

École polytechnique de Louvain

Équilibre entre flexibilité future et durabilité environnementale dans la conception structurelle : une analyse des stratégies de surdimensionnement versus d'optimisation et de renforcement

Auteur: **Benoît GEERTS**

Promoteur: **Denis ZASTAVNI**

Lecteurs: **Jean-Philippe JASIENSKI, Yvette PELSSER, Sylvain RASNEUR, Hadrien RATTEZ**

Année académique 2024–2025

Master [120] : ingénieur civil des constructions

Remerciements

J'adresse mes remerciements à Monsieur Denis Zastavni, qui a assuré la promotion académique de ce mémoire.

Je tiens également à remercier les membres du jury — Monsieur Jean-Philippe Jasienski, Madame Yvette Pelsser, Monsieur Sylvain Rasneur et Monsieur Hadrien Rattez — pour l'attention portée à ce travail. Leur lecture contribuera, je l'espère, à enrichir la réflexion menée dans ce mémoire.

Table des matières

Résumé	5
1 Introduction	6
2 Économie circulaire	8
2.1 Impact environnemental du secteur de la construction dans le monde	8
2.2 De l'économie linéaire à l'économie circulaire	8
2.3 L'économie circulaire dans l'environnement bâti	9
3 Conception des bâtiments circulaires	11
3.1 Réversibilité des bâtiments	11
3.2 Transformabilité des bâtiments	12
3.3 Stratégies de conception pour l'adaptabilité et la déconstruction	13
4 Exemples de conversions et de rénovations	16
4.1 La conversion des immeubles de bureaux à Bruxelles	16
4.2 Projets de rénovation et de transformation à Bruxelles	20
5 Principes généraux d'une structure adaptable	23
6 Mise en place de l'étude de cas et des scénarios de transformation	25
6.1 Définition de la structure de référence	25
6.2 Scénario 1 : Conversion de bureaux en aires de stockage	26
6.3 Scénario 2 : Conversion de bureaux en commerces et bureaux	27
6.4 Scénario 3 : Surélévation de deux niveaux	28
7 Techniques de renforcement des structures en béton armé	30
7.1 Chemisage en béton armé	30
7.2 Chemisage en acier	31
7.3 Tôles collées	31
7.4 Renforcement par matériaux composites PRF	32
7.5 Produits utilisés pour l'analyse comparative	33
8 Organigrammes de dimensionnement	34
8.1 Organigramme 1 : processus général	34
8.2 Organigramme 2 : dimensionnement des dalles et des poutres	35
8.3 Organigramme 3 : dimensionnement des colonnes	35

8.4	Organigramme 4 : dimensionnement des noyaux	35
8.5	Organigramme 5 : renforcement par lamelles PRFC	36
8.6	Organigramme 6 : renforcement par tissu PRFC	36
8.7	Organigramme 7 : renforcement par chemisage en béton armé	37
9	Présentation des résultats	38
9.1	Scénario 1 : Conversion de bureaux en aires de stockage	38
9.2	Scénario 2 : Conversion de bureaux en commerces et bureaux	44
9.3	Scénario 3 : Surélévation de deux niveaux	47
10	Analyse croisée des résultats	50
10.1	Analyse globale	50
10.2	Analyse par type d'élément	50
10.3	Analyse contextuelle	52
11	Conclusion	54
	Références	59
	Annexes	60
A	Méthodes de calcul	60
A.1	Dimensionnement des armatures en flexion d'une section rectangulaire	60
A.2	Vérification de l'effort tranchant dans une section rectangulaire	63
A.3	Vérification de la flèche et de la fissuration d'une poutre en flexion	66
A.4	Dimensionnement de la section d'une colonne carrée comprimée	69
A.5	Dimensionnement des armatures d'une colonne carrée comprimée	71
A.6	Calcul de l'action du vent	74
A.7	Vérification des contraintes dans un noyau soumis à l'action du vent	80
A.8	Renforcement en flexion par lamelles PRFC	82
A.9	Renforcement d'une colonne en compression par tissu PRFC	84
A.10	Dimensionnement des armatures de chemisage en béton armé	86

Résumé

Face aux défis environnementaux croissants et à l'évolution rapide des usages du bâti, la question de la flexibilité structurelle se pose comme une problématique de plus en plus stratégique. Alors que le secteur de la construction reste l'un des plus émetteurs en matière de gaz à effet de serre et de consommation de ressources, repenser la manière dont les bâtiments sont conçus devient une priorité. L'adaptabilité dans le temps, la réversibilité des usages et la circularité des matériaux apparaissent comme des leviers essentiels pour allonger la durée de vie utile des bâtiments et réduire leur empreinte environnementale.

Ce rapport examine les conditions d'un équilibre entre flexibilité future et durabilité environnementale, à travers la comparaison de deux stratégies de conception structurelle : le surdimensionnement initial des éléments porteurs et le renforcement a posteriori en cas de transformation. Trois scénarios types de reconversion ont été modélisés, afin d'évaluer les impacts environnementaux associés à chaque stratégie, en particulier le potentiel de réchauffement global (GWP), exprimé en kg de CO₂ équivalent.

Les résultats bruts indiquent que, toutes choses égales par ailleurs, le surdimensionnement initial présente un GWP inférieur à celui du renforcement, notamment lorsque ce dernier mobilise des matériaux très émissifs comme les PRFC (polymères renforcés de fibres de carbone). Toutefois, cette comparaison directe ne reflète pas fidèlement les conditions réelles du cycle de vie d'un bâtiment. Le surdimensionnement est toujours engagé, même lorsqu'aucune transformation ne survient, alors que le renforcement n'est déclenché qu'en cas de besoin.

Une analyse complémentaire a été menée pour replacer les résultats dans un contexte réaliste d'évolution du bâtiment. Elle s'appuie sur deux critères : la fréquence à laquelle les différents éléments structurels sont concernés par des transformations, et la probabilité qu'une transformation survienne effectivement au cours du cycle de vie. Cela permet d'évaluer si ces stratégies restent pertinentes une fois replacées dans un cycle de vie réaliste. Les résultats montrent clairement que le surdimensionnement, bien qu'efficace en apparence, n'est que très rarement la solution la plus sobre sur le plan environnemental.

1 Introduction

Face aux défis environnementaux croissants et à l'évolution rapide des usages du bâti, la question de la flexibilité structurelle se pose aujourd'hui comme une problématique stratégique pour le secteur de la construction. Responsable d'une part importante des émissions de gaz à effet de serre et de la consommation de ressources naturelles, ce secteur est appelé à repenser en profondeur ses pratiques afin de répondre aux exigences de durabilité. Dans ce contexte, l'adaptabilité des bâtiments dans le temps, la réversibilité des usages et la circularité des matériaux apparaissent comme des leviers essentiels pour prolonger la durée de vie des constructions et limiter leur empreinte environnementale.

Cette problématique trouve un écho particulier dans les politiques d'aménagement du territoire. En Wallonie, le Code du Développement Territorial (CoDT) vise à lutter contre l'étalement urbain et à limiter l'artificialisation des sols, notamment par la valorisation du bâti existant. À Bruxelles, où la pression immobilière est forte, la transformation d'immeubles existants constitue également un enjeu central, tant d'un point de vue environnemental qu'urbanistique. Dans les faits, toutefois, les pratiques actuelles de conception restent largement fondées sur des logiques linéaires. Les bâtiments sont majoritairement conçus pour un usage unique, sans anticipation des évolutions futures, et la démolition est souvent privilégiée à la transformation, malgré son impact environnemental considérable. Par ailleurs, la séparation entre architecture, structure et environnement empêche encore trop souvent une approche intégrée qui tiendrait compte de la flexibilité et de la durabilité dès la conception.

C'est dans ce contexte que s'inscrit la problématique centrale du présent mémoire : comment concilier flexibilité structurelle future et durabilité environnementale dès la phase de conception ? Plus précisément, faut-il surdimensionner les éléments porteurs dès l'origine pour anticiper d'éventuelles transformations, ou, au contraire, concevoir au plus juste et recourir à un renforcement ciblé si nécessaire ? Cette question soulève une difficulté fondamentale : les deux stratégies envisagées ne s'inscrivent pas dans la même temporalité. Le surdimensionnement est engagé dès la construction, alors que le renforcement, quant à lui, n'est déclenché que si une adaptation devient effective. L'incertitude qui entoure les transformations futures — que ce soit en termes de probabilité, de moment ou de nature — rend leur comparaison particulièrement complexe.

Le cadre théorique de ce travail s'appuie sur des concepts bien établis dans la littérature scientifique : l'économie circulaire appliquée à l'environnement bâti, la réversibilité des structures, la transformabilité des espaces, ainsi que les stratégies de conception orientées vers la déconstruction et l'adaptabilité. Les techniques de renforcement des structures existantes, notamment par matériaux composites (PRFC), sont abondamment documentées, tant dans la recherche académique que dans les normes et pratiques industrielles. En revanche, le surdimensionnement n'apparaît dans aucune source comme une stratégie intentionnelle d'adaptabilité. À ce jour, aucune étude comparative n'a été identifiée entre surdimensionnement initial et renforcement a posteriori en matière d'impact environnemental. Ce constat souligne l'originalité et la pertinence du présent travail.

L'objectif principal du mémoire est de comparer l'impact environnemental de ces deux stratégies de conception structurelle — surdimensionnement et renforcement — dans une perspective d'adaptabilité fonctionnelle. Il s'agit notamment d'évaluer leur pertinence relative à travers différents scénarios réalistes de transformation. Le travail vise également à identifier, parmi les éléments structurels, ceux qui sont les plus fréquemment sollicités dans les reconversions, afin de formuler des principes d'aide à la décision en phase de conception.

La méthodologie repose sur la modélisation paramétrique d'un immeuble de bureaux en béton armé, représentatif du bâti tertiaire urbain. Trois scénarios de transformation ont été simulés : la

conversion des plateaux en surfaces de stockage, l'aménagement partiel en espaces commerciaux avec création de double hauteur, et la surélévation de deux étages. Pour chaque scénario, les performances de la stratégie de surdimensionnement sont comparées à celles du renforcement, à l'aide de scripts Python intégrés dans Grasshopper, permettant le dimensionnement automatisé des éléments structurels. L'évaluation environnementale repose sur le Potentiel de Réchauffement Global (GWP).

Ce travail propose ainsi une approche comparative originale, s'inscrivant dans une réflexion plus large sur la transition vers une construction durable et circulaire. En l'absence de références sur la stratégie de surdimensionnement, l'analyse développée ici ouvre une nouvelle perspective sur la manière d'anticiper les évolutions programmatiques des bâtiments tout en maîtrisant leur impact environnemental. Elle vise à alimenter la réflexion des concepteurs, des ingénieurs et des décideurs sur la pertinence de leurs choix structuraux à long terme.

Le mémoire est structuré en trois parties : un cadre théorique établissant les fondements conceptuels du sujet ; une étude de cas détaillant la structure de référence et les scénarios de transformation envisagés ; et enfin une analyse comparative des résultats, suivie d'une discussion croisée et de recommandations générales.

2 Économie circulaire

2.1 Impact environnemental du secteur de la construction dans le monde

L'urbanisation massive actuelle constitue un enjeu central pour l'avenir environnemental de notre planète. Par le biais des bâtiments, des infrastructures et des villes, l'humanité façonne son interaction avec les ressources naturelles, influençant durablement les flux et les stocks environnementaux. Dans les régions industrialisées comme dans les pays en développement, la croissance continue du bâti entraîne des conséquences physiques considérables [10, 12].

En Europe, le secteur de la construction est particulièrement impactant : il est responsable de 38% de la production totale de déchets, de 40% des émissions de CO₂, et consomme près de 50% des ressources naturelles disponibles. À l'échelle mondiale, il représente à lui seul environ un tiers des émissions de gaz à effet de serre, 40% de la consommation de matières premières, et génère une part équivalente des déchets produits [10, 12, 45].

Bien que l'industrie du bâtiment soit un moteur essentiel de la croissance économique et du bien-être social, son développement s'est souvent fait au détriment de l'environnement. Les approches traditionnelles en matière de durabilité, centrées principalement sur le recyclage en fin de vie, se révèlent aujourd'hui insuffisantes. Elles ne permettent pas une gestion efficace des ressources tout au long de leur cycle de vie et peinent à générer des bénéfices environnementaux à grande échelle [40].

2.2 De l'économie linéaire à l'économie circulaire

Le défi majeur est désormais de repenser en profondeur notre modèle économique. Il s'agit de passer d'une logique linéaire — fondée sur l'extraction, l'utilisation et l'élimination rapide des ressources — à une approche circulaire où les matériaux sont constamment réutilisés, revalorisés et intégrés dans un cycle de production durable. Dans cette vision, la notion de déchet disparaît au profit d'une circulation continue des ressources, et la production industrielle s'inscrit dans un processus de renouvellement des matières [10, 12].

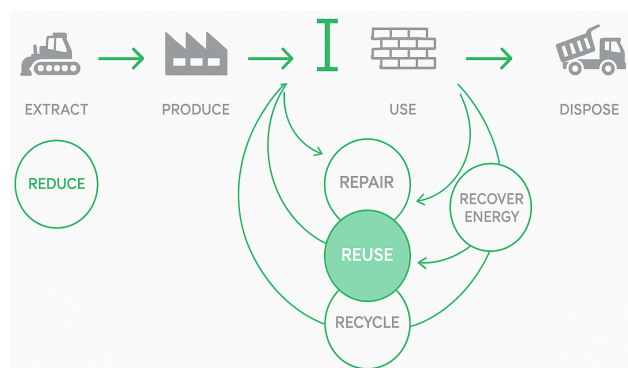


FIGURE 1 – De l'économie linéaire à l'économie circulaire

Dans le domaine de la construction, cette transition implique de rompre avec les méthodes conventionnelles de conception, qui aboutissent trop souvent à la démolition en fin de vie des bâtiments. L'impact environnemental de cette approche linéaire est désormais bien documenté et met

en évidence son inadéquation avec les enjeux actuels. Face à cela, il devient crucial d'adopter une méthode de conception capable d'inverser les flux traditionnels pour favoriser des boucles circulaires de matériaux. Cela signifie penser les bâtiments dès leur conception pour leur déconstruction, leur réutilisation et leur régénération, tout au long de leur cycle de vie [10, 12].

2.3 L'économie circulaire dans l'environnement bâti

L'économie circulaire repose historiquement sur les principes des 3R : Réduire, Réutiliser et Recycler. Ces actions visent à limiter la consommation de ressources, à prolonger la durée de vie des produits et à valoriser les déchets. Ce cadre s'est progressivement enrichi avec l'introduction du modèle des 9R, plus complet et mieux adapté à une transition vers une économie véritablement circulaire [40].

Ces stratégies peuvent être regroupées en trois grandes catégories :

1. Prévention :

- **Refuser** les produits à fort impact environnemental en privilégiant des alternatives durables ;
- **Repenser** l'usage des produits à travers des approches innovantes, telles que l'économie de partage ou la multifonctionnalité ;
- **Réduire** la consommation de matières et d'énergie tout en améliorant l'efficacité des processus.

2. Prolongation de la durée de vie :

- **Réutiliser** les produits sans transformation, que ce soit par le même utilisateur ou par un autre ;
- **Réparer** les produits endommagés pour leur redonner leur fonctionnalité initiale ;
- **Rénover** les produits obsolètes afin de les adapter aux normes ou usages actuels ;
- **Re-manufacturer** les produits en les reconstituant à partir de composants récupérés sur d'autres produits similaires ;
- **Reconvertir** des composants pour créer de nouveaux produits à usages différents.

3. Valorisation en fin de vie :

- **Recycler** les matériaux en fin de cycle afin de produire de nouveaux matériaux, même si la qualité peut varier ;
- **Récupérer** l'énergie contenue dans les déchets non recyclables.

Dans le domaine de la construction, appliquer les principes de l'économie circulaire signifie concevoir les bâtiments dès l'origine pour permettre leur réutilisation, leur adaptabilité et leur démontage. Cette approche permet de préserver la valeur des matériaux, de réduire la production de déchets et de limiter l'extraction de ressources vierges [40].

Cependant, cette transition est encore difficile à mettre en œuvre. Les bâtiments sont généralement conçus pour être démolis, et non déconstruits. Intégrer l'économie circulaire suppose donc une

refonte profonde des pratiques de conception, un choix plus rigoureux des matériaux (en privilégiant ceux à faible impact environnemental), ainsi qu'une évolution des systèmes constructifs, le tout sans compromettre la performance ni le confort des usagers. Dans ce contexte, les principes fondamentaux de la conception circulaire pour l'environnement bâti sont les suivants [40] :

1. Concevoir pour la déconstruction :

- Faciliter l'assemblage et le démontage des bâtiments afin de réutiliser les matériaux, de limiter les déchets et de préserver leur qualité ;
- Éviter les connexions chimiques, privilégier les assemblages mécaniques facilement accessibles et opter pour la construction à sec ;
- Fournir des directives claires pour garantir une déconstruction efficace et sécurisée.

2. Concevoir pour l'adaptabilité :

- Assurer la polyvalence des bâtiments pour s'adapter aux besoins évolutifs des usagers ;
- Intégrer des stratégies telles que la convertibilité (changement de fonction) et l'expansibilité (agrandissement ou réduction) ;
- Prolonger la durée de vie des constructions tout en minimisant leur impact environnemental.

3. Sélectionner des matériaux durables :

- Privilégier des matériaux réutilisables, recyclables et non toxiques ;
- Choisir des matériaux présentant une faible énergie grise et une empreinte carbone réduite ;
- Favoriser les matériaux compatibles avec les principes de l'économie circulaire.

4. Optimiser les flux de ressources :

- Intégrer une gestion efficiente de l'énergie et de l'eau tout au long du cycle de vie du bâtiment ;
- Réduire les consommations grâce à des dispositifs passifs (éclairage naturel, ventilation, inertie thermique) tout en garantissant le confort et la qualité de vie des occupants.

Ainsi, en intégrant les principes de l'économie circulaire, les pratiques de conception doivent évoluer pour permettre la création de bâtiments réutilisables, adaptables et démontables, ouvrant ainsi la voie à des constructions circulaires où la réversibilité et la transformabilité deviennent des enjeux essentiels.

3 Conception des bâtiments circulaires

3.1 Réversibilité des bâtiments

La réversibilité des bâtiments désigne leur capacité à être transformés, démontés, reconfigurés ou réutilisés sans générer de déchets importants. Contrairement à la démolition traditionnelle, qui détruit les matériaux sans perspective de récupération, la réversibilité vise à prolonger la durée de vie utile des bâtiments en les rendant adaptables à de nouveaux usages tout au long de leur cycle de vie.

Dans cette logique, il ne s'agit plus de concevoir les bâtiments comme des structures statiques et permanentes, limitées à un usage unique, mais comme des plateformes ouvertes, modulables et évolutives. Ces structures doivent être capables de s'accommoder des exigences techniques et fonctionnelles changeantes, tout en minimisant leur impact environnemental. Cela suppose de rompre avec le modèle linéaire dominant – construire, consommer, démolir – pour adopter une approche circulaire où les bâtiments sont conçus pour se transformer, se reconfigurer et se déconstruire [9].

Cependant, la majorité des constructions contemporaines, en particulier celles réalisées après 1945, ont été pensées pour l'assemblage, mais rarement pour le démontage. Cette logique conduit à une consommation excessive de ressources naturelles, une production importante de déchets, et une faible adaptabilité aux besoins futurs. Ce constat est d'autant plus problématique que les différents éléments d'un bâtiment ne suivent pas les mêmes cycles de vie : tandis que la structure peut durer jusqu'à 75 ans, les revêtements extérieurs doivent être remplacés après une vingtaine d'années, les installations techniques deviennent obsolètes en une quinzaine d'années, et les aménagements intérieurs sont souvent modifiés tous les trois à cinq ans [10].

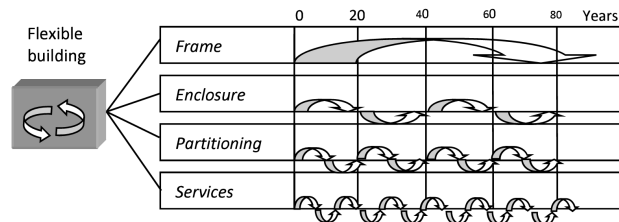


FIGURE 2 – Différents cycles de vie des composants d'un bâtiment [12]

Ce décalage entre les rythmes de vie des composants peut devenir problématique, en particulier lorsque des éléments à cycle court sont fixés de manière rigide à des parties conçues pour durer. Stewart Brand a théorisé cette dynamique sous le nom de *shearing layers*, soulignant l'importance de différencier, dès la conception, les éléments rapides et lents afin de permettre leur évolution indépendante. Il identifie six couches fondamentales dans un bâtiment : le site, la structure, l'enveloppe, les services, le plan d'espace et le mobilier. Cette stratification propose une lecture systémique du bâtiment, dans laquelle chaque couche peut évoluer à son propre rythme, rendant les interventions plus ciblées et donc plus durables [44].

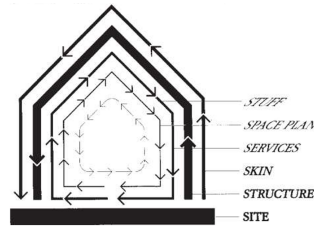


FIGURE 3 – Couches fondamentales dans un bâtiment [12]

Par ailleurs, la dimension et le poids des composants sont également des critères clés pour assurer la réversibilité. Pour être facilement manipulables, les éléments doivent être limités en taille et conçus selon des dimensions génératives, c'est-à-dire standardisées et répétables. L'utilisation de composants standard avec des tolérances de montage et de démontage suffisantes facilite les opérations de démontage, de ré-assemblage, et de maintenance. Enfin, la durabilité physique d'un composant conditionne sa capacité à être réutilisé plusieurs fois, réduisant ainsi les pertes de ressources.

3.2 Transformabilité des bâtiments

Dans le contexte de la construction circulaire, la capacité d'un bâtiment à se transformer est un indicateur central de sa réversibilité. Cette transformabilité repose sur trois dimensions complémentaires : spatiale, structurelle et matérielle. Celles-ci reflètent le potentiel du bâtiment à évoluer au fil du temps, à différents niveaux physiques : bâtiment, système, composant, matériau. Deux modèles permettent d'aborder ces dimensions à travers le prisme de la conception : le modèle de transformation spatiale et le modèle de transformation structurelle [10].

— Modèle de transformation spatiale

Il se concentre sur l'adaptabilité du bâtiment à différentes configurations d'usage au cours de son cycle de vie. Pour cela, il est essentiel de prévoir des scénarios d'évolution, de concevoir une structure de base stable et durable, et de rendre les systèmes techniques indépendants du reste de l'organisation spatiale. L'objectif est de concevoir un bâtiment capable de répondre à un maximum de transformations avec un minimum d'éléments techniques.

— Modèle de transformation structurelle

Il évalue la capacité du bâtiment à être démonté et réutilisé. Il repose sur des principes de modularité, d'indépendance des composants, et de démontabilité. Plus les éléments d'une structure sont autonomes les uns des autres, plus le bâtiment est facilement transformable. L'existence d'un noyau central est ici essentielle. Ce noyau doit garantir la stabilité, accueillir les systèmes techniques, et offrir la possibilité de reconfigurer les espaces périphériques sans recourir à la démolition. Il doit également intégrer les services nécessaires à tout scénario d'usage, tout en restant suffisamment générique pour en faciliter l'adaptation.

La transformation spatiale et la transformation structurelle apparaissent comme les deux piliers fondamentaux du bâtiment réversible. En permettant de reconfigurer un bâtiment sans démolition ni production de déchets, ces modèles offrent un cadre concret pour concevoir des structures capables de s'adapter aux mutations futures. Ils posent les bases de nouvelles approches d'évaluation et de conception orientées vers la réutilisation, la longévité et la flexibilité. La section suivante explorera plus en détail les stratégies architecturales permettant de traduire ces principes en actions concrètes.

3.3 Stratégies de conception pour l'adaptabilité et la déconstruction

La conception pour l'adaptabilité et la déconstruction regroupe les stratégies architecturales visant à prolonger la vie des bâtiments tout en minimisant leur impact environnemental. Elle repose sur deux approches complémentaires : la première, la **conception pour l'adaptabilité**, consiste à réutiliser ou adapter un bâtiment existant en conservant autant que possible sa structure originale, afin de préserver l'énergie grise tout en améliorant ses performances pour répondre aux normes actuelles et aux besoins des utilisateurs. Cette approche, la plus avancée en matière de durabilité, permet une réaffectation efficace du bâti. La seconde, la **conception pour la déconstruction** (ou le démontage), se concentre non pas sur la préservation du bâtiment entier, mais sur la récupération et la réutilisation ou le recyclage de ses composants et matériaux. Ces deux approches reposent sur des principes de conception spécifiques, détaillés ci-dessous, qui servent de lignes directrices pour aider les architectes et concepteurs à intégrer ces stratégies dans leurs projets [27].

Principes de conception pour l'adaptabilité

1. Anticiper le changement : concevoir des bâtiments capables de s'adapter facilement à des usages futurs, y compris pour leurs éléments individuels.
2. Climat et site : exploiter les conditions climatiques locales et intégrer des technologies passives pour s'adapter à des usages futurs inconnus.
3. Fondations : les fondations sont conçues pour permettre l'extension du bâtiment, que ce soit verticalement ou horizontalement.
4. Conception proactive : réduire les risques d'obsolescence en privilégiant des solutions favorisant la réutilisation future et l'adaptabilité.
5. Disposition du bâtiment : regrouper les zones de fonctions similaires et positionner stratégiquement les zones de services et les connexions pour faciliter les modifications futures.
6. Structure flexible : la conception et la sélection des éléments structurels prennent en compte les usages et scénarios futurs du bâtiment. Les systèmes structurels sont évolutifs, permettant l'agrandissement d'un bâtiment soit verticalement soit horizontalement.
7. Qualité de l'exécution : Les conceptions, plans et spécifications assurent une construction de qualité, appliquée aux structures et aux finitions, favorisant une longue durée de vie et une adaptabilité future.
8. Sélection des matériaux : Choisir les matériaux pour leur durabilité et leur aptitude à vieillir correctement afin d'assurer la longévité du bâtiment.
9. Maintenabilité : La conception et les choix des matériaux tiennent compte du besoin d'entretien régulier et de gestion efficace des ressources, prolongeant la vie fonctionnelle de la construction.
10. Hauteurs entre planchers : Les bâtiments intègrent des hauteurs suffisantes entre les planchers pour permettre une variété d'usages futurs, incluant d'éventuels usages commerciaux dans des structures résidentielles.
11. Largeur et lumière naturelle : La largeur du bâtiment est pensée pour maximiser la lumière naturelle, augmentant ainsi la polyvalence et l'adaptabilité des espaces à de futurs usages.

