



## Rénovation énergétique:

### Potentiel de végétalisation des toitures de la rive Est de Liège

Travail de fin d'études réalisé en vue de l'obtention du grade de master en Ingénieur Civil Architecte par Simon Rohon

Co-promoteurs : Sigrid Reiter & Jacques Teller

Jury : Shady Attia - Anne-Françoise Marique - Gaëlle Michaud-Nérard

Université de Liège - Faculté des Sciences Appliquées  
Année académique 2016/2017





# Résumé

## **Rénovation énergétique: Potentiel de végétalisation des toitures de la rive Est de Liège**

---

Travail de fin d'études réalisé en vue de l'obtention du grade de master en Ingénieur Civil Architecte par Simon Rohon.

---

Faculté des sciences Appliquées ULg - Année académique 2016-2017

Le parc immobilier belge est relativement ancien. Pour répondre aux objectifs du Gouvernement Wallon en termes de qualité et de limitation de la consommation énergétique, le rôle de la rénovation s'avère primordial.

Les stratégies de rénovation énergétique sont variées. Ce travail étudie en particulier les toitures vertes. Leurs avantages sont multiples et interviennent selon différentes échelles. À l'échelle urbaine, leur efficacité sur différents points est conditionnée par leur nombre et leur mise en réseau. Dès lors, une réflexion globale doit être engagée.

Ce mémoire propose un outil d'évaluation du potentiel de végétalisation des toitures pour alimenter une démarche plus générale déjà entamée par la ville de Liège. Le terrain d'étude est relativement vaste avec une superficie d'environ 450 hectares correspondant globalement à la rive Est de Liège.

Parmi les différents critères retenus dans la hiérarchisation du potentiel des toitures, le critère structurel a été étudié plus spécifiquement. Le passé industriel des quartiers étudiés est encore visible, avec entre autre la présence de nombreuses structures en acier, type hangar. Ces structures sont presque systématiquement écartées des études de végétalisation. Dans un tel contexte, ce travail a étudié la pertinence de cette mise à l'écart à travers trois études de cas.

Les résultats obtenus ont permis d'intégrer les structures en acier dans l'étude globale et de mettre en évidence un potentiel de 23,7 hectares de toitures disposant d'un fort potentiel de végétalisation sur la rive Est de Liège.

La dernière partie de ce mémoire propose des stratégies et pistes de réflexion pour mettre en oeuvre ce potentiel significatif mais aujourd'hui très peu exploité.

## Remerciements

Avant toutes choses je tiens à remercier les différentes personnes qui m'ont aidé et permis de mener à bien ce travail de fin d'étude.

En premier lieu, je remercie Sigrid Reiter et Jacques Teller, promotrice et co-promoteur qui m'ont laissé une autonomie suffisante et la liberté de faire évoluer le sujet d'étude tout en s'assurant de me fournir les outils et méthodes nécessaires au bon déroulement de ce travail.

Je remercie aussi les autres membres de mon jury, Anne-Françoise Marique, Gaëlle Michaud-Nérard et Shady Attia. Tous m'ont accordé leur temps, leurs compétences et leurs conseils pour alimenter cette réflexion.

Je souhaite aussi remercier les différents acteurs sollicités au cours des évolutions de ce travail pour leur disponibilité, leur intérêt et leur pédagogie:

Clément Baghi, Jean-Marie Bleus et Jean-François Demonceau pour leur expérience précieuse dans la construction et les modèles de calculs structuraux.

Anne-Marie Veithen et Vincent Lesage pour leur pragmatisme et leur connaissance des enjeux de l'urbanisme liégeois

Christine Ruelle pour ses contacts et connaissances vis-à-vis des entrepreneurs liégeois mais aussi ses conseils avisés.

Enfin je tiens à remercier ma famille pour leur intérêt et leur soutien.

# Table des matières

<b>Résumé</b>	<b>1</b>
<b>Remerciements</b>	<b>2</b>
<b>Introduction</b>	<b>6</b>
<b>I - Etat de l'art</b>	<b>9</b>
1 - Un lieu ou une façade à part entière: la toiture	10
a] Nuances selon les cultures	10
b] Innovations techniques et enjeux climatiques	11
2 - Les toitures vertes	12
a] Historique et terminologie	12
b] Intérêts des toitures végétalisées	14
Isolation thermique	14
Isolation acoustique	15
Esthétique	15
Gestion des eaux pluviales	16
Îlot de chaleur	19
Biodiversité	20
Qualité de l'air et de l'eau	20
c] Impact structural	21
3 - Des rénovations d'ampleur concluantes	22
a] En Europe	22
b] En Amérique du Nord	24
c] En Asie	25
d] Ailleurs dans le monde	25
4 - Des études similaires envisagées à grande échelle	26
a] À Paris	26
b] À Melbourne	26
c] À Sheffield et au Royaume-Uni	27
5 - Conclusions de l'état de l'art et intérêt de l'étude	28
<b>II - Etude de la rive Est de Liège</b>	<b>29</b>
1 - Méthodologie	30
a] Cadre théorique	30

b] Terrain d'étude	31
c] Cartographie SIG	36
d] Analyse structurelle	37
2 - Liège rive droite, quartier aux multiples visages	38
a] Quelles surfaces?	38
b] Gisement de toitures plates	40
c] Un bâti ancien?	41
3 - Structure: cadre réglementaire et normatif	45
a] Evolution globale des normes (d'après Gao, 1996)	45
b] Evolution des normes liées aux résistances	46
Le Béton (armé)	46
L'acier	47
c] Evolution des normes liées aux Actions	48
Le Vent	48
d] Conclusions	48
4 - Structure: étude de cas	49
a] Choix des modèles d'études	49
b] Hypothèses générales	51
Charge de neige	51
Charge de vent	51
Matériaux	52
c] Analyse des modèles	54
Cas 1 : Hall Industriel Avenue Albert 1er, 66 (Grivegnée)	54
Cas 2 Atelier de boucherie, Avenue Georges Truffaut, 42	59
Cas 3 Hangar Rue des trois grands, 22 (Grivegnée)	65
5 - Conclusion	70
<b>III - Analyse des résultats</b>	<b>71</b>
1 - Potentiel de végétalisation de la rive Est	72
2 - Limites de l'étude	74
a] Années de construction	74
b] Renovations antérieures	75
c] Intérêt urbanistique	76
3 - Echantillonnage des petits toits plats	78

Ilot d’Amercoeur	79
Ilots du Longdoz	80
Ilots des Vennes	81
Ilot de Chênée	82
Synthèse	83
4 - Des toitures déjà appropriées?	84
5 - Conclusions	87
<b>IV - Perspectives</b>	<b>88</b>
1 - Cadre réglementaire et administratif	89
2 - Master plan ou plan végétal	89
3 - Mise en relation des acteurs	90
4 - Les projets publics et les reconnaissances comme leviers d’action	91
5 - Incitation financière et montage juridique	92
<b>Conclusion</b>	<b>94</b>
<b>Table des figures</b>	<b>97</b>
<b>Table des tableaux</b>	<b>100</b>
<b>Bibliographie</b>	<b>101</b>
<b>Annexes</b>	<b>106</b>
Note de calcul	107
Détail chiffré des cas d’étude	112



Introduction



La Belgique possède un parc immobilier et notamment résidentiel parmi les plus anciens d'Europe. « *Et au sein de la Belgique, c'est le parc wallon qui est encore le plus ancien (plus de 50% des logements datent d'avant 1945, 75% d'avant 1980 et seulement 12% ont été construits après 1990).* »(DGO4, 2012, p. 6). Cela peut atteindre jusqu'à 68% pour certaines agglomérations comme la ville de Liège (Singh et al., 2013; Ruellan, 2016). Diverses études mettent en exergue l'importance de la rénovation du stock bâti et notamment la rénovation énergétique pour permettre à la Belgique d'atteindre les différents objectifs environnementaux, énergétiques ou encore économiques qu'elle s'est fixés. Le Schéma de développement territorial (SDER) adopté en 2013, retranscrit ces enjeux à travers deux des ses 4 piliers fondamentaux. «*Améliorer et développer le parc de logements (I.4) doit également répondre à la diversité des besoins et aux défis climatique et énergétique.*» (Gouvernement wallon, 2013, p. 11). Dès lors le rôle de la rénovation apparaît comme prépondérant dans les stratégies pour améliorer le parc immobilier tout en limitant l'étalement urbain et la destruction des ressources naturelles. «*Dans un contexte d'érosion de la biodiversité et de fragmentation des réseaux écologiques, les sites d'intérêt biologique doivent être protégés et les continuités des écosystèmes maintenues (IV.2)*» (Gouvernement wallon, 2013, p. 12).

Une rénovation énergétique efficace est une stratégie globale et complexe à l'échelle du bâtiment. Au sein de cette stratégie, différentes cibles d'améliorations peuvent être identifiées comme les techniques spéciales, l'organisation intérieure ou encore l'enveloppe du bâtiment. De multiples pistes permettent d'optimiser cette dernière. Dans le cadre de ce mémoire une option est ici étudiée en particulier : la végétalisation de la toiture.

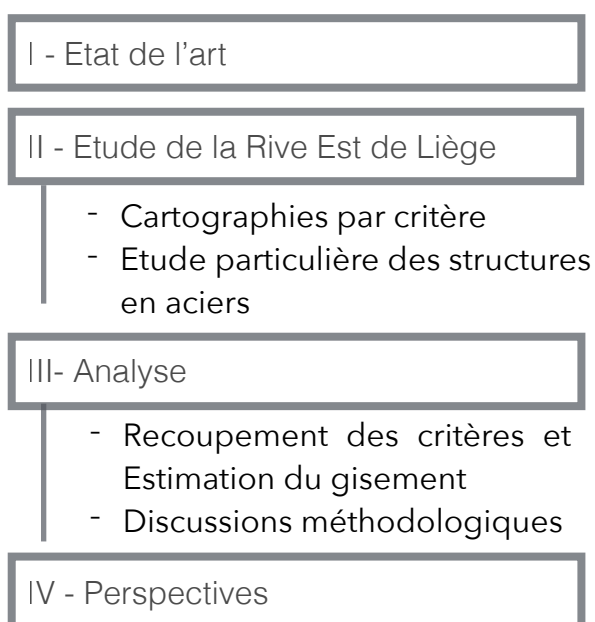
Plus qu'un simple phénomène de mode esthétique, la toiture verte est source de nombreux avantages. La plupart sont maîtrisés et quantifiés mais d'autres comme l'impact exact sur les îlots de chaleur urbains suscitent encore le débat dans la communauté scientifique. Malgré ces quelques questions, le marché est aujourd'hui florissant et trouve parfaitement sa place dans la tendance « du retour de la nature en ville ». Actuellement, le développement des toitures vertes reste essentiellement contingenté aux nouveaux projets. Cette limitation de l'utilisation des toitures vertes dans la rénovation énergétique peut s'expliquer par les contraintes structurales liées à leur mise en place.

À l'image de chercheurs anglo-saxons (Munby, 2005; Castletown & al., 2010), il est intéressant de se questionner sur l'évolution des normes et des méthodes de calculs de dimensionnement structurel. Cette évolution pourrait être la source d'une réserve structurelle sous exploitée aux vues des Eurocodes actuellement en vigueur. En restant conscient que chaque bâtiment a une histoire et donc une structure qui a plus ou moins bien vieilli, ce travail vise à évaluer un potentiel structural global à travers l'étude de différents bâtiments et en testant plusieurs scénarios de végétalisation des toitures.

