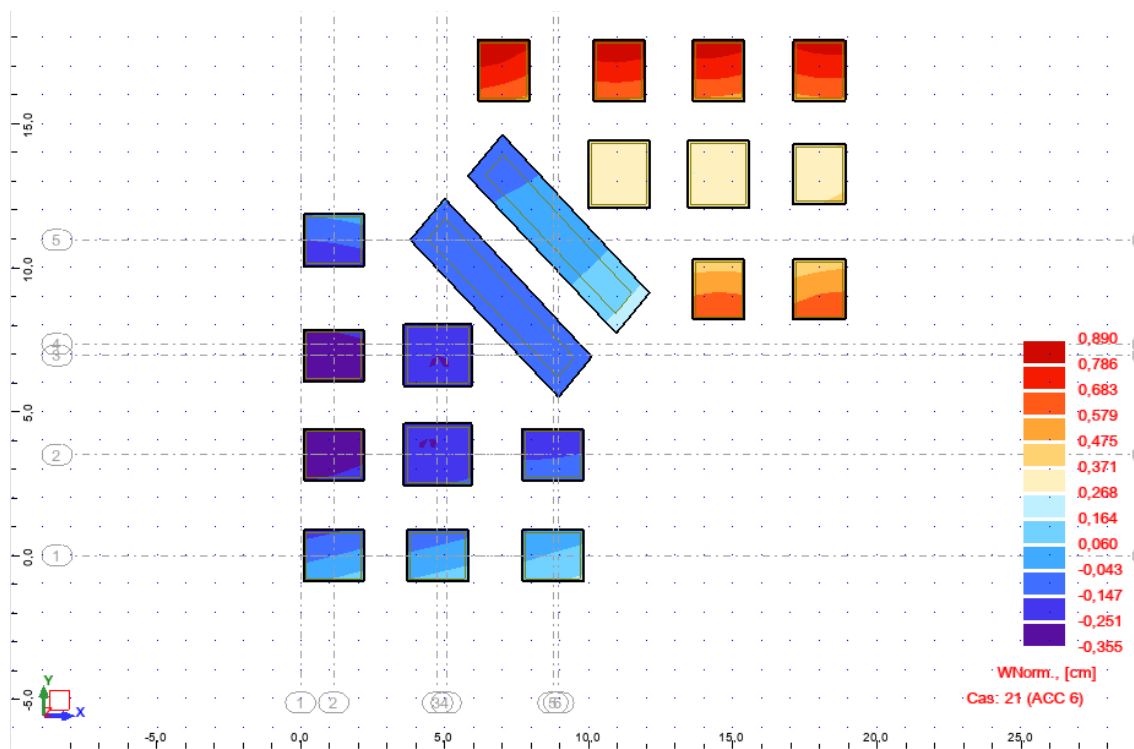


Figure III.12 : Déplacement max sous les combinaisons accidentelles.

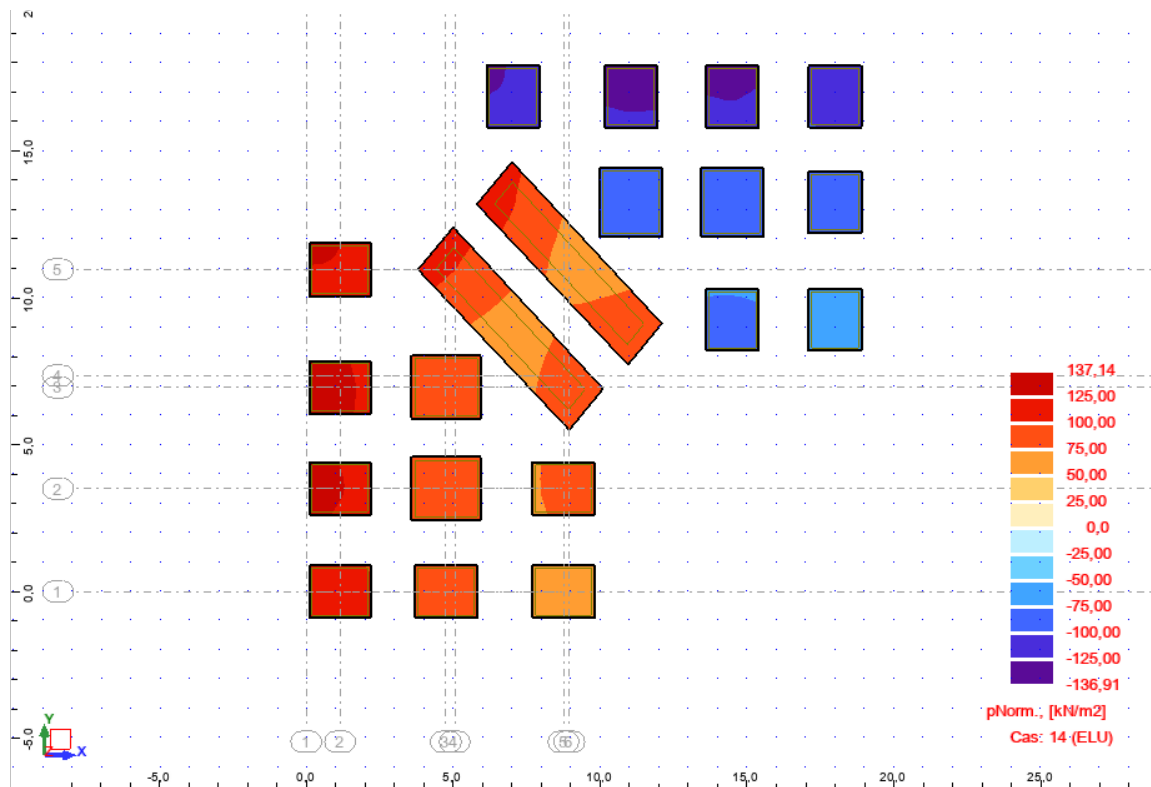


Figure III.13 : Réaction du sol en ELU.