Principes de conception pour la déconstruction et le démontage

1. Pratiques générales sur les bâtiments
 - a. Simplifier la structure et la forme du bâtiment.
 - b. Privilégier la conception modulaire et les sous-assemblages préfabriqués.
 - c. Utiliser un système de construction ouvert avec des pièces interchangeables.
 - d. Utiliser une grille structurelle.
 - e. Utiliser des technologies de construction standard, simples et "low-tech".
2. Sélection des matériaux
 - a. Sélectionner des matériaux recyclables, durables et légers lorsque c'est approprié.
 - b. Minimiser les différents types de matériaux et éviter les matériaux composites difficiles à séparer.
 - c. Concevoir pour le vieillissement différentiel et l'usure des surfaces.
 - d. Éviter les finitions secondaires et les matériaux toxiques.
 - e. Identifier clairement les matériaux et leur composition chimique.
3. Composants de bâtiment
 - a. Réduire les types de composants, favoriser les assemblages modulaires et accessibles pour réparation ou remplacement.
 - b. Limiter les pièces d'usure et garantir des tailles adaptées à la manutention prévue.
 - c. Rendre les liaisons chimiques plus faibles que les parties connectées.
 - d. Fournir une identification permanente des composants et faciliter leur manipulation lors du montage/démontage.
4. Connexions
 - a. Simplifier les connexions.
 - b. Créer des connexions indépendants, interchangeables et résistants à des usages répétés.
 - c. Limiter les fixations, privilégier les connexions mécaniques, rendre les connexions visibles et accessibles.
 - d. Concevoir les connexions en fonction des contraintes de travail et de la main-d'œuvre pour faciliter la séparation.
5. Accès et Bâtiment
 - a. Permettre le démontage en parallèle plutôt que le démontage séquentiel.
 - b. Concevoir des bâtiments en couches distinctes selon leur durée de vie, avec des tolérances limitant les méthodes destructives.
 - c. Séparer la structure du bardage, des cloisons internes, des services, ainsi que les systèmes mécaniques, électriques et de plomberie.

- d. Planifier soigneusement les itinéraires des services pour qu'ils soient clairement identifiables, accessibles, et entretenus ou mis à niveau sans perturber les autres parties du bâtiment.

6. Transmission de l'Information

- a. Maintenir une documentation détaillée des matériaux, systèmes et méthodes de déconstruction.
- b. Identifier clairement les points de démontage, connexions et matériaux.
- c. Fournir un plan de déconstruction, des étiquettes permanentes et des pièces de rechange.

Il convient de souligner que la réutilisation, plus durable que le recyclage, permet de conserver davantage d'énergie grise ; à ce titre, l'adaptabilité représente la stratégie la plus souhaitable pour limiter la production de déchets et préserver les ressources.

4 Exemples de conversions et de rénovations

Les projets de reconversion ou de rénovation constituent un terrain d’observation précieux pour évaluer, dans les faits, la manière dont les principes de flexibilité, d’adaptabilité et de circularité peuvent s’appliquer au bâti existant. Ils révèlent autant les opportunités que les contraintes liées aux typologies, aux caractéristiques structurelles, ou aux contextes réglementaires. Ce chapitre propose une lecture critique de plusieurs cas de transformation, en s’appuyant sur l’exemple bruxellois, où la reconversion des immeubles de bureaux constitue un enjeu urbain et environnemental central.

4.1 La conversion des immeubles de bureaux à Bruxelles

À Bruxelles, la vacance structurelle des bureaux s’est accentuée au cours des dernières années. En 2022, le stock total atteignait 12,4 millions de m² [figure 4], dont plus d’un million inoccupés [figure 5]. Ce phénomène s’explique notamment par l’évolution des modes de travail – généralisation du télétravail, réduction des surfaces par poste via le flex-desk – mais aussi par une polarisation du marché autour de bâtiments mieux localisés, plus durables, et offrant davantage de services [38].

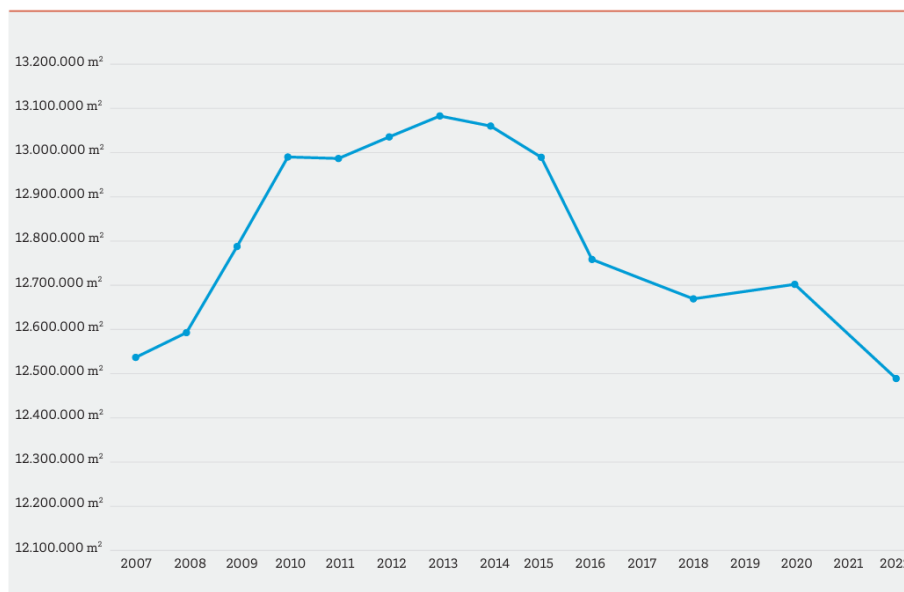


FIGURE 4 – Évolution du stock de bureaux en Région de Bruxelles-Capitale [38]

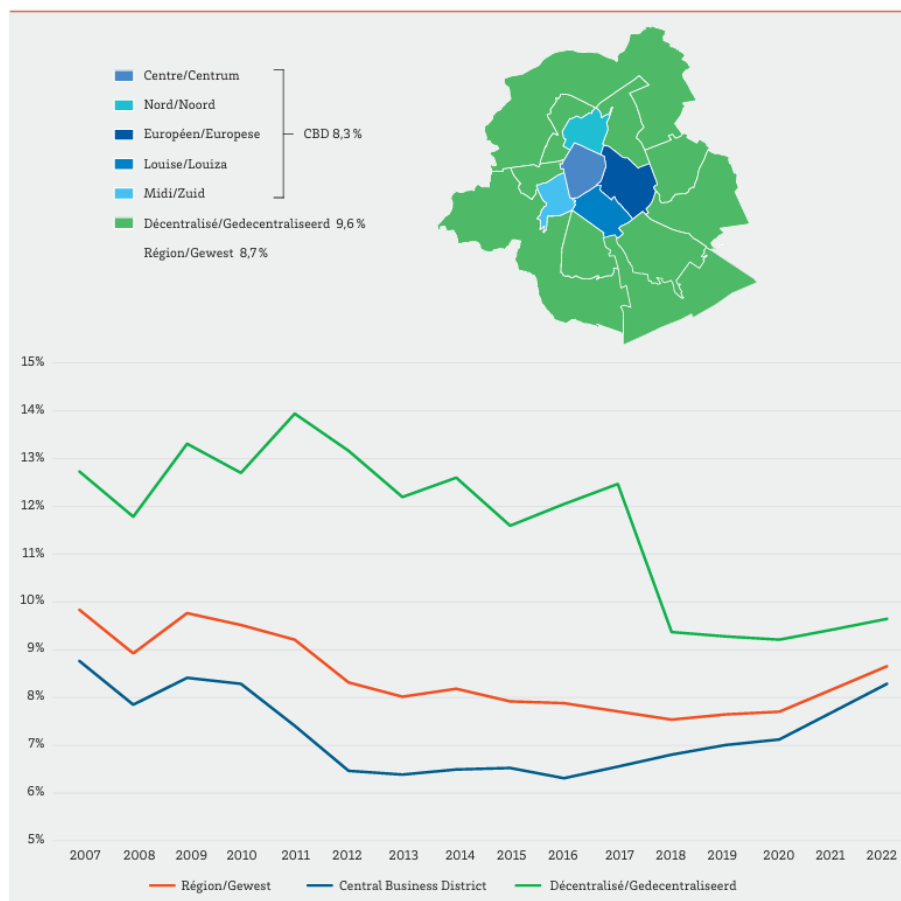


FIGURE 5 – Taux de vacance commercialisée en 2022 et évolution depuis 2007 [38]

Parmi les 1.002.088 m² de bureaux vacants recensés début 2022, 592.564 m² sont théoriquement convertibles en logements [figure 6]. Cependant, seuls 35 bâtiments (sur 314) sont totalement inoccupés, représentant à peine 20 % des surfaces vacantes. Les autres espaces, notamment ceux situés dans des immeubles récents ou en zones industrielles, sont moins adaptés à une reconversion immédiate et restent majoritairement dédiés à leur usage initial de bureaux [39].

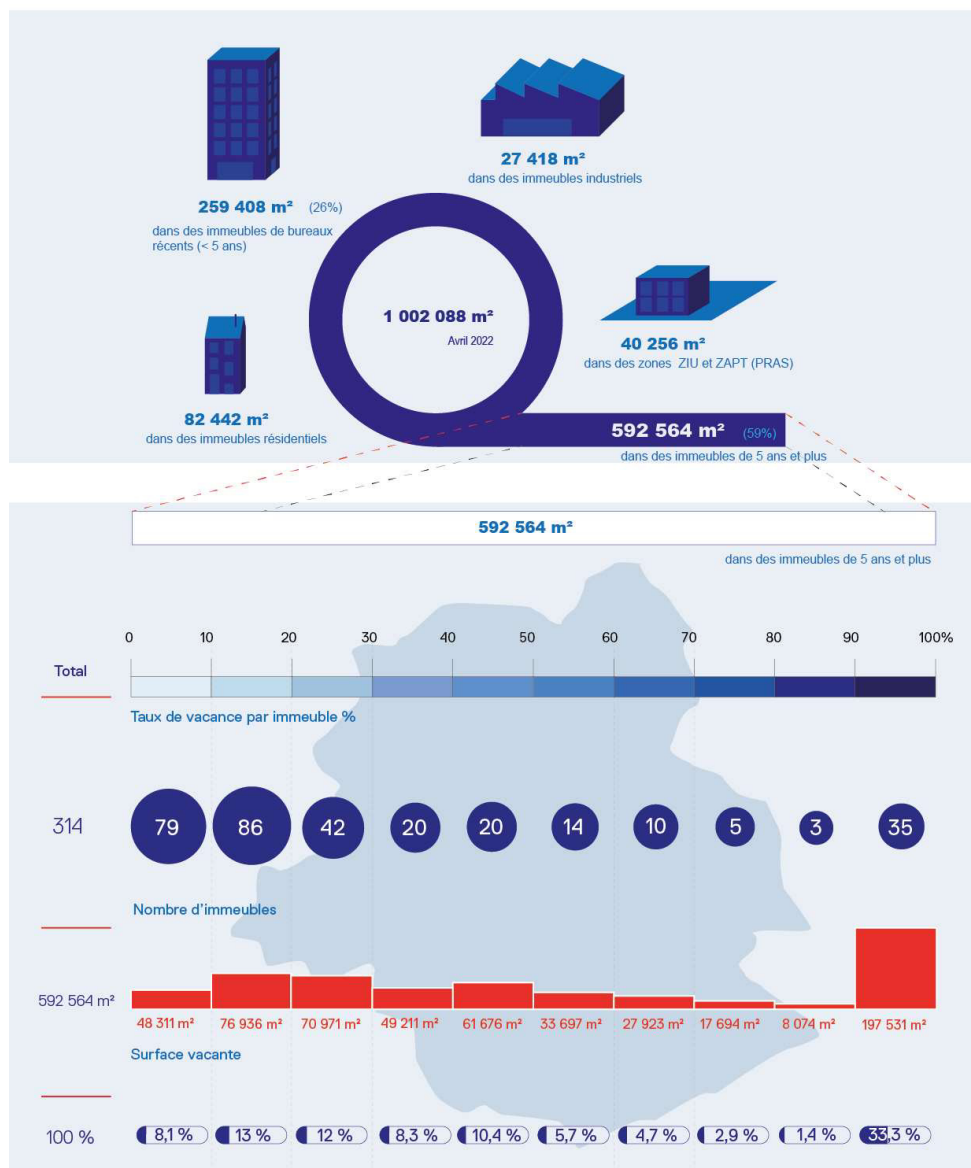


FIGURE 6 – Caractéristiques de la vacance [39]

4.1.1 La conversion de bureaux

Du point de vue des affectations, la reconversion en logements constitue la destination principale, représentant 70 % des transformations en 2021-2022 [figure 7], loin devant les équipements publics ou les usages mixtes. Depuis 1997, plus d'un million de m² de bureaux ont ainsi été transformés en surfaces résidentielles, contribuant à près d'un quart des nouveaux logements produits en 2021 [38].

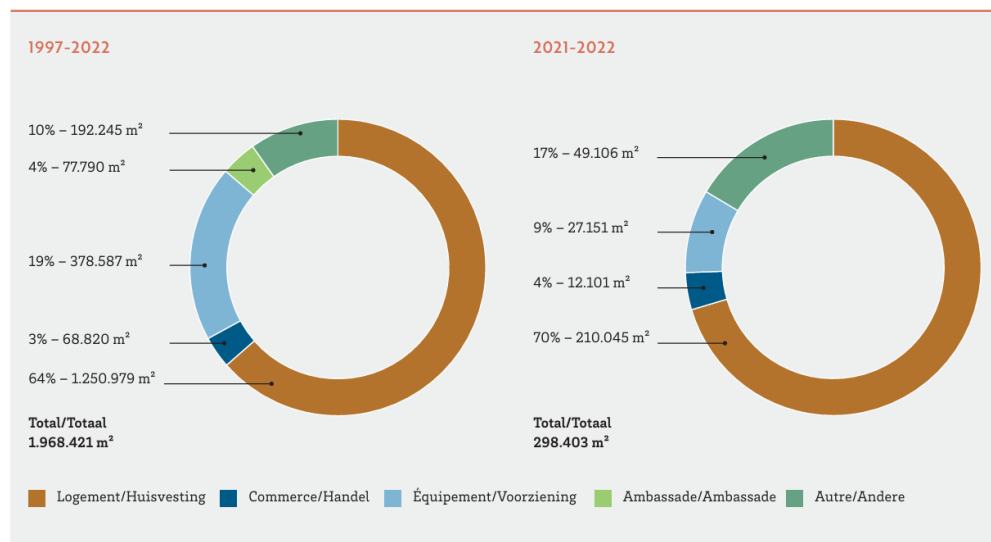


FIGURE 7 – Conversions de bureaux par type de destination de 1997 à 2022 et en 2021-2022 [38]

À titre d'exemples, on peut citer les projets suivants [38] :

- La démolition d'un bâtiment de 26.000 m² de bureaux anciennement occupé par Allianz a donné lieu à un projet mixte comprenant des logements, un hôtel, des commerces et de nouveaux bureaux.
- La démolition de 22.400 m² de bureaux d'un ancien immeuble de la KBC a permis l'aménagement de 1.600 m² de bureaux, ainsi que des logements, des chambres d'hôtel, un équipement d'intérêt collectif et des commerces.
- Un bâtiment de 19.000 m² situé rue du Marais a été déconstruit, puis remplacé par trois immeubles à appartements, accompagnés d'un espace de bureaux de moins de 700 m².
- L'ancien immeuble de bureaux d'AXA a fait l'objet d'une reconversion, conservant une partie de sa superficie initiale en bureaux et intégrant un hôtel, des commerces et un centre de congrès.
- Le projet de transformation du Centre de Communication Nord (CCN) prévoit la construction de 500 logements (48.000 m²), 7.900 m² de commerces, 92.000 m² de bureaux et 6.400 m² d'équipements.

Ces exemples illustrent la diversité des projets de reconversion et la tendance à intégrer plusieurs affectations au sein d'un même ensemble, renforçant la mixité et répondant aux objectifs de la ville de proximité.

4.1.2 Conversion selon la période de construction

L'analyse des opérations de conversion à Bruxelles révèle une corrélation étroite entre la période de construction des immeubles de bureaux et leur capacité à être transformés. Les bâtiments des années 1970 représentent près de 28 % des conversions recensées, contre 17 % pour les décennies 1980 et 1990 [figure 8].

À partir des années 1980, les caractéristiques des immeubles de bureaux – notamment leur gaba-

rit, leur profondeur et leur architecture – ont rendu les opérations de conversion plus complexes. Par conséquent, la démolition-reconstruction devient une solution plus courante que la transformation, malgré son impact environnemental [38, 39].

Plus surprenante est la présence d’immeubles construits dans les années 2000 parmi les bâtiments déjà concernés par des reconversions (8,4 % des cas). Cette tendance soulève une question préoccupante : celle de l’obsolescence accélérée des bâtiments tertiaires récents. Elle met en lumière l’importance, dès la conception, de prévoir des caractéristiques structurelles permettant l’adaptabilité [38, 39].

Pour faire face à cette problématique, le projet de Règlement Régional d’Urbanisme *Good Living* impose que « toute construction nouvelle portant sur une superficie de plancher brute supérieure à 1.000 m² soit conçue de manière à être adaptable et reconvertible. Cette reconvertibilité est évaluée notamment sur la base des critères suivants : le dimensionnement et les surfaces éclairantes des espaces découlant de la structure portante du bâtiment, la position des noyaux de distribution et de circulation, ainsi que celle des gaines et espaces techniques ».

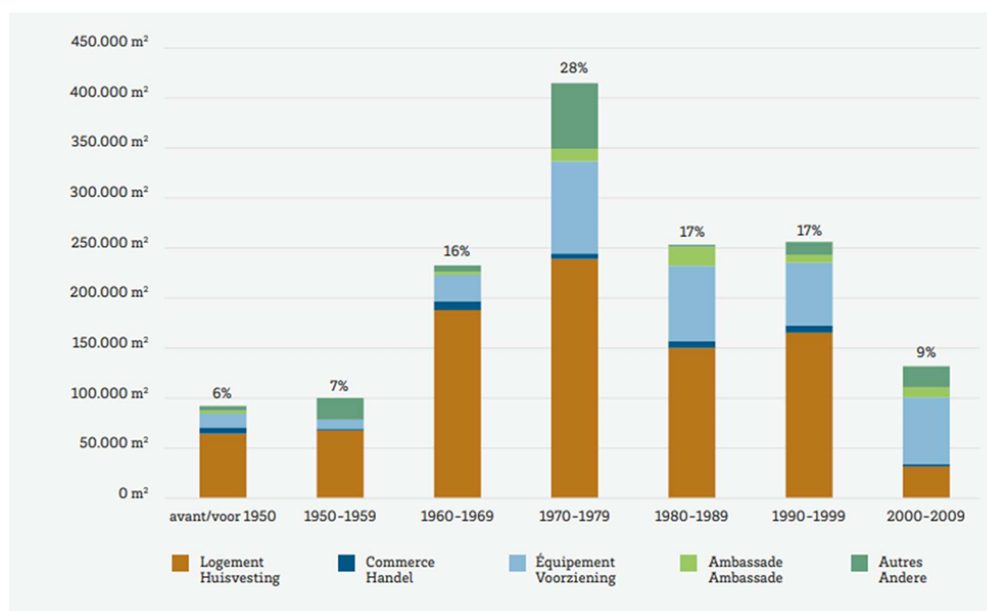


FIGURE 8 – Conversions de bureaux autorisées de 1997 à 2020, par type de destination et décennie de construction [37]

4.2 Projets de rénovation et de transformation à Bruxelles

A travers plusieurs projets de rénovation l’agence d’architecture AgwA explore l’idée qu’il est possible d’utiliser intelligemment les bâtiments existants pour leur donner une nouvelle vie, plutôt que de céder à la frénésie de démolition et de reconstruction, tout en maximisant les ressources et en minimisant l’empreinte environnementale. Les projets ci-dessous illustrent cette approche.

4.2.1 METAL

Le projet Metal convertit un ancien atelier de pneus en une salle de sport, une école du soir et trois appartements. L’approche de conception se concentre sur l’utilisation et l’extension des structures

existantes, offrant une polyvalence spatiale grâce à la simplicité et la robustesse des poutres en béton [46].



FIGURE 9 – METAL, remise en état d'un atelier de pneus en une école du soir, une salle de sport et des logements [1]

4.2.2 ECAM

Le projet ECAM à Bruxelles intègre la rénovation, la démolition et la construction de nouveaux bâtiments, ainsi qu'un parc public. Les bâtiments existants, datant de 1900 à 1980, accueilleront diverses fonctions comme une école maternelle, des installations sportives et des bureaux. Les nouvelles constructions et extensions sont conçues avec des typologies structurelles simples, permettant une grande flexibilité et adaptation aux futurs changements programmatiques. Grâce au surdimensionnement des espaces, les bâtiments peuvent accueillir diverses fonctions. Par exemple, un ancien bâtiment scolaire devient une école maternelle avec des espaces inadaptés mais fertiles en termes d'usages, offrant des spatialités inattendues [46].

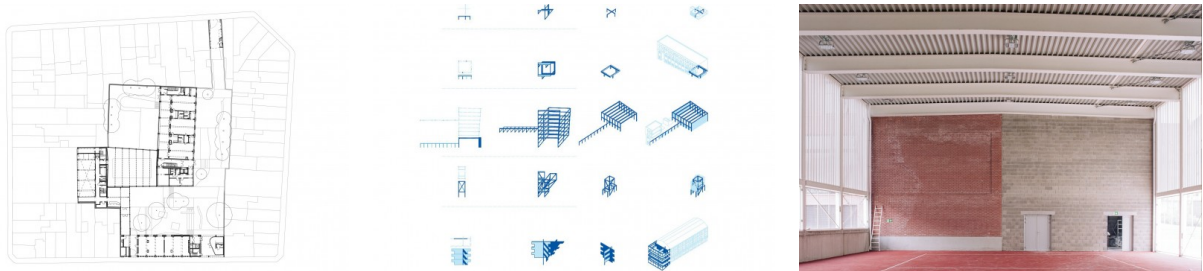


FIGURE 10 – ECAM, requalification du site de l'ex-ECAM : école, complexe sportif, espace de bureaux, jardin d'enfants, parc [1]

4.2.3 Verbiest

Le projet Verbiest transforme un ancien entrepôt commercial en une maison avec atelier. Située dans un îlot urbain complexe, la structure en béton existante a été maintenue pour réduire l'empreinte écologique tout en créant trois nouveaux espaces extérieurs et un vide vertical abritant un escalier en bois. Les sols ont été renforcés par des dalles en bois massif, et le toit partiellement reconstruit intègre une serre agricole. Chaque intervention, comme le mur longitudinal structurant l'atelier ou les ajustements géométriques du patio, s'inscrit dans une logique de conservation et d'adaptation [46].



FIGURE 11 – Verbiest, reconversion d'un entrepôt en logements individuels et atelier artistique [1]

Ces projets démontrent que les bâtiments peuvent être réutilisés de façon flexible et créative, offrant des solutions adaptées à des usages multiples. Ils valorisent les qualités spatiales surdimensionnées, limitent l'énergie grise grâce à la réutilisation des structures et illustrent un engagement social et environnemental en maintenant l'équilibre entre patrimoine et innovation.

5 Principes généraux d'une structure adaptable

Au terme de cette analyse, il est possible de dégager les caractéristiques fondamentales d'une structure architecturale conçue pour conjuguer durabilité environnementale et flexibilité d'usage. Il s'agit d'imaginer un bâtiment non pas comme un objet figé, mais comme un socle stable, capable d'évoluer en réponse aux évolutions fonctionnelles, techniques et sociétales. Cette approche repose avant tout sur la dissociation claire entre une structure porteuse pérenne et des aménagements facilement transformables.

La structure doit être pensée dès l'origine comme un cadre polyvalent. Elle s'appuie sur une trame régulière constituée d'une grille de colonnes, complétée par un dimensionnement modulaire. Cette organisation offre une grande liberté d'agencement dans les deux directions du plan. La largeur du bâtiment joue également un rôle clé : lorsqu'elle est optimisée, elle favorise l'éclairage naturel tout en renforçant la réversibilité des espaces. De même, une hauteur sous plafond suffisante permet d'accueillir des usages variés – logements, bureaux, commerces – tout en facilitant les réaménagements verticaux (création de mezzanines, trémies ou ouvertures).

La stabilité structurelle repose sur des noyaux techniques bien positionnés, intégrant contreventement, circulations et gaines, qui servent à la fois de colonne vertébrale au bâtiment et de points d'ancrage pour de futures transformations. La structure doit également anticiper l'évolution du bâtiment en intégrant des réserves de capacité, tant au niveau des fondations que dans la superstructure, afin de permettre des extensions ultérieures, horizontales ou verticales.

Concernant les matériaux, le béton et la maçonnerie restent des choix privilégiés dans les constructions à plusieurs étages. Ils sont appréciés pour leur haute résistance à la compression, leur faible coût, leur disponibilité courante, ainsi que pour leur bon comportement au feu et à l'isolation acoustique. Bien que ce type de structure porteuse ne soit pas conçu pour être démonté ou déplacé, et que sa réutilisation directe demeure aujourd'hui limitée, une structure inerte bien conçue peut atteindre une longévité de plusieurs centaines d'années. Elle constitue ainsi un socle stable, durable et peu exigeant en entretien, tout en permettant des aménagements évolutifs [43].

La souplesse d'usage repose également sur la capacité du bâtiment à intégrer dès sa conception des scénarios de transformation. La séparation fonctionnelle entre éléments permanents et éléments modifiables permet de faire évoluer les espaces sans compromettre l'intégrité structurelle. Cette logique de conception permet d'accompagner, sans interventions lourdes, les changements d'usage liés à des facteurs aussi divers que les transformations des modes de vie, le travail hybride, les évolutions démographiques ou les nouvelles formes d'habitat.