Pour optimiser cette prospection, le terrain d'étude doit posséder une diversité des typologies bâties importante, des constructions récentes mais aussi relativement

anciennes afin de hiérarchiser d'éventuelles stratégies de végétalisation. Une imperméabilisation des sols et une forte densité bâtie, des enjeux de gestion des eaux pluviales ou encore le manque d'espaces verts sont aussi des caractéristiques du terrain d'étude en faveur d'une réflexion sur l'implantation de toitures vertes. Le terrain étude en question sera précisé par la suite mais il s'agit globalement de la rive Est de Liège. Entre la colline du fort de la chartreuse et la Dérivation de la Meuse, la rive droite est marquée par les stigmates d'un urbanisme industriel relativement dense et pauvre en espaces publics et en espaces verts. Dans ce contexte minéral, les toitures vertes apparaissent comme des solutions pertinentes dans le cadre de rénovations énergétiques.

Le processus de travail est précisé dans la méthodologie. Dans un souci de clarté, ce mémoire adopte un plan légèrement différent de la démarche suivie. Schématiquement le plan de ce mémoire peut être présenté comme ceci :



Dans un premier temps, l'état de l'art s'attachera à préciser les intérêts des toitures vertes dans le cadre d'une rénovation et présentera des exemples d'études urbaines menées sur ce sujet. À partir de ces exemples, des critères tels que la surface, l'âge du bâti... seront retenus pour hiérarchiser les toitures avec le plus fort potentiel de végétalisation. Le critère structurel sera examiné plus en détail et la pertinence d'écarter systématiquement les toitures reposant sur des structures en acier pour une potentielle végétalisation sera questionnée dans ce travail.

À la lumière de ces résultats et du croisement des données, un travail de cartographie permet de synthétiser la réflexion menée et de discuter la méthodologie adoptée pour mieux comprendre les résultats obtenus et éventuellement les nuancer.

Une dernière partie s'intéresse aux perspectives qui s'offrent à ville de Liège en vue d'ouvrir ce travail à la complexité des dynamiques sociales ou mêmes politiques propres au bassin liégeois et ainsi envisager des stratégies ou leviers d'actions pour favoriser le développement des toitures vertes à Liège.



I - Etat de l'art

# 1 - Un lieu ou une façade à part entière: la toiture

---

## a) Nuances selon les cultures

La toiture est un élément constitutif quasi systématique d'un bâtiment. Elle se différencie des autres façades de maintes manières, par son orientation, son accessibilité, sa visibilité mais aussi par les corps de métiers nécessaires à sa mise en oeuvre. Sa forme, ses matériaux, ses fonctions sont généralement liés au climat de la région et à la culture des habitants. Ainsi *«Presque toutes les toitures des maisons individuelles en Tunisie sont plates comme dans les autres pays méditerranéens. La fonction des toitures dans l'Europe du Nord est limitée à la protection contre les effets du climat, tandis que les toitures dans les pays de la Méditerranée sont aussi très souvent utilisées par les habitants.»* (A. Aouididi &al., 1989, p. 17).

Avec les innovations techniques du début du XXème siècle (développement du béton armé entre autres) suivi de l'essor démographique et économique des « Trente Glorieuses », les typologies de toitures ont largement évoluées. Aujourd'hui, les habitations à toitures plates ne sont pas rares en Wallonie. Néanmoins les toitures traditionnelles restent largement encouragées afin de conserver une *« harmonie avec le type de toiture propre aux constructions traditionnelles locales. »* (CWATUP, Art. 419.c. ).

En Wallonie, ce souhait de cohérence urbanistique des pouvoirs publics se traduit par l'incitation des toitures à deux pans notamment dans les sites ruraux: *«Les volumes principaux comprendront une toiture à deux versants droits de même inclinaison et de même longueur de pente ; les volumes secondaires éventuels comprendront une toiture en pente, d'un ou de deux versants.»* (CWATUP, Art. 419.c. ).

Cependant les toitures à doubles pans se sont révélées très vite inadaptées pour des grandes et très grandes surfaces bâties. Les bâtiments du secteur industriel et économique par exemple ont ainsi largement plébiscité les toitures à sheds (ou toiture à redans partiels) et les toitures plates.

Alors que la Wallonie s'engage sur des réflexions pour lutter contre l'étalement urbain, l'imperméabilisation des sols ou encore la limitation de sa consommation énergétique, il est légitime de s'interroger sur l'enjeu que représentent ces grandes surfaces, généralement accompagnées d'aires de manoeuvre et de stationnement, pour leur propriétaire ainsi que pour leur environnement urbain

---

## b] Innovations techniques et enjeux climatiques

Dans le contexte des dernières décennies où l'intérêt porté aux énergies renouvelables et à la consommation énergétique s'est accru, l'enveloppe des bâtiments figure parmi les sources de réflexions majeures. Les nombreuses évolutions de la norme PEB, depuis une dizaine d'années, l'illustre parfaitement.

Le site du Service public de Wallonie fournit la réglementation PEB à respecter (exigences de performance énergétique, procédure PEB, méthode de calcul) selon la date d'introduction de la demande de permis d'urbanisme :

- à partir du 1er janvier 2021
- à partir du 1er janvier 2019 - bâtiments publics
- du 1er janvier 2017 au 31 décembre 2020
- du 1er janvier 2016 au 31 décembre 2016
- du 1er mai 2015 au 31 décembre 2015
- du 1er janvier 2014 au 30 avril 2015
- du 1er juin 2012 au 31 décembre 2013
- du 1er septembre 2011 au 31 mai 2012
- du 1er mai 2010 au 31 août 2011
- du 1er septembre 2008 au 30 avril 2010
- du 1er décembre 1996 au 31 août 2008
- du 1er mai 1985 au 30 novembre 1996

(Service public de Wallonie, DGO4. energie.wallonie.be, consulté le 25/04/2017)

Selon les référentiels utilisés, la production locale d'énergie est plus ou moins favorisée. Ainsi l'utilisation de panneaux photovoltaïques et/ou solaires en toiture peut permettre d'acquérir plus aisément certains labels qui visent la performance globale du bâtiment sans se concentrer explicitement sur l'enveloppe. Cette utilisation de la toiture, bien qu'intéressante ne sera pas étudiée spécifiquement dans le cadre de ce mémoire mais simplement évoquée lors du travail de cartographie.

La solution étudiée apporte elle aussi une plus-value à la toiture mais répond à d'autres enjeux d'adaptation auxquels sont confrontées les villes d'aujourd'hui. Il y a parmi ces enjeux, de manière non exhaustive : la réduction des gaz à effets de serre, l'imperméabilisation des sols, les îlots de chaleurs ou encore la réintroduction de la nature en ville.

Il s'agit des toitures végétalisées.

## 2 - Les toitures vertes

Le terme de toiture verte est générique et rassemble aussi bien les toitures végétalisées artificiellement que les toitures colonisées spontanément.

La première se différencie de la seconde par un dispositif de couches visant à l'implantation d'espèces végétales. Actuellement les toitures végétalisées consistent en un substrat disposé sur une couche filtrante, elle-même sur une couche drainante. Ce complexe est séparé de la structure et de l'isolation par une membrane d'étanchéité, elle-même protégée des actions mécaniques dues aux racines par un film de protection. (Fig 1)

Dans le cadre de ce travail, il s'agit de s'intéresser aux dispositifs artificiels et non spontanés.

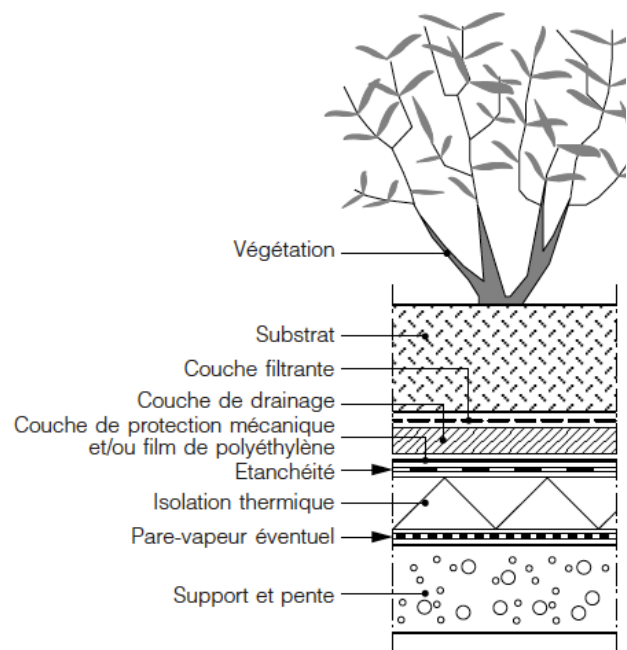


Figure 1: Schéma de composition d'une toiture végétalisée. (CSTC, 2006, p. 7)

### a] Historique et terminologie

À l'image des jardins suspendus de Babylone l'idée de végétaliser une toiture ou une terrasse n'est pas récente mais jusqu'au XIX<sup>ème</sup> siècle elle est restée l'apanage des puissants et de quelques cultures traditionnelles nord-amérindienne, sibérienne et scandinave. Pour les premiers il s'agissait d'un symbole de pouvoir alors que pour les deuxièmes il s'agissait essentiellement d'un outil de régulation thermique.

Avec le béton armé, les architectes tels que le Corbusier et l'école du Bauhaus en Europe ou encore F.Lloyd Wright outre-atlantique « firent une large place aux toitures-terrasses utilitaires, y compris les terrasses plantées. » (F. Lassalle, 2006, p. 13). Il faudra cependant attendre les années 70 et « la montée en puissance d'une conscience écologique dans les pays anglo-saxons et plus spécialement en Allemagne » (F. Lassalle, 2006, p. 14) pour assister à une véritable démocratisation des procédés de mise en oeuvre.

Les différentes réflexions abordées dans la littérature s'accordent pour distinguer au moins 2 types de végétalisation qui peuvent se différencier par les essences plantées et surtout selon les épaisseurs de substrat:

- les toitures à végétation intensive (ou toiture-jardin)
- les toitures à végétation extensive.

« Le premier groupe se caractérise par une épaisse couche de substrat dans laquelle il est même possible de planter des arbres. Les toitures appartenant au deuxième groupe possèdent quant à elles une couche de substrat plus fine et ne sont bien souvent pas

*accessibles.* » (CSTC, 2006, p. 1). Dans cette définition du CSTC, l'absence de valeurs claires pour définir les épaisseurs de substrat n'est pas innocente. En effet, Berndtsson (2010) constate une absence de consensus (cf Tableau n°1), au sein de la communauté scientifique, sur une définition claire de chaque catégorie et notamment une valeur seuil d'épaisseur de substrat pour différencier les toitures extensives des toitures intensives.