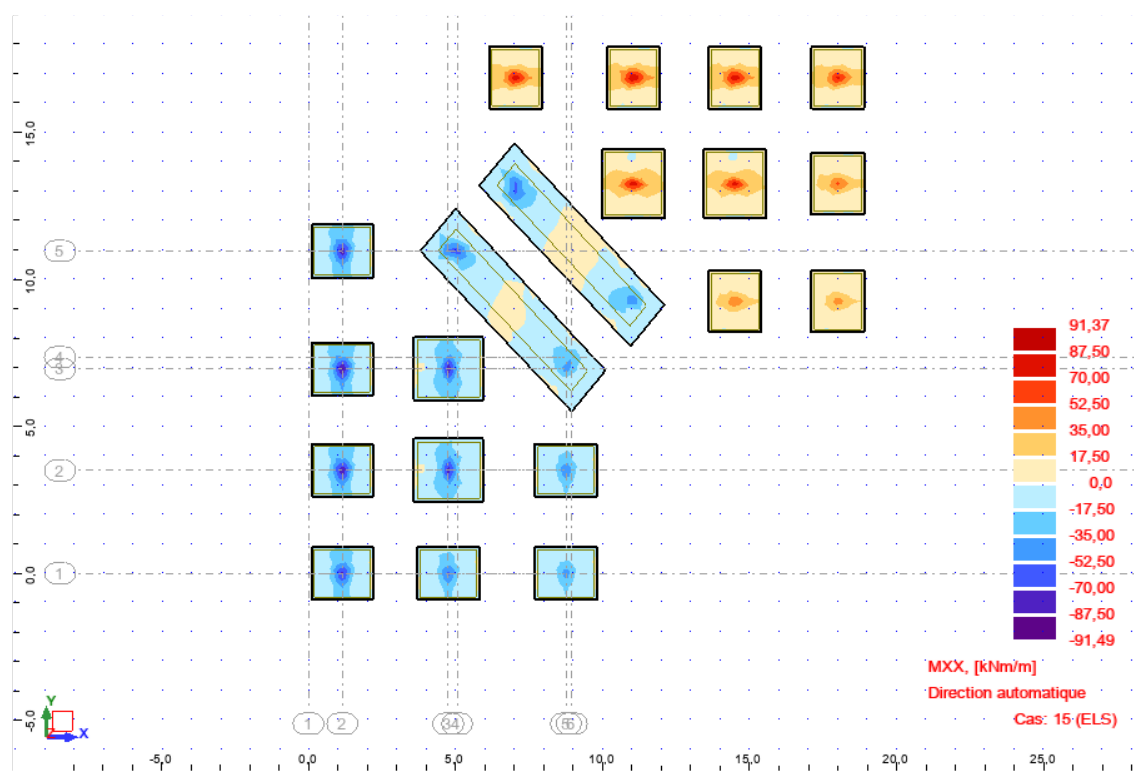


Figure III.14 : Réaction du sol en ELS.

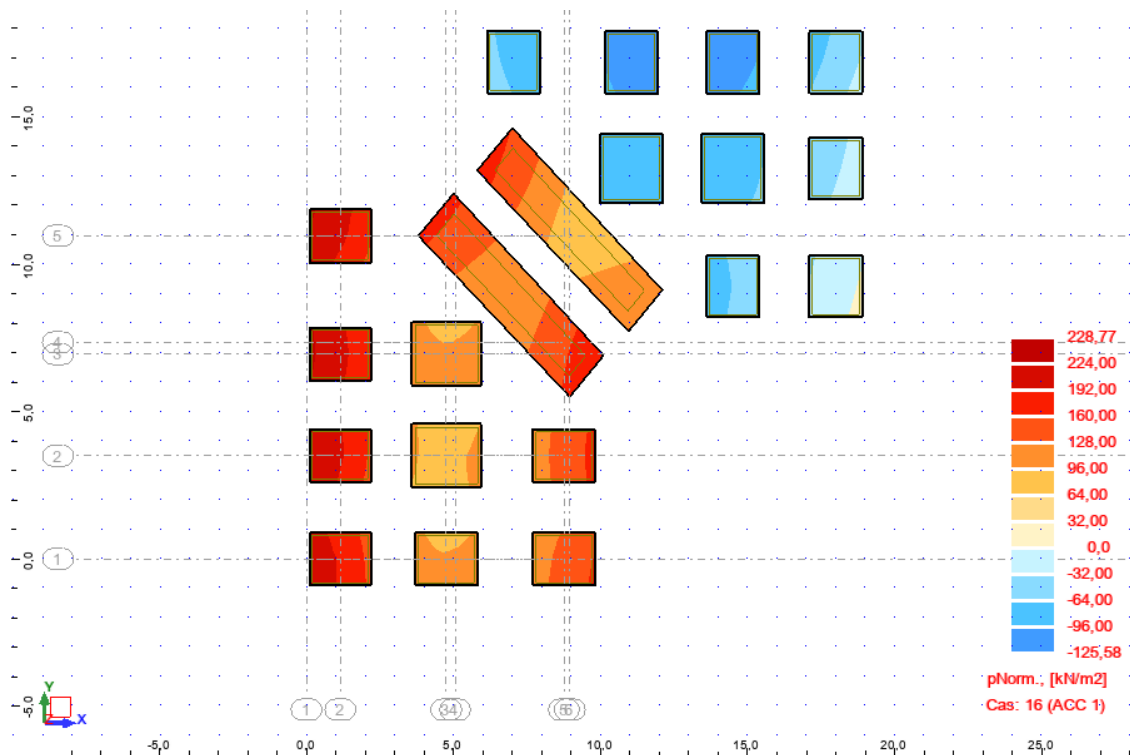


Figure III.15 : Réaction du sol max sous les combinaisons accidentelles.

b) Résultats avec sol hétérogène, $\sigma_{adm} = 1$ et 2 bars :

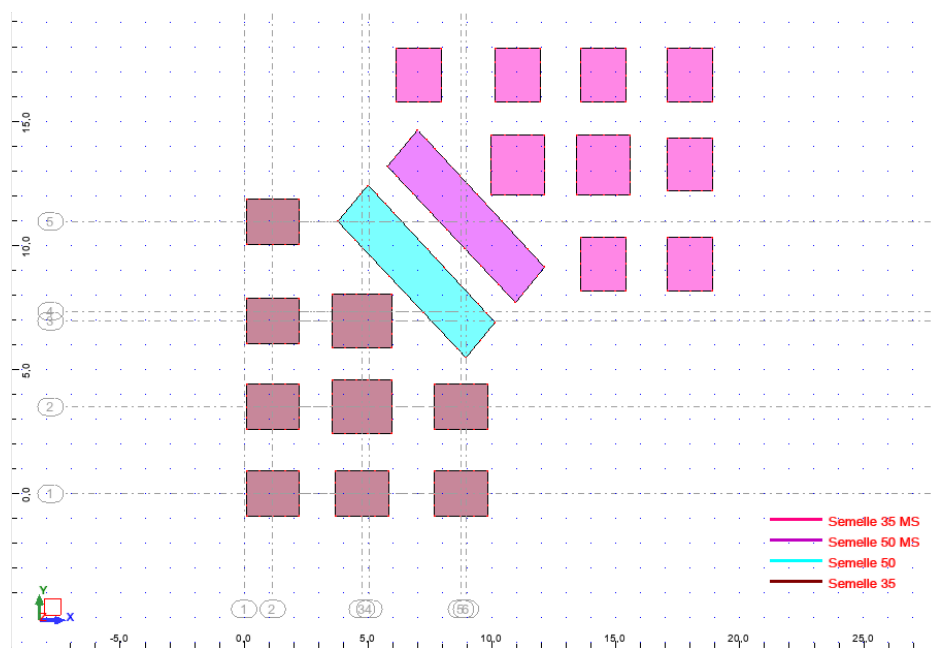


Figure III.16 : Une partie des fondations fondée sur
un sol de 2 bars et une partie sur un sol de 1 bar.