Ce modèle trouve une application particulièrement pertinente dans les contextes urbains denses, où il s'agit de concilier intensité d'usage, évolutivité fonctionnelle et longévité des structures. Il permet d'accueillir durablement des espaces collectifs, partagés ou hybrides, tout en réduisant le risque d'obsolescence programmatique. En combinant stabilité structurelle, modularité, démontabilité partielle et circularité des usages, cette approche prolonge la valeur d'usage du bâtiment et inscrit la construction dans une véritable dynamique environnementale à long terme.

La définition de cette structure de base constitue ainsi un point de départ pour explorer concrètement son potentiel évolutif. Dans cette perspective, trois scénarios de transformation ont été définis afin d'évaluer la flexibilité structurelle et les contraintes techniques associées à l'adaptation du bâtiment. Ces scénarios représentent des situations réalistes d'évolution programmatique, auxquelles un immeuble de bureaux pourrait être confronté au cours de sa vie, notamment dans des contextes urbains dynamiques. Ils constituent également une base pertinente pour comparer les stratégies de

surdimensionnement initial par rapport à un renforcement ultérieur ciblé.

6 Mise en place de l'étude de cas et des scénarios de transformation

6.1 Définition de la structure de référence

Après avoir identifié les principes fondamentaux d'une structure adaptable, il convient de définir la structure de référence qui sera effectivement utilisée pour l'étude des scénarios de transformation.

La structure a été modélisée comme un immeuble de bureaux de quatre niveaux, conçu selon un système d'ossature poteaux-poutres en béton armé, complété par deux noyaux rigides assurant la stabilité horizontale.

Le bâtiment présente une largeur totale de 15 m et une longueur de 40 m, pour une surface d'environ 600 m² par niveau. La hauteur d'étage est fixée à 4 m, afin de garantir une hauteur libre compatible avec d'éventuelles transformations.

Le plan est basé sur une trame orthogonale régulière, avec des portées principales de 5,4 m à 7 m, ce qui offre une bonne modularité et facilite la flexibilité des aménagements intérieurs. Les noyaux sont disposés symétriquement au centre du bâtiment, permettant de garantir la stabilité et la circulation verticale tout en maintenant des plateaux largement libres.

Le système de planchers est constitué de prédalles en béton armé, assurant un effet diaphragme et une redistribution homogène des charges horizontales vers les noyaux. Certaines dalles sont considérées isostatiques, tandis que d'autres présentent une continuité sur trois travées, assurant un comportement hyperstatique.

Les sections structurelles ont été définies de manière à respecter les contraintes minimales en matière de résistance au feu [16] ainsi que les exigences acoustiques usuelles [5, 25]. Ces paramètres ont été pris en compte dès la modélisation de la structure de référence.

Le dimensionnement est basé sur une charge d'exploitation de 3 kN/m², typique d'un immeuble de bureaux à laquelle s'ajoute une charge permanente de 1 kN/m² correspondant au poids des cloisons.

Tous ces paramètres — dimensions de la trame, portées, sections, hauteurs d'étage, charges — ont été intégrés de manière paramétrable dans Grasshopper et peuvent ainsi être modifiés facilement selon les hypothèses de calcul.

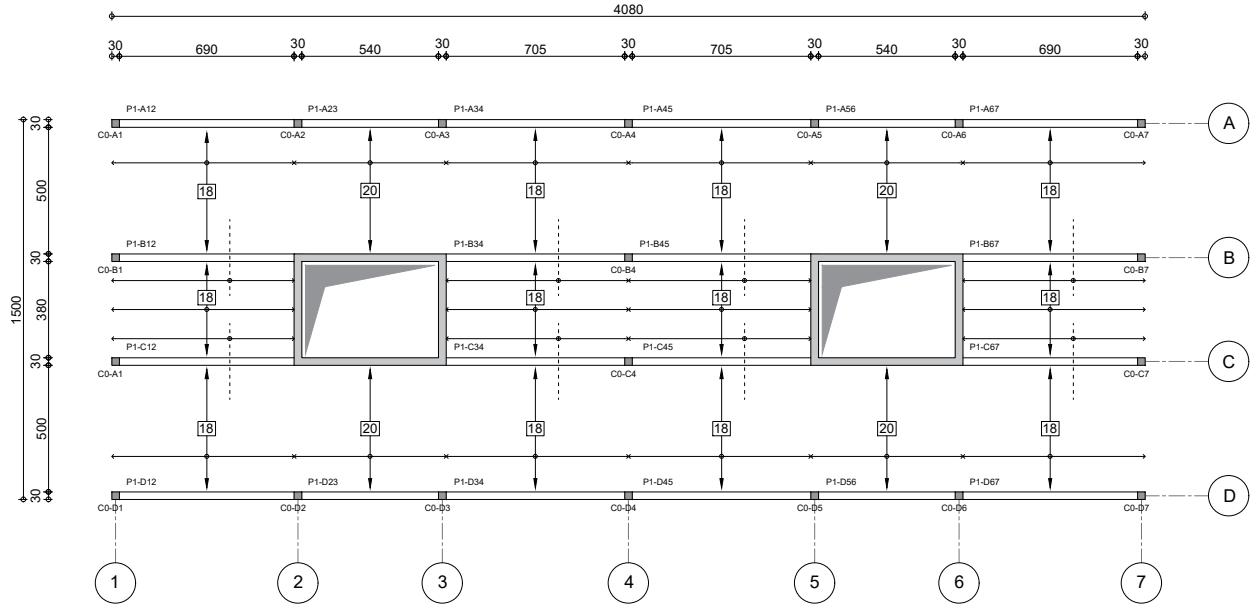


FIGURE 12 – Plan de la structure de référence [21]

Cette configuration constitue le scénario 0, c'est-à-dire l'état initial de l'immeuble avant toute transformation. Sur cette base, trois scénarios de transformation ont été définis, afin de :

- vérifier si la structure de base peut s'adapter aux évolutions programmatiques sans interventions majeures,
- identifier les éléments nécessitant un surdimensionnement initial ou un renforcement ultérieur,
- et étudier l'impact environnemental de ces adaptations.

6.2 Scénario 1 : Conversion de bureaux en aires de stockage

Dans ce premier scénario, l'hypothèse étudiée est celle d'une transformation des plateaux de bureaux en surfaces de stockage. Ce changement d'affectation s'accompagne d'une augmentation substantielle des charges d'exploitation, qui passent de 3 kN/m^2 (bureaux) à $7,5 \text{ kN/m}^2$ pour les zones de stockage, avec un maintien des charges permanentes dues aux cloisons à 1 kN/m^2 .

Problématique étudiée :

L'élément central de l'analyse concerne la capacité portante des dalles et des poutres existantes. L'augmentation des charges d'exploitation remet en cause la dimensionnement initial des éléments horizontaux, notamment au niveau de leur flexion et de leur déformation. Il est donc nécessaire d'évaluer :

- la vérification des armatures en flexion,
- la vérification de la flèche sous charges accrues,
- les éventuelles contraintes supplémentaires sur les colonnes et les fondations.

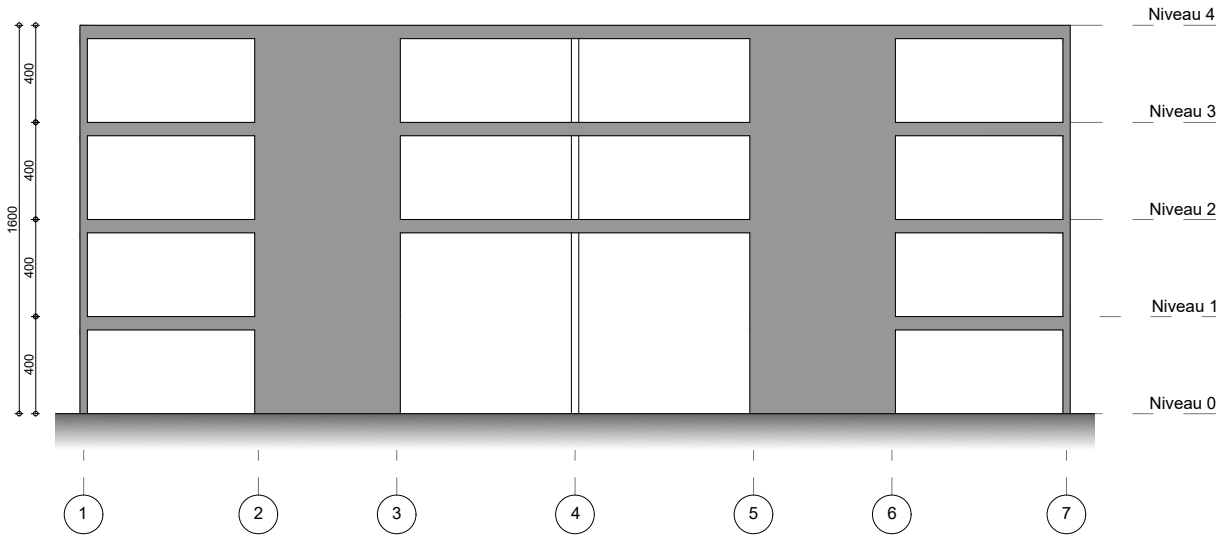


FIGURE 14 – Élévation - Scénario 2 [21]

Ce nouvel agencement entraîne plusieurs adaptations structurelles :

- la suppression des colonnes B4, C4,
- l'installation de hourdis SP320 [17] portant de façade à façade sur les poutres A34, D34, A45, D45,
- le doublement de la hauteur des colonnes A4 et D4.

Problématiques étudiées :

- le flambement accru des colonnes A4 et D4 en raison de leur hauteur doublée,
- une surcharge locale de ces éléments verticaux et des poutres adjacentes soutenant les hourdis,
- la vérification de la capacité portante des éléments vis-à-vis des nouvelles sollicitations.

Ce scénario met en lumière les défis structurels liés à la création de volumes atypiques au sein d'une trame initialement conçue pour des plateaux standards.

6.4 Scénario 3 : Surélévation de deux niveaux

Le troisième scénario envisage l'ajout de deux niveaux supplémentaires en béton au-dessus des trois étages existants. Ce type d'intervention est courant en milieu urbain, car il permet de répondre à la pression foncière, d'accroître la densité bâtie et de valoriser économiquement le bâtiment.

Problématiques étudiées :

- l'augmentation des charges verticales sur l'ensemble des colonnes et des noyaux porteurs,
- l'augmentation de la hauteur du bâtiment, avec modification des actions du vent et vérification des pressions exercées sur les façades et les noyaux.

Ce scénario souligne également l'importance d'intégrer, dès la conception, une réserve de capacité portante suffisante au niveau des fondations, conformément aux principes d'adaptabilité exposés au chapitre [3.3].

Ces trois scénarios serviront de base à l'analyse comparative environnementale développée dans les chapitres suivants, afin d'évaluer les impacts respectifs du surdimensionnement initial et du renforcement ultérieur.

7 Techniques de renforcement des structures en béton armé

À la suite de la définition des trois scénarios de transformation développés dans le chapitre précédent, il est nécessaire de préciser les techniques de renforcement qui pourraient être mises en œuvre pour adapter la structure existante à ces nouvelles sollicitations. Ces méthodes constituent l'alternative au surdimensionnement initial et permettront, dans la suite de l'étude, de comparer leur impact environnemental. Ce chapitre présente ainsi les différentes techniques de renforcement disponibles, puis justifie le choix de la technique retenue comme référence pour l'analyse comparative appliquée aux scénarios étudiés.

7.1 Chemisage en béton armé

Le chemisage en béton armé consiste à augmenter la section d'un élément porteur existant, par ajout de béton armé et d'un ferrailage complémentaire, mis en œuvre après coffrage. Cette technique, assez répandue, assure une amélioration significative de la résistance et de la rigidité de l'élément renforcé [4].

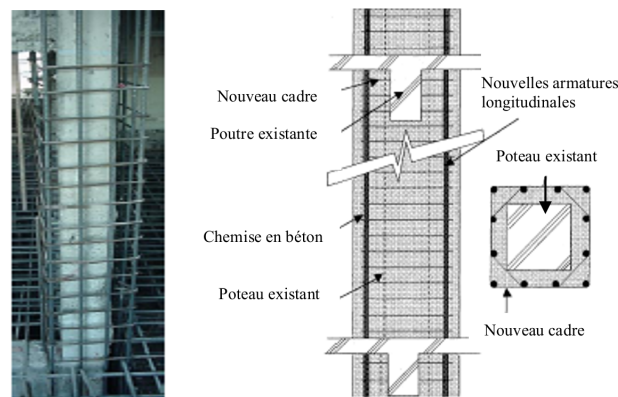


FIGURE 15 – Chemisage en béton armé [4]

Avantages	Inconvénients
– Technique peu coûteuse du fait des matériaux utilisés. – Main d'œuvre peu qualifiée.	– Augmentation considérable des sections donc du poids de la structure. – Les éléments sont plus encombrants et moins esthétiques. – Nécessité de mettre hors service l'ouvrage pendant la durée des travaux, souvent longue. – Transport des matériaux. – Nécessité de coffrages. – Mise en œuvre souvent difficile.

7.2 Chemisage en acier

Les chemises en acier, largement utilisées en renforcement parasismique, consistent à enrober les poteaux avec des éléments préfabriqués, scellés par du coulis de ciment. Pour les poteaux circulaires, elles se présentent en deux demi-coques soudées sur place. Pour les poteaux rectangulaires, elles sont souvent de forme elliptique et remplies de béton, afin d'assurer un confinement efficace au niveau des rotules plastiques [4].

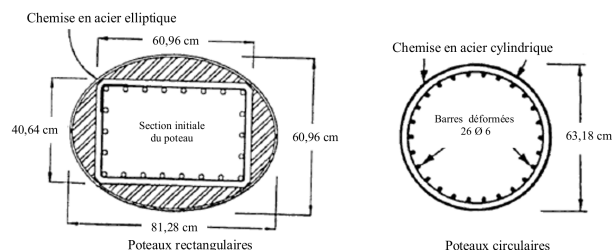


FIGURE 16 – Chemisage en acier [4]

Avantages	Inconvénients
– Courte durée de réalisation. – Bonne performance (ductilité). – Faible augmentation des sections.	– Coûts relativement élevés. – Nécessité d'une main d'œuvre qualifiée pour la soudure. – Problèmes de corrosion nécessitant un entretien régulier. – Poids des chemises et découpage complexe. – Augmentation de la rigidité en flexion (non souhaitable en parasismique).

7.3 Tôles collées

Ce type de renforcement consiste à coller des tôles d'acier sur le béton à l'aide d'adhésifs structuraux, afin d'améliorer sa capacité portante ou de corriger des déficiences locales. Développée dans les années 1960 pour l'industrie et les ouvrages d'art, la méthode est appréciée pour son faible encombrement. Toutefois, elle nécessite une préparation soignée des surfaces et reste sensible aux environnements agressifs et aux incendies [4].

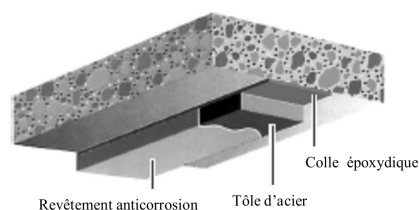


FIGURE 17 – Plat métallique [4]

Avantages	Inconvénients
– Intervention peu intrusive. – Flexibilité de pose. – Faible encombrement.	– Sensibilité de l'acier à l'oxydation. – Préparation des surfaces complexe. – Nécessité de collage sous pression (vérins) pour assurer une adhésion suffisante. – Difficulté de mise en œuvre sur de grandes surfaces.

7.4 Renforcement par matériaux composites PRF

Le renforcement par matériaux composites à matrice polymère renforcée de fibres (PRF) est une technique relativement récente et de plus en plus répandue pour la réhabilitation des structures en béton armé. Elle consiste à coller extérieurement des bandes, tissus ou lamelles de fibres noyées dans une résine époxy, formant une enveloppe résistante autour de l'élément à renforcer ou servant de renfort en flexion. Cette méthode, simple à mettre en œuvre, peu intrusive et peu exigeante en main-d'œuvre, permet d'augmenter la résistance et la ductilité tout en limitant l'encombrement et en conservant un faible poids propre. Par ailleurs, les fibres de carbone présentent des caractéristiques non corrosives et une bonne résistance à la plupart des substances chimiques, offrant ainsi à ce système de renforcement une durabilité bien supérieure à celle des matériaux conventionnels comme l'acier, ce qui en fait une solution économiquement avantageuse à long terme [4].



FIGURE 18 – Tissu PRFC [42]



FIGURE 19 – Lamelles PRFC [42]

Avantages	Inconvénients
– Faible densité. – Excellentes propriétés mécaniques longitudinales. – Résistance à la corrosion et aux environnements agressifs. – Facilité de mise en œuvre. – Bonne tenue à la fatigue.	– Anisotropie marquée (propriétés directionnelles). – Comportement fragile à la rupture. – Coût initial plus élevé que l'acier traditionnel.

Ces composites associent une matrice polymère (généralement époxy) et des fibres longues, offrant un rapport résistance/poids très élevé. On distingue trois types principaux de PRF selon la nature des fibres utilisées :

- PRFV : polymère renforcé de fibres de verre,
- PRFA : polymère renforcé de fibres d'aramide,
- PRFC : polymère renforcé de fibres de carbone.

Le tableau suivant présente un comparatif de leurs principales propriétés mécaniques [4] :

Propriétés	PRFV	PRFA	PRFC
Densité [kg/m ³]	1600-2000	1050-1250	1600-1900
Module d'élasticité [GPa]	20-55	40-125	120-250
Résistance en traction [MPa]	400-1800	1000-1800	1200-2250

Parmi ces matériaux, le PRFC se distingue nettement grâce à son module d'élasticité très élevé et sa haute résistance à la traction. Ces caractéristiques permettent d'assurer un renforcement performant, d'améliorer la résistance en compression (par confinement du béton) ou en flexion des éléments existants, tout en laissant intactes les possibilités d'adaptation future de la structure. Sa faible masse et sa facilité d'application sont également des arguments majeurs pour des chantiers de transformation avec contraintes d'exploitation.

Par conséquent, ces qualités font du PRFC la solution la plus adaptée pour servir de référence dans la comparaison entre renforcement et surdimensionnement, et pour évaluer leur impact sur la capacité d'adaptation et la durabilité des structures étudiées dans ce mémoire.

7.5 Produits utilisés pour l'analyse comparative

Dans le cadre de cette étude, les produits retenus pour modéliser les renforcements par matériaux composites PRFC sont issus du catalogue de l'entreprise Mapei. Ce choix repose principalement sur la disponibilité de fiches techniques détaillées ainsi que de fiches de déclaration environnementale (EPD), indispensables à l'évaluation du Potentiel de Réchauffement Global (GWP) dans les chapitres suivants.

Les produits utilisés sont les suivants :

- Lamelles PRFC : Carboplate E250 [28, 29]
- Résine époxy pour lamelles PRFC : Mapewrap 11 [30, 31]
- Tissu PRFC : Mapewrap C UNI-AX [34]
- Résine époxy pour tissu PRFC : Mapewrap 21 et 31T [32, 33]

8 Organigrammes de dimensionnement

Ce chapitre présente les organigrammes décrivant les différentes étapes de dimensionnement des éléments structuraux. Ces processus ont été mis en œuvre à l'aide de scripts Python intégrés dans l'environnement Grasshopper, afin d'automatiser les calculs et de garantir la cohérence des vérifications. Les méthodes de calcul utilisées dans ces scripts sont détaillées dans l'annexe [A].

8.1 Organigramme 1 : processus général

Cet organigramme illustre le déroulement global de l'étude, depuis la définition de la structure de référence jusqu'à l'évaluation des scénarios de transformation envisagés.

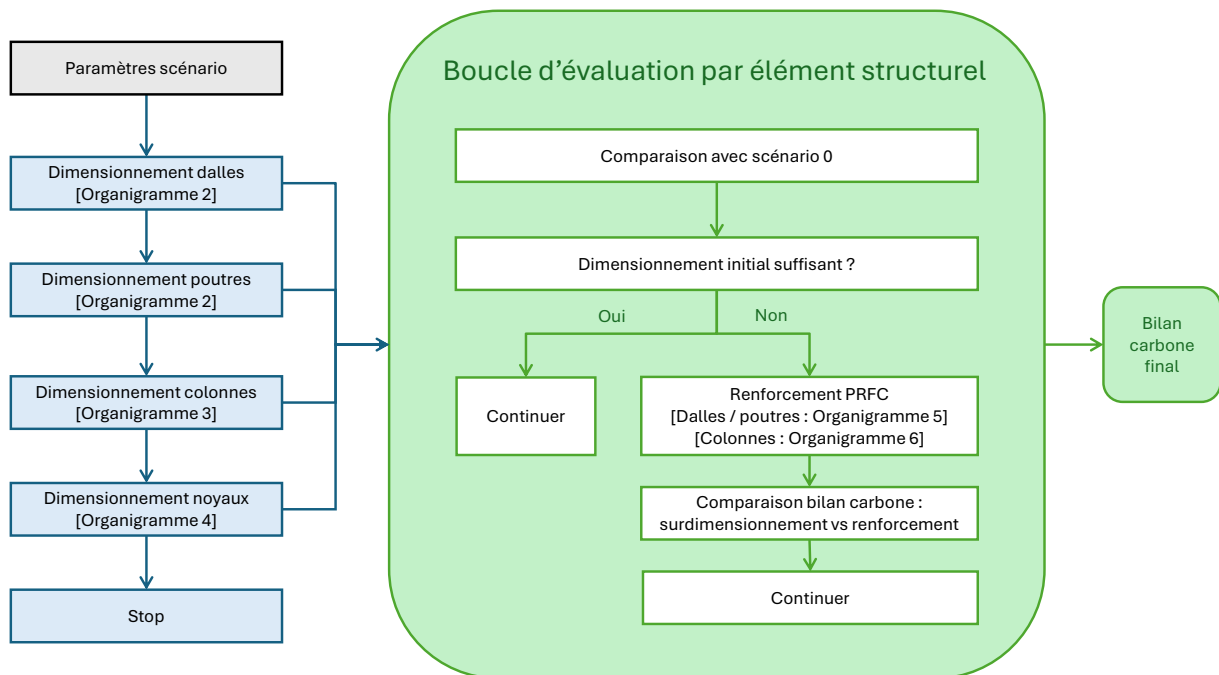


FIGURE 20 – Organigramme 1 : processus général [21]

8.2 Organigramme 2 : dimensionnement des dalles et des poutres

Cet organigramme détaille la méthode de dimensionnement des dalles et des poutres en béton armé, en s'appuyant sur les méthodes 1, 2 et 3 décrites en annexe [A.1, A.2, A.3].

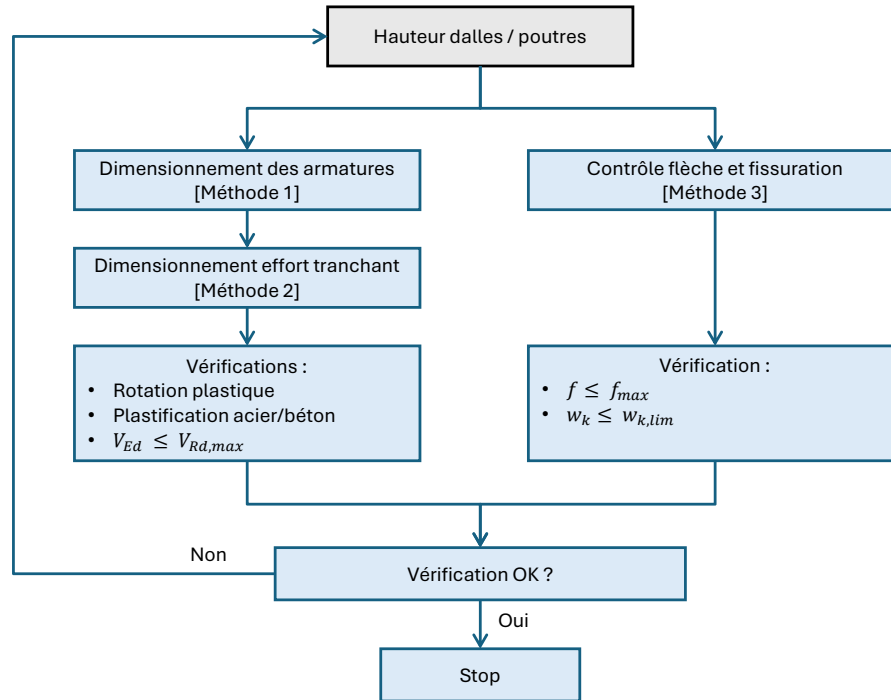


FIGURE 21 – Organigramme 2 : dimensionnement dalles/poutres [21]

8.3 Organigramme 3 : dimensionnement des colonnes

Cet organigramme présente la méthode de dimensionnement des colonnes en béton armé, incluant les vérifications de stabilité au flambement, en s'appuyant sur les méthodes 4 et 5 décrites en annexe [A.4, A.5].

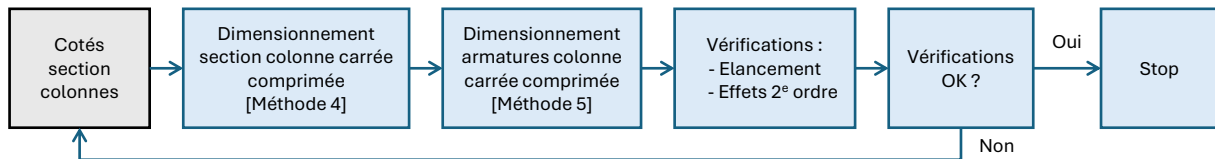


FIGURE 22 – Organigramme 3 : dimensionnement colonnes [21]

8.4 Organigramme 4 : dimensionnement des noyaux

Cet organigramme décrit la méthode de vérification des noyaux en béton armé vis-à-vis des actions horizontales telles que le vent, en s'appuyant sur les méthodes 6 et 7 décrites en annexe [A.6, A.7].