Intensive (mm)	Extensive (mm)	Référence
150-200	50 - 150	Kosareo & Ries (2007)
>500	-	Köhler & al. (2002)
150 - 350	30 - 140	Mentens & al. (2006)
>100	<100	Wong & al. (2007)
>300	-	Bengtsson & al. (2005)
>100	20 - 100	Graham & Kim (2005)

Tableau 1 : Exemples d'épaisseurs de sol pour des toitures végétalisées intensives et extensives définies par différents auteurs. (Berndtsson, 2010, p.352)

F. Lassalle, en s'appuyant sur les travaux de Liesecke propose même une catégorie supplémentaire qui se différencie de la végétalisation extensive par la régularité de l'entretien nécessaire. Ainsi la toiture semi-intensive à la différence des toitures extensives quasi autonomes et nécessitant peu d'entretien, peut être constituée d'arbustes ou de «*graminées denses et hautes qui ne peuvent se maintenir durablement sans entretien régulier*» (Liesecke, 1990, cité par F. Lassalle, 2006, p.27)

Cette mise en lumière de la notion d'entretien est intéressante et sera reprise plus tard par le rapport du VEGDUD: «*Les 2 années de suivi de la plateforme ont finalement révélé l'importance de la maintenance des toitures sans laquelle elles dépérissent.* » (Musy & al. 2014, p. 49) ainsi que la Note d'information technique n°229 du CSTC qui permet d'établir un consensus sur la terminologie utilisée en Belgique. Dans cette note technique, la toiture jardin-légère est comparable à la toiture semi-intensive de F. Lassalle.

CARACTÉRISTIQUES	VÉGÉTATION INTENSIVE		VÉGÉTATION EXTENSIVE
	Toiture-jardin	Toiture-jardin légère	Toiture végétalisée
Épaisseur indicative des couches au-dessus de l'étanchéité	≥ 0,25 m	entre 0,10 et 0,25 m	≤ 0,1 m
Charge permanente et poids propre approximatifs de la toiture verte (saturée)	≥ 400 kg/m <sup>2</sup>	100 à 400 kg/m <sup>2</sup>	30 à 100 kg/m <sup>2</sup>
Accessibilité	Oui	Oui	Non (*)
Pente indicative usuelle du support	2 à 10 % (1 à 6°)	2 à 58 % (1 à 30°)	2 à 70 % (1 à 35°)
Entretien de la végétation	Important	Moyen	Limité
Réalisation en rénovation en bâtiment neuf	Souvent impossible A étudier	Parfois A étudier	Oui Oui
(*) Sauf aménagement supplémentaire.			

Tableau 2: Catégorisation des toitures vertes. (CSTC, 2006, p. 7)

Malgré les différents points de vue et terminologies qui rendent compliquée une comparaison chiffrée des diverses études menées sur les toitures vertes, les scientifiques s'accordent sur certains intérêts liés aux toitures vertes.

---

## b] Intérêts des toitures végétalisées

Les intérêts des toitures vertes sont multiples et plus ou moins quantifiables. Deux échelles d'analyse de ces avantages sont identifiables: L'échelle urbaine et l'échelle architecturale.

### **Isolation thermique**

Pour le propriétaire, l'argument le plus intéressant est généralement la régulation thermique obtenue grâce à l'installation d'une toiture verte. En été celle-ci permet de conserver une certaine fraîcheur dans le bâtiment grâce à l'ombrage, l'évapotranspiration des végétaux mais aussi une certaine réflexion des radiations solaires. Les travaux de Lazzarin, en 2005 montrent que les toits verts ont un albédo bien supérieur aux toits courants : 0,23 contre 0,1 pour ces derniers. Par ailleurs, l'étude menée par Wong & al. à Singapour en 2003 constate que les gains de chaleur dans le bâtiment diminuent significativement avec l'augmentation de l'épaisseur de sol. Le climat chaud et humide de Singapour est bien différent du climat belge. Pour les toits verts construits en Belgique il serait logique de penser que c'est surtout la conservation de la chaleur qui est intéressante en hiver.

À la Rochelle, (France), Ouldboukhitine et al.(2014) soulignent que grâce aux résistances thermiques supplémentaires issues des composants du toit vert, l'impact sur les besoins en chauffage est plus significatif lorsque le climat est froid. Cette augmentation de la résistance thermique implique aussi une limitation des gains solaires pour le bâtiment.

Il s'avère finalement que l'installation d'une toiture verte en Belgique permet d'économiser de l'énergie en hiver et en été. Ainsi F. Ascione et al. (2013) en prenant pour exemple Amsterdam pour des climats moyens ont pu chiffrer les gains annuels en kWh/m<sup>2</sup>/an pour un système à air conditionné installé dans un bâtiment avec différentes toitures. Les différentes toitures vertes ont permis d'économiser en moyenne 4% de la consommation d'énergie nécessaire pour un bâtiment avec une toiture conventionnelle. Il est notable que les toitures vertes intensives permettent d'économiser jusqu'à 8%.

Au delà des gains d'énergie ou plutôt de la conservation d'énergie, Ouldboukhitine et al.(2014) constate d'un point de vue thermique que l'inertie de la toiture verte bénéficie à toute la structure du toit. En limitant l'exposition de la membrane d'étanchéité aux températures extrêmes et aux importantes fluctuations de températures, la toiture verte permet d'augmenter la durabilité du toit. Bien qu'une toiture verte soit plus efficace pour un bâtiment neuf pour lequel elle a été pensée, le potentiel d'un tel dispositif dans le cadre d'une rénovation (énergétique) est évident.



## Isolation acoustique

Les travaux de Connelly & Hodgson (2008) mettent en avant l'intérêt des toitures vertes qui permettent d'améliorer considérablement l'indice d'affaiblissement acoustique TL. Selon eux la toiture verte est meilleure que les dispositifs de faux-plafonds et est efficace sur toutes les plages de fréquences conditionnant l'architecture. Particulièrement efficaces à basses et moyennes fréquences (50 à 2000Hz), il n'en reste pas moins intéressant à hautes fréquences à tel point que Connelly et Hodgson (2008) estiment que les toitures végétalisées offrent l'opportunité d'éliminer le besoin en isolation acoustique via les dispositifs de faux-plafonds.

F. Lassalle (2006) sur la base d'essais menés au CSTB, chiffre cette atténuation des nuisances sonores. Les essais sont réalisés sur des toitures vertes extensives installées sur des complexes, de type bac acier+isolant+étanchéité, ayant peu de masse et donc atténuant peu les nuisances sonores. Les résultats soulignent un gain de 8 dbA à 125Hz pour des bruits de chocs et de 5dB pour des bruits aériens par rapport au même complexe sans végétalisation. Cet affaiblissement acoustique est conséquent car un gain de 3 dBA permet de diviser par deux la gêne sonore perçue.

## Esthétique

« Le retour de la nature en ville ». Cette formulation traduit une tendance chez les habitants des milieux urbains à vouloir retrouver le contact et les bénéfices de la nature. Les travaux de Yuen et Nyuk Hien (2004) mettent en évidence que la population est largement favorable aux toits verts avec plus de 80 %. Le mémoire de V. Loiseau (2011), a d'ailleurs mis en évidence une possibilité de monétariser cette envie à travers une étude de terrain menée à Liège. Au cours de cette enquête elle a pu constater que les habitants ayant une vue sur le toit d'un parking se disent prêt à participer financièrement à la végétalisation de cette toiture.



Figure 2: Projet sélectionné pour le site de l'ancien tri-postal de Matabiau (Toulouse)

Certains architectes s'appuient sur cette tendance. Il n'est pas rare aujourd'hui d'observer des projets architecturaux « très verdurisés », à l'image des nombreux projets proposés dans le cadre de la réflexion sur le « Grand Paris » ou encore le projet de tour « écologique » qui vient de remporter le concours sur le site de l'ancien tri-postal de Matabiau à Toulouse (Fig. 2).

Aujourd'hui cette esthétisation de la nature est telle que certaines voix comme celle de Federico Ferrari s'élèvent pour dénoncer ce phénomène faisant oublier les intérêts environnementaux que peut apporter la végétalisation. Dans un entretien accordé à G. Morel *Jourmel du magazine d'architectures*, ses mots sont incisifs. « *L'esthétisation de la nature, réduite à un habillage verdoyant du projet, vide la question environnementale de son urgence* » (2017, p. 25).

À une autre échelle, les villes ont bien compris qu'en appuyant ces végétalisations à travers l'octroi de primes ou la reconnaissance architecturale, elles pouvaient transformer leur image devenue si importante auprès des différents acteurs économiques. Pour ne citer que quelques exemples, les villes de Seraing (Belgique) et Sheffield (Royaume-Uni) largement touchées par la désindustrialisation se sont dotées de Master Plan faisant la part belle au retour de la nature en ville.

Ces notions d'esthétisme, de bien-être ou encore d'« image de marque » associées à la nature restent du domaine du qualitatif. D'un point de vue plus pragmatique, les toitures vertes influent aussi sur d'autres paramètres quantifiables de dimension urbaine.

### **Gestion des eaux pluviales**

« *Utiliser le sol avec parcimonie et limiter son artificialisation* » (Gouvernement Wallon, 2013, p. 13) est la première phrase du premier objectif du premier pilier du SDER. Avec ces termes les enjeux fixés par le SDER sont clairs, les villes sont aujourd'hui confrontées à une artificialisation importante de leur territoire et doivent préserver les ressources foncières naturelles. L'étude de l'IWEPS menée en 2017 confirme l'importance de cette prise de conscience: l'artificialisation des sols a augmenté de 26,5% entre 1985 et 2016. Ce sont principalement les terres agricoles qui souffrent de cette croissance des terrains artificialisés avec une perte de 555 km<sup>2</sup> en 31 ans soit environ 6,1%. ([www.iweps.be](http://www.iweps.be)).

Généralement cette artificilisation provoque une imperméabilisation des sols qui entraîne une charge supplémentaire sur le réseau d'égouttage lors d'événements pluvieux. Face à cette problématique de gestion des eaux, les toitures vertes apportent ici une proposition très intéressante. À la suite d'un événement pluvieux, le substrat stocke un volume d'eau plus ou moins important. Ce volume peut dépendre de la période de l'année, l'épaisseur du substrat, les essences plantées ou encore le degré de saturation du substrat avant l'épisode pluvieux. Par la suite, l'eau retourne sous forme de vapeur d'eau dans l'atmosphère soit, en s'évaporant de la terre, soit en étant consommée par les plantes et relâchée dans l'atmosphère par évapotranspiration.

Lors d'intempéries importantes, l'intérêt principal des toitures vertes consiste en une capacité de stockage qui permet un déphasage du report de charge sur le réseau. Ainsi les toitures vertes permettent de « répondre à deux objectifs : limiter les risques de crues et éviter le coûteux surdimensionnement des réseaux. » (Musy et al., 2014, p. 6)

En 2006, les travaux de J. Mentens et al. (Fig 2) bien qu'effectués sur une toiture en pente de 20° confirme le rôle de la végétalisation dans le déphasage ainsi que la réduction du ruissellement lors d'un événement pluvieux.