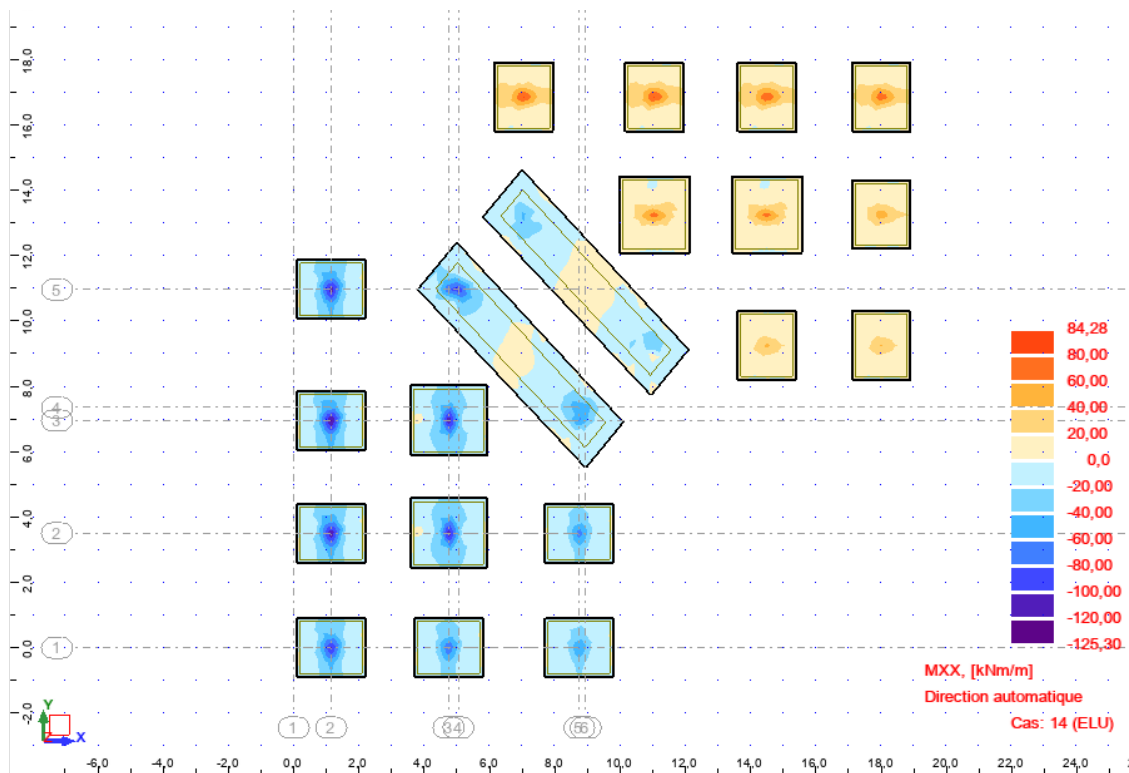


Figure III.17 : Moment au niveau des semelles sous ELU.

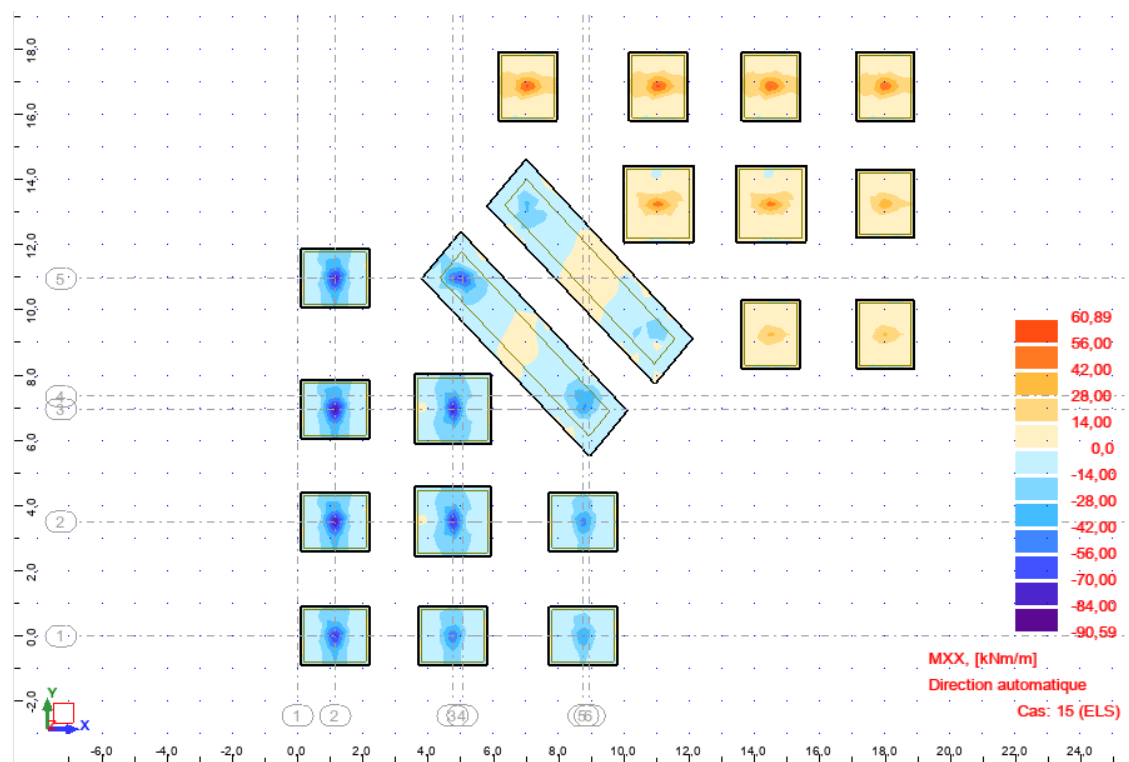


Figure III.18 : Moment au niveau des semelles sous ELS.

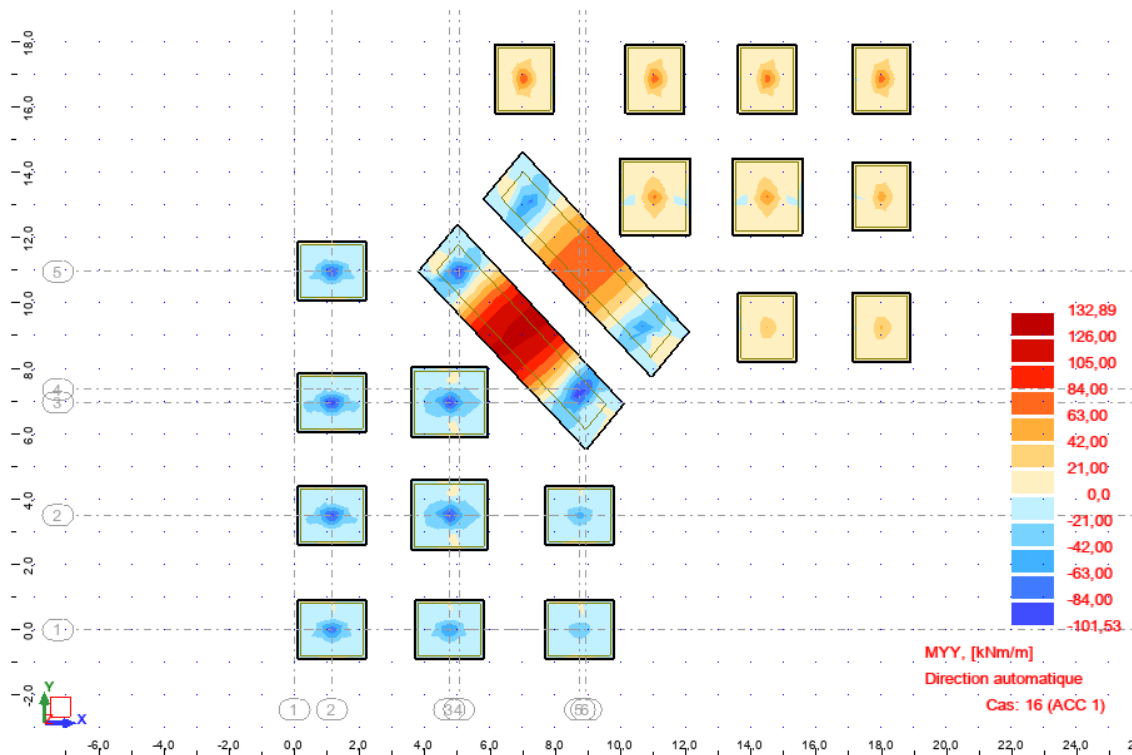


Figure III.19 : Moment max au niveau des semelles sous les combinaisons accidentelles.