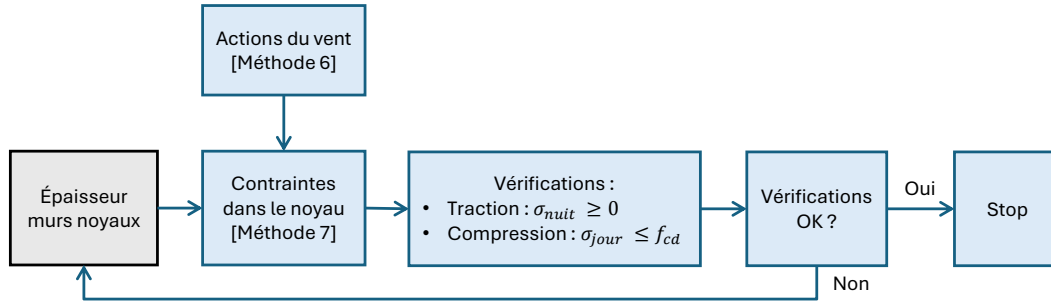


FIGURE 23 – Organigramme 4 : dimensionnement noyaux [21]

8.5 Organigramme 5 : renforcement par lamelles PRFC

Cet organigramme illustre le déroulement du renforcement par lamelles PRFC, en s'appuyant sur la méthode 8 décrite en annexe [A.8].

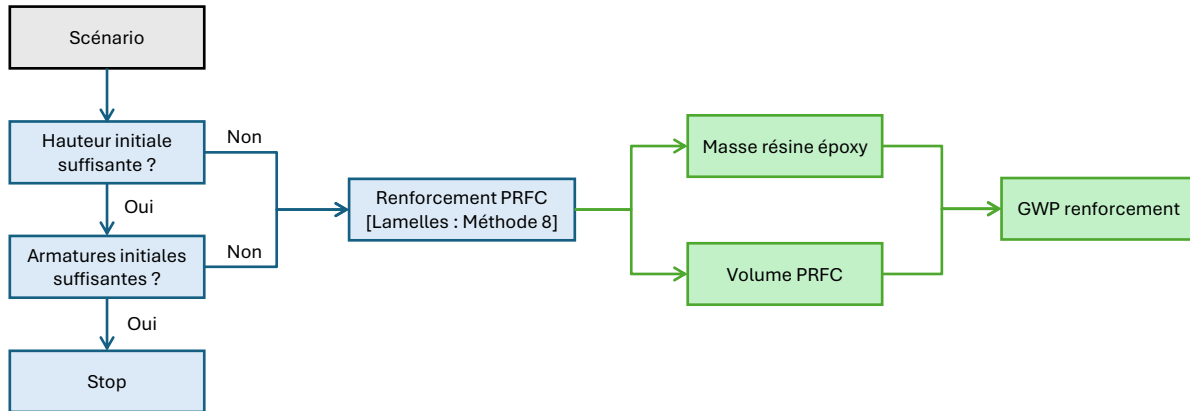


FIGURE 24 – Organigramme 5 : renforcement par lamelles PRFC [21]

8.6 Organigramme 6 : renforcement par tissu PRFC

Cet organigramme illustre le déroulement du renforcement par tissu PRFC, en s'appuyant sur la méthode 9 décrite en annexe [A.9].

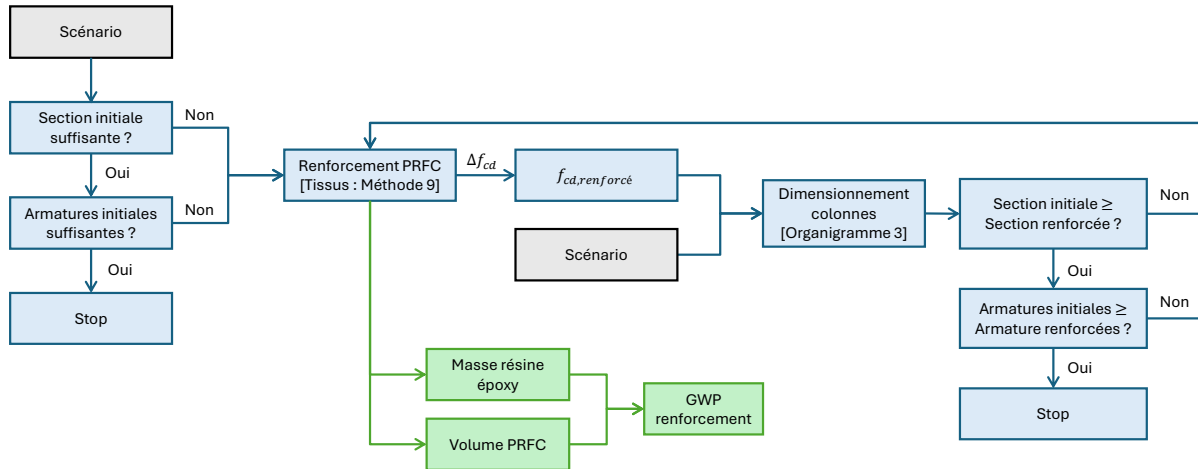


FIGURE 25 – Organigramme 6 : renforcement par tissu PRFC [21]

8.7 Organigramme 7 : renforcement par chemisage en béton armé

Cet organigramme illustre le déroulement du renforcement par chemisage en béton armé, en s'appuyant sur la méthode 10 décrite en annexe [A.10].

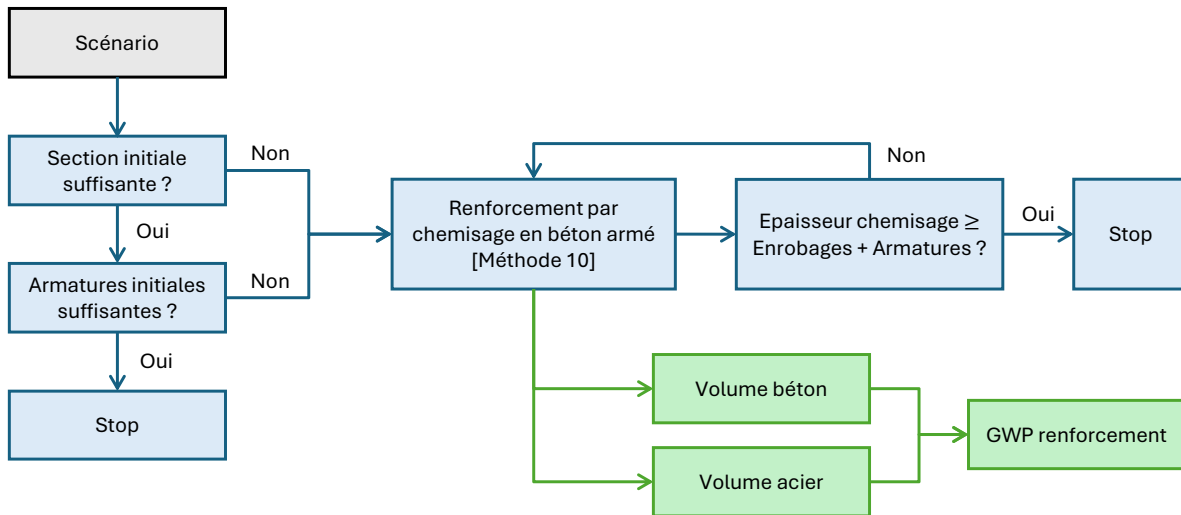


FIGURE 26 – Organigramme 7 : renforcement par chemisage en béton armé [21]

9 Présentation des résultats

Ce chapitre présente les résultats de l'analyse environnementale comparant deux approches structurales : le surdimensionnement initial et le renforcement a posteriori. Les résultats sont exprimés en termes de Potentiel de Réchauffement Global (GWP), en kg CO₂ équivalent. Pour chaque scénario étudié, les éléments structurels affectés sont identifiés, puis leur impact environnemental est quantifié. L'objectif est de comparer, à performance équivalente, les conséquences environnementales des deux stratégies afin d'éclairer le choix de conception.

Les valeurs de GWP associées au surdimensionnement correspondent à l'écart d'impact environnemental entre le dimensionnement initial et le surdimensionnement, et non aux quantités absolues de matériaux. Cela permet une comparaison équitable avec les scénarios de renforcement, qui représentent eux aussi une variation par rapport au cas de référence.

Les valeurs de GWP associées à l'acier incluent l'ensemble des armatures longitudinales et transversales. Toutefois, les étriers ne sont pas systématiquement affichés dans les tableaux.

Les données utilisées pour cette analyse sont issues des scripts paramétriques développés sous Grasshopper [22] ainsi que de certaines opérations effectuées via des scripts Python.

9.1 Scénario 1 : Conversion de bureaux en aires de stockage

Dans ce scénario, les niveaux initialement affectés à des bureaux sont convertis en surfaces de stockage. Cette transformation entraîne une augmentation significative des charges d'exploitation, passant de 3 kN/m² à 7,5 kN/m². La structure est soumise à des sollicitations verticales accrues, en particulier au niveau des dalles, poutres et colonnes.

Les tableaux ci-dessous répertorient, pour ce scénario, les éléments structurels horizontaux et verticaux soumis à une vérification. Les sections et armatures sont comparées à celles du cas de référence, afin d'identifier les éléments nécessitant un renforcement. Ces résultats servent à localiser les modifications envisagées, sans entrer ici dans leur interprétation détaillée.

TABLEAU 1 – Synthèse des sections et armatures des éléments horizontaux - Scénario 1

Éléments structurels horizontaux	h_{sc0} [m]	h_{sc1} [m]	$A_{s,sc0}$ [cm ²]	$A_{s,sc1}$ [cm ²]	Renforcement
Dalles 1 travée	0,20	0,24	6,28	7,85	A renforcer
Dalles 3 travées - rive	0,18	0,18	4,71	7,07	A renforcer
Dalles 3 travées - centre	0,18	0,18	3,14	3,14	OK
Dalles 3 travées - appuis	0,18	0,18	4,71	7,85	A renforcer
Poutres A12, D12, A67, D67	0,53	0,60	9,05	13,85	A renforcer
Poutres A23, D23, A56, D56	0,44	0,50	9,05	13,85	A renforcer
Poutres A34, D34, A45, D45	0,54	0,60	10,18	13,85	A renforcer
Poutres B12, C12, B67, C67	0,66	0,73	20,11	28,27	A renforcer
Poutres B34, C34, B45, C45	0,67	0,75	20,11	31,42	A renforcer

TABLEAU 2 – Synthèse des sections et armatures des éléments verticaux - Scénario 1

Éléments structuraux verticaux	c_{sc0}/e_{sc0} [m]	c_{sc1}/e_{sc1} [m]	$A_{s,sc0}$ [cm ²]	$A_{s,sc1}$ [cm ²]	Renforcement
Colonnes A1, D1, A7, D7 Niveau 3, 2, 1, 0	0,30	0,30	4,52	4,52	OK
Colonnes A2, D2, A6, D6 Niveau 3, 2, 1	0,30	0,30	4,52	4,52	OK
Niveau 0	0,30	0,30	4,52	12,57	A renforcer
Colonnes A3, D3, A5, D5 Niveau 3, 2, 1	0,30	0,30	4,52	4,52	OK
Niveau 0	0,30	0,30	4,52	12,57	A renforcer
Colonnes A4, D4 Niveau 3, 2, 1	0,30	0,30	4,52	4,52	OK
Niveau 0	0,30	0,30	4,52	12,57	A renforcer
Colonnes B1, C1, B7, C7 Niveau 3, 2, 1	0,30	0,30	4,52	4,52	OK
Niveau 0	0,30	0,30	4,52	19,63	A renforcer
Colonnes B4, C4 Niveau 3	0,30	0,30	4,52	4,52	OK
Niveau 2	0,30	0,30	4,52	19,63	A renforcer
Niveau 1	0,30	0,37	19,63	19,63	A renforcer
Niveau 0	0,34	0,42	19,63	19,63	A renforcer
Murs noyaux	0,30	0,30			OK

Le graphique ci-dessous présente les résultats du scénario en termes de Potentiel de Réchauffement Global (GWP), exprimé en kilogrammes de CO₂ équivalent. Les valeurs affichées correspondent à **l'ensemble de la structure**, regroupées par type d'élément (dalles, poutres, colonnes). Chaque barre représente la contribution des différents matériaux utilisés : béton, armatures, PRFC et résine. Ce graphique permet de comparer l'impact environnemental global d'un surdimensionnement initial à celui d'un renforcement par PRFC.

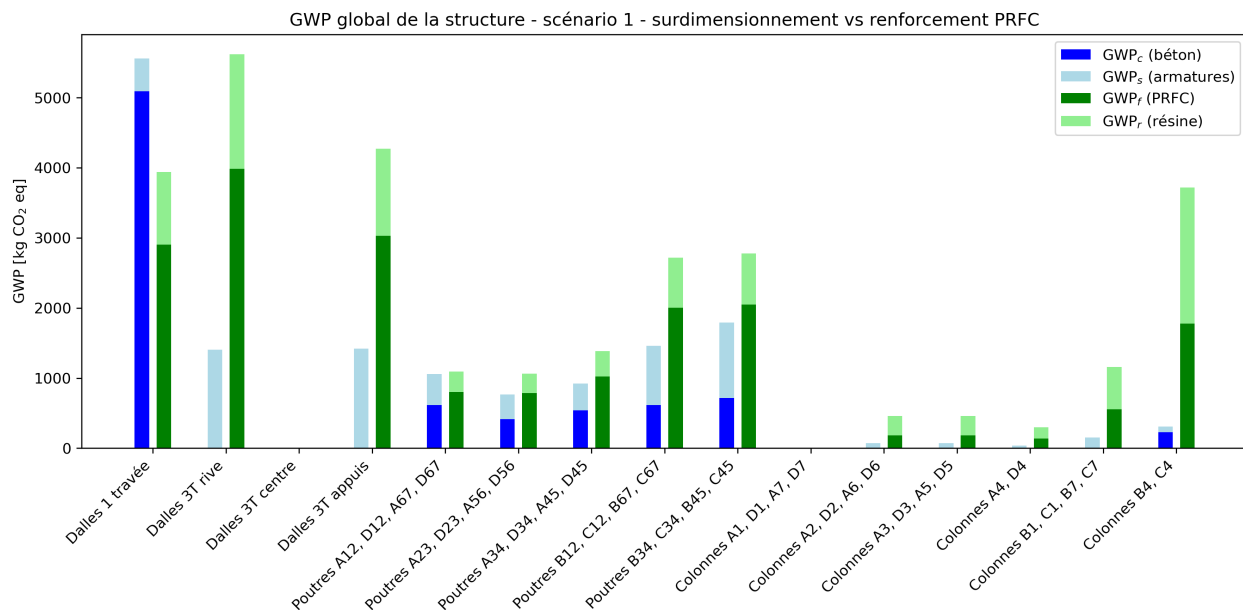


FIGURE 27 – GWP global de la structure - scénario 1 - surdimensionnement vs renforcement PRFC

La tendance générale observée dans le graphique indique que le renforcement par PRFC génère un GWP plus élevé que le surdimensionnement. Toutefois, cette tendance s'inverse dans le cas particulier des dalles isostatiques (1 travée).

On observe également une différence de comportement structurel entre les dalles isostatiques et les dalles hyperstatiques (3 travées). Ces dernières bénéficient d'une redistribution des efforts qui réduit le moment fléchissant à reprendre. Grâce à cela, leur épaisseur peut être maintenue dans la stratégie de surdimensionnement, ce qui rend le GWP du béton nul et réduit fortement l'impact environnemental global.

À l'inverse, les dalles isostatiques, qui ne présentent pas de continuité entre travées, ne profitent d'aucune redistribution. Le moment fléchissant à reprendre est donc plus élevé, ce qui implique une augmentation de l'épaisseur. Comme le montre le tableau [3], cette augmentation entraîne un volume de béton plus important, et donc un GWP béton significatif.

TABLEAU 3 – Comparaison GWP des dalles isostatiques et hyperstatiques - Travée AB

Éléments structurels	l [m]	Dimensionnement			Surdimensionnement			GWP surdimensionnement			GWP renforcement		
		$M_{ed,sc0}$ [kNm]	h_{sc0} [m]	$A_{s,sc0}$ [cm ²]	$M_{ed,sc1}$ [kNm]	h_{sc1} [m]	$A_{s,sc1}$ [cm ²]	Béton [kg CO ₂ eq]	Acier [kg CO ₂ eq]	Total [kg CO ₂ eq]	PRFC [kg CO ₂ eq]	Résine [kg CO ₂ eq]	Total [kg CO ₂ eq]
Dalles isostatique	5	39,3	0,20	6,28	63,6	0,24	7,85	5095	467	5.562	2.906	1.033	3.939
Dalles hyperstatique (travée de rive)	5	26,9	0,18	4,71	43,2	0,18	7,07	0	1.404	1.404	3.986	1.636	5.622

Le tableau [4] ci-dessous permet de tirer deux observations. Premièrement, même en faisant varier la hauteur et l'aire des armatures de la dalle isostatique, le GWP du surdimensionnement reste supérieur à celui du renforcement. Deuxièmement, en optimisant le ratio béton/armatures dans les limites des critères structurels, il est possible de réduire jusqu'à 20% des émissions de CO₂ équivalent tout en diminuant l'épaisseur de la dalle. Dans le cas présent, cela correspond à une hauteur de dalle de 23 cm.

TABLEAU 4 – Comparaison GWP des dalles isostatiques selon la hauteur

Éléments structurels	l [m]	Dimensionnement			Surdimensionnement			GWP surdimensionnement			GWP renforcement		
		$M_{ed,sc0}$ [kNm]	h_{sc0} [m]	$A_{s,sc0}$ [cm ²]	$M_{ed,sc1}$ [kNm]	h_{sc1} [m]	$A_{s,sc1}$ [cm ²]	Béton [kg CO ₂ eq]	Acier [kg CO ₂ eq]	Total [kg CO ₂ eq]	PRFC [kg CO ₂ eq]	Résine [kg CO ₂ eq]	Total [kg CO ₂ eq]
Dalle isostatique	5	39,3	0,20	6,28	63,6	0,24	7,85	5.095	467	5.562	2.906	1.033	3.939
					63,6	0,23	9,05	3.821	824	4.645	2.491	1.033	3.524
					63,6	0,22	15,39	2.547	2.710	5.257	2.491	1.033	3.524
					63,6	0,21	25,13	1.273	5.608	6.881	2.491	1.033	3.524
					63,6	0,20	39,27	0	9.815	9.815	2.491	1.033	3.524

Un autre enseignement tiré du graphique [27] concerne l'impact environnemental de la résine époxy utilisée dans le renforcement par PRFC. Pour les lamelles PRFC mises en œuvre dans le renforcement des dalles et des poutres, la résine [30, 31] représente à elle seule plus de 25% du GWP total lié au renforcement, comme l'illustre le graphique ci-dessous.

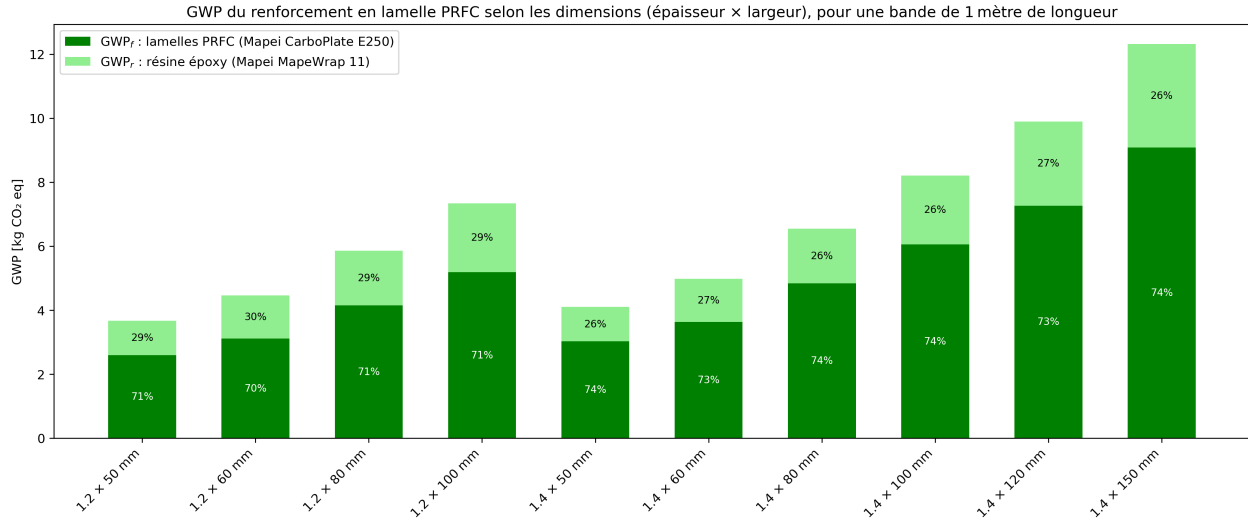


FIGURE 28 – Impact de la résine époxy dans le GWP du renforcement en lamelle PRFC [23]

Pour les tissus PRFC utilisés dans le renforcement des colonnes, la résine époxy [32, 33] représente plus de 50% du GWP total associé à cette technique, comme le montre le graphique ci-dessous.

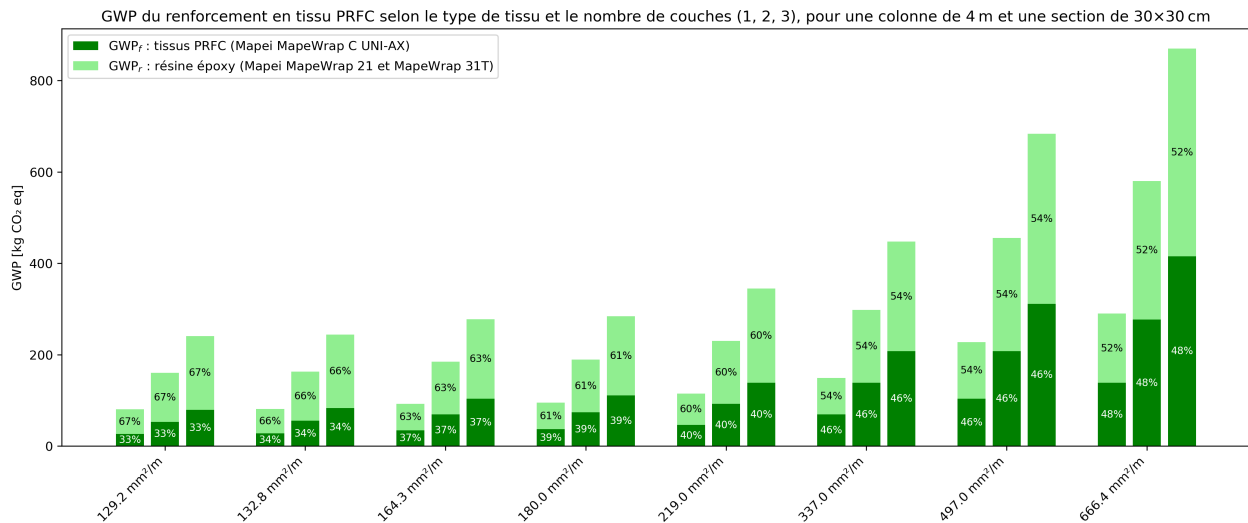


FIGURE 29 – Impact de la résine époxy dans le GWP du renforcement en tissu PRFC [23]

À l'échelle de la structure [tableau 5], les colonnes ne représentent qu'environ 4% du GWP total dans la stratégie de surdimensionnement. En revanche, leur contribution augmente fortement dans le cas du renforcement, avec un impact environ huit fois plus élevé.

TABLEAU 5 – Résultats GWP par catégorie d'éléments pour l'ensemble de la structure - Scénario 1

Éléments structurels	GWP rurdimensionnement			GWP renforcement par PRFC		
	Béton [kg CO ₂ eq]	Acier [kg CO ₂ eq]	Total [kg CO ₂ eq]	PRFC [kg CO ₂ eq]	Résine [kg CO ₂ eq]	Total [kg CO ₂ eq]
Dalles	5.095	3.291	8.386	9.924	3.912	13.836
Poutres	2.943	2.785	5.728	6.410	2.285	8.695
Colonnes	229	415	644	2.597	3.070	5.667
Murs noyaux	0	0	0	0	0	0
Total	8.267	6.491	14.758	18.931	9.267	28.198

Le faible GWP des colonnes dans la stratégie de surdimensionnement s'explique, en partie, par le fait que ces éléments disposent déjà d'une section minimale imposée par les exigences de résistance au feu [16]. Cette contrainte introduit, de facto, une réserve de capacité à la compression, qui a permis, dans un grand nombre de cas, de limiter voire d'éviter tout surdimensionnement complémentaire [tableau 6].

TABLEAU 6 – Sections minimales et sections effectives des colonnes - Scénario 1

Éléments structurels	$c_{sc0,min}$ [m]	c_{sc0} [m]	$c_{sc1,min}$ [m]	c_{sc1} [m]	Renforcement section
Colonnes A1, D1, A7, D7					
Niveau 3	0.13	0,30	0.14	0,30	OK
Niveau 2	0.15	0,30	0.17	0,30	OK
Niveau 1	0.17	0,30	0.18	0,30	OK
Niveau 0	0.18	0,30	0.20	0,30	OK
Colonnes A2, D2, A6, D6					
Niveau 3	0.15	0,30	0.16	0,30	OK
Niveau 2	0.18	0,30	0.20	0,30	OK
Niveau 1	0.19	0,30	0.24	0,30	OK
Niveau 0	0.22	0,30	0.27	0,30	OK
Colonnes A3, D3, A5, D5					
Niveau 3	0.15	0,30	0.16	0,30	OK
Niveau 2	0.18	0,30	0.20	0,30	OK
Niveau 1	0.19	0,30	0.24	0,30	OK
Niveau 0	0.22	0,30	0.27	0,30	OK
Colonnes A4, D4					
Niveau 3	0.15	0,30	0.17	0,30	OK
Niveau 2	0.18	0,30	0.20	0,30	OK
Niveau 1	0.20	0,30	0.24	0,30	OK
Niveau 0	0.23	0,30	0.28	0,30	OK
Colonnes B1, C1, B7, C7					
Niveau 3	0.15	0,30	0.17	0,30	OK
Niveau 2	0.18	0,30	0.21	0,30	OK
Niveau 1	0.20	0,30	0.25	0,30	OK
Niveau 0	0.24	0,30	0.29	0,30	OK
Colonnes B4, C4					
Niveau 3	0.18	0,30	0.21	0,30	OK
Niveau 2	0.24	0,30	0.30	0,30	OK
Niveau 1	0.29	0,30	0.36	0,37	A renforcer
Niveau 0	0.33	0,34	0.42	0,42	A renforcer

Ce phénomène est également observé dans la stratégie de renforcement, ce qui limite la quantité de matériau à utiliser. Toutefois, la technique par tissu PRFC présente un impact carbone élevé, même pour de faibles quantités de matériau. Cela atténue l'effet de cette réserve. Néanmoins, celle-ci a contribué à réduire l'ampleur des renforcements requis, et donc les émissions associées.