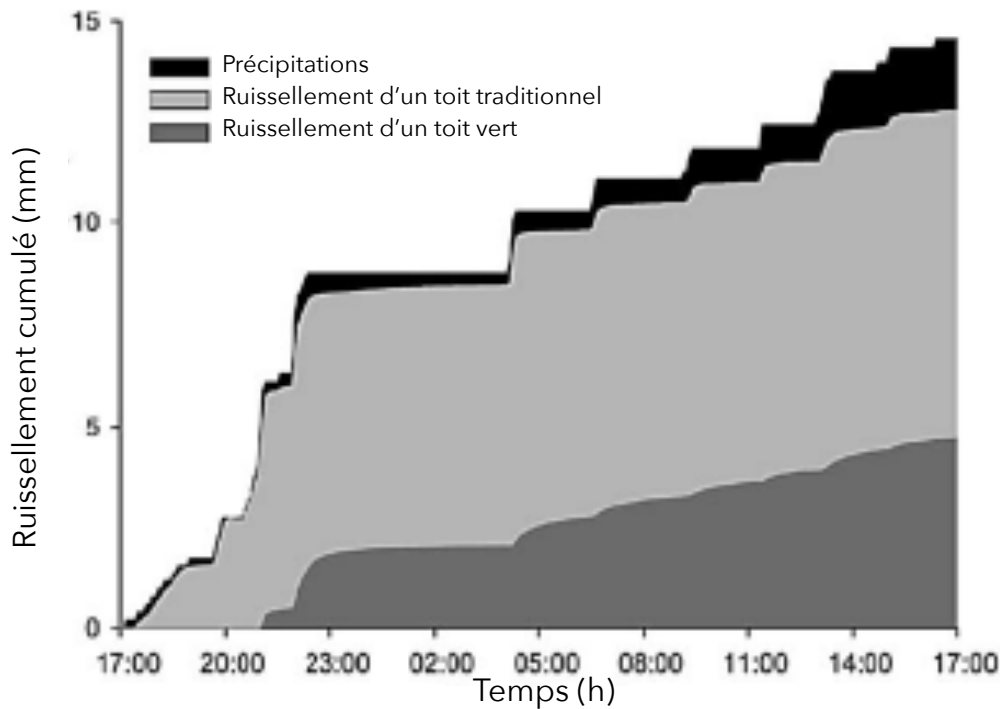


Figure 3: Ruissellements cumulés sur 24h pour deux toitures de pente à 20°. L'une végétalisée et l'autre non, à Leuven (Belgique), avril 2003. (Mentens et al., 2006, p. 218)

De même le CSTC (2006), dans une étude comparative de petites toitures végétalisées (7,5m \*1m), a pu relever des effets similaires (Fig. 3). Ce graphique met en exergue, l'importance du type de toiture verte. Plus le substrat est important et plus le débit de pointe est réduit et postposé. Plus largement, Berntsson à travers son état de l'art effectué en 2010 constate que les études divergent mais s'accordent toutes sur un déphasage du pic de ruissellement de 30 min à 2h.

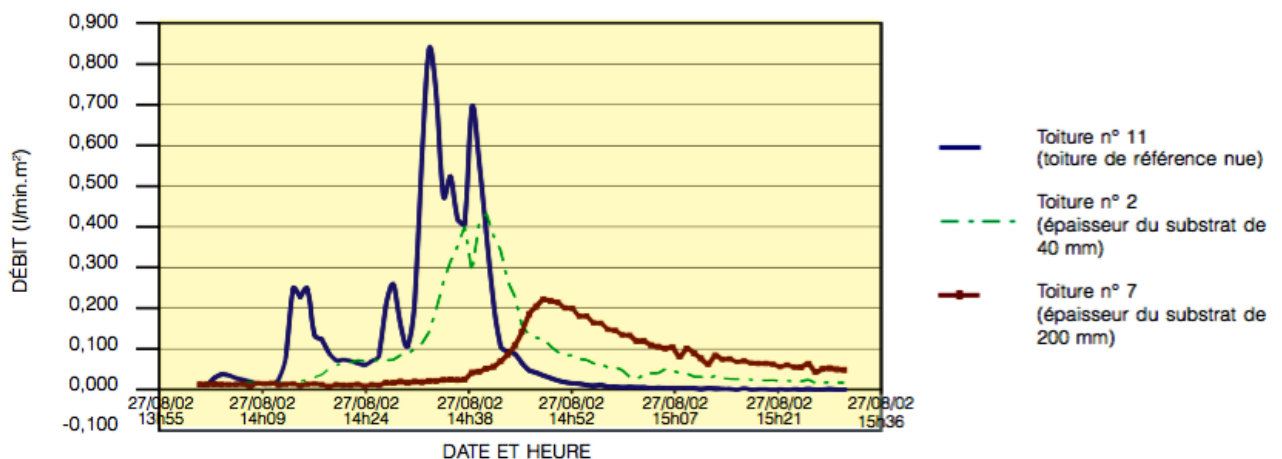


Figure 4: Débit évacué par différentes toitures durant un orage. (CSCT, 2006, p. 4)

Du point de vue annuel, Musy & al. dans le rapport final du Vegdud (2014) compare différents scénarios de végétalisation urbaine (noues, toitures vertes, arbres d'alignement) et leur impact sur le bilan hydrologique d'un bassin versant nantais sur une année.

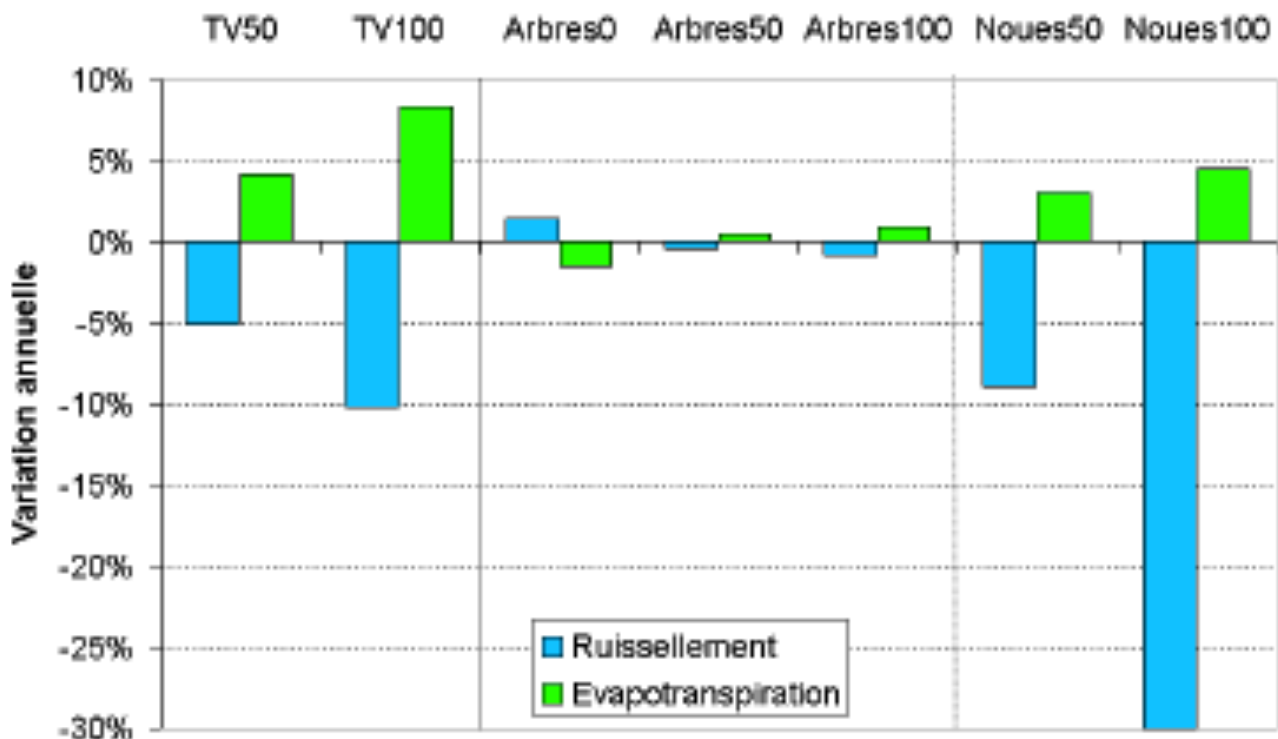


Figure 5: Impact des scénarios de végétalisation du quartier du Pin sec sur le bilan hydrique. (Musy & al., 2014, p.76)

Le diagramme ci-dessus reprend les résultats de l'étude des différents scénarios. Ainsi les scénarios « TVX » correspondent à une végétalisation de X% des toitures plates du site d'étude avec un substrat de 150mm. « ArbresX », correspondent à l'implantation d'arbres d'alignements sur X% des voiries (2 rangs pour les voiries de plus de 12m de large) et « NouesX » simulent un remplacement de X% du réseau d'égouttage par des noues de 2m de large. « Les impacts les plus importants sont obtenus par les noues pour ce qui concerne la réduction du volume ruisselé [...]. L'effet des toitures végétalisées est également notable, en particulier en ce qui concerne l'évapotranspiration ; dans ce cas, c'est surtout l'évaporation de l'eau stockée en surface ou dans le substrat de la toiture qui est modifiée. » (Musy & al., 2014, p. 75)

Les chiffres présentés par Mentens et al., en 2006 dans sa revue littéraire sont encore plus éloquentes avec des réductions du ruissellement de l'ordre de 65 à 85% pour les toitures intensives (épaisseur de plus de 150mm de substrat) et de 27 à 81 % pour les toitures extensives (épaisseurs inférieures à 150mm de substrat, soit en moyenne 100mm de substrat).

Quelques années plus tard, en 2010, Berndtsson confirme ces ordres de grandeur et constate que malgré la diversité contextuelle et la multitude des paramètres, la littérature scientifique est unanime sur les effets bénéfiques des toitures vertes en termes de gestion des eaux.

## Îlot de chaleur

« Vers la fin du XXI<sup>e</sup> siècle (2081-2100), le réchauffement moyen à la surface du globe par rapport à la période 1850-1900 sera probablement supérieur à 1,5 °C selon les scénarios RCP4,5, RCP6,0 et RCP8,5 (degré de confiance élevé), et probablement supérieur à 2 °C selon les scénarios RCP6,0 et RCP8,5 (degré de confiance élevé) » (GIEC, 2015, p. 10). Les villes en concentrant l'activité humaine et en imperméabilisant l'espace accentuent localement ce phénomène de réchauffement. Cette hausse de la température en ville par rapport à la périphérie est désignée sous le terme « d'îlot de chaleur urbain ». Cet effet de hausse des températures induit de multiples conséquences auxquelles les villes d'aujourd'hui doivent faire face : inconfort thermique entraînant une hausse de la consommation d'énergie de refroidissement, conditions favorables à la formation de nuages de pollution...

Akbar & al. (2012) ont mis en avant l'enjeu majeur que représente la réflexion de la lumière du soleil par les toitures dans ce phénomène. Selon leurs travaux, l'augmentation de l'albédo d'1m<sup>2</sup> (en climat chaud ou tempéré) de 0,01, diminue la température globale à long terme de  $3 \times 10^{-15} \text{K}$ . Soit une réduction des émissions de CO<sub>2</sub> d'environ 6,5 à 7,5 kg CO<sub>2</sub>. Dans la mesure où Lazzarin & al. (2005) ont estimé qu'une toiture classique peut avoir un albédo de 0,1 tandis que l'albédo mesuré sur la toiture extensive étudiée est de 0,23, le potentiel des toits verts dans la diminution de l'effet d'îlot de chaleur urbain est manifeste.

Outre l'albédo, différents mécanismes sont à l'oeuvre pour limiter la surchauffe d'un toit vert (évapotranspiration, ombrage, convection...). Il est néanmoins reconnu qu'un toit humide arrosé est plus performant grâce à une augmentation de la réflexion et au phénomène d'évapotranspiration (Kolokotsa & al., 2013). Ainsi dans des climats chauds et secs, comme en Australie, Coutts & al. (2013) ont montré qu'un toit avec un albédo et une isolation élevée pourraient probablement être plus efficace pour limiter l'effet d'îlot de chaleur urbain sans engendrer une surconsommation d'eau nécessaire dans ces climats pour entretenir un toit vert.