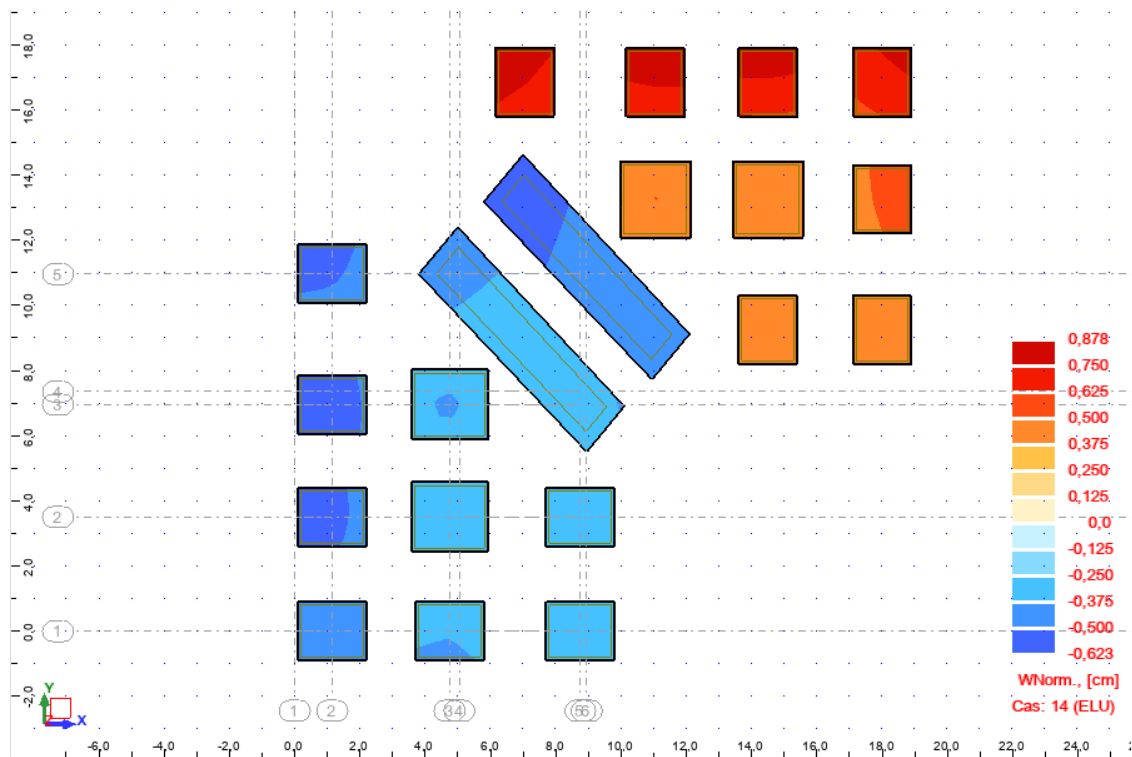


Figure III.20 : Déplacement suivant -Z sous ELU.

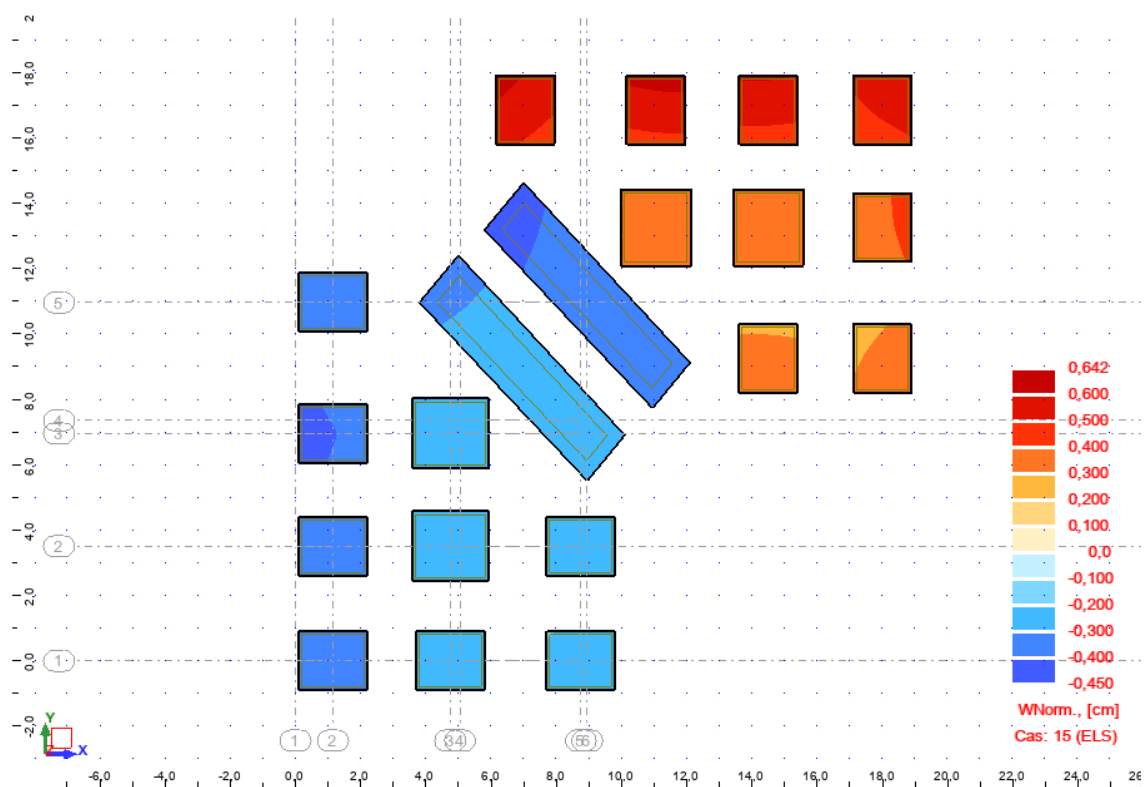


Figure III.21 : Déplacement suivant -Z sous ELS.