Des variations intermédiaires de charges d'exploitation (4,5 et 6 kN/m²) ont également été testées dans ce scénario. Elles n'ont pas entraîné de différences significatives sur les résultats comparatifs entre surdimensionnement et renforcement, et ne sont donc pas présentées ici.

9.2 Scénario 2 : Conversion de bureaux en commerces et bureaux

Ce scénario envisage une reconversion partielle du bâtiment, dans laquelle le rez-de-chaussée est transformé en surface commerciale, dont une partie s'étend sur deux niveaux [figure 13]. Les étages supérieurs conservent leur usage de bureaux. Cette configuration implique la suppression partielle de planchers et de colonnes, ainsi qu'un allongement de certains éléments porteurs, entraînant des ajustements structurels localisés.

Comme pour le scénario précédent, les tableaux suivants synthétisent les besoins de renforcement des éléments structurels soumis à de nouvelles contraintes. Seuls les éléments dont les dimensions ou les armatures doivent être modifiées sont signalés comme tels. Ces données permettent de localiser les adaptations nécessaires à la structure dans ce scénario.

TABLEAU 7 – Synthèse des sections et armatures des éléments horizontaux - Scénario 2

Éléments structurels horizontaux	h_{sc0} [m]	h_{sc2} [m]	$A_{s,sc0}$ [cm ²]	$A_{s,sc2}$ [cm ²]	Renforcement
Dalles 1 travée	0,20	0,20	6,28	6,28	OK
Dalles 3 travées - rive	0,18	0,18	4,71	4,71	OK
Dalles 3 travées - centre	0,18	0,18	3,14	3,14	OK
Dalles 3 travées - appuis	0,18	0,18	4,71	4,71	OK
Poutres A12, D12, A67, D67	0,53	0,53	9,05	9,05	OK
Poutres A23, D23, A56, D56	0,44	0,44	9,05	9,05	OK
Poutres A34, D34, A45, D45	0,54	0,73	10,18	28,27	A renforcer
Poutres B12, C12, B67, C67	0,66	0,66	20,11	20,11	OK
Poutres B34, C34, B45, C45	0,67	0,67	20,11	20,11	OK

TABLEAU 8 – Synthèse des sections et armatures des éléments verticaux - Scénario 2

Éléments structurels verticaux	c_{sc0}/e_{sc0} [m]	c_{sc2}/e_{sc2} [m]	$A_{s,sc0}$ [cm ²]	$A_{s,sc2}$ [cm ²]	Renforcement
Colonnes A1, D1, A7, D7 Niveau 3, 2, 1, 0	0,30	0,30	4,52	4,52	OK
Colonnes A2, D2, A6, D6 Niveau 3, 2, 1, 0	0,30	0,30	4,52	4,52	OK
Colonnes A3, D3, A5, D5 Niveau 3, 2	0,30	0,30	4,52	4,52	OK
Niveau 1	0,30	0,30	4,52	8,04	A renforcer
Niveau 0	0,30	0,30	4,52	12,57	A renforcer
Colonnes A4, D4 Niveau 3	0,30	0,30	4,52	4,52	OK
Niveau 2	0,30	0,30	4,52	12,57	A renforcer
Niveau 1	0,30	0,37	4,52	32,17	A renforcer
Niveau 0	0,30	0,37	4,52	32,17	A renforcer
Colonnes B1, C1, B7, C7 Niveau 3, 2, 1, 0	0,30	0,30	4,52	4,52	OK
Colonnes B4, C4 Niveau 3, 2	0,30	0,30	4,52	4,52	OK
Niveau 1, 0	0,30	0,30	19,63	19,63	OK
Murs noyaux	0,30	0,30			OK

Le graphique ci-dessous présente les résultats en termes de Potentiel de Réchauffement Global (GWP) **par élément individuel** pour les composants concernés par des modifications dans le cadre de ce scénario. Les valeurs sont exprimées en kg de CO₂ équivalent, en distinguant les dif-

férentes sources d'impact : béton, armatures, PRFC, résine, ainsi que béton et armatures liés au chemisage. Ce graphique permet de comparer, élément par élément, l'impact environnemental du surdimensionnement initial avec ceux d'un renforcement par PRFC ou par chemisage en béton armé.

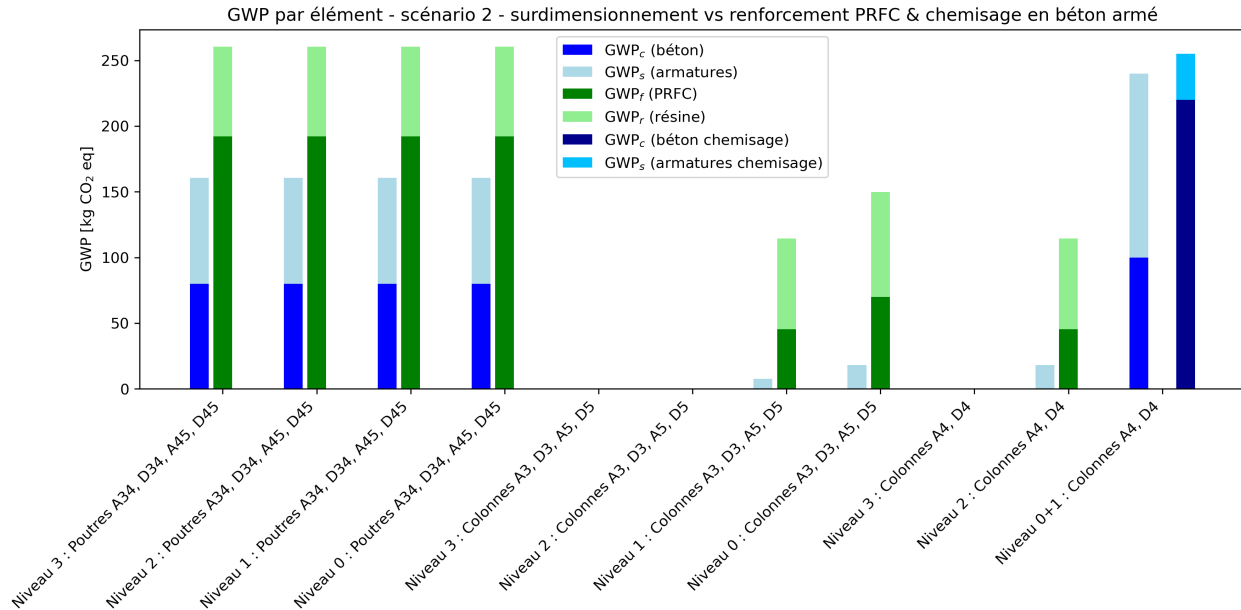


FIGURE 30 – Résultats GWP par élément - Scénario 2

Pour les colonnes A4 et D4, la technique de renforcement par tissu PRFC s'avère inapplicable : le nombre de couches nécessaires dépasse la limite recommandée, fixée à trois. Au-delà, l'efficacité du tissu diminue en raison d'un facteur correctif exponentiel appliqué à son épaisseur effective [A.9].

Le principe du renforcement par PRFC repose sur le confinement du béton, ce qui permet d'en augmenter la résistance à la compression. Cette technique est particulièrement adaptée aux efforts de compression axiale. En revanche, elle devient moins performante pour reprendre les efforts de traction dus au moment induit par les effets du second ordre liés au flambement — ce qui est précisément le cas ici, la longueur de flambement des colonnes A4 et D4 étant doublée dans ce scénario.

Pour pallier cette limitation, une autre technique est requise. Parmi celles présentées au chapitre [7.1], le chemisage en béton armé apparaît comme l'option la plus appropriée. Cela s'explique notamment par le fait que ces colonnes sont situées au rez-de-chaussée — où l'augmentation du poids propre a un impact structural limité — et que l'objectif est de compenser un déficit en armatures longitudinales.

Le tableau suivant illustre les différences entre le surdimensionnement et le renforcement par chemisage en béton armé pour les colonnes A4, D4.

TABLEAU 9 – Comparaison GWP pour les colonnes A4, D4 (niveau 0)

Élément structurel	Données			Dimensionnement		Surdimensionnement		Chemisage			GWP surdimensionnement			GWP renforcement par chemisage		
	l [m]	$N_{ed,sc0}$ [kN]	$N_{ed,sc2}$ [kN]	c [m]	A_s [cm ²]	c [m]	A_s [cm ²]	e [m]	c [m]	A_s [cm ²]	Béton [kg CO ₂ eq]	Acier [kg CO ₂ eq]	Total [kg CO ₂ eq]	Béton [kg CO ₂ eq]	Acier [kg CO ₂ eq]	Total [kg CO ₂ eq]
Colonnes A4, D4 : niveau 0	8	866	1899	0,30	4,52	0,37	32,17	0,07	0,44	4,52	99,5	139,8	239,3	220	35	255

Le chemisage impose une épaisseur minimale afin de respecter les normes d'enrobage des armatures longitudinales et transversales. Cette exigence entraîne automatiquement une quantité significative de béton, et donc un impact environnemental accru en termes de GWP. Toutefois, ce surcoût peut être partiellement compensé par une optimisation des armatures : l'augmentation de la section accroît le bras de levier, ce qui permet l'utilisation de barres de diamètre inférieur. Le GWP associé à l'acier s'en trouve réduit, contrebalançant en partie l'empreinte carbone du béton supplémentaire.

Pour les colonnes, la distinction entre surdimensionnement et renforcement est moins marquée dans le cas du chemisage en béton armé que dans celui du renforcement par PRFC. Cette observation sera approfondie dans le scénario 3, à travers une comparaison détaillée entre les deux techniques de renforcement et le surdimensionnement.

9.3 Scénario 3 : Surélévation de deux niveaux

Le troisième scénario étudie l'ajout de deux étages supplémentaires en superstructure. Cette surélévation entraîne une augmentation des charges verticales sur les colonnes et noyaux existants, ainsi qu'une modification des efforts dus au vent, liée à la hauteur accrue du bâtiment. Les impacts se concentrent principalement sur les éléments porteurs verticaux.

Les tableaux ci-dessous recensent les éléments structuraux soumis à vérification en raison de cette transformation. La comparaison avec les dimensions initiales permet d'identifier les éléments nécessitant un renforcement. Ces résultats servent à localiser les adaptations structurelles induites par la surélévation.

TABLEAU 10 – Synthèse des sections et armatures des éléments horizontaux - Scénario 3

Éléments structuraux horizontaux	h_{sc0} [m]	h_{sc3} [m]	$A_{s,sc0}$ [cm ²]	$A_{s,sc3}$ [cm ²]	Renforcement
Dalles 1 travée	0,20	0,20	6,28	6,28	OK
Dalles 3 travées - rive	0,18	0,18	4,71	4,71	OK
Dalles 3 travées - centre	0,18	0,18	3,14	3,14	OK
Dalles 3 travées - appuis	0,18	0,18	4,71	4,71	OK
Poutres A12, D12, A67, D67	0,53	0,53	9,05	9,05	OK
Poutres A23, D23, A56, D56	0,44	0,44	9,05	9,05	OK
Poutres A34, D34, A45, D45	0,54	0,54	10,18	10,18	OK
Poutres B12, C12, B67, C67	0,66	0,66	20,11	20,11	OK
Poutres B34, C34, B45, C45	0,67	0,67	20,11	20,11	OK

TABLEAU 11 – Synthèse des sections et armatures des éléments verticaux - Scénario 3

Éléments structuraux verticaux	c_{sc0}/e_{sc0} [m]	c_{sc3}/e_{sc3} [m]	$A_{s,sc0}$ [cm ²]	$A_{s,sc3}$ [cm ²]	Renforcement
Colonnes A1, D1, A7, D7 Niveau 3, 2, 1, 0	0,30	0,30	4,52	4,52	OK
Colonnes A2, D2, A6, D6 Niveau 3, 2, 1 Niveau 0	0,30 0,30	0,30 0,30	4,52 4,52	4,52 8,04	OK A renforcer
Colonnes A3, D3, A5, D5 Niveau 3, 2, 1 Niveau 0	0,30 0,30	0,30 0,30	4,52 4,52	4,52 12,57	OK A renforcer
Colonnes A4, D4 Niveau 3, 2, 1 Niveau 0	0,30 0,30	0,30 0,30	4,52 4,52	4,52 12,57	OK A renforcer
Colonnes B1, C1, B7, C7 Niveau 3, 2 Niveau 1 Niveau 0	0,30 0,30 0,30	0,30 0,30 0,30	4,52 4,52 4,52	4,52 8,04 19,63	OK A renforcer A renforcer
Colonnes B4, C4 Niveau 3 Niveau 2 Niveau 1 Niveau 0	0,30 0,30 0,30 0,34	0,30 0,34 0,38 0,42	4,52 4,52 19,63 19,63	19,63 19,63 19,63 19,63	A renforcer A renforcer A renforcer A renforcer
Murs noyaux	0,30	0,30			OK

Le graphique ci-dessous présente les résultats en termes de Potentiel de Réchauffement Global (GWP) **par élément individuel**, pour les composants modifiés dans le cadre de ce scénario. Les valeurs sont exprimées en kg de CO₂ équivalent, en distinguant les différentes sources d'impact :

béton, armatures, PRFC, résine, ainsi que le béton et les armatures liés au chemisage. Ce graphique permet de comparer, élément par élément, l'impact environnemental d'un surdimensionnement initial à celui d'un renforcement par PRFC ou par chemisage en béton armé.

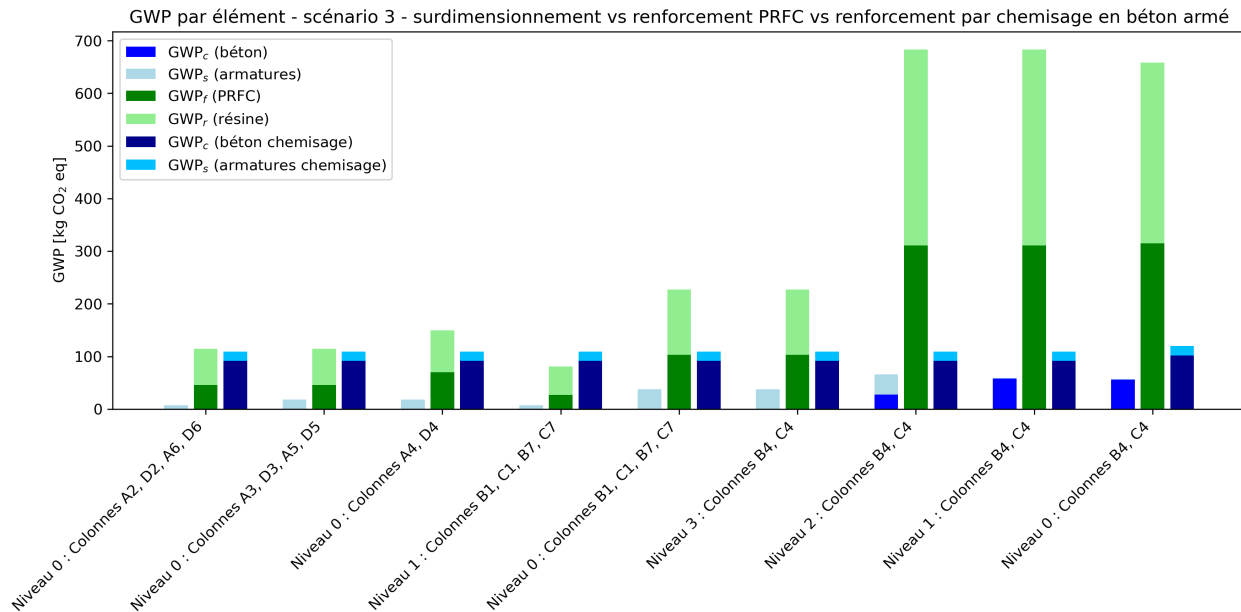


FIGURE 31 – Résultats GWP par élément - Scénario 3

De manière générale, le graphique ci-dessus montre que le renforcement génère davantage d'émissions de CO₂ que le surdimensionnement.

Dans certains cas, cet écart est particulièrement prononcé. En effet, le surdimensionnement peut se limiter à une légère augmentation du diamètre des armatures, sans modification de la section en béton. À l'inverse, le renforcement – même minimal – induit systématiquement une augmentation significative du GWP.

C'est ce que l'on observe pour les colonnes A2, D2, A6 et D6 au niveau 0. Pour ces éléments, l'effort supplémentaire à reprendre est de 408 kN (passant de 817 kN à 1225 kN) et le surdimensionnement ainsi que le renforcement y sont appliqués à leur seuil minimal.

Les trois tableaux ci-dessous comparent l'impact environnemental des différentes stratégies dans ces conditions minimales.

TABEAU 12 – GWP pour un surdimensionnement minimum

Élément structurel	Dimensionnement		Surdimensionnement		GWP surdimensionnement		
	c [m]	A_s [cm ²]	c [m]	A_s [cm ²]	Béton [kg CO ₂ eq]	Acier [kg CO ₂ eq]	Total [kg CO ₂ eq]
Colonnes A2, D2, A6, D6 : niveau 0	0,3	4,52	0,3	8,04	0	7,6	7,6

TABLEAU 13 – GWP pour un renforcement minimum par PRFC

Élément structurel	Renforcement par PRFC			GWP renforcement par PRFC		
	Nombre de couche	Surface résistante par unité de largeur [mm ² /m]	Consommation de résine époxy [g/m ²]	Tissu [kg CO ₂ eq]	Résine [kg CO ₂ eq]	Total [kg CO ₂ eq]
Colonnes A2, D2, A6, D6 : niveau 0	1	129,2	975	45,5	68,9	114,4

TABLEAU 14 – GWP pour renforcement minimum par chemisage

Élément structurel	Renforcement par chemisage			GWP renforcement par chemisage		
	c_{sc0} [m]	e [m]	A_s [cm ²]	Béton [kg CO ₂ eq]	Acier [kg CO ₂ eq]	Total [kg CO ₂ eq]
Colonnes A2, D2, A6, D6 : niveau 0	0,3	0,06	4,52	91,7	17,3	109

Il apparaît clairement que, dans ce cas précis, le GWP associé au surdimensionnement (7,6 kg CO₂ eq) est jusqu'à 14 fois inférieur à celui du renforcement par PRFC (114,4 kg CO₂ eq) ou par chemisage en béton armé (109 kg CO₂ eq).

On observe également dans le graphique [31] que le recours au renforcement par PRFC s'intensifie pour les trois dernières séries de colonnes, tandis que l'impact du chemisage en béton armé reste stable. Pour mieux comprendre cette évolution, il a lieu de comparer les colonnes A4, B1 et B4 du niveau 0, toutes soumises à une augmentation de charges de l'ordre de 50%, et qui illustrent bien cette tendance.

TABLEAU 15 – Comparaison du GWP pour les colonnes A4, B1 et B4 (niveau 0)

Éléments structurels	ΔN_{Ed} [kN]	Renforcement par chemisage			GWP renforcement par chemisage			Renforcement par PRFC			GWP renforcement par PRFC		
		c_{sc0} [m]	e [m]	A_s [cm ²]	Béton [kg CO ₂ eq]	Acier [kg CO ₂ eq]	Total [kg CO ₂ eq]	Nombre de couche	Surface résistante par unité de largeur [mm ² /m]	Masse résine [kg]	Tissu [kg CO ₂ eq]	Résine [kg CO ₂ eq]	Total [kg CO ₂ eq]
Colonne A4 : niveau 0	433	0,3	0,06	4,52	91,7	17,3	109	1	337,0	6,96	70	79,9	149,9
Colonne B1 : niveau 0	470	0,3	0,06	4,52	91,7	17,3	109	1	497,0	10,8	103,4	124	227,4
Colonne B4 : niveau 0	948	0,34	0,06	4,52	101,9	18	119,9	2	666,4	29,92	314,8	343,5	658,3

On constate que, pour une augmentation des efforts allant du simple au double, le chemisage en béton armé maintient un GWP relativement constant, tandis que le renforcement par PRFC devient de plus en plus impactant. L'impact environnemental devient particulièrement marqué dans le cas de la colonne B4, où le GWP associé au PRFC dépasse de plus de quatre fois celui du chemisage.

Cette évolution s'explique en partie par l'augmentation de la quantité de résine époxy nécessaire, dont le poids dans le GWP total peut atteindre 50%, comme illustré dans l'analyse du scénario précédent [figure 29].

Le PRFC peut donc rester pertinent pour de petites interventions ciblées, mais au-delà d'un certain seuil d'effort, le chemisage est clairement plus sobre en CO₂.

10 Analyse croisée des résultats

Cette conclusion synthétise les résultats issus de l'analyse environnementale comparative entre deux stratégies de conception structurelle : le surdimensionnement initial et le renforcement a posteriori. L'objectif est d'évaluer, à partir des trois scénarios étudiés, laquelle de ces approches permet de mieux concilier adaptabilité fonctionnelle et impact environnemental, mesuré ici par le potentiel de réchauffement global (GWP), exprimé en kg de CO₂ équivalent. L'analyse compare plusieurs techniques de renforcement, en particulier les polymères renforcés de fibres de carbone (PRFC) et le chemisage en béton armé.

10.1 Analyse globale

Les résultats montrent des tendances marquées entre les deux approches en matière d'impact environnemental. Le surdimensionnement initial présente un GWP total plus faible que le renforcement dans la quasi-totalité des cas analysés (scénarios 1 à 3). Cette différence s'explique principalement par l'utilisation de PRFC, dont l'impact environnemental est fortement lié à la présence de résine époxy comme liant.

Celle-ci représente une part significative du GWP total : environ 25 % pour les lamelles [figure 28], et plus de 50 % pour les tissus [figure 29]. Même dans les configuration où les besoins de renforcement sont limités, le recours au PRFC — qu'il s'agisse de tissu ou de lamelles — reste globalement plus pénalisant en termes d'émissions de CO₂ que le surdimensionnement initial (tableaux [12] [13] [14]).

10.2 Analyse par type d'élément

Colonnes

Dans le scénario 1, les colonnes renforcées par tissu PRFC présentent un GWP particulièrement élevé. Il est environ huit fois supérieur à celui obtenu avec une stratégie de surdimensionnement [tableau 5].

En outre, au-delà de trois couches, l'efficacité du tissu PRFC diminue, ce qui réduit fortement son intérêt pour les renforcements de grande ampleur. Cette technique s'avère également moins performante que le chemisage en béton armé pour reprendre les moments induits par le flambement, notamment du fait de sa capacité limitée à reprendre des efforts de traction longitudinaux — à la différence du chemisage en béton armé, mieux dimensionné pour ces sollicitations.

En comparaison, le chemisage en béton armé entraîne une augmentation du volume de béton — et donc du GWP — mais il permet de réduire la quantité d'armatures nécessaires, en augmentant le bras de levier entre les aciers et l'axe neutre de la section [tableau 9].

Chaque technique présente par ailleurs des contraintes spécifiques. Le PRFC, bien que plus technique, permet une mise en œuvre rapide, peu intrusive et peu exigeante en main-d'œuvre. Le chemisage en béton armé, en revanche, utilise des matériaux standards et économiques, mais implique des travaux plus lourds, une interruption prolongée d'usage et une logistique plus contraignante.

Au-delà de ces considérations pratiques, les colonnes peuvent, dans certains cas, bénéficier d'une réserve de capacité liée à des exigences réglementaires comme la résistance au feu. Cette réserve, lorsqu'elle existe, peut permettre de limiter ou d'éviter certaines interventions.

Cette observation renvoie aux principes d'une structure adaptable développés au chapitre [5].

Les noyaux et colonnes y sont décrits comme des éléments porteurs stratégiques, constituant la colonne vertébrale du bâtiment et servant de points d'ancrage pour d'éventuelles transformations. Ils sont conçus pour accueillir des évolutions futures, horizontales ou verticales, grâce à l'intégration anticipée de réserves de capacité au niveau des fondations comme de la superstructure.

Le croisement de cette approche théorique avec l'analyse pratique montre que le surdimensionnement déjà présent dans les éléments verticaux — même s'il n'était pas intentionnel — peut être valorisé dans une logique d'évolutivité du bâtiment et de sobriété environnementale, à condition d'être mobilisé de façon réfléchie.

Dalles

Dans le cas des dalles isostatiques étudiées, le surdimensionnement entraîne une augmentation significative de l'épaisseur. Cela accroît fortement le volume de béton et, par conséquent, le GWP [tableau 3]. Cette configuration rend le renforcement par PRFC plus avantageux sur le plan environnemental.

Plus largement, cela montre que pour des éléments sollicités en flexion simple, des solutions composites, comme des dalles en béton renforcées par PRFC, peuvent représenter une alternative environnementalement plus sobre que les structures massives en béton armé. Toutefois, cette stratégie reste peu développée en pratique, en raison de freins économiques, mais aussi de contraintes techniques comme la complexité de mise en œuvre, de l'absence de normalisation en conception neuve et les performances anisotropes du PRFC, principalement efficaces en traction unidirectionnelle.

Les dalles hyperstatiques permettent, grâce à la continuité structurelle, une meilleure redistribution des efforts et un surdimensionnement sans augmentation de l'épaisseur [tableau 3]. Ce comportement favorable dépend toutefois du maintien de l'hyperstaticité dans le temps. En cas de transformation du bâtiment — par exemple la création de trémies, la suppression de porteurs ou la modification d'appuis — cette continuité peut être rompue, et la dalle se comporter localement comme un élément isostatique.

Le renforcement devient alors d'autant plus contraignant qu'il doit à la fois compenser les effets induits par la transformation elle-même, et corriger la perte de capacité liée au passage d'un fonctionnement hyperstatique à un fonctionnement isostatique, ce qui s'avère particulièrement pénalisant.

Cette sensibilité souligne l'importance d'anticiper, dès la conception, les scénarios de transformation susceptibles d'affecter la répartition des efforts dans les éléments structuraux.