Dans des climats tempérés, l'intérêt des toits verts est plus évident. A la Rochelle, Ouldboukhité et al. (2014) ont récemment montré que la température moyenne de l'air circulant en septembre dans des « canyons urbains » avec des toits verts était plus fraîche de 0,8°C que l'air circulant entre des bâtiments aux toits courants. Ainsi, les toits verts sont bénéfiques pour le confort intérieur mais aussi extérieur aux bâtiments. Néanmoins il est notable que ces chiffres significatifs sont issus d'une modélisation numérique permettant une végétalisation importante des toits. Parler de réduction de l'îlot de chaleur devient pertinent à partir d'une certaine proportion de toits verts. Une toiture verte isolée a un impact marginal sur le confort urbain global.

## Biodiversité

Presque une évidence, la diversité de la faune et la flore sur un toit vert est bien plus importante que sur un toit classique. Williams (2014), à travers sa revue de la littérature scientifique confirme cette affirmation mais met en garde contre les comparaisons hâtives entre les sols de plain pieds et les toitures vertes.

Plusieurs études montrent que les toitures vertes peuvent favoriser le développement de certaines espèces, comme par exemple les abeilles (Brenneisen, 2006). Williams (2014) souligne néanmoins que pour certaines espèces, les toits peuvent devenir des pièges écologiques selon leur proximité et leur accessibilité entre eux.

Tout comme pour la réflexion sur les îlots de chaleur, l'impact d'une toiture verte isolée est minime. Evoquer la biodiversité prend tout son sens lorsque cet argument est utilisé pour appuyer une réflexion de rénovation urbaine et de mise en réseau des espaces végétalisés

## Qualité de l'air et de l'eau

La ville en tant que zone de forte densité de population et d'activité doit faire face à des enjeux qui lui sont indissociables. La qualité de l'eau et de l'air font partie de ces enjeux. Currie & Bass (2008) à travers l'étude de plusieurs scénarios développés sur la ville de Toronto ont mis en avant une amélioration de l'air et notamment la diminution des PM10 (poussière en suspension) grâce aux toitures intensives. Celles-ci agissent comme un piège pour les différents polluants et particules fines puis les dégradent grâce au mécanisme de photosynthèse. Ils précisent que dans l'éventualité où une politique de toits verts était développée pour améliorer la qualité de l'air, il serait nécessaire de cibler un grand nombre ou une agrégation de toits pour apporter un impact significatif sur la qualité de l'air.

Dans une étude de 2006, Berndtsson et al. restent prudents à propos des toitures vertes pour améliorer la qualité de l'eau. Bien que la pluie ruisselant d'une toiture verte soit de meilleure qualité que la pluie ruisselant d'un toit « classique », elle reste chargée de nombreux polluants très souvent liés au type d'entretien de la toiture.

Ainsi les toitures vertes intensives peuvent s'avérer bénéfiques pour la qualité de l'air sous certaines conditions mais la prudence demeure de mise concernant le traitement des eaux de pluie. Concernant les toitures à végétation extensive, Berndtsson et al. (2006), estiment qu'il y a de nombreuses raisons d'implanter de tels toits dans un environnement urbain mais le traitement de la qualité des eaux pluviales n'en fait pas partie.

---

### c) Impact structural

Ainsi les toitures intensives peuvent paraître plus intéressantes au vue des différents avantages qu'elles procurent. Néanmoins dans le cadre d'une rénovation, certains arguments peuvent militer en faveur d'une toiture extensive. En effet, les toitures intensives nécessitent plus de maintenance et pour certaines régions, le besoin d'irrigation peut être très important lors des périodes estivales. Au-delà de ces deux arguments c'est généralement la capacité structurelle du bâtiment qui pose question. Grâce à l'intérêt porté aux toitures vertes, les innovations techniques ont permis d'alléger les surcharges entraînées par les complexes de végétalisation. Ainsi le CSTC, dans sa note technique de 2006 établit un consensus au niveau belge et des valeurs seuils de surcharge pour chaque catégorie. Il est intéressant de remarquer que dans ce même tableau (Tab. 2), la réalisation en rénovation des toitures intensives et semi-intensives semble compliquée mais n'est pas exclue. À l'inverse, pour une toiture extensive les aménagements semblent relativement simples à effectuer. Lassalle (2006) va plus loin et souligne que la surcharge entraînée par une couche de gravier (de 80 à 100kg/m<sup>2</sup>) est tout à fait comparable à la surcharge d'une toiture verte extensive. Ainsi une substitution de la toiture verte aux graviers est envisageable sans modification de la structure porteuse. Un autre cas intéressant présenté par le même auteur, est celui des toitures accessibles qui selon la norme doivent pouvoir encaisser une surcharge de l'ordre de 350 kg/m<sup>2</sup>. Ainsi en rendant les zones végétalisées inaccessibles, une végétalisation semi-intensive pourrait être envisageable.

Explicitement ou implicitement, les auteurs se restreignent généralement aux structures en béton armé. Or certaines techniques de végétalisation extensive sont développées pour des structures légères comme le bois ou l'acier. F. Lassalle souligne d'ailleurs des solutions existantes « *sur élément porteur en tôle d'acier nervuré [...] Il s'agit de l'élément porteur le plus utilisé pour les toitures des bâtiments industriels et commerciaux, ainsi que pour certains bâtiments de bureaux ou administratif* »(2006, p.33).

Il est alors légitime de se demander si les importantes surfaces en toitures des bâtiments industriels et commerciaux ne présentent-ils pas d'immenses enjeux de gestion des eaux, écologiques, environnementaux ou encore de santé publique aujourd'hui sous-estimés par les pouvoirs publics du point de vue des incitations mise en places? Afin de répondre à cette question dans le cas de la ville de Liège, nous nous attacherons dans un premier temps à estimer le gisement potentiel de toitures végétalisables dans un périmètre représentatif de la diversité du bâti liégeois. Puis nous étudierons précisément des typologies bâties de structures légères pour lesquelles la communauté scientifique reste généralement circonspecte.

### 3 - Des rénovations d'ampleur concluantes

#### a] En Europe

Les exemples de rénovations de grandes surfaces en toiture sont nombreux sur le vieux continent. En Allemagne, la première publication du guide pour la conception des toitures végétalisées par la FLL (Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau, qui peut se traduire en français par Groupe de recherche sur le développement et la réalisation de paysages) permet de mettre en place des standards et le développement d'un marché. Quelques années plus tard, la parution en 1987 de la loi fédérale de la protection de la nature (Bundesnaturschutzgesetz) affecta les normes constructives, obligeant tous les nouveaux projets à remplacer ou améliorer les paysages qui pourraient être modifiés par le projet, attisant ainsi l'intérêt porté aux toitures vertes.

Autre précurseur en terme de toits verts, la Suisse, et notamment le canton de Bâle qui fait aujourd'hui figure d'exemple mondial en termes de végétalisation des toitures. La loi oblige d'ailleurs tous les nouveaux toits plats construits en ville à être végétalisés. L'argument le plus récurrent en faveur de cette politique est de permettre une amélioration de la biodiversité en ville. Un des projets régulièrement cité en exemple dans la littérature scientifique est le RhyPark building. Une étude de Brenneisen (2006) a démontré la richesse de cette toiture en terme de diversité des espèces présentes.

La ville de Bâle va plus loin et ne s'intéresse pas seulement aux nouveaux projets. À l'image du dépôt des transports publics Bâlois situé au 7 Wiesenplatz construit 1907 et rénové en 2011. Initialement envisagée elle aussi pour favoriser la biodiversité, la toiture s'est avérée être excellente pour le confort acoustique des voisins en limitant la gêne engendrée par le trafic des tramways entrant ou quittant le dépôt.



©Dan Wenger

Figure 6: Dépôt Wiesenplatz BVB (Bâle).([naturetoit.blogspot.be](http://naturetoit.blogspot.be))



Il est intéressant de remarquer que les toitures vertes ne sont pas toutes mises en place pour les mêmes raisons. Ainsi le toit d'environ 10 000m<sup>2</sup> de l'Augustenborg Botanical Garden à Malmö permet de tester différents substrats, épaisseurs, essences, matériaux alternatifs... Ces toits accessibles au public ont avant tout un but expérimental et de sensibilisation du grand public. (Lindhqvist & Lifset, 2003)



Figure 7 : Augustenborg Botanical Garden (Malmö, Suède) .(www.trendhunter.com)

En France, le toit de la piscine Molitor a été rénové pour accueillir un bar-restaurant. Ce nouvel espace est conçu pour offrir aux parisiens un endroits calme, accueillant et surtout esthétique à travers une véritable réflexion sur les essences plantées.



Figure 8 : Piscine Molitor (Paris, France). (www.jardinsdefrance.org)

Ces quelques exemples montrent que selon le contexte, les objectifs d'implantation de toitures vertes peuvent différer mais celles-ci répondent aux attentes et parfois les supplantent à l'image de dépôt de tramway de Bâle. Ces réussites peuvent s'observer en Europe mais aussi sur d'autres continents.

## b] En Amérique du Nord

Comme le remarque Peck & Kuhn, en 2000, le changement des normes constructives en Ontario, au Canada, a permis d'augmenter considérablement la capacité structurale de nombreux bâtiments existants. Cette augmentation vient notamment de la charge de neige à prendre en compte :  $1,07 \text{ kN/m}^2$ , soit  $0,88 \text{ kN/m}^2$  de moins que les normes antérieures. Cette évolution normative compte parmi les facteurs favorisant les rénovations énergétiques d'envergures présentées ci-dessous.

Munby (2005) relève trois exemples pertinents, deux à Toronto (Canada) et un à Chicago (Etats-Unis). En 2000, La Mairie de Chicago (Chicago City Hall) avec sa toiture de  $1880 \text{ m}^2$  est utilisée comme un outil de démonstration pour lutter contre les îlots de chaleur urbains. La capacité portante du toit ayant été largement réévaluée grâce à la modification des normes, un mélange de zone de toitures vertes intensives et extensives a pu être mis en place. L'été suivant, en 2001, une différence de température de  $50^\circ\text{C}$  est relevée entre la surface du toit de la mairie et le toit de goudron noir du Cook County Building, un bâtiment voisin de la mairie. Annuellement, la quantité moyenne d'énergie économisée grâce à cette toiture verte est de  $9000 \text{ kWh}$ .



© Mark Farina

Figure 9: Mairie de Chicago (Etats-Unis). (landarchs.com)

À Toronto les surfaces mises en jeu sont moins importantes avec  $230 \text{ m}^2$  de toitures vertes pour le Toronto City Hall et  $460 \text{ m}^2$  pour le Eastview Neighbourhood Community Centre. Mises en place respectivement en 2000 et 2002, ces toitures accessibles recherchaient avant tout à offrir un espace expérimental et pédagogique. Les résultats sont néanmoins très concluants avec une économie d'énergie annuelle de  $25 \text{ kWh/m}^2/\text{an}$  pour le Toronto City Hall et de  $20 \text{ kWh/m}^2/\text{an}$  pour le Eastview Neighbourhood Community Centre.

---

### c] En Asie

En Asie et notamment dans les mégalopoles où la pression foncière est considérable, Wong & al. (2003) ont envisagé via la modélisation, 5 scénarios de rénovation d'une toiture de 966m<sup>2</sup> sur un bâtiment commercial existant à Singapour. Les résultats sont particulièrement significatifs avec une réduction de la consommation énergétique de 29MWh pour les toitures intensives à la végétation la plus luxuriante, soit quasiment 15% de réduction de la consommation initiale (200MWh). Pour des toitures extensives plus courantes, l'économie d'énergie est de 19 MWh, soit quasiment 10% de la consommation initiale.