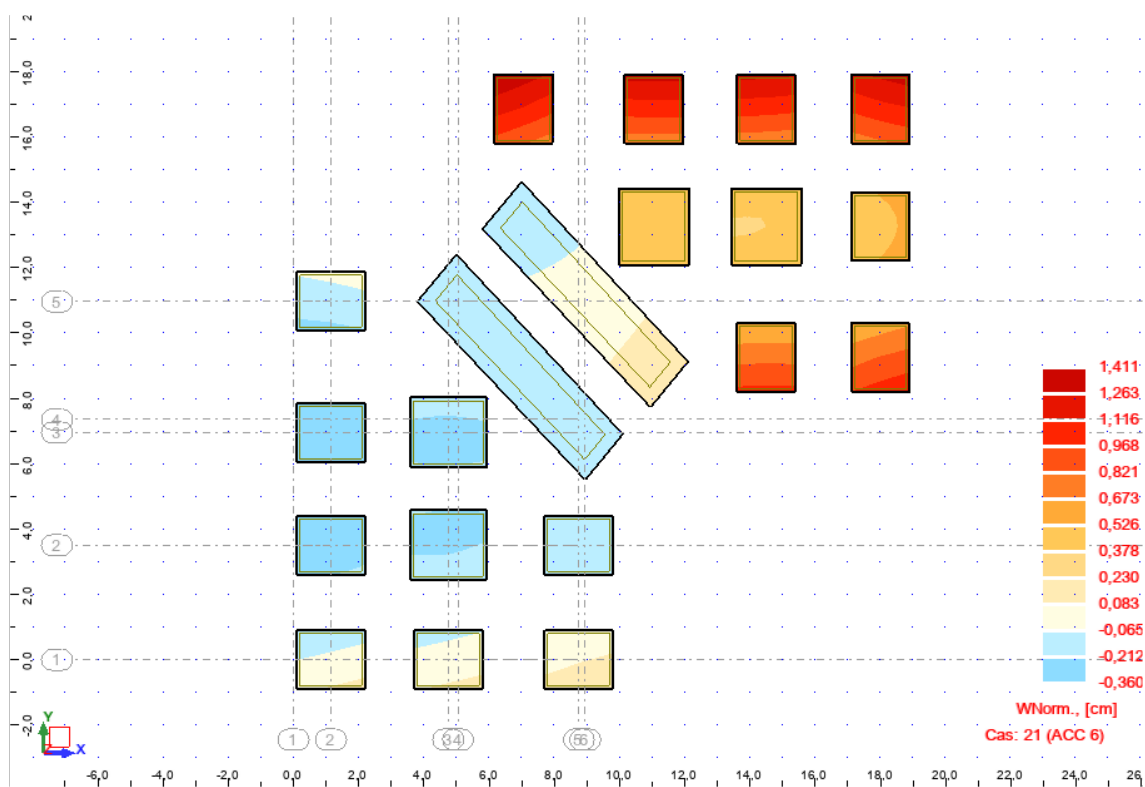


Figure III.22 : Déplacement max sous les combinaisons accidentelles.

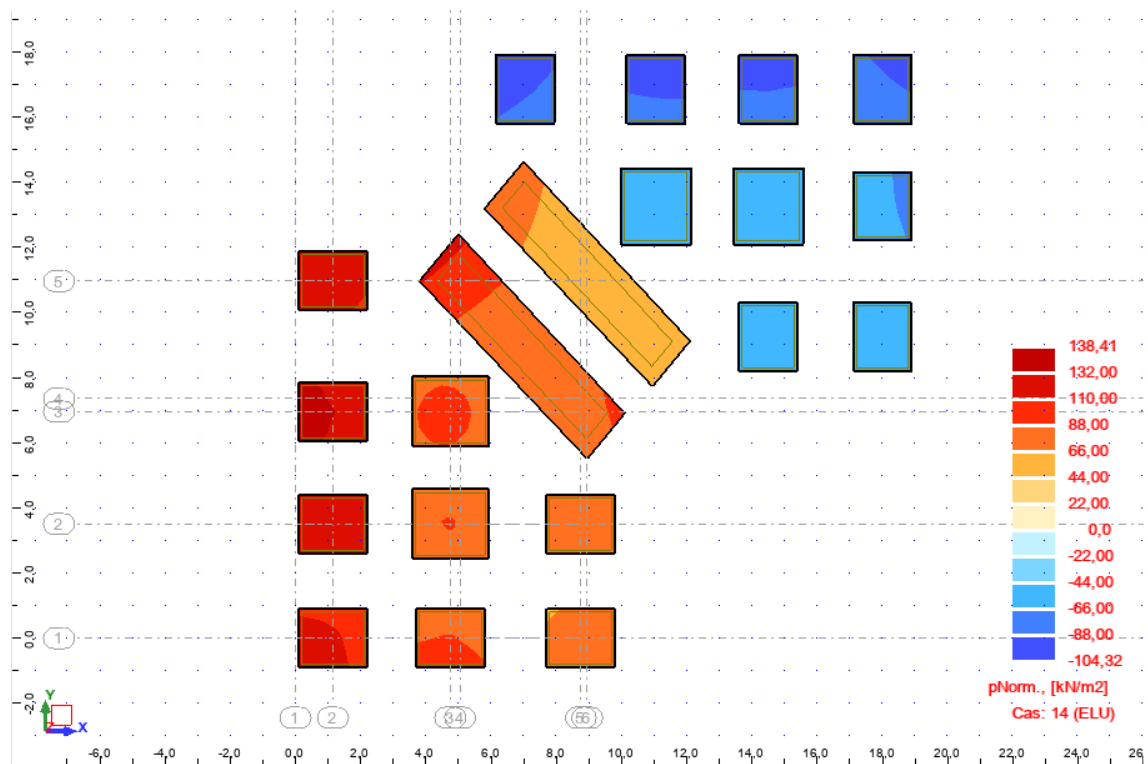


Figure III.23 : Réaction du sol en ELU.