Par ailleurs, une optimisation du ratio acier/béton permet de réduire le GWP. Ce principe se vérifie dans le cas étudié, où l'analyse du tableau [4] met en évidence une tendance non linéaire du GWP en fonction de l'épaisseur de dalle. Une réduction modérée de celle-ci permet d'abaisser le GWP global, mais passé un certain seuil, la quantité d'armatures nécessaires augmente fortement, inversant l'effet recherché.

Cela suggère donc l'existence d'un optimum environnemental, situé autour de 0,23 m dans le cas étudié. Le confronter à des critères économiques constituerait une piste pertinente pour évaluer dans quelle mesure une stratégie bas carbone peut s'aligner — ou non — avec les logiques usuelles de conception.

10.3 Analyse contextuelle

Ce chapitre vise à déterminer dans quels contextes le surdimensionnement initial constitue une alternative pertinente au renforcement a posteriori. L'analyse repose sur deux critères principaux : la fréquence de sollicitation observée des éléments dans les scénarios de transformation, et la probabilité qu'une transformation survienne effectivement au cours du cycle de vie du bâtiment.

Certains éléments structurels apparaissent de manière récurrente dans les scénarios étudiés, ce qui les rend plus susceptibles d'être sollicités en cas de transformation. C'est notamment le cas des colonnes, qui émergent comme des candidates prioritaires à un surdimensionnement anticipé.

Les dalles peuvent aussi être concernées, notamment dans des transformations localisées (trémies, ouvertures). Toutefois, leur éligibilité dépend fortement de leur configuration statique. Quant aux poutres, leur implication varie selon la nature et la localisation des transformations, ce qui rend leur surdimensionnement plus difficile à anticiper et nécessite une appréciation au cas par cas.

Ainsi, lorsque des éléments sont fréquemment sollicités dans les transformations, un surdimensionnement anticipé peut devenir plus avantageux sur le cycle de vie. À l'inverse, pour ceux dont la sollicitation reste incertaine, l'intérêt du surdimensionnement dépend fortement du contexte.

Une analyse croisée des scénarios permet d'identifier les éléments structurels les plus fréquemment concernés par des besoins de renforcement, c'est-à-dire ceux qui apparaissent dans au moins deux scénarios sur trois. Ce critère a été utilisé pour sélectionner les éléments étudiés dans le tableau ci-dessous. Il s'avère que, dans ce cas, tous les éléments retenus sont des colonnes. Ce choix se révèle d'autant plus pertinent que, pour ces éléments, l'écart entre le GWP du surdimensionnement anticipé et celui d'un renforcement ultérieur est souvent important. Leur comparaison permet ainsi de mieux cerner les situations dans lesquelles le surdimensionnement peut réellement constituer une alternative plus sobre.

Enfin, pour évaluer la pertinence du surdimensionnement, il est nécessaire de tenir compte de la probabilité qu'un bâtiment subisse une transformation au cours de son cycle de vie. Cette estimation repose sur des données de reconversion de bureaux à Bruxelles, selon deux hypothèses :

- La première, fondée sur la part actuelle des surfaces vacantes identifiées comme convertibles en logements ($\approx 592\,564\text{ m}^2$ sur un total de 12,4 millions), conduit à un taux ponctuel de 4,78%, soit un taux cumulé d'environ 11,5% sur 60 ans.
- La seconde, fondée sur un taux observé de transformation ($\approx 1\,674\,298\text{ m}^2$ sur 25 ans) [39], extrapolé à 60 ans, donne un taux cumulé d'environ 34%.

Le tableau ci-dessous compare, pour chaque colonne retenue :

- le GWP du surdimensionnement anticipé (systématiquement engagé à la construction),
- et le GWP d'un renforcement éventuel, pondéré par la probabilité qu'il survienne effectivement.

TABLEAU 16 – Comparaison GWP : surdimensionnement vs renforcement selon la probabilité de transformation

Éléments structurels	GWP Surdimensionnement [kg CO ₂ eq]	GWP Renforcement [kg CO ₂ eq]	GWP Renforcement selon la probabilité de transformation [11,5% - 34%] [kg CO ₂ eq]
A2 : niveau 0	7,6	109	[12,5 - 37,1]
A3 : niveau 0	18,3	109	[12,5 - 37,1]
A4 : niveau 0	18,3	109	[12,5 - 37,1]
B1 : niveau 0	37,8	109	[12,5 - 37,1]
B4 : niveau 2	66,2	109	[12,5 - 37,1]
B4 : niveau 1	59,1	109	[12,5 - 37,1]
B4 : niveau 0	58,9	119,9	[13,8 - 40,8]

L'analyse du tableau met en évidence que dans un seul cas (A2 niveau 0) le surdimensionnement présente un avantage environnemental. À l'inverse, dans quatre cas (B1 niveau 0 et B4 à tous les niveaux), le renforcement s'avère plus favorable en termes de GWP. Les deux derniers cas (A3 et A4 niveau 0) présentent un écart peu significatif entre les deux stratégies, ne permettant pas de trancher nettement.

Or, les colonnes analysées ici correspondent aux situations où le surdimensionnement pouvait a priori sembler le plus pertinent. Elles sont à la fois les éléments les plus fréquemment sollicités dans les scénarios de transformation, et ceux pour lesquels l'écart de GWP apparaissait initialement le plus favorable au surdimensionnement. Le fait que cette stratégie ne s'avère clairement avantageuse que dans un seul cas souligne ses limites, y compris dans des situations jugées a priori favorables.

11 Conclusion

Dans le contexte de la transition vers une construction plus durable et plus adaptable, ce travail s'est focalisé sur la comparaison de deux stratégies structurelles opposées : le surdimensionnement initial des éléments porteurs versus leur renforcement a posteriori en cas de transformation.

À partir de la modélisation paramétrique d'une structure de bureaux en béton armé, trois scénarios représentatifs de reconversion ont été étudiés. L'analyse environnementale, centrée sur le potentiel de réchauffement global (GWP), a permis de quantifier l'impact carbone de chaque stratégie à performance structurelle équivalente.

Les résultats montrent que le surdimensionnement, bien qu'en apparence avantageux, n'est que rarement la solution la plus sobre sur le plan environnemental. Cette stratégie engage systématiquement un surcoût carbone, même si aucune transformation ne survient. À l'inverse, le renforcement n'est activé que lorsque cela s'avère nécessaire, ce qui permet de limiter l'impact au strict nécessaire.

Nuances et cas particuliers

Dans certains cas spécifiques, notamment pour les colonnes, un surdimensionnement partiel est déjà présent de manière non intentionnelle, par exemple pour satisfaire aux exigences de résistance au feu. Toutefois, il s'agit là d'une contrainte réglementaire, non d'un choix stratégique en faveur du surdimensionnement.

Globalement, même pour les éléments sollicités dans plusieurs scénarios, les simulations ont montré que le renforcement reste, dans la majorité des cas, plus favorable lorsque l'on tient compte de la probabilité réelle de transformation au cours du cycle de vie.

Recommandations générales

Au terme de cette étude, plusieurs recommandations se dégagent pour orienter la conception structurelle dans une logique d'adaptabilité et de sobriété environnementale. Il apparaît notamment essentiel :

- d'anticiper les transformations futures dès la phase de conception,
- d'identifier les éléments les plus susceptibles d'être affectés,
- et d'évaluer la probabilité qu'une transformation se produise.

Sur cette base, il convient de choisir une stratégie de conception adaptée au niveau de risque identifié :

- en distinguant clairement les éléments structurels stratégiques et pérennes — tels que les noyaux techniques, les fondations ou la trame porteuse — des composants susceptibles d'être modifiés au cours du cycle de vie du bâtiment,
- en choisissant les techniques de renforcement selon leur efficacité structurelle et environnementale,
- en évitant le surdimensionnement lorsque l'analyse ne montre pas d'intérêt environnemental clair,
- et en limitant le recours au PRFC aux interventions ponctuelles.

Enfin, il convient de dimensionner les éléments en optimisant le ratio béton/acier, afin de réduire l'empreinte carbone dès la construction. Il est également essentiel de renforcer la collaboration entre architectes et ingénieurs, pour anticiper les transformations possibles tout au long du cycle de vie

du bâtiment.

Limites et perspectives

L'analyse repose sur un ensemble d'hypothèses qui en délimitent la portée. Les trois scénarios étudiés ne couvrent qu'une partie des possibilités de transformation qu'un bâtiment peut rencontrer au cours de son cycle de vie. La structure de référence — un immeuble de bureaux en béton armé — limite également la portée des résultats à ce seul système constructif.

Le traitement des éléments structurels a été mené de manière indépendante, sans modélisation globale des interactions, ni prise en compte du phasage d'exécution ou des contraintes de mise en œuvre. En outre, la probabilité de transformation a été estimée à partir de données spécifiques au contexte bruxellois. Bien qu'elle introduise une dimension temporelle cohérente avec la durée de vie des bâtiments, son applicabilité à d'autres contextes reste limitée.

Ces limites constituent autant de pistes d'approfondissement. Étendre l'analyse à d'autres systèmes constructifs, à des scénarios de transformation plus variés ou à des techniques de renforcement complémentaires permettrait de tester la robustesse des conclusions. L'intégration de critères économiques et opérationnels, ainsi que l'extension de l'étude aux fondations offrirait une vision plus globale des implications liées au choix entre surdimensionnement initial et renforcement a posteriori.

Références

- [1] AGWA. <https://www.agwa.be/>. Consulté le 30 avril 2025.
- [2] ALPHA BETON. *Brochure technique prédalles*. <https://www.alphabeton.eu/fr/>. Consulté le 06 avril 2025.
- [3] ALPHA BETON. *Prédalles documentation technique*. <https://www.alphabeton.eu/fr/>. Consulté le 06 avril 2025.
- [4] Riad BENZAID, Habib MESBAH et Nasr-Eddine CHIKH. *Les matériaux composites « PRF » pour le confinement externe du béton*. Éditions Universitaires Européennes, 2010.
- [5] BRUXELLES ENVIRONNEMENT. *Acoustique d'un plancher porteur massif*. <https://guidebatimentdurable.brussels/acoustique-dun-plancher-porteur-massif#quelles-valeurs-viser-en-pratique-pour-un-plancher-porteur-massif->. Guide Bâtiment Durable, consulté le 17 mai 2025.
- [6] Jean-François CAP. *LGCIV1032 : Structure en béton armé*. Département GCE, École polytechnique de Louvain-la-Neuve (EPL), UCLouvain. 2023.
- [7] Jean-François CAP, Christophe BAYART et Martin STEINMETZ. *LGCIV1032 : Structure en béton armé, syllabus d'exercices*. Département GCE, École polytechnique de Louvain-la-Neuve (EPL), UCLouvain. 2023.
- [8] Danielle CLAUD. *Actions du vent sur les bâtiments selon l'Eurocode 1 – Partie 1-4*. Techniques de l'Ingénieur, Réf. C3306 V1, publié le 10 mai 2014. 2014.
- [9] Elma DURMISEVIC. *Design Support for revisable buildings with focus on visualizing and simulating transformation capacity during initial design phase*. https://www.academia.edu/105519855/Design_Support_for_revisable_buildings_with_focus_on_visualizing_and_simulating_transformation_capacity_during_initial_design_phase. Consulté le 18 février 2025. 2017.
- [10] Elma DURMISEVIC. *Dynamic and Circular Buildings by High Transformation and Reuse Capacity*. https://www.academia.edu/108958274/Dynamic_and_Circular_Buildings_by_High_Transformation_and_Reuse_Capacity. Consulté le 18 février 2025. 2016.
- [11] Elma DURMISEVIC. *Reversible Building Design*. <https://www.bamb2020.eu/wp-content/uploads/2018/12/Reversible-Building-Design-guidelines-and-protocol.pdf>. Consulté le 01 mars 2025. 2018.
- [12] Elma DURMISEVIC. *Transformable building structures : design for disassembly as a way to introduce sustainable engineering to building design and construction*. https://www.academia.edu/105519858/Transformable_building_structures_design_for_disassembly_as_a_way_to_introduce_sustainable_engineering_to_building_design_and_construction. Consulté le 11 février 2025. 2006.
- [13] *EN 1991-1-4 Eurocode 1 : Actions sur les structures – Partie 1-4 : Actions du vent*. Disponible via NBN. Comité Européen de Normalisation (CEN). 2005.
- [14] *EN 1992-1-1 Eurocode 2 : Calcul des structures en béton – Partie 1-1 : Règles générales et règles pour les bâtiments*. Disponible via NBN. Comité Européen de Normalisation (CEN). 2005.
- [15] *EN 1992-1-1 Eurocode 2 : Calcul des structures en béton – Partie 1-1, Annexe J : Renforcement des structures existantes en béton au moyen de matériaux composites collés*. pp. 345–350. Disponible via NBN. Comité Européen de Normalisation (CEN). 2005.

-
- [16] EN 1992-1-2 Eurocode 2 : Calcul des structures en béton – Partie 1-2 : Règles générales – Calcul du comportement au feu. NBN EN 1992-1-2 :2023 (F). Références utilisées : Tableaux 6.1 et 6.10. Disponible via NBN. Comité Européen de Normalisation (CEN). 2023.
- [17] ERGON. *Guide technique – Section 2 : Eléments de plancher et de toiture*. <https://www.ergon.be/fr/produits/dalles-en-beton-pour-plancher-et-toiture/>. Consulté le 27 mai 2025.
- [18] Demi FANG et al. « Reducing embodied carbon in structural systems : A review of early-stage design strategies ». Dans : *Journal of Building Engineering* 76 (oct. 2023), p. 107054. DOI : 10.1016/j.jobe.2023.107054. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352710223012330>.
- [19] FEBE – FEBELCEM. *Construire en béton préfabriqué*. <https://www.febelcem.be/fr/accueil/>. Consulté le 06 avril 2025. 2003.
- [20] Juliana FELKNER. *Multi-objective design balancing structural, environmental, and architectural considerations*. https://www.academia.edu/77575731/Multi_objective_design_balancing_structural_environmental_and_architectural_considerations. Consulté le 11 février 2025. 2016.
- [21] Benoît GEERTS. *Plans et schémas techniques réalisés dans le cadre du mémoire de fin d'études*. Travail personnel, Département GCE, École polytechnique de Louvain (EPL), UCLouvain. 2025.
- [22] Benoît GEERTS. *Scripts Grasshopper – TFE_Dimensionnement : Scénarios 0, 1, 2, 3*. Scripts personnels utilisés dans le cadre du travail de fin d'études, Département GCE, École polytechnique de Louvain (EPL), UCLouvain. 2025.
- [23] Benoît GEERTS. *Scripts Python 5.3 et 5.4 : GWP résine — renforcement par tissus et lamelles PRFC*. Scripts personnels, Département GCE, École polytechnique de Louvain (EPL), UCLouvain. 2025.
- [24] Danielle Khoury GREGORIO et Robert Schmidt III. *Designing for the Future : The Role of Adaptability in Architecture*. <https://www.khouryarquitectura.com/en/designingforthefuture>. Consulté le 19 février 2025.
- [25] B. INGELAERE. *Méthodes de construction pour améliorer l'isolation acoustique entre appartements*. https://www.cstc.be/preview/documents/Fiches_contact/Contact26.pdf. CSTC-Contact n°26, Centre Scientifique et Technique de la Construction (CSTC), consulté le 17 mai 2025.
- [26] Pierre LATTEUR. *LG CIV2014 : Building technology*. Notes de cours personnelles, Département GCE, École polytechnique de Louvain-la-Neuve (EPL), UCLouvain. 2024.
- [27] Paul W LONG. *Architectural Design for Adaptability and Disassembly*. https://www.academia.edu/35804830/Architectural_Design_for_Adaptability_and_Disassembly. Consulté le 18 février 2025. 2014.
- [28] MAPEI. *CarboPlate - Fiche EPD (Déclaration Environnementale de Produit)*. <https://api.environded.com/api/v1/EPDLibrary/Files/3cd61681-ad8e-48da-be15-08dd33d46473/Data>. Consulté le 30 juin 2025. 2025.
- [29] MAPEI. *CarboPlate - Fiche technique, lamelles en fibre de carbone pour le renforcement structural*. https://cdnmedia.mapei.com/docs/librariesprovider16/products-documents/1_01001_carboplate_fr-be_4fe28082ed6b44daa9e795b6c8ebbf7a.pdf?sfvrsn=d325c3f3_0. Consulté le 30 juin 2025. 2025.

-
- [30] MAPEI. *MapeWrap 11 - Fiche EPD (Déclaration Environnementale de Produit)*. https://cdnmedia.mapei.com/docs/librariesprovider2/products-documents/7_mapewrap-11_2e8546a4c2474f17971123016ca9f80e.pdf?sfvrsn=aec8e7f6_0. Consulté le 30 juin 2025. 2025.
 - [31] MAPEI. *MapeWrap 11 - Fiche technique, époxy d'imprégnation pour systèmes de renforcement en fibre de carbone*. https://cdnmedia.mapei.com/docs/librariesprovider2/products-documents/1_01006_mapewrap-11_en_4bf8a5342b2c4fd0aebf40d248f42d35.pdf?sfvrsn=5aed0164_0. Consulté le 30 juin 2025. 2025.
 - [32] MAPEI. *MapeWrap 21 - Fiche EPD (Déclaration Environnementale de Produit)*. https://cdnmedia.mapei.com/docs/librariesprovider2/products-documents/7_mapewrap-21_c1e0bd5b53b042a7abc86f610a06b3d9.pdf?sfvrsn=7ecdb1e8_0. Consulté le 30 juin 2025. 2025.
 - [33] MAPEI. *MapeWrap 21 - Fiche technique, époxy pour systèmes de renforcement structurel*. https://cdnmedia.mapei.com/docs/librariesprovider2/products-documents/1_01007_mapewrap-21_en_225a527bea3b41ad947fd686999b7028.pdf?sfvrsn=bfdea751_0. Consulté le 30 juin 2025. 2025.
 - [34] MAPEI. *MapeWrap C UNI-AX - Fiche technique, tissus unidirectionnels en fibre de carbone pour le renforcement structurel*. https://cdnmedia.mapei.com/docs/librariesprovider16/products-documents/1_01002_mapewrap-c-uni-ax_fr-be_f7713ba527494198935ea0598e16c625.pdf?sfvrsn=78f2f8c1_0. Consulté le 30 juin 2025. 2025.
 - [35] Michel MONHONVAL. *LE VENT selon EN 1991-1-4 et ANB*. Département GCE, École polytechnique de Louvain-la-Neuve (EPL), UCLouvain. 2024.
 - [36] PERSPECTIVE.BRUSSELS. *ABOUT.brussels n°08, La conversion des bureaux à l'appui du projet de ville régional*. 2024.
 - [37] PERSPECTIVE.BRUSSELS. *OBSERVATOIRE DES BUREAUX n°39, État des lieux 2018, 2019 et 2020*. 2021.
 - [38] PERSPECTIVE.BRUSSELS. *OBSERVATOIRE DES BUREAUX n°40, État des lieux 2021 et 2022*. 2024.
 - [39] PERSPECTIVE.BRUSSELS. *TASK FORCE, La conversion des bureaux à l'appui du projet de ville bruxellois*. 2022.
 - [40] Mohamed Kamel RAHLA. *Implementing Circular Economy Strategies in Buildings—From Theory to Practice*. https://www.academia.edu/84741912/Implementing_Circular_Economy_Strategies_in_Buildings_From_Theory_to_Practice. Consulté le 18 février 2025. 2021.
 - [41] SERVICE PUBLIC DE WALLONIE. *Code du Développement Territorial (CoDT)*. [https://wallex.wallonie.be/files/medias/10/codt\(1\).pdf](https://wallex.wallonie.be/files/medias/10/codt(1).pdf). Consulté le 03 août 2025. 2025.
 - [42] SIKA BELGIUM. *Sika Belgium - Produits pour la construction et l'industrie*. Consulté le 28 juin 2025. 2025. URL : <https://bel.sika.com/fr/home.html>.
 - [43] Niels De TEMMERMAN. *Multiple design approaches to transformable building : construction typologies*. https://www.academia.edu/86364019/Multiple_design_approaches_to_transformable_building_construction_typologies. Consulté le 12 février 2025. 2014.
 - [44] Niels De TEMMERMAN. *Transformability of conventional and dynamic load bearing building nodes*. https://www.academia.edu/114247491/Transformability_of_conventional_and_dynamic_load_bearing_building_nodes. Consulté le 12 février 2025. 2013.

- [45] UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. *Global Status Report for Buildings and Construction : Beyond foundations : Mainstreaming sustainable solutions to cut emissions from the buildings sector*. <https://doi.org/10.59117/20.500.11822/45095>. ISBN : 978-92-807-4131-5. 2024.
- [46] Benoit VANDENBULCKE. *From AgwA to Oversize : From design practice to a pedagogic and research project*. https://www.academia.edu/108198629/From_AgwA_to_Oversize_From_design_practice_to_a_pedagogic_and_research_project. Consulté le 19 février 2025. 2019.

Annexes

A Méthodes de calcul

Cette annexe présente les méthodes de calcul mises en œuvre pour dimensionner les différents éléments structuraux étudiés. Ces méthodes, traduites en scripts Python intégrés en Grasshopper, permettent d'automatiser l'ensemble des vérifications nécessaires au projet.

A.1 Dimensionnement des armatures en flexion d'une section rectangulaire

Références [6, 7, 14]

1. Entrées :

- Hauteur totale de la section : h
- Largeur de la section : b
- Enrobage : e
- Moment fléchissant ultime : M_{Ed}
- Résistance caractéristique du béton : f_{ck}
- Résistance caractéristique de l'acier : f_{yk}
- Critère de rotation plastique : $x/d \leq 0,45$

2. Paramètres initiaux :

- $f_{cd} = \alpha_{cc} \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c}$ avec $\alpha_{cc} = 0,85$, $\gamma_c = 1,5$
- $f_{ctm} = 0,3 \cdot f_{ck}^{2/3}$
- $f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s}$ avec $f_{yk} = 500$ MPa, $\gamma_s = 1,15$
- $d = h - e$
- $z = 0,9 \cdot d$

3. Itérations pour ajuster z :

$$F_c = \frac{M_{Ed}}{z}$$

$$h_c = \frac{F_c}{b \cdot f_{cd}}$$

$$z_{new} = d - \frac{h_c}{2}$$

avec :

$$— h_c = \lambda x \quad \text{et } \lambda = 0,8$$

4. Calcul des armatures :

$$A_s = \frac{M_{Ed}}{z \cdot f_{yd}}$$

5. Vérification des hypothèses :

Les hypothèses suivantes doivent être vérifiées pour garantir la validité de la méthode "Stress-block" et assurer la ductilité de la section.

- **Hypothèse 1 : Critère de rotation plastique**

$$x = \frac{h_c}{0,8} \Rightarrow \text{Si } \frac{x}{d} \leq 0,45 \Rightarrow \text{OK}$$

- **Hypothèse 2 : Plastification du béton et de l'acier :**

Deux cas sont possibles :

1. Le béton atteint la rupture avant l'acier, il faut vérifier que l'acier a plastifié :

$$0,35\% \leq \varepsilon_c \quad \text{et} \quad 0,217\% \leq \varepsilon_s \leq 4\% \Rightarrow \text{OK}$$

avec :

$$\varepsilon_s = \varepsilon_c \cdot \frac{d - x}{x}$$

2. L'acier atteint la rupture avant le béton, il faut vérifier que le béton a plastifié :

$$4\% \leq \varepsilon_s \quad \text{et} \quad 0,2\% \leq \varepsilon_c \leq 0,35\% \Rightarrow \text{OK}$$

avec :

$$\varepsilon_c = \varepsilon_s \cdot \frac{x}{d - x}$$

Si $\varepsilon_c < 0,2\%$, alors le béton n'a pas plastifié. Il faut utiliser la méthode du moment réduit :

$$\mu_{Rd} = \frac{M_{Ed}}{b \cdot d^2 \cdot f_{cd}}$$

$$A_s = \omega \cdot b \cdot d \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}}$$

6. Détermination de la hauteur minimale $h_{\min}$:

$$(x/d)_{lim} \Rightarrow \mu_{Rd,lim} \Rightarrow d_{min} = \sqrt{\frac{M_{Ed}}{\mu_{Rd,lim} \cdot b \cdot f_{cd}}} \Rightarrow h_{min} = d_{min} + e$$

7. Dispositions constructives pour les armatures :

- Aire minimale d'armatures :

$$A_{s,min} = \frac{0,2 \cdot k_h \cdot f_{ctm} \cdot b \cdot h}{f_{yk}}$$

avec :

- $k_h = 0,8 - 0,6 \cdot (\min(b, h) - 0,3)$ et $0,5 \leq k_h \leq 0,8$
- Aire maximale : $A_{s,max} = 4\% \cdot A_c$

8. Sorties :

- Aire d'armatures requise : A_s
- Taux d'armatures : $\rho = \frac{A_s}{b \cdot d} \cdot 100$
- Vérification des hypothèses : plastification et rotation plastique (OK / NOK)
- Hauteur minimale requise : h_{min}

A.2 Vérification de l'effort tranchant dans une section rectangulaire

Références [6, 7, 14]

1. Entrées :

- Hauteur de la section : h
- Largeur de la section : b
- Enrobage : e
- Résistance caractéristique du béton : f_{ck}
- Effort tranchant : V_{Ed}
- Aire des armatures longitudinales : $A_{s,long}$

2. Paramètres initiaux :

- $f_{cd} = \alpha_{cc} \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c}$ avec $\alpha_{cc} = 0,85$, $\gamma_c = 1,5$
- $f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s}$ avec $f_{yk} = 500$ MPa, $\gamma_s = 1,15$
- $k = \min \left(1 + \sqrt{\frac{200}{d [\text{mm}]}} , 2 \right)$
- $\rho_{long} = \min \left(\frac{A_{s,long}}{b \cdot d} , 0,02 \right)$
- $d = h - e$
- $z = 0,9 \cdot d$

3. Résistance réduite du béton νf_{cd} :

$$\nu f_{cd} = \frac{\nu \cdot f_{cd}}{\alpha_{cc}}$$

avec :

$$\nu = 0,6 \cdot \left(1 - \frac{f_{ck}}{250} \right)$$

4. Effort tranchant résistant sans armatures $V_{Rd,c}$:

$$V_{Rd,c} = \left(\max \left(C_{Rdc} \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_{long} \cdot f_{ck})^{1/3} , v_{\min} \right) + 0,15 \cdot \sigma_{cp} \right) \cdot b \cdot d$$

avec :

$$C_{Rd,c} = \frac{0,18}{\gamma_c}$$

- $\sigma_{cp} = 0$ pour des poutres non comprimées axialement
- $v_{\min} = 0,035 \cdot k^{3/2} \cdot \sqrt{f_{ck}}$

• **Vérification pour les dalles**

Pour les dalles, on ne prévoit généralement pas d'étriers. On vérifiera donc uniquement que :

$$V_{Ed} \leq V_{Rd,c}$$

Si cette condition n'est pas respectée, il convient de :

- augmenter l'épaisseur de la dalle,
- augmenter la quantité d'armatures longitudinales,
- utiliser un béton de plus haute résistance,
- ou envisager une précontrainte,

afin d'éviter de devoir placer des armatures transversales difficilement réalisables sur de grandes largeurs.

5. Vérification de la résistance des bielles comprimées $V_{Rd,max}$:

1. Hypothèse initiale : $\cot \theta = 2$ et $\cot \alpha = 0$ (étriers verticaux)

$$V_{Rd,max} = \frac{\nu f_{cd} \cdot (\cot \theta + \cot \alpha) \cdot b \cdot z}{1 + \cot^2 \theta}$$

Si $V_{Ed} < V_{Rd,max}$: OK

2. Sinon on recalcule avec un $\cot \theta = [1, 2]$:

$$\cot \theta = \min \left(\max(\xi + \sqrt{\xi^2 - 1}, 1), 2 \right)$$

avec :

$$\xi = \frac{z \cdot b \cdot \nu f_{cd}}{2 \cdot V_{Ed}}$$

Si $V_{Ed} < V_{Rd,max}$: OK

3. Sinon il faut modifier la section de béton ou utiliser des étriers inclinés ($\alpha \neq 90^\circ$).

6. Armatures d'effort tranchant (étriers) :

- Valeur minimale :

$$A_{s,etr,min} = 0,08 \cdot \sqrt{f_{ck}} \cdot \frac{b}{f_{yk}}$$

- Valeur requise :

$$A_{s,etr} = \max \left(\frac{V_{Ed}}{z \cdot f_{yd} \cdot \cot \theta}, A_{s,etr,min} \right)$$

7. Sorties :

- Aire d'armatures requise : $A_{s,etr,min}$
- Nombre d'étriers par mètre : $n_{etr,unitaire}$
- Nombre d'étriers : n_{etr}
- Volume total d'étriers : $V_{s,etr}$

A.3 Vérification de la flèche et de la fissuration d'une poutre en flexion

Références [6, 7, 14]

1. Entrées :

- Longueur de la poutre : l
- Largeur et hauteur de section : b, h
- Enrobage : e
- Diamètre des armatures tendues : ϕ_s
- Armatures tendues et comprimées : A_s, A'_s
- Distance aux armatures comprimées : d'
- Résistance caractéristique du béton : f_{ck}
- Moment fléchissant ultime : M
- Nombre de travées : n (1 ou 3)
- Critère de flèche admissible : $l/\text{critère}_{max}$
- Ouverture limite des fissures : $w_{k,limite}$ (par défaut : 0,3 mm)

2. Paramètres initiaux :

- $d = h - e$
- $f_{cd} = \alpha_{cc} \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c}$ avec $\alpha_{cc} = 0,85, \gamma_c = 1,5$
- $f_{cm} = f_{ck} + 8 \text{ MPa}$
- $f_{ctm} = 0,3 \cdot f_{ck}^{2/3}$
- $E_{cm} = 22 \cdot k_{gr} \cdot \left(\frac{f_{cm}}{10} \right)^{0.3}$ avec $k_{gr} = 1$
- $E_{c,eff} = \frac{E_{cm}}{1 + \phi_{eff}}$ avec $\phi_{eff} = 2$
- $\alpha_e = \frac{E_s}{E_{c,eff}}$ avec $E_s = 200 \text{ GPa}$

3. Caractéristiques de la section non fissurée ($y_{G,I}, I_I$) :

Le niveau du centre de gravité par rapport à la fibre supérieure de la section non-fissurée $y_{G,I}$ vaut :

$$y_{G,I} = x = \frac{b \cdot h^2/2 + \alpha_e \cdot A_s \cdot d + \alpha_e \cdot A'_s \cdot d'}{b \cdot h + \alpha_e \cdot A_s + \alpha_e \cdot A'_s}$$

L'inertie de la section non-fissurée I_I vaut :

$$I_I = \frac{b \cdot h^3}{12} + b \cdot h \left(\frac{h}{2} - y_{G,I} \right)^2 + \alpha_e \cdot A_s \cdot (y_{G,I} - d)^2 + \alpha_e \cdot A'_s \cdot (y_{G,I} - d')^2$$

4. Caractéristiques de la section fissurée ($y_{G,II}$, I_{II}) :

Le niveau du centre de gravité de la section fissurée qui est également le niveau de l'axe neutre est obtenu au moyen de l'expression suivante après quelques itérations :

$$y_{G,II} = x = \frac{b \cdot x^2/2 + \alpha_e \cdot A_s \cdot d + \alpha_e \cdot A'_s \cdot d'}{b \cdot x + \alpha_e \cdot A_s + \alpha_e \cdot A'_s}$$

L'inertie de la section fissurée I_{II} vaut :

$$I_{II} = \frac{b \cdot x^3}{12} + b \cdot x \left(\frac{h}{2} - y_{G,II} \right)^2 + \alpha_e \cdot A_s \cdot (y_{G,II} - d)^2 + \alpha_e \cdot A'_s \cdot (y_{G,II} - d')^2$$

5. Calcul de la flèche de manière explicite :

La flèche peut être obtenue au moyen de l'expression :

$$f = k \cdot l^2 \cdot (1/r)$$

avec :

- Le coefficient k selon le nombre de travées :

$$k = \begin{cases} \frac{5}{48}, & \text{si } n = 1 \\ \frac{8}{185}, & \text{si } n = 3 \end{cases}$$

- La courbure finale :

$$(1/r) = \zeta \cdot (1/r)_{II} + (1 - \zeta) \cdot (1/r)_I$$

avec :

1. Le coefficient ζ qui permet de tenir compte de la participation du béton tendu dans l'élément :

$$\zeta = \begin{cases} 0 & \text{si } M \leq M_{cr} \\ 1 - \beta \left(\frac{M_{cr}}{M} \right)^2 & \text{sinon (borné entre 0 et 1)} \end{cases}$$

— $\beta = 0,5$ pour un chargement prolongé ou un grand nombre de cycles de chargement

— Le moment de fissuration M_{cr} :

$$M_{cr} = f_{ctm} \cdot \frac{I_I}{h - y_{G,I}}$$

2. La courbure dans le cas fissuré et non-fissuré :

$$(1/r)_I = \frac{M}{I_I \cdot E_{c,eff}}$$

$$(1/r)_{II} = \frac{M}{I_{II} \cdot E_{c,eff}}$$

6. Contrôle de la fissuration

L'ouverture des fissures est calculée au moyen de l'expression suivante :

$$w_k = s_{r,max} \cdot (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm})$$

avec :

- La déformation moyenne après fissuration :

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} = \max \left[\frac{\sigma_s}{E_s} - k_t \cdot \frac{f_{ct,eff}}{E_s \cdot \rho_{s,eff}} \cdot (1 + \alpha_e \cdot \rho_{s,eff}), \quad 0,6 \cdot \frac{\sigma_s}{E_s} \right]$$

avec :

- la contrainte dans l'armature tendue : $\sigma_s = \alpha_e \cdot \frac{M}{I_{II}} \cdot (d - x)$
- $k_t = 0,4$ pour des charges à long terme

- L'espacement maximal des fissures :

$$s_{r,max} = 3,4 \cdot c + 0,425 \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot \frac{\phi}{\rho_{p,eff}}$$

avec :

- $k_1 = 0,8$ pour des barres à haute adhérence
- $k_2 = 0,5$ en flexion simple

7. Vérifications finales :

- Flèche : $f \leq f_{max} = \frac{l}{\text{critère}_{max}}$
- Fissuration : $w_k \leq w_{k,limite}$

8. Sorties :

- Flèche calculée f et flèche admissible f_{max}
- Vérification flèche : OK / NOK
- Ouverture de fissures : w_k
- Vérification fissuration : OK / NOK

A.4 Dimensionnement de la section d'une colonne carrée comprimée

Références [6, 7, 14]

En pratique, seuls les éléments suffisamment élancés ET soumis à des efforts de compression élevés doivent être dimensionnés en tenant compte des effets du second ordre [6].

1. Entrées :

- Effort normal : N_{Ed}
- Résistance caractéristique du béton : f_{ck}
- Coefficient de flambement : k
- Longueur réelle de la colonne : l

2. Paramètres initiaux :

- $f_{cd} = \alpha_{cc} \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c}$ avec $\alpha_{cc} = 0,85$, $\gamma_c = 1,5$
- $f_{cm} = f_{ck} + 8 \text{ MPa}$
- $E_{cm} = 22 \cdot k_{gr} \cdot \left(\frac{f_{cm}}{10}\right)^{0.3}$ avec $k_{gr} = 1$

3. Évaluation de la section initiale :

- Longueur de flambement : $l_{fl} = k \cdot l$
- Section de base : $A = \frac{N_{Ed}}{f_{cd}}$

4. Vérification de l'élancement

- Élancement : $\lambda_A = l_{fl} \cdot \sqrt{\frac{A}{I}}$
- Effort normal réduit : $n = \frac{N_{Ed}}{A \cdot f_{cd}}$
- Élancement limite : $\lambda_{lim} = \frac{20 \cdot A \cdot B \cdot C}{\sqrt{n}}$ avec : $A = 0,7$ $B = 1,1$ $C = 0,7$

Si $\lambda_A < \lambda_{lim}$: les effets du second ordre peuvent être négligés et la section initiale est conservée.
Sinon, il est nécessaire de vérifier les effets du second ordre.

5. Vérification des effets du second ordre :

- Calcul de la charge critique d'Euler :

$$N_{crit} = \frac{\pi^2 \cdot E_{cm} \cdot I}{\gamma_c \cdot l_{fl}^2}$$

Si $N_{Ed} < N_{crit}$: les effets du second ordre peuvent être négligés et la section initiale est conservée.

Sinon : itérations sur A jusqu'à ce que $N_{Ed} < N_{crit}$

6. Vérification de l'élancement maximal :

Lorsque $\lambda_A \cdot \sqrt{n}$ est supérieur à 20, les effets du second ordre deviennent significatifs. Au-delà de 70, la colonne est considérée comme excessivement élancée [6]. Dans ce cas, la section doit être redimensionnée.

- Si $\lambda_A \cdot \sqrt{n} < 70$: la dernière section calculée est conservée.
- Sinon :

$$A = \left(\frac{l_{fl}}{70} \right) \cdot \sqrt{\frac{12 \cdot N_{Ed}}{f_{cd}}}$$

7. Sorties :

- Aire de la section carrée : A
- Côté de la section carrée : c

A.5 Dimensionnement des armatures d'une colonne carrée comprimée

Références [6, 7, 14]

1. Entrées :

- Côté de la section carrée : c
- Longueur de la colonne : l
- Coefficient de flambement : k
- Enrobage : e
- Effort normal : N_{Ed}
- Effort normal quasi-permanent : $N_{qp} = G_k + \varphi_2 \cdot Q_k$
- Excentricité réelle de la charge verticale : e_0
- Résistance caractéristique du béton : f_{ck}
- Coefficient de fluage à long terme : $\varphi(\infty, t_0)$

2. Paramètres initiaux :

- $l_{fl} = k \cdot l$
- $f_{cd} = \alpha_{cc} \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c}$ avec $\alpha_{cc} = 0,85$, $\gamma_c = 1,5$
- $f_{cm} = f_{ck} + 8$ MPa
- $E_{cm} = 22 \cdot k_{gr} \cdot \left(\frac{f_{cm}}{10} \right)^{0.3}$ avec $k_{gr} = 1$
- $\lambda_A = l_{fl} \cdot \sqrt{\frac{A}{I}}$

3. L'excentricité due aux imperfections géométriques e_i :

$$e_i = \theta_i \cdot \frac{l_{fl}}{2}$$

avec :

- $\theta_i = \alpha_h \cdot 1/200$
- $\alpha_h = 2/\sqrt{l}$

4. L'excentricité du second ordre e_2 :

$$e_2 = \frac{1}{r} \cdot \frac{l_{fl}^2}{c}$$

avec :

- Le coefficient dépendant de la distribution de la courbure : $c = \pi^2$
- La courbure estimée : $\frac{1}{r} = K_r \cdot K_\varphi \cdot \frac{1}{r_0}$

- La courbure correspondante à un effort normal pour M_{Rd} maximum : $\frac{1}{r_0} = \frac{2 \cdot \varepsilon_{yd}}{0,9 \cdot d}$
- $K_r = 1$ si A_s inconnu
- $K_\varphi = 1 + \beta \cdot \varphi_{eff}$
 - $\beta = 0,35 + \frac{f_{ck}}{200} - \frac{\lambda_A}{150}$
 - $\varphi_{eff} = \frac{M_{0,qp}}{M_{0,Ed}} \cdot \varphi(\infty, t_0)$
 - $M_{0,qp} = N_{0,qp} \cdot e_i$
 - $M_{Ed} = N_{Ed} \cdot e_i$

5. L'excentricité totale e_{tot} :

$$e_{tot} = e_0 + e_i + e_2$$

et

$$M_{Ed} = N_{Ed} \cdot e_{tot}$$

Pour que la colonne résiste au flambement, elle devra pouvoir reprendre le couple (N_{Ed}, M_{Ed})

6. Calcul des armatures $A_{s,tot}$:

Il est possible de déterminer le ferrailage nécessaire en utilisant le diagramme d'interactions adimensionnels ci-dessous [figure 32].

— Coefficients adimensionnés :

$$\nu_{Rd} = \frac{N_{Ed}}{b \cdot h \cdot f_{cd}}, \quad \mu_{Rd} = \frac{M_{Ed}}{b \cdot h^2 \cdot f_{cd}}$$

— Recherche de ω via interpolation dans les courbes interactionnelles

— Aire d'armatures :

$$A_{s,1} = A_{s,2} = \omega \cdot b \cdot h \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}}$$

$$A_{s,tot} = A_{s,1} + A_{s,2}$$

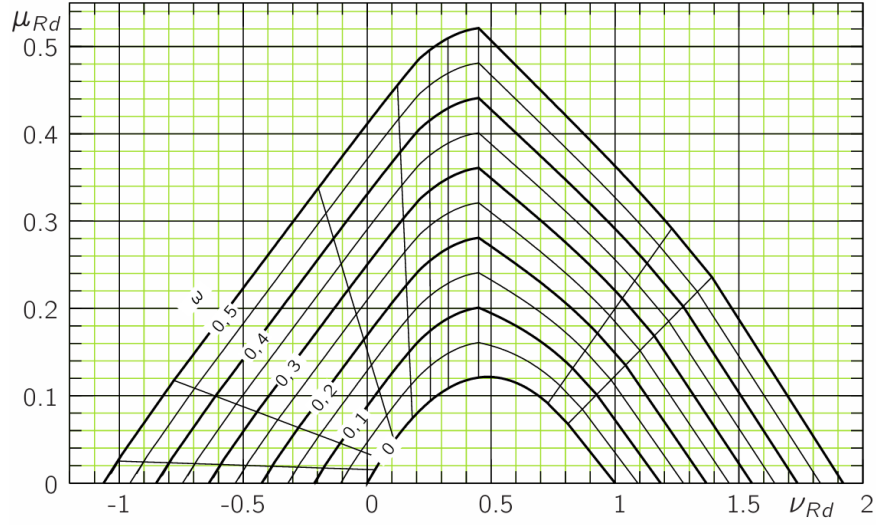


FIGURE 32 – Diagramme d'interactions adimensionnel, section rectangulaire symétrique, armature double, C12 - C50 [6]

7. Dispositions constructives pour les armatures longitudinales :

$$\begin{aligned}
 \text{— Minimum} &= \begin{cases} \varnothing \geq \varnothing_{12} \\ A_s \geq 0,10 \cdot \frac{N_{Ed}}{f_{yd}} \\ A_s \geq 0,2\% \cdot A_c \end{cases} \\
 \text{— Maximum} &= A_s \leq 4\% \cdot A_c
 \end{aligned}$$

8. Dispositions constructives pour les étriers :

$$\begin{aligned}
 \text{— Diamètre} &= \begin{cases} \geq \varnothing 5 & \text{pour des barres de treillis} \\ \geq \varnothing 6 & \text{si } 12 \leq \varnothing_{long} \leq 20 \\ \geq \varnothing 8 & \text{si } 25 \leq \varnothing_{long} \leq 32 \\ \geq \varnothing 10 & \text{si } \varnothing_{long} = 40 \text{ mm} \\ \geq \varnothing 12 & \text{si } \varnothing_{long} = 50 \text{ mm} \\ \geq \varnothing_{long}/4 \end{cases} \\
 \text{— Espacement} &= \begin{cases} \leq 15 \cdot \varnothing_{long} \\ \leq \text{la plus petite dimension} \\ \leq 300 \text{ mm} \end{cases}
 \end{aligned}$$

9. Sorties :

- Aire minimale des armatures : $A_{s,tot}$
- Diamètre et nombre de barres : $\varnothing, n_{barres}$
- Aire et volume total des barres : $A_{s,barres}$
- Diamètre et nombre d'étriers : $\varnothing_{etr}, n_{etr}$
- Espacement maximum des étriers : s_{max}
- Volume total des étriers : V_{etr}

A.6 Calcul de l'action du vent

Références [8, 13, 35]

1. Entrées principales :

- Catégorie de terrain : I à IV
- Vitesse de base du vent : $v_{b,0}$
- Période de retour : T
- Hauteur de la structure : h
- Longueur de la paroi face au vent : b
- Longueur de la paroi parallèle au vent : d
- Surface des parois : lisse, rugueuse ou très rugueuse
- Coefficient de direction : c_{dir}
- Coefficient de saison : c_{season}
- Coefficient structural : $c_s c_d$

2. Vitesse de référence v_b :

La vitesse de référence tient compte de la direction, de la saison, et du niveau de sécurité associé à la période de retour T .

$$v_b = c_{dir} \cdot c_{season} \cdot c_{prob} \cdot v_{b,0}$$

avec :

- Coefficient de probabilité : $c_{prob} = \left(\frac{1-K \cdot \ln(-\ln(1-p))}{1-K \cdot \ln(-\ln(0.98))} \right)^n$
- Probabilité d'occurrence : $p = \frac{1}{T}$
- $K = 0,2$ et $n = 0,5$ (valeurs recommandées en Belgique)

3. Vitesse moyenne v_m :

Elle est calculée à partir de la vitesse de référence en tenant compte de l'orographie locale et de la rugosité du terrain.

$$v_m = c_0 \cdot c_r \cdot v_b$$

avec :

- Coefficient d'orographie : $c_0 = 1$ (pente $< 3^\circ$)
- Coefficient de rugosité : $c_r = k_r \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)$
- Coefficient de terrain : k_r (selon la catégorie de terrain)
- Hauteur nulle théorique du vent : z_0 (selon la catégorie du terrain)

4. Lien entre pression dynamique de pointe et pression dynamique de base : $q_p = c_e \cdot q_b$:

On distingue la pression dynamique de base q_b , liée à v_b , et la pression dynamique de pointe q_p , affectée par la turbulence.

$$q_b = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_b^2$$

avec :

— Densité de l'air : $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$

$$q_p = (1 + 7I_v) \cdot \frac{1}{2} \rho \cdot v_m^2$$

avec :

— Intensité de turbulence : $I_v = \frac{k_i}{c_0 \ln(z/z_0)}$

— Coefficient de turbulence : $k_i = c_0 (1 - 2 \cdot 10^{-4} (\log_{10}(z_0) + 3)^6)$

et :

— Coefficient d'exposition : $c_e = \left(1 + \frac{7k_i \cdot k_r}{c_0 \cdot c_r}\right) \cdot c_0^2 \cdot c_r^2$

5. Hauteur de référence z_e :

Elle dépend de la hauteur h de la structure et de la dimension b face au vent.

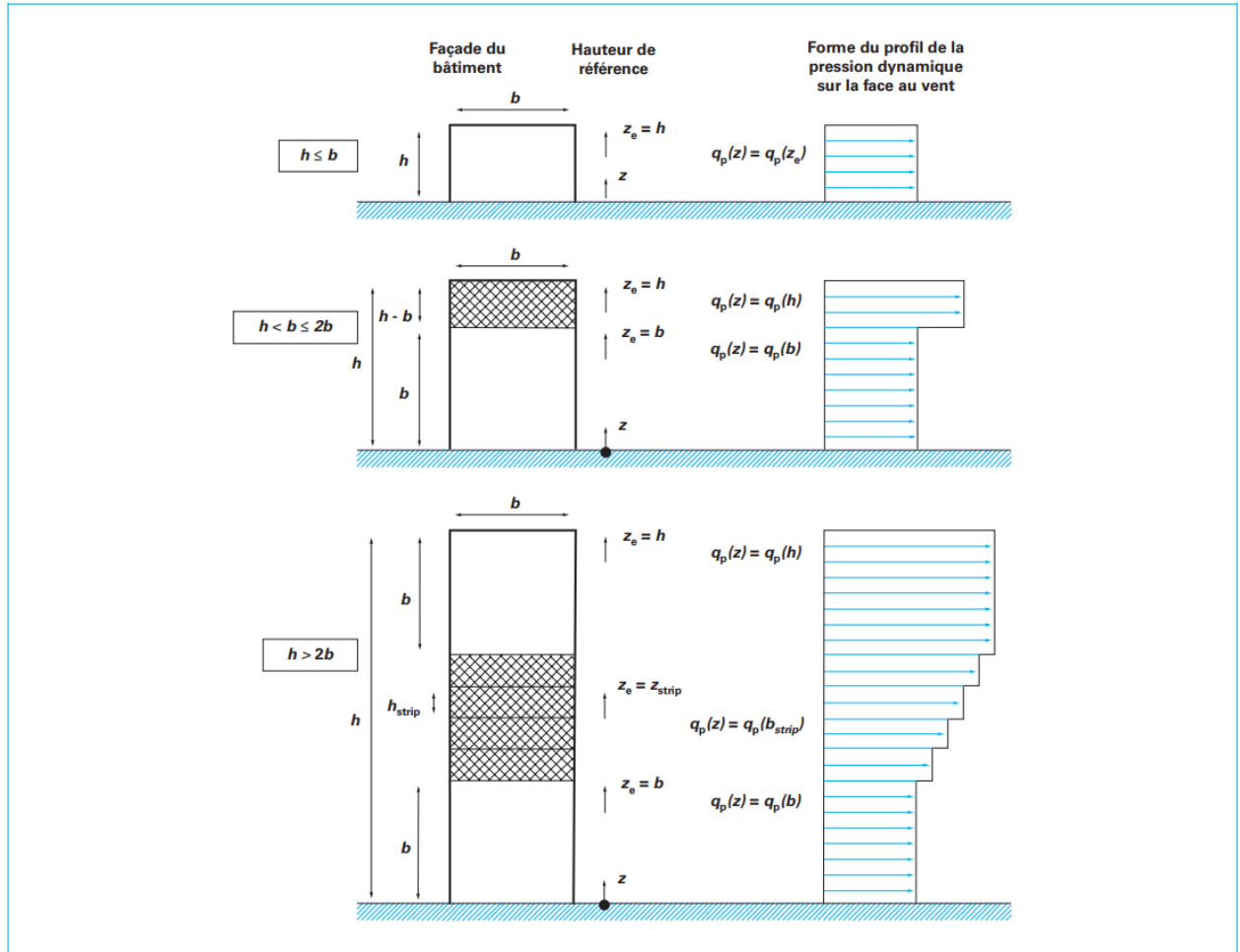


FIGURE 33 – Hauteur de référence z_e dépendant de h et de b [8]

6. Coefficient de pression c_{pe} et aires de référence des murs verticaux A, B, C, D, E :

Ces valeurs dépendent des proportions du bâtiment et de sa géométrie.

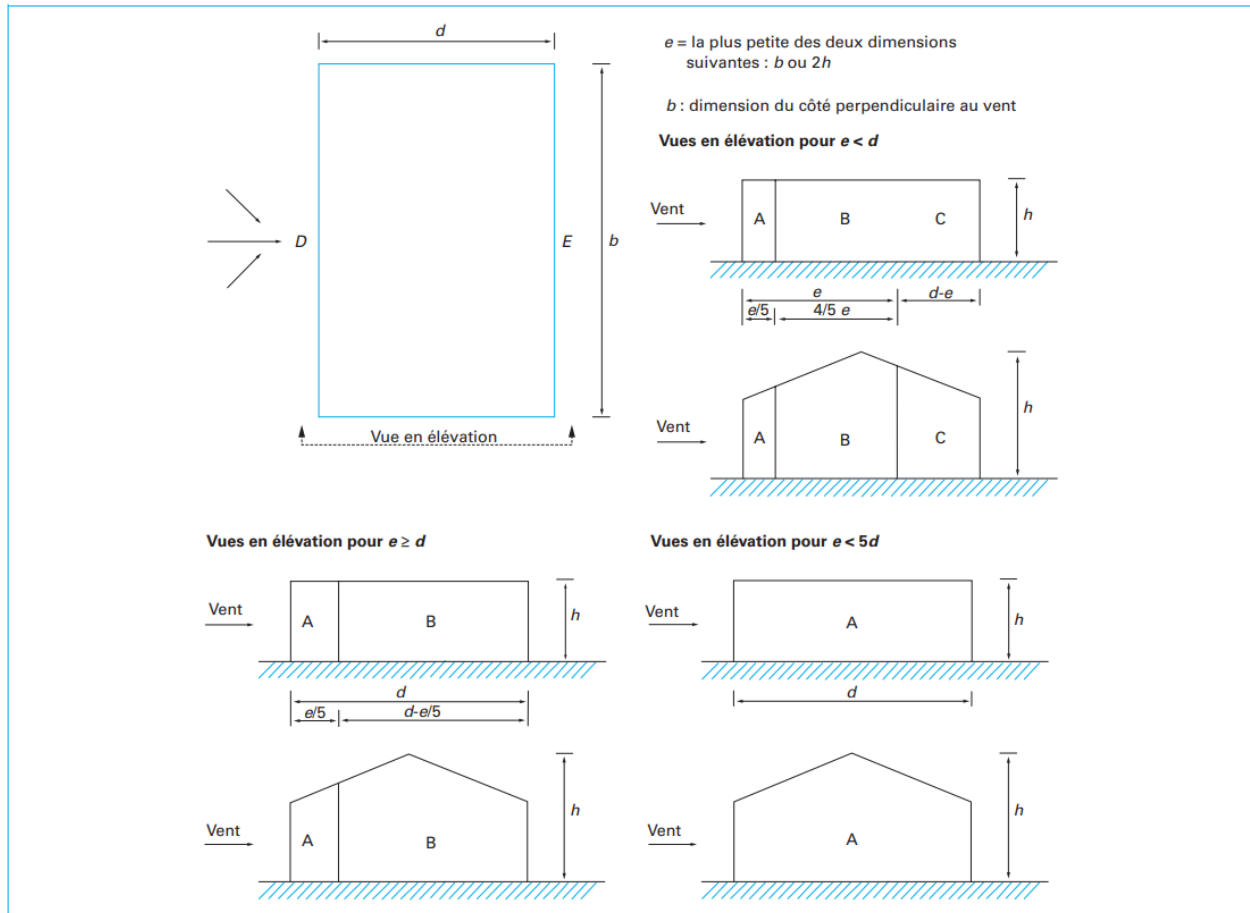


FIGURE 34 – Légendes relatives aux murs verticaux [8]

Zones	A		B		C		D		E	
h/d	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$
5	- 1,2	- 1,4	- 0,8	- 1,1	- 0,5		+ 0,8	+ 1,0	- 0,7	
1	- 1,2	- 1,4	- 0,8	- 1,1	- 0,5		+ 0,8	+ 1,0	- 0,5	
$\leq 0,25$	- 1,2	- 1,4	- 0,8	- 1,1	- 0,5		+ 0,7	+ 1,0	- 0,3	

Une interpolation linéaire peut être appliquée pour des valeurs intermédiaires de h/d .

FIGURE 35 – Valeurs c_{pe} pour les murs verticaux [8]

7. Coefficient de pression c_{pe} et aires de référence des toitures-terrasses F, G, H, I :

De manière analogue aux murs verticaux, les coefficients de pression c_{pe} pour les toitures-terrasses dépendent de la géométrie et de l'exposition de la structure.

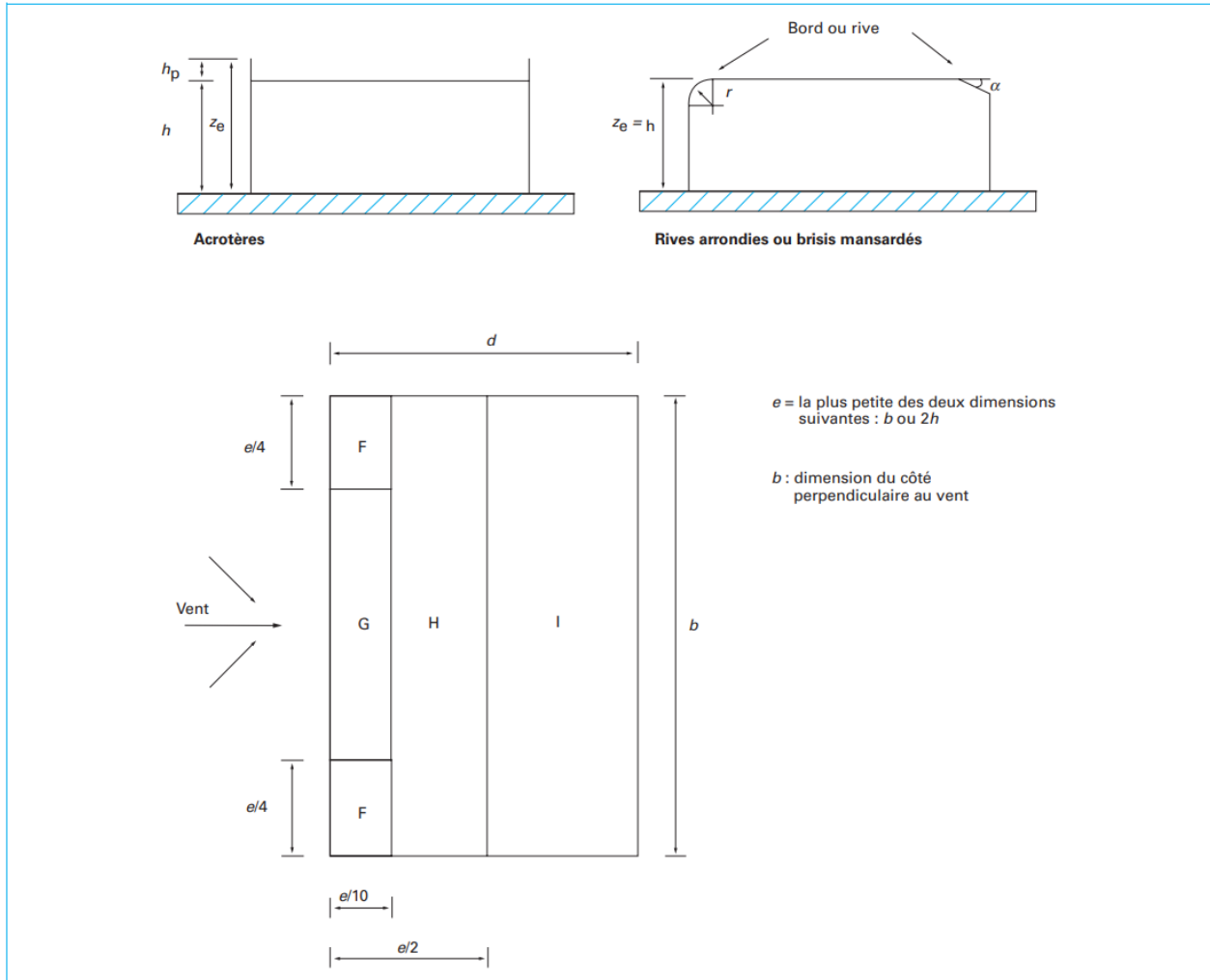


FIGURE 36 – Légendes applicables aux toitures-terrasses [8]

Types de toiture		Zones						
		F		G		H		I
		$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10} = c_{pe,1}$
Rives à arêtes vives		-1,8	-2,5	-1,2	-2,0	-0,7	-1,2	+0,2 et -0,2
Avec acrotères	$h_p / h = 0,025$	-1,6	-2,2	-1,1	-1,8	-0,7	-1,2	+0,2 et -0,2
	$h_p / h = 0,05$	-1,4	-2,0	-0,9	-1,6	-0,7	-1,2	+0,2 et -0,2
	$h_p / h = 0,10$	-1,2	-1,8	-0,8	-1,4	-0,7	-1,2	+0,2 et -0,2
Rives arrondies	$r / h = 0,05$	-1,0	-1,5	-1,2	-1,8	-0,4		+0,2 et -0,2
	$r / h = 0,10$	-0,7	-1,2	-0,8	-1,4	-0,3		+0,2 et -0,2
	$r / h = 0,20$	-0,5	-0,8	-0,5	-0,8	-0,3		+0,2 et -0,2

FIGURE 37 – Valeurs c_{pe} pour les toitures-terrasses [8]

8. Coefficient de frottement c_{fr} :

Les forces de frottement s'appliquent sur la partie des surfaces extérieures parallèles au vent, situées au-delà d'une certaine distance des bords au vent ou des angles au vent de la toiture.

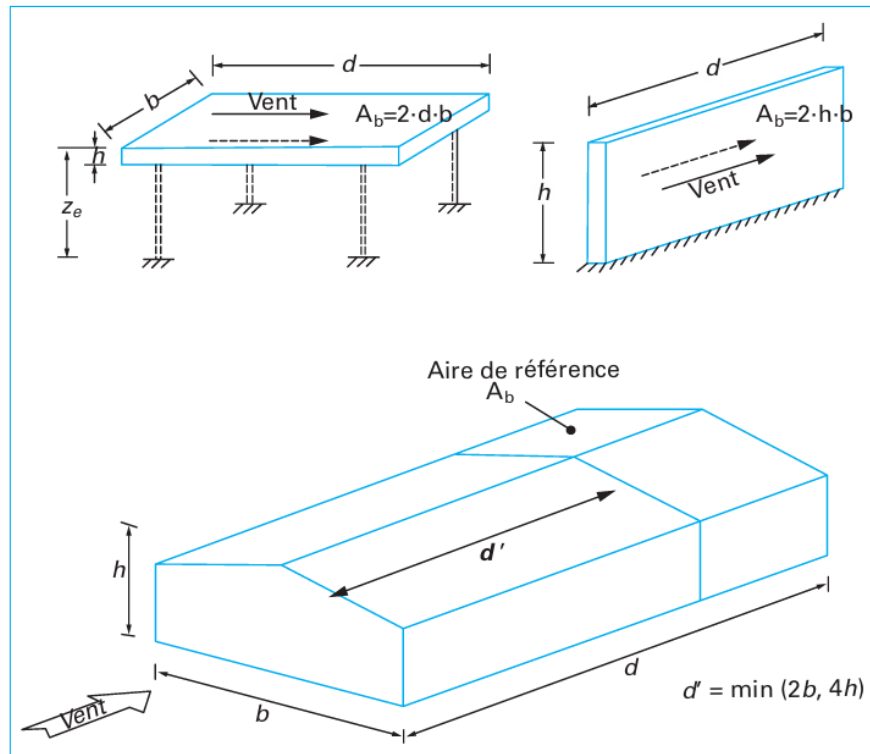


FIGURE 38 – Aire de référence pour le frottement [8]

Surfaces	Coefficient de frottement c_{fr}
Lisse (acier, béton lisse)	0,01
Rugueuse (béton brut, bardeaux bitumés)	0,02
Très rugueuse (ondulations, nervures, pliures)	0,04

FIGURE 39 – Valeurs des coefficients de frottement c_{fr} [8]

9. Forces exercées par le vent :

L'action du vent s'obtient par combinaison de pressions extérieure et intérieure, auxquelles s'ajoutent les effets de frottement :

$$F = \left[c_s c_d \cdot \sum q_p(z_e) \cdot c_{pe} - \sum q_p(z_i) \cdot c_{pi} \right] \cdot A_{ref} + c_{fr} \cdot q_p(z_e) \cdot A_{ref}$$

avec :

— Coefficient structural : $c_s c_d = [0,85, 0,95]$

- Coefficient de pression extérieure : c_{pe}
- Coefficient de pression intérieure : $c_{pi} = 0, 2$ ou $-0, 3$
- Coefficient de frottement : c_{fr}
- Hauteurs de référence pour les pressions intérieures et extérieures : $z_i = z_e$
- Aires de références des murs verticaux et des toitures-terrasses : A_{ref}

10. Pressions globales résultantes :

On évalue ensuite les effets combinés sur les parois :

- Pressions appliquées sur les parois D et E [figure 34] :

$$p_{DE} = p_D - p_E$$

- Moyenne pondérée des pressions appliquées sur la toiture-terrasse [figure 36] :

$$p_{m,toiture} = \frac{p_F A_F + p_G A_G + p_H A_H + p_I A_I}{A_F + A_G + A_H + A_I}$$

Ces résultats permettent de dimensionner les éléments structuraux soumis aux efforts dus au vent, en tenant compte des cas de pression intérieure extrêmes.

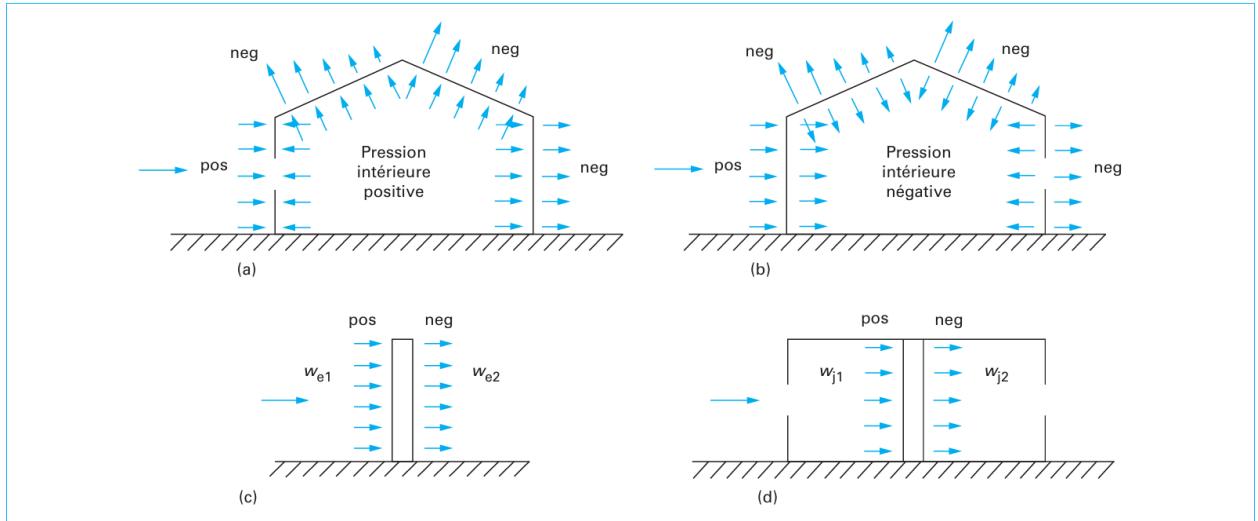


FIGURE 40 – Pressions aérodynamiques sur les surfaces [8]

11. Sorties :

- Vitesse moyenne : v_m
- Pression dynamique de base : q_b
- Pression dynamique de pointe : q_p
- Somme des pressions sur les parois D et E : p_{DE}
- Moyenne pondérée des pressions sur la toiture-terrasse : $p_{m,toiture}$

A.7 Vérification des contraintes dans un noyau soumis à l'action du vent

Références [26]

1. Entrées :

- Pression sur les façades : p_{vent}
- Pression sur la toiture-terrasse : $p_{vent,toiture}$
- Dimensions des travées : $l_{12}, l_{23}, l_{34}, l_{AB}, l_{BC}$
- Nombre de noyaux : n_{noyaux}
- Nombre et hauteur des niveaux : n_{niv}, h_{niv}
- Dimensions constructives : $h_{dalles}, b_{poutres}, h_{poutres}, c_{colonnes}, e_{noyau}$
- Charges permanentes et variables : $G_{k,cloison}, Q_k$
- Résistance caractéristique du béton : f_{ck}

2. Hypothèses et simplifications :

- Répartition uniforme des pressions
- Bâtiment symétrique, efforts répartis équitablement entre les noyaux
- Les surfaces de planchers sont estimées à partir de la géométrie autour d'un noyau

3. Efforts appliqués sur le noyau :

La nuit, seules les charges permanentes et les efforts dus au vent sont pris en compte. En journée, les charges d'exploitation s'y ajoutent, augmentant l'effort normal de compression :

$$N_{nuit} = 1,35 \cdot G_k \cdot n_{niv} + R_{vent,toiture}$$

$$N_{jour} = (1,35 \cdot G_k + 1,5 \cdot Q_k) \cdot n_{niv} + R_{vent,toiture}$$

$$M_{vent} = R_{vent} \cdot \frac{h}{2}$$

avec :

- R_{vent} : résultante des forces horizontales du vent sur le bâtiment
- $R_{vent,toiture}$: résultante des forces verticales du vent sur la toiture-terrasse

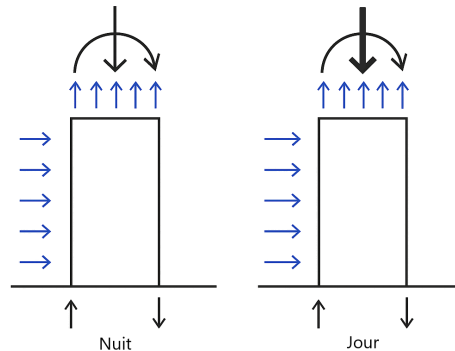


FIGURE 41 – Représentation des efforts sur le noyau

4. Cas 1 – Nuit (sans charge d'exploitation) :

La contrainte σ_{nuit} doit rester positive afin d'éviter l'apparition de traction dans le noyau :

$$\sigma_{nuit} = \frac{N_{nuit}}{A_{noyau}} - \frac{M_{vent}}{W_{noyau}}$$

La vérification s'effectue comme suit :

- $\sigma_{nuit} \geq 0$: pas de traction $\rightarrow$ OK
- $-1 \leq \sigma_{nuit} < 0$ MPa : traction modérée $\rightarrow$ OK sous réserve de justification
- $\sigma_{nuit} < -1$ MPa : traction excessive $\rightarrow$ NOK

5. Cas 2 – Jour (avec charge d'exploitation) :

La contrainte σ_{jour} doit rester inférieure à la résistance de calcul du béton f_{cd} :

$$\sigma_{jour} = \frac{N_{jour}}{A_{noyau}} + \frac{M_{vent}}{W_{noyau}}$$

La vérification s'effectue comme suit :

- $\sigma_{jour} \leq f_{cd}$: compression admissible $\rightarrow$ OK
- $\sigma_{jour} > f_{cd}$: compression excessive $\rightarrow$ NOK

6. Sorties :

- Contrainte dans le noyau (nuit) : σ_{nuit}
- Contrainte dans le noyau (jour) : σ_{jour}
- État de traction (nuit) : OK / à justifier / NOK
- État de compression (jour) : OK / NOK

A.8 Renforcement en flexion par lamelles PRFC

Références [6, 14, 15]

1. Entrées :

- Résistance caractéristique du béton : f_{ck}
- Résistance caractéristique à la traction du PRFC : f_{fuk}
- Module d'élasticité du PRFC : E_f
- Longueur de l'élément : l
- Dimensions de la section : hauteur h , largeur b
- Enrobage : e
- Moment initial : M_{Ed}
- Moment supplémentaire à reprendre : ΔM_{Ed}
- Catalogue de lamelles : $e_{f,cat}, b_{f,cat}$
- Critère de rotation plastique : $x/d \leq 0,45$

2. Paramètres initiaux :

- $f_{cd} = \alpha_{cc} \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c}$ avec $\alpha_{cc} = 0,85$, $\gamma_c = 1,5$
- $f_{fud} = \eta_f \cdot \frac{f_{fuk}}{\gamma_f}$ avec $\eta_f = 0,7$, $\gamma_f = 1,3$
- $d = h - e$
- $z = 0,9 \cdot d$

3. Équilibre statique :

$$M_{Ed} + \Delta M_{Ed} = F_c \cdot z = (F_s + F_f) \cdot z$$

4. Itération pour ajuster z :

$$F_c = \frac{M_{Ed} + \Delta M_{Ed}}{z}$$

$$h_c = \frac{F_c}{b \cdot f_{cd}}$$

$$z_{new} = d - \frac{h_c}{2}$$

avec :

- $h_c = \lambda x$ et $\lambda = 0,8$

5. Calcul des renforts PRFC :

$$A_f = \frac{\Delta M_{Ed}}{f_{fud} \cdot z}$$

6. Vérification des hypothèses :

L'ajout de PRFC augmente F_c , et donc la hauteur x de la zone comprimée :

- Le critère de rotation plastique ($x/d \leq 0,45$) garantit que la zone comprimée reste limitée, assurant un comportement ductile.
- L'augmentation de x réduit la déformation ε_s de l'acier, pouvant compromettre sa plastification ; on vérifie donc que $\varepsilon_s \geq 0,217\%$.
- Si l'acier ne plastifie pas, on s'assure que le béton atteint une déformation plastique suffisante ($\varepsilon_c \geq 0,2\%$), pour garantir la ductilité globale de la section.

• **Hypothèse 1 : Critère de rotation plastique**

$$x = \frac{h_c}{0,8} \Rightarrow \text{Si } \frac{x}{d} \leq 0,45 \Rightarrow \text{OK}$$

• **Hypothèse 2 : Plastification du béton et de l'acier**

Deux cas sont possibles :

1. Le béton atteint la rupture avant l'acier, il faut vérifier que l'acier a plastifié :

$$0,35\% \leq \varepsilon_c \quad \text{et} \quad 0,217\% \leq \varepsilon_s \leq 4\% \Rightarrow \text{OK}$$

avec :

$$\varepsilon_s = \varepsilon_c \cdot \frac{d - x}{x}$$

2. L'acier atteint la rupture avant le béton, il faut vérifier que le béton a plastifié :

$$4\% \leq \varepsilon_s \quad \text{et} \quad 0,2\% \leq \varepsilon_c \leq 0,35\% \Rightarrow \text{OK}$$

avec :

$$\varepsilon_c = \varepsilon_s \cdot \frac{x}{d - x}$$

7. Sélection des lamelles dans le catalogue :

Couches admissibles : il convient de ne pas prévoir plus de deux couches de lamelles en PRFC. L'épaisseur maximale de la section transversale de la bande de PRFC, hors colle, ne doit pas dépasser 3mm. [15]

8. Sorties :

- Vérification des hypothèses : plastification et rotation plastique (OK/NOK)
- Nombre de couches : n_{couches}
- Nombre de lamelles par couche : n_f
- Dimensions des lamelles : e_f, b_f
- Aire totale des lamelles : A_f
- Volume total posé : V_f

A.9 Renforcement d'une colonne en compression par tissu PRFC

Références [14, 15]

1. Entrées :

- Résistance caractéristique du béton : f_{ck}
- Résistance en traction caractéristique du PRFC : f_{fuk}
- Facteur de réduction appliqué à la contrainte de traction : η_f
- Module d'élasticité du PRFC : E_f
- Aire de la section des fibres par mètre : A_f
- Nombre de couches de tissu : n_f
- Longueur de la colonne : l
- Coefficient de flambement : k
- Géométrie de la section : circulaire ou rectangulaire
- Dimensions de la section : D, b, h
- Rayon des congés pour section rectangulaire : r_c
- Excentricité du premier ordre : e_0

2. Paramètres initiaux :

- $f_{cd} = \alpha_{cc} \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c}$ avec $\alpha_{cc} = 0,85, \gamma_c = 1,5$
- $f_{fud} = \eta_f \cdot \frac{f_{fuk}}{\gamma_f}$ avec $\eta_f = 0,7, \gamma_f = 1,4$
- $l_0 = l \cdot k$
- $D_{eq} = \frac{2 \cdot b \cdot h}{b + h}$

3. Calcul de l'épaisseur effective t_f :

$$t_f = \frac{n_f^{k_f} \cdot A_f}{b_f}$$

avec :

- $k_f = 0,85$ si $n_f > 3$, ou sinon 1

4. Vérification des conditions de validité :

- La résistance caractéristique du béton $f_{ck} \leq 50$ MPa
- Le rayon des congés des sections transversales rectangulaires $r_c \geq 20$ mm
- Le diamètre d'un poteau circulaire ou le diamètre équivalent d'un poteau rectangulaire ou carré $D_{eq}, D \geq 150$ mm
- L'excentricité du premier ordre satisfait la condition : $e_0/D_{eq} \leq 0,20$

— L'élancement satisfait la condition : $l_0/D_{eq} \leq 40$

5. Augmentation de la résistance du béton confinée Δf_{cd} :

— **Cas circulaire :**

$$\Delta f_{cd} = \begin{cases} 0 & \text{si } \frac{t_f \cdot f_{fud}}{D \cdot f_{cd}} < 0,07 \\ k_{cc} \cdot \frac{t_f}{D} \cdot f_{fud} & \text{sinon} \end{cases}$$

avec :

— $k_{cc} = 2,5$

— **Cas rectangulaire :**

$$\Delta f_{cd} = \begin{cases} 0 & \text{si } \frac{b^2}{h^2} \cdot k_e \cdot \frac{t_f \cdot k_r \cdot f_{fud}}{D_{eq} \cdot f_{cd}} < 0,07 \\ k_{cc} \cdot \frac{b^2}{h^2} \cdot k_e \cdot \frac{t_f \cdot k_r \cdot f_{fud}}{D_{eq}} & \text{sinon} \end{cases}$$

avec :

$$— k_e = 1 - \frac{(b - 2 \cdot r_c)^2 + (h - 2 \cdot r_c)^2}{3 \cdot b \cdot h}$$

$$— k_r = \frac{r_c}{50} \cdot \left(2 - \frac{r_c}{50}\right) \quad \text{si } r_c < 50 \text{ mm, ou sinon } 1$$

6. Sorties :

— Augmentation de la résistance du béton confinée : $\Delta f_{cd}, \Delta f_{ck}$

— Volume total de PRFC : V_f

A.10 Dimensionnement des armatures de chemisage en béton armé

La méthode de dimensionnement est identique à celle décrite pour le dimensionnement des armatures d'une colonne carrée comprimée [A.5], à l'exception des adaptations suivantes :

1. Entrées :

- Côté initial de la section existante : c_{sc0}
- Epaisseur du chemisage : $e_{chemisage}$
- Aire des armatures longitudinales existantes : $A_{s,sc0}$:

2. Calcul des armatures $A_{s,chemisage}$:

L'aire des armatures à ajouter est déterminée en tenant compte de la contribution des armatures existantes :

$$A_{s,chemisage} = A_s - A_{s,sc0,réduite}$$

Étant donné la différence de bras de levier entre les deux sections, un facteur de réduction est appliqué à l'armature existante :

$$A_{s,sc0,réduite} = A_{s,sc0} \cdot \frac{d_{sc0}}{d}$$

avec :

- d_{sc0} : distance utile dans la section initiale
- d : distance utile dans la section chemisée

3. Sorties :

- Aire des armatures de chemisage : $A_{s,chemisage}$
- Diamètre et nombre de barres : $\varnothing, n_{barres,chemisage}$
- Aire et volume total des barres : $A_{s,barres,chemisage}$
- Diamètre et nombre d'étriers : $\varnothing_{etr,chemisage}, n_{etr,chemisage}$
- Espacement maximum des étriers : $s_{max,chemisage}$
- Volume total des étriers : $V_{etr,chemisage}$

UNIVERSITÉ CATHOLIQUE DE LOUVAIN
École polytechnique de Louvain

Rue Archimède, 1 bte L6.11.01, 1348 Louvain-la-Neuve, Belgique | www.uclouvain.be/epl