Au Japon, Tokyo oblige les nouveaux projets de construction de plus de 1000m<sup>2</sup> à végétaliser au moins 20% de leur surface afin de limiter l'effet d'îlot de chaleur urbain, favorisant ainsi grandement les toitures vertes. (Liu & Baskaran, 2004). À terme l'objectif affiché de cette démarche est de baisser de 1°C la température du centre ville selon Dunnnett et Kingsbury (2008).

---

### d] Ailleurs dans le monde

En Amérique du sud, les toitures vertes pourraient avoir un intérêt particulier dans la gestion des eaux de pluies particulièrement abondantes dans ces climats subtropicaux. Face aux problèmes d'érosion des sols et d'inondations liées à la surcharge des réseaux durant les épisodes pluvieux, la capacité de déphasage et d'atténuation des pics de charge des toitures vertes est idéale. Cependant Dunnnett et Kingsbury (2008) soulignent d'autres barrières liées à la santé publique. La crainte d'attirer des moustiques porteurs de virus ou autres maladies comme la malaria dissuade largement les autorités de favoriser l'implantation de toitures vertes.

Finalement les toitures vertes offrent différents avantages plus ou moins marqués selon les climats. Même si les études ne portent pas sur l'ensemble des climats possibles, de nombreuses villes d'Europe, d'Asie et d'Amérique du Nord incitent et favorisent la mise en place de toitures vertes.

Chaque toiture verte offre différents avantages mais nous l'avons vu ci-dessus avec des avantages liés à la biodiversité ou encore la gestion des eaux de ruissellement, c'est bien la mise en réseau des toitures vertes, une réflexion globale qui permettra de tirer pleinement parti de chacune d'elles. Dans cette optique, certaines villes vont aujourd'hui plus loin que des « réflexions ponctuelles », restreintes à l'échelle d'un bâtiment et s'engagent sur des réflexions plus larges à l'échelle de l'aire urbaine, à l'image de Paris, Melbourne ou encore Sheffield.

## 4 - Des études similaires envisagées à grande échelle

---

### a] À Paris

En 2013, l'atelier parisien d'urbanisme (APUR), publia son rapport sur le potentiel de végétalisation des toitures-terrasses de Paris. Le constat est édifiant, la part des toitures végétalisées est faible avec 44 hectares, cela représente « à peine 1,4% des espaces verts » de Paris, et ce malgré la prise en compte des végétalisations en pots. Une première analyse cartographique a permis de mettre en évidence l'importance de l'âge des quartiers. A travers l'évolution des codes urbanistiques et des techniques de construction, les arrondissements périphériques concentrent actuellement 85% des toitures végétalisées.

Cette importance de la périphérie se retrouve dans l'analyse du potentiel. En croisant, des données sur la hauteur des bâtiments, des images infrarouges, des permis de construire, des photographies aériennes ou encore le nivellement de terrain, l'APUR a pu mettre en évidence 44 hectares de toitures végétalisées et un gisement de 460 hectares de toitures plates minérales essentiellement situé dans les arrondissements périphériques.

En ne conservant que les toitures de plus de 200m<sup>2</sup> avec une pente inférieure à 2% et « présentant un revêtement de surface laissant supposer une structure porteuse en béton et un encombrement minimum » (APUR, 2013, p. 9), l'APUR a pu « isoler un patrimoine de 80 hectares de toitures plates présentant un fort potentiel de végétalisation. » (2013, p. 9)

Il est intéressant de constater que malgré des critères relativement contraignants, cette étude a permis de dégager un gisement non négligeable qui permet aujourd'hui à la ville de Paris d'envisager des stratégies de végétalisation à plus ou moins long terme.

### b] À Melbourne

Bien que le climat soit complètement différent, l'approche utilisée et les préconisations de Wilkinson & Reed (2009) pour estimer le gisement potentiel de toitures végétalisables sont intéressantes.

Grâce aux logiciels comme Google Earth et Google street view, Wilkinson & Reed ont pu compléter leur base de données initiales et catégoriser le parc bâti existant selon différents critères.

- la pente : Les valeurs seuils retenues, en font le critère le moins discriminant. Selon ce critère, toutes les toitures de plus de 2% et de moins de 30° sont intéressantes.
- L'exposition : à travers l'orientation et surtout l'ombrage des bâtiments voisins, c'est le critère qui s'avère le plus discriminant en excluant approximativement 75% du stock bâti.
- la structure : en s'appuyant sur le consensus que les structures en béton armé supportent plus facilement une mise en place de toiture verte, Wilkinson & Reed écartent les structures légères. L'étude reste néanmoins prudente et reconnaît que même dans le cas d'une structure béton, une analyse structurelle reste nécessaire avant tous travaux.

Finalement après corrélation de ces critères, seuls 78 des 526 bâtiments de l'échantillon, soit 15%, semblent pertinents pour une étude approfondie en vue d'une végétalisation. Wilkinson & Reed (2009) estiment que c'est une faible proportion mais qu'un environnement plus périurbain, avec des bâtiments moins hauts, ou d'autres villes aux typologies différentes pourrait avoir un meilleur potentiel. Cette analyse rejoint le constat de l'APUR sur la ville de Paris, selon lequel le potentiel de végétalisation le plus important se situe dans les arrondissements périphériques de la ville qui ont été bâtis plus tardivement et donc avec des techniques plus modernes.

---

### c] À Sheffield et au Royaume-Uni

À l'image de Liège, Sheffield (Royaume-Uni) est marqué par un passé industriel. Aujourd'hui sa reconversion est largement entamée en s'appuyant sur une économie de la connaissance mais aussi à travers la modification de son image. Dans ce contexte de reconversion urbaine, les travaux de Munby (2005) sur les toitures végétalisées prennent tout leur sens.

Sa réflexion est d'autant plus intéressante que contrairement aux deux études présentées ci-dessus c'est la structure des bâtiments qui est la base de l'étude. Ses travaux, repris et approfondis plus tard par Castletown & al. (2010), soulignèrent que l'application des Eurocodes au Royaume-Uni dégage un potentiel structurel pour les bâtiments antérieurs à l'application des Eurocodes.

Les Eurocodes sont basés sur une méthode de calcul semi-probabiliste. Cette méthode repose sur l'utilisation de facteurs de sécurité appliqués, d'une part, à la résistance des éléments structurels et d'autre part aux actions ou charges qu'ils subissent. Selon Castletown & al. (2010), c'est une modification des valeurs des coefficients de sécurité appliqués aux charges qui permet de dégager un potentiel structurel pour les bâtiments construits avec les normes britanniques antérieures aux Eurocodes. Alors que les Eurocodes utilisent un coefficient de 1,35 pour les charges permanentes et un coefficient de 1,5 pour les charges variables (vent et neige entre autres), les anciennes normes britanniques (British Standards) utilisaient respectivement des coefficients de 1,4 et 1,6. Autrement dit, les valeurs des coefficients ayant été diminués, c'est la charge théorique prise en compte qui diminue. Par conséquent, une charge réelle plus lourde peut être appliquée au bâtiment sans dépasser la charge théorique pour lequel le bâtiment a été dimensionné sous les anciennes normes.

Les méthodes de calculs utilisées ne permettent pas de chiffrer exactement et de manière globale le nombre  $\text{kg/m}^2$  ou le % résistance « supplémentaire » acquis par l'ensemble des bâtiments construits avant l'application des Eurocodes. Le changement de prise en compte des charges de neiges qui permet à chaque bâtiment britannique construit avant les eurocodes de supporter  $0,15\text{kN/m}^2$  en plus, fait figure d'exception.

Plus largement, Munby, en 2005, à travers un cas d'étude portant sur un bâtiment typique des années 60-70 avec une structure acier, a pu évaluer ce potentiel structurel inutilisé à  $2,99\text{kN/m}^2$  soit environ  $305\text{ kg/m}^2$  sous certaines conditions. Pour rappel, le CSTC, considère que les toitures semi-intensives pèsent plus de  $100\text{ kg/m}^2$ .

## 5 - Conclusions de l'état de l'art et intérêt de l'étude

Les toitures vertes en climat tempéré ont aujourd'hui largement fait leurs preuves. La revue de la littérature et des études menées permettent de quantifier les différents avantages de ces toitures pour chaque bâtiment comme l'amélioration du confort acoustique ou la diminution de la consommation énergétique. Lorsque des stratégies plus globales de végétalisation sont envisagées, des enjeux supplémentaires peuvent entrer en ligne de mire. Parmi ces enjeux, la gestion de l'eau et le dimensionnement du réseau d'égouttage, la diminution des îlots de chaleur ou encore le retour de la biodiversité en ville. La plupart dépassent les intérêts privés et influent directement sur la qualité de vie en ville. Dès lors l'intérêt porté sur ces études urbaines par des villes comme Paris ou Sheffield est compréhensible.

Parmi ces études certains critères sont récurrents pour caractériser les toitures à fort potentiel en termes de végétalisation. Les toitures à faible pente, dites plates, l'exposition ou encore la superficie sont de bons indicateurs. Néanmoins, il est étonnant que l'indicateur probablement le plus fondamental ne soit questionné que dans les travaux menés au Royaume-Uni. Ces travaux sont les seuls à s'intéresser à la structure et à corréliser l'évolution des normes et les progrès techniques allégeant les complexe de végétalisation pour envisager des structures jusqu'ici écartées des études: les structures légères et notamment les structures en acier.

Ces structures ont particulièrement marqué les villes de l'ère industrielle. Avec l'évolution du cadre réglementaire et les progrès concernant le confort des usagers effectués depuis cette ère, la plupart de ces bâtiments nécessitent d'être rénovés. C'est donc cohérent que des villes comme Sheffield soient motrices dans la réflexion sur les structures en acier.

Alors que la ville de Liège revoit sa réflexion sur la mise en réseau des espaces verts à travers la mise à jour du Plan Communal du Développement de la Nature (PCDN)(parution prévue courant 2017), certains quartiers apparaissent comme étant plus nettement dépourvus d'espaces végétalisés. Parmi ces quartiers certains présentent les traces du passé industriel liégeois mais aussi d'un développement économique plus récent.

La rive est de Liège, entre la dérivation de la Meuse et la colline de la Chartreuse rassemble plusieurs de ces quartiers. Cet échantillon représentatif de la diversité du bâti liégeois sert de terrain d'étude à ce travail.

Quels qu'ils soient, les résultats tenteront dans leur modeste mesure d'alimenter la réflexion constante de la ville de Liège sur ses stratégies d'amélioration du cadre urbain.



## II - Etude de la rive Est de Liège

# 1 - Méthodologie

## a] Cadre théorique

Analyser bâtiment par bâtiment les capacités structurales des 9586 entités n'a à aucun moment été envisagé pour des raisons pratiques évidentes. Cette situation est appelée structure conventionnelle ou close par Pirès en 1997. Dans cette structure de recherche empirique « *la situation du chercheur est telle qu'il lui est impossible d'étudier toute sa population et qu'il décide d'en prélever un échantillon bien défini* » (Pirès, 1997, p. 13). Derrière la notion d'échantillon, Pirès y voit « *l'idée de considérer une petite quantité de quelque chose pour éclairer certains aspects généraux du problème* » (1997, p. 19). Dans le cas de ce travail, c'est une analyse plus approfondie de quelques bâtiments qui permettra de valider ou réfuter certaines hypothèses sur ces cas pour ensuite colorer une approche plus générale sur les potentialités de végétalisation en rénovation urbaine.

De manière plus pragmatique Schwandt (1997) cité par Savoie-Zajc, synthétise le processus d'échantillonnage à travers la prise de deux types de décisions: « *choisir un site et ensuite échantillonner à l'intérieur de ce site en fonction des considérations avancées précédemment.* » (2006, p.101) Le schéma suivant propose une interprétation de cette assertion dans le cadre de ce travail de fin d'étude.

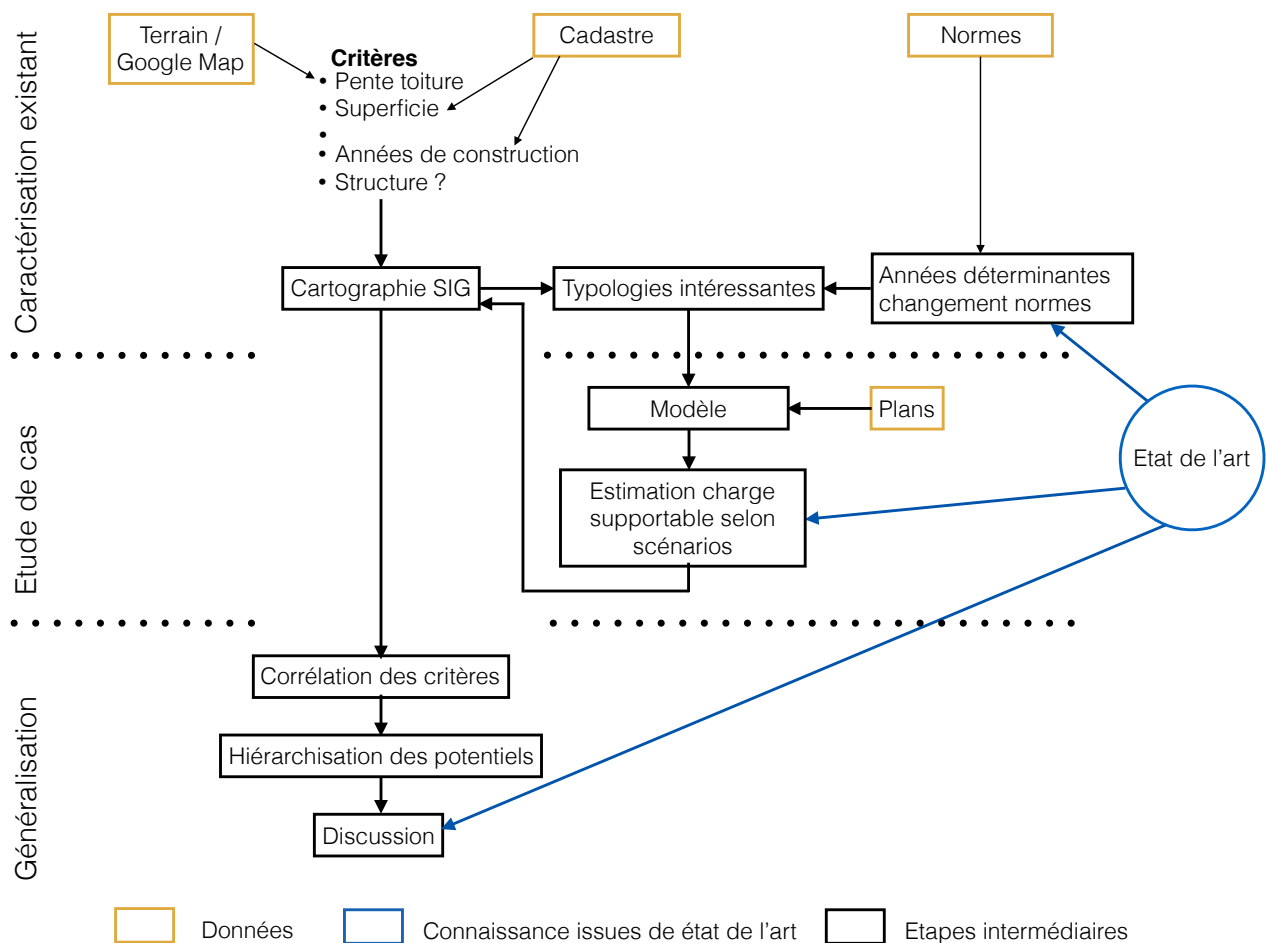


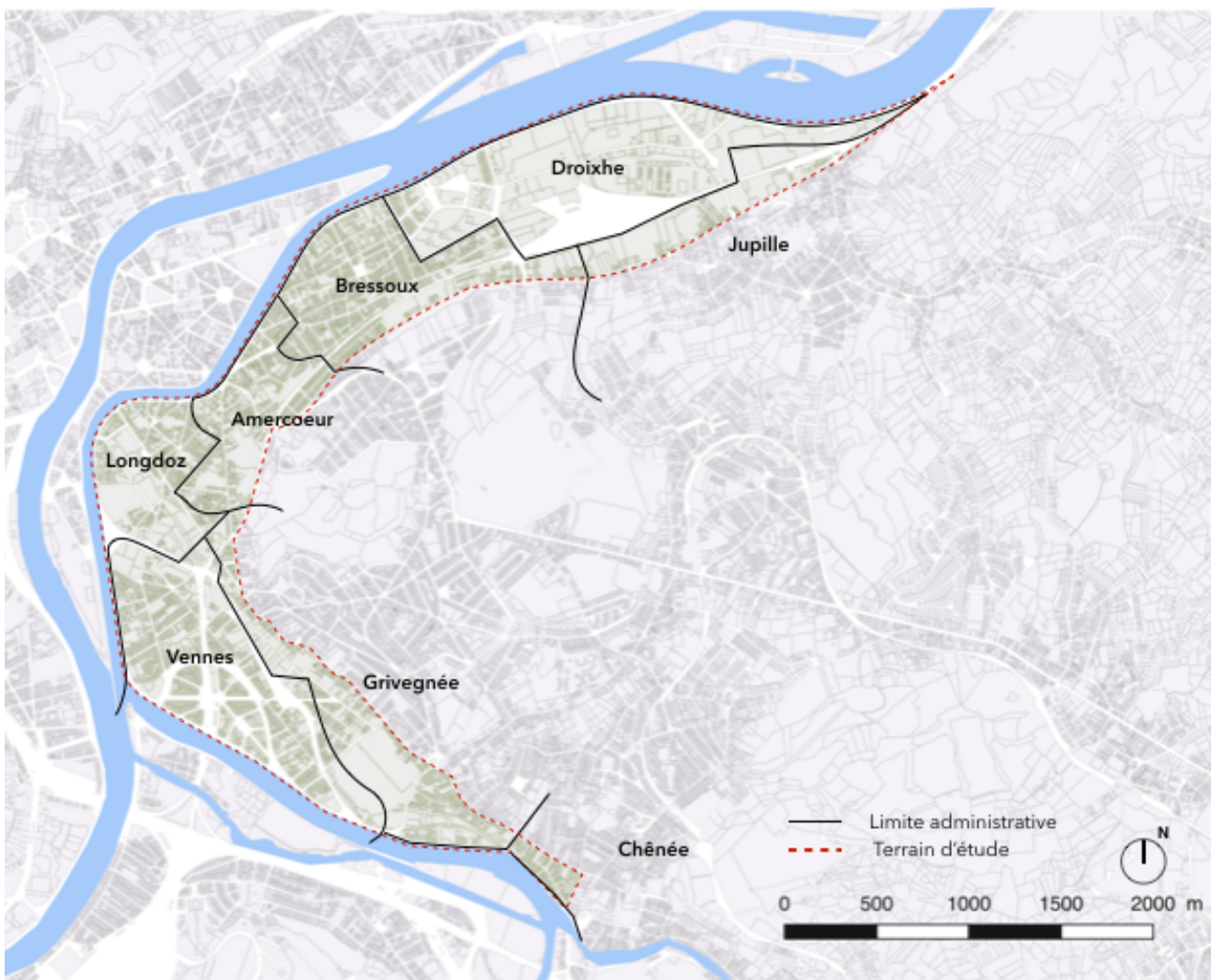
Figure 10: Schéma organisationnel du travail de fin d'étude



L'état de l'art permet de cadrer la problématique et d'émettre certaines hypothèses. Dans le cadre de ce travail, il met notamment en lumière les critères pertinents pour caractériser le potentiel des toitures et ceux qui peuvent être remis en question. La première partie du travail s'attache à caractériser le site d'étude à travers une analyse cartographique basée sur ces critères. En parallèle une étude des normes constructives belges et de leur évolution permet de catégoriser les bâtiments liégeois. Ensuite, l'étude de cas issus des typologies établies, valide, nuance ou invalide les hypothèses formulées remettant en question certains critères. Les conclusions de ces études sont retranscrites dans la cartographie SIG puis croisées avec les autres critères retenus. Une carte synthétise finalement le travail effectué et la hiérarchisation des potentiels de végétalisation. Ce document permet d'ouvrir une discussion et des perspectives développées dans la dernière partie de ce travail de fin d'étude.

## b] Terrain d'étude

Dans un premier temps nous nous intéresserons à l'échelle de la ville de Liège et plus précisément sa rive Est. Le terrain d'observation retenu permet d'optimiser tous les avantages des toitures vertes évoqués précédemment. La superficie de ce terrain est d'environ 450 hectares.



Carte 1: Terrain d'études et limites administratives des quartiers

La plupart des quartiers de la rive Est sont relativement dépourvus d'espaces verts et notamment d'espaces verts publics (Cf Carte 2). L'absence d'espace végétalisé et l'urbanisation dense de la zone d'étude, entraînent une rupture dans l'écosystème mosan ainsi qu'un risque accru d'effet d'îlot de chaleur.

Droixhe est le seul quartier du site à posséder un véritable parc, celui-ci se prolonge aux pieds des tours d'habitation. La présence du végétal dans l'espace public s'observe aussi dans les Venues, grâce notamment aux alignements d'arbres, aux espaces enherbés le long des quais et au milieu des boulevards de Froidmont et Emile de Laveleye. En comparaison, du reste de l'agglomération liégeoise, cette présence du végétal reste très limitée et la zone d'étude ressort particulièrement par sa minéralité et l'imperméabilisation importante de ses sols.



*Carte 2: Présence du végétal dans l'espace public*

Au-delà des espaces publics végétalisés, la flore peut se développer dans les coeurs d'îlots à l'image de la majeure partie des Venues (Cf Carte 3). Le développement d'habitations avec jardins a permis de maintenir une certaine flore et des surfaces perméables. Ce n'est pas le cas sur l'ensemble du terrain d'étude. Droixhe et le boulevard de Froidmont, malgré la présence d'un parc et d'espaces enherbés, ont une part plus importante de leur sol qui est imperméabilisée. Cela s'explique par le développement de l'économie locale dans ces zones qui a favorisé des constructions de grandes superficies souvent accompagnées de parkings ou d'aires de manœuvres asphaltées.

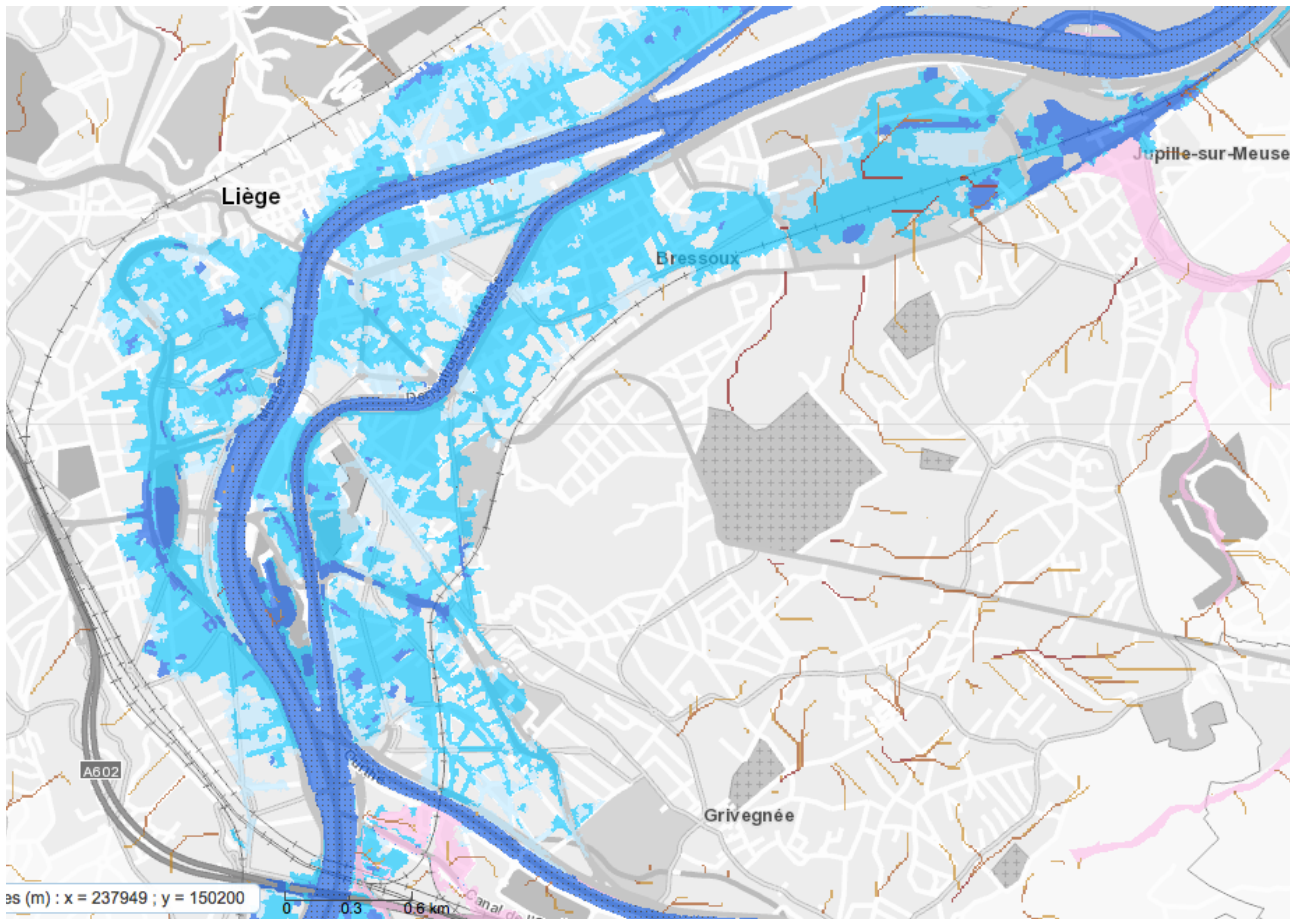


Carte 3: Orthophotoplans à infrarouges, Vennes et Boulevard de Froidmont (Service public de Wallonie, 2015 )



Carte 4: Orthophotoplans à infrarouges, Droixhe (Service public de Wallonie, 2015)

La question de la gestion des eaux de pluie est loin d'être anecdotique dans cette plaine alluviale remaniée par l'homme. La carte des zones inondables du Service Public de Wallonie (Cf Carte 5) illustre parfaitement les enjeux et permet de mieux comprendre le rôle des stations de pompage et les risques encourus en cas de surcharge du réseau lors d'un événement pluvieux important. Les coeurs d'îlots perméables aux eaux de pluies existent mais la pression foncière et l'ère industrielle y ont entraîné l'implantation de nombreuses entreprises limitant ainsi l'inertie et la capacité d'absorption des eaux de pluie du terrain d'étude.



**Légende**

Scénario de période de retour extrême  
Ruissellement

- Débit de pointe faible
- Débit de pointe moyen
- Débit de pointe élevé

Débordement (hauteur d'eau)

- Indéterminée
- Entre 0 et 0,3m
- Entre 0 et 0,3m avec vitesse supérieur à 1m/s
- Entre 0,3 et 1,3m
- Entre 0,3 et 1,3m avec vitesse supérieur à 1m/s
- Supérieure à 1,3m
- Supérieure à 1,3m avec vitesse supérieur à 1m/s

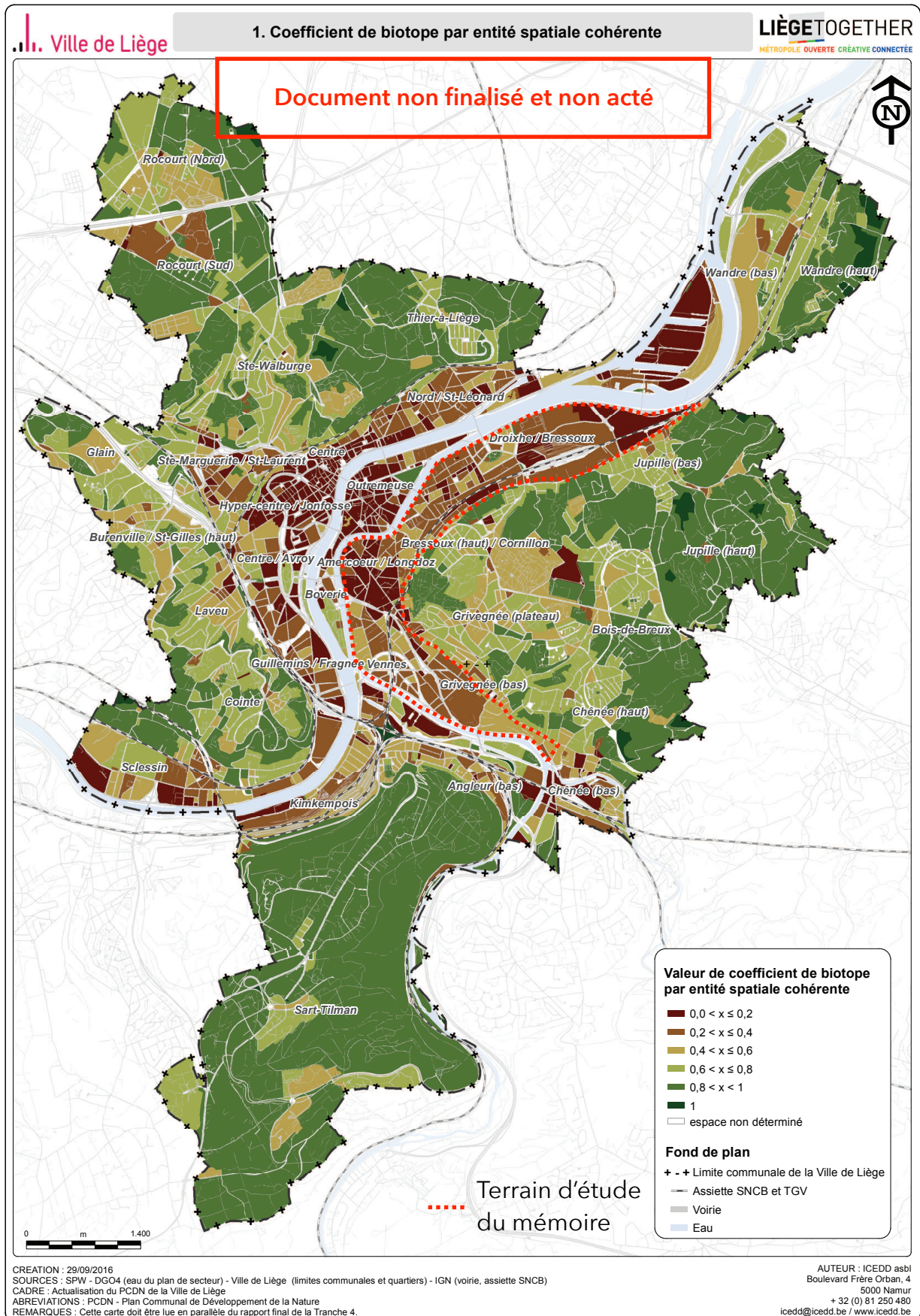
Carte 5: Zones inondables, scénario de période de retours extrême, Liège (Service public de Wallonie, 2017)

Un indicateur mis au point à Berlin et aujourd’hui en cours d’étude sur Liège, synthétise ces enjeux d’imperméabilisation des sols, et de support des écosystèmes: le coefficient de biotope par surface (CBS). Ce dernier attribue à chaque type de surface, un coefficient allant de 0 à 1 ([www.stadtentwicklung.berlin.de](http://www.stadtentwicklung.berlin.de)). 0 étant pour les surfaces imperméables (ex : asphalte) et 1 étant attribué aux espaces verts en pleine terre. Parmi les différentes surfaces, les toitures vertes présentent un coefficient relativement élevé de 0,7. Le CBS se calcul alors de la manière suivante:

$$CBS = \frac{\sum_i S_i \times \text{coeff}_i}{S_{\text{totale}}}$$

Où S: surface (m<sup>2</sup>)

La ville de Liège, dans le cadre de ce travail, a accepté de fournir une carte synthétique de l'état d'avancement de ses travaux pour illustrer l'intérêt du site d'étude. Ce document n'est pas finalisé et donc non acté.



Carte 6: Travail en cours de la ville de Liège sur le coefficient de biotope par surface

À travers cet indicateur synthétique, le site ressort nettement en rassemblant toutes les surfaces l'Est de la Dérivation avec un CBS perfectible. Une amélioration qui peut passer entre autres, par la végétalisation des toitures que le CBS valorise particulièrement.

Ces premières remarques sur la diversité bâtie, la part majeure des sols imperméabilisés, les enjeux pour le confort urbain et la biodiversité font de la rive Est de Liège, un terrain d'étude idéal pour évaluer le potentiel et l'intérêt d'une végétalisation des toitures. Afin de traiter correctement et efficacement la masse de données récupérées pour ce site relativement conséquent les systèmes d'information géographiques (SIG) sont particulièrement utiles.

---

### c] Cartographie SIG

Les différentes informations supportant l'analyse et les perspectives développées dans ce mémoire ont été rassemblées, corrélées et interprétées à l'aide du logiciel Quantum GIS (Version 2.14). Il a permis la construction d'un système d'information géographique (SIG). Cette cartographie SIG de la rive droite basée sur les informations du Cadastre de 2010, des observations de terrains et des vues Google Earth et Google Streetview datant de la période allant d'octobre 2013 à juillet 2014 permet de rassembler pour chaque bâtiment :

- son année de construction (source cadastrale)
- son emprise au sol (source cadastrale)
- la pente du toit (observations de terrain et images satellites)

Afin