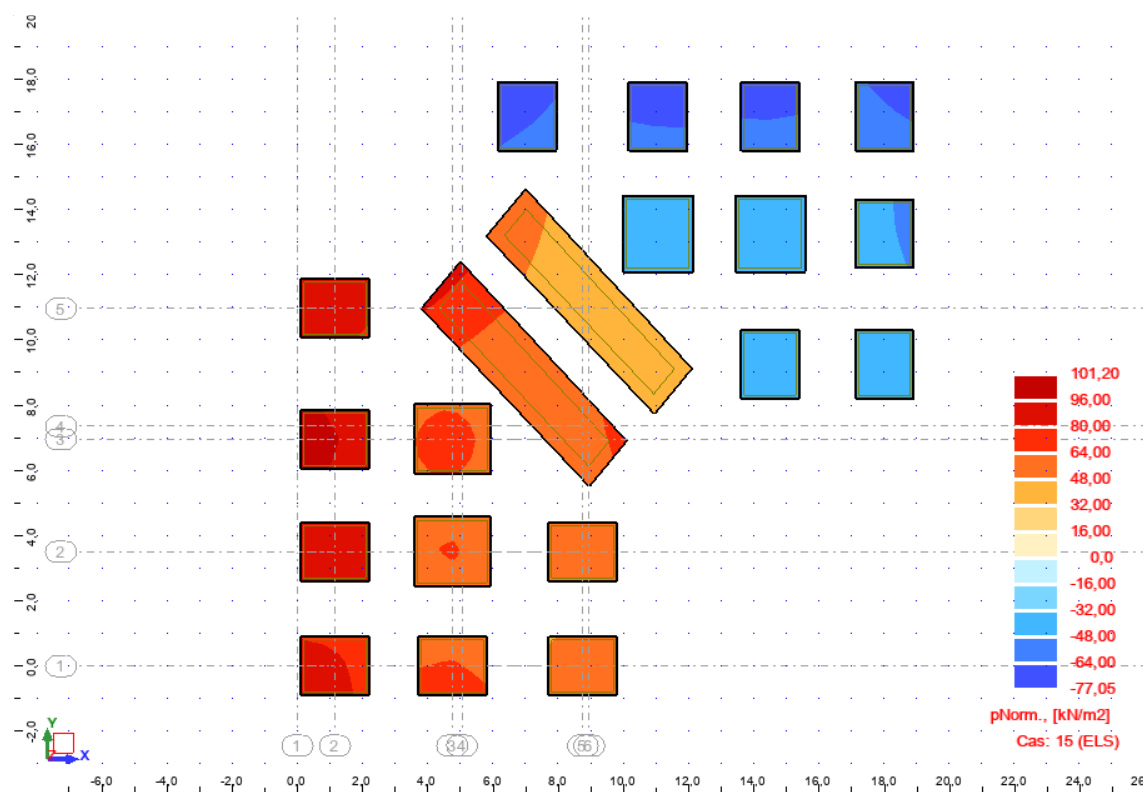


Figure III.24 : Réaction du sol en ELS.

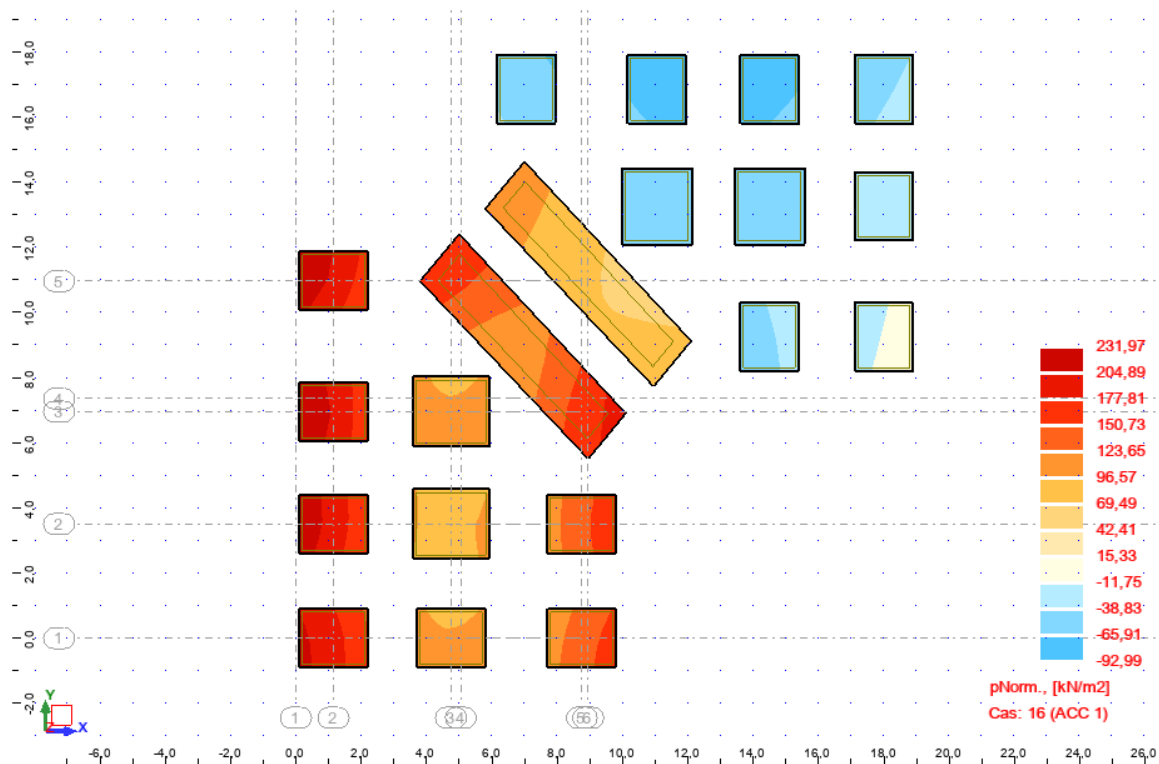


Figure III.25 : Réaction du sol max sous les combinaisons accidentelles.

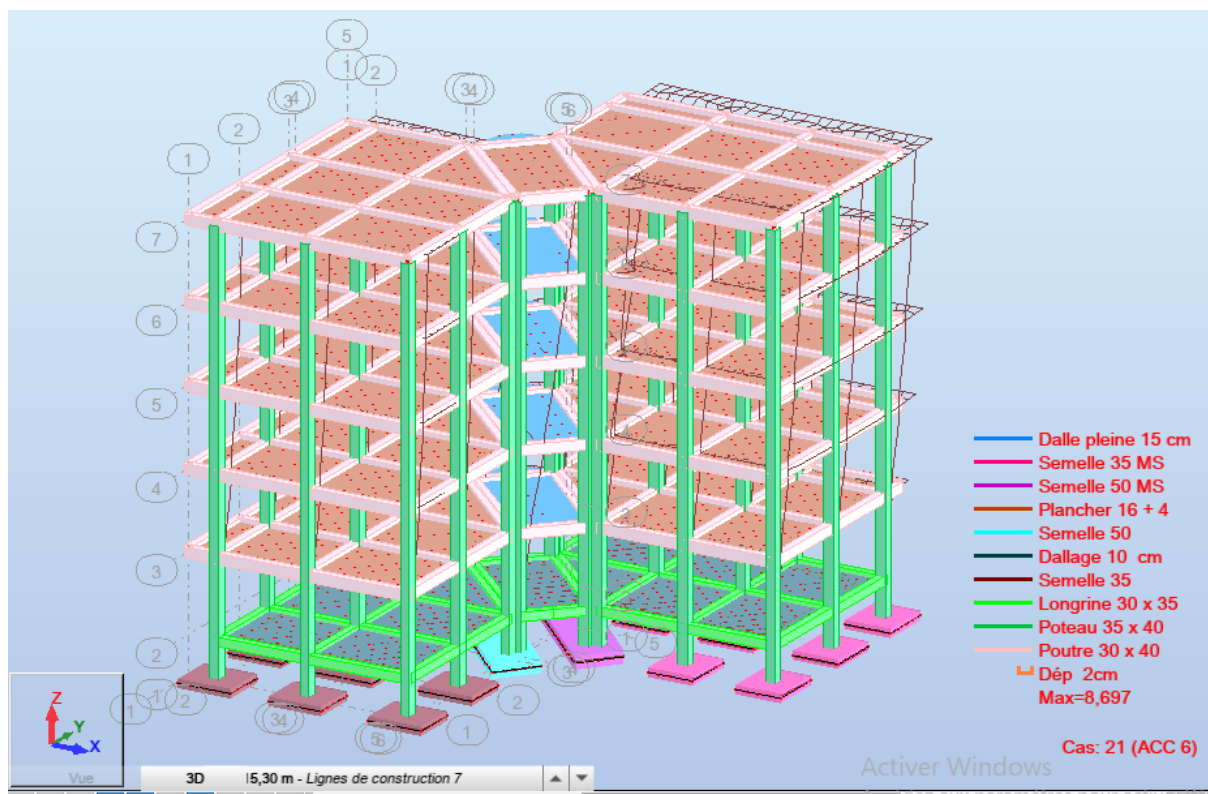


Figure III.26 : Déplacement max en tête du bâtiment sous la combinaison ACC 6.

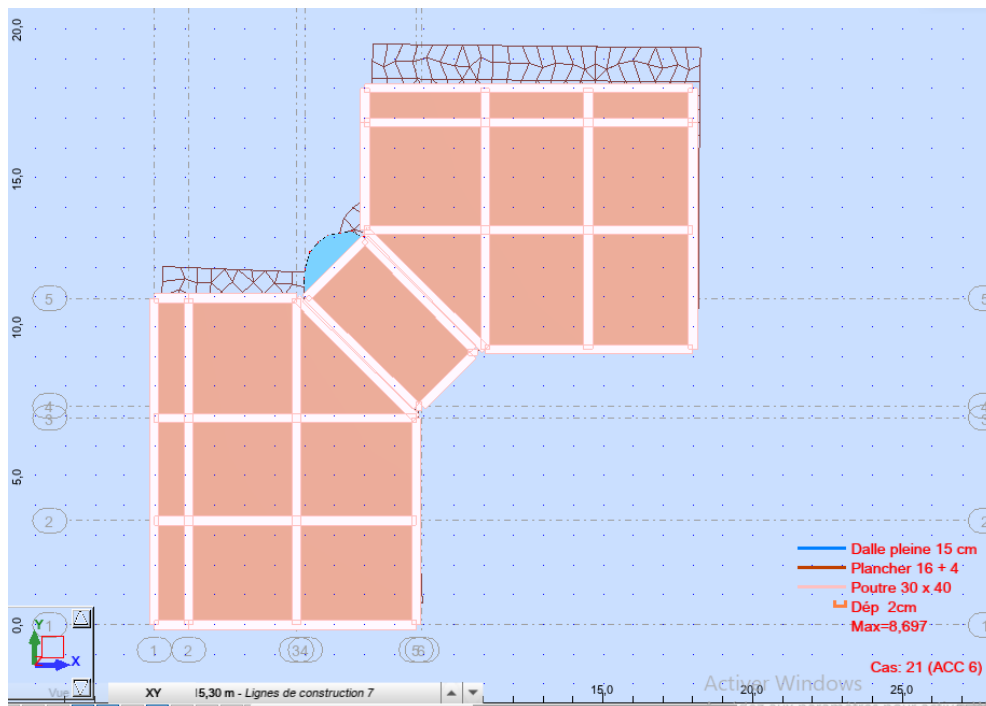


Figure III.27 : Déplacement max en tête du bâtiment sous la combinaison ACC 6.

6.6. Interprétation :

Soit un déplacement proche de 9 cm en tête du bâtiment sous la combinaison accidentelle ACC 6, ce qui rapproche vers la réalité (environ 10 cm) enregistrée pendant la visite de terrain sur les lieux.

Il est fort probable que ce déplacement est dû à un mouvement du bâtiment en cas du mauvais sol sur le cote le plus endommagé par l'infiltration des eaux, excité par un séisme qui a touché la région dans les dernières années.

Le déplacement du bâtiment en tête a été alors aggravé par trois facteurs importants :

- ✓ Mauvais sol sous une partie du bâtiment,
- ✓ La forme en plan du bâtiment avec un décrochement dépassant les limites prescrites par le RPA 99 (page 34), avec $(l_1 + l_2) / L = 15 / 17,6 = 0,85$ nettement supérieur à 0,25.
- ✓ Disposition des joints séparant le gage de l'escalier par rapport aux appartements.

7. Conclusion :

L'inclinaison du bâtiment (13 cm) et les fissures observées résultent de l'action combinée des racines de FICUS, des fuites du réseau d'assainissement et de l'hétérogénéité du sol. Les racines, situées à 4-5 m, ont favorisé le retrait des argiles, tandis que les fuites sous les fondations ont provoqué ramollissement et lessivage du sol, créant des vides côté Sud-Est. L'hétérogénéité du sol (argile de 45 à 62 %, plasticité forte, sulfates XA2) a aggravé les tassements différentiels et la dégradation chimique des fondations. La simulation numérique sous Robot (sol hétérogène 1/2 bar) donne un déplacement en tête de 9 cm, proche des 12 cm mesurés, confirmant ces mécanismes. La cause première est donc le sol plastique et hétérogène, les fuites d'eau et les racines jouant un rôle aggravant, ce qui justifie des investigations complémentaires et des travaux de reprise en sous-œuvre.

Chapitre IV

Conclusions et recommandations.

1. Rappel du contexte et des objectifs :

L'expertise menée sur le bâtiment en béton armé (R+4), situé à Bordj Bou Arreridj et construit en 1994, avait pour objectif de diagnostiquer les causes des désordres structurels observés : inclinaison anormale de l'ouvrage (12 cm vers le sud et 5 cm vers l'est), fissures traversantes évolutives (jusqu'à 10 cm d'ouverture), éclatement du mortier et des dalles, notamment au 4ème étage, ainsi que des signes d'humidité et de dégradation des réseaux.

À l'issue des investigations documentaires, des visites de terrain, des analyses géotechniques et des simulations numériques, ce chapitre final synthétise les causes retenues, évalue la gravité de la situation, et propose des solutions de confortement adaptées et durables.

2. Synthèse des causes des désordres :

L'analyse croisée des chapitres 1 à 3 permet d'identifier une combinaison de facteurs naturels, techniques et humains :

2.1. Causes géotechniques et hydriques (facteurs déclencheurs principaux) :

- Hétérogénéité du sol d'assise : présence d'un sol fin à très plastique (I_p moyen $\approx 19\%$), avec une fraction argileuse variant de 45 % à 62 % sur la surface du bâtiment. Cette variation latérale génère des tassements différentiels.
- Présence d'arbres FICUS à proximité (4 à 5 m) : racines puissantes et superficielles, s'étendant horizontalement jusqu'à 20 m, absorbant l'eau du sol et aggravant le retrait des argiles.
- Dysfonctionnement du réseau d'assainissement : canalisations traversant l'intérieur des fondations, avec fuites avérées, entraînant un ramollissement du sol, une érosion interne et la création de vides sous les semelles.
- Accumulation des eaux pluviales côté Est : stagnation favorisant la saturation du sol, la perte de portance et l'aggravation des infiltrations.

2.2. Causes liées aux études et à l'exécution :

- Insuffisances probables de l'étude géotechnique initiale : nombre et profondeur des sondages limités (0 à 1,40 m), absence d'étude des variations saisonnières de la nappe, absence de caractérisation du retrait-gonflement.
- Matériaux non conformes : absence de ciment spécial (type CRS) malgré une agressivité chimique du sol (sulfates jusqu'à 1,15 %, classe XA2), entraînant une dégradation progressive des fondations.
- Erreurs dans l'étude structurelle : irrégularité en plan non conforme au RPA 99 (rapport $(I1+I2)/L = 0,85 > 0,25$), joint de séparation inefficace (5 cm), modélisation mécanique inadaptée à l'hétérogénéité du sol.

2.3. Conséquences sur l'ouvrage :

- Inclinaison résultante d'environ 13 cm sur 12 m de hauteur (soit $\approx 1/90$), dépassant largement les tolérances admissibles.
- Fissures structurelles évolutives, désordres sur les dalles du 4ème étage (ouverture jusqu'à 10 cm), risque de désaxement des réseaux intérieurs.
- Simulation numérique sous Robot (sol hétérogène 1 bar / 2 bars) montre un déplacement en tête de bâtiment proche de 9 cm sous combinaison accidentelle, corroborant les mesures terrain.

3. Évaluation de la gravité et de l'urgence :

L'état actuel du bâtiment présente un risque élevé d'aggravation des désordres en cas de nouvelle sollicitation sismique ou pluviométrique exceptionnelle. La sécurité des occupants n'est pas immédiatement compromise, mais une intervention rapide est impérative pour :

- Stabiliser les tassements différentiels,
- Empêcher l'évolution des fissures,
- Éviter un basculement supplémentaire de l'ouvrage.

4. Recommandations finales :

Les recommandations sont classées en trois niveaux : investigations complémentaires, mesures curatives, et actions préventives durables.

4.1. Investigations complémentaires (à réaliser sous 1 à 2 mois) :

Les résultats obtenus par le rapport géotechnique ne décrivent pas la réalité de l'assiette du sol en place, des Investigations complémentaires s'imposent, comme l'indique le tableau suivant.

Tableau IV.1 : Investigations complémentaires à réaliser.

Action	Objectif
Sondages pressiométriques sous les fondations (côté Sud-Est)	Mesurer le module de déformation réel du sol
Essais de gonflement libre sur carottes prélevées sous semelles	Quantifier l'amplitude potentielle du retrait-gonflement
Inspection endoscopique du réseau d'assainissement	Localiser précisément les fuites sous dalle
Mesure d'humidité du sol (humidimètre ou gaz traceur)	Confirmer la zone de saturation active

4.2. Mesures curatives (à court terme, 3 à 6 mois) :

- Reprise en sous-œuvre localisée : injection de résine expansive ou de micro-béton sous les semelles du côté Sud-Est pour combler les vides et stabiliser le sol.
- Réparation des canalisations d'assainissement : remplacement des tronçons perforés, pose de regards de visite, mise en place d'une protection chimique anti-racines.
- Correction des eaux pluviales : création d'une pente de drainage efficace côté Est, installation de caniveaux extérieurs, suppression des zones de stagnation.
- Traitement des fissures : injection de résine époxy dans les fissures actives, pose de chambres de reprises dans les maçonneries fissurées.

4.3. Actions structurelles durables (moyen terme, 6 à 18 mois) :

- Confortement général : possibilité de chemisage de certains poteaux et voiles porteurs pour reprendre les efforts modifiés par l'inclinaison.
- Remplacement du ciment dégradé : dépose des parties de béton atteintes par les sulfates, reprise avec béton haute performance (CEM I ou CRS).
- Ajout de joints de dilatation : reprise du joint séparatif entre blocs mitoyens avec un joint de 8 à 10 cm et dispositif d'étanchéité.
- Contreventement complémentaire : si nécessaire, ajout de voiles en béton armé dans le sens Est-Ouest pour limiter le déplacement en tête.

4.4. Préconisations pour la gestion du bâtiment :

- Surveillance périodique : mise en place de témoins de fissures (plâtre ou comparateurs mécaniques) relevés tous les 3 mois.
- Entretien préventif : vérification semestrielle des réseaux d'eau pluviale et d'assainissement, nettoyage des caniveaux.
- Information des occupants : signaler les zones à éviter (fissures évolutives), interdire les surcharges localisées en 4ème étage.

5. Conclusion générale :

L'expertise menée sur le bâtiment R+4 de Bordj Bou Arreridj démontre que les désordres constatés résultent d'une interaction complexe entre :

- Un sol hétérogène et plastique, sensible au retrait-gonflement,
- Une agression hydrique prolongée (fuites d'assainissement + eaux pluviales + racines de FICUS),
- Des lacunes dans les études initiales (géotechnique et structure) et dans l'exécution (matériaux, joint de séparation).

L'inclinaison mesurée (≈ 13 cm) et les fissures traversantes constituent des indicateurs graves de tassements différentiels actifs. Toutefois, des solutions techniques existent pour stabiliser l'ouvrage, corriger les causes profondes et restaurer un niveau de sécurité satisfaisant.

Il est recommandé de mettre en œuvre sans délai les investigations complémentaires proposées, puis d'engager les travaux de reprise en sous-œuvre et de réparation des réseaux. Une approche progressive, combinant confortement local et drainage pérenne, permettra d'éviter un effondrement ou une démolition précoce, tout en protégeant la sécurité des occupants et la durabilité du patrimoine bâti.

Références bibliographiques :

- [1] Direction des Travaux Publics, *DTR B.C.2.2 – Règles de calcul des charges et surcharges dans les bâtiments*, Algérie.
- [2] Centre National de Recherche Appliquée en Génie Parasismique (CGS), *RPA 99 (Version 2003) – Règles Parasismiques Algériennes*, Alger, Algérie, 2003.
- [3] République Française, *Code de la construction et de l'habitation*, Articles L.132-4 à L.132-9 et R.132-3 à R.132-8 relatifs à la prévention des risques liés au retrait-gonflement des sols argileux, Paris, France.
- [4] République Française, *Arrêté du 22 juillet 2020 définissant le contenu des études géotechniques à réaliser dans les zones exposées au phénomène de mouvement de terrain différentiel consécutif à la sécheresse et à la réhydratation des sols*, Journal Officiel de la République Française, 2020.
- [5] République Française, *Loi n° 2018-1021 du 23 novembre 2018 portant évolution du logement, de l'aménagement et du numérique (ELAN)*, Journal Officiel de la République Française, 2018.
- [6] Autodesk, *Robot Structural Analysis Professional 2021 – Logiciel de simulation numérique pour l'analyse structurelle des bâtiments*, Autodesk Inc., 2021.
- [7] Cerema, *Les études géotechniques liées au retrait-gonflement des argiles (études RGA)*, Bron, France.
- [8] Institut National de la Consommation, « La réalisation d'études géotechniques sur des sols argileux », 5 janvier 2023.
- [9] Assistance Expertise Bâtiment, « Fissures dans le bâtiment : causes, diagnostic et solutions »,
- [10] La Gage Unique, « L'impact des racines sur les fondations : essences invasives, distances minimales recommandées et solutions de mitigation ».
- [11] Mémoire de projet, Chapitre III, « Calcul des charges et combinaisons d'actions selon le DTR B.C.2.2 et le RPA 99 (Version 2003) », données utilisées pour les valeurs de charges permanentes, surcharges d'exploitation et combinaisons ELU, ELS et accidentelles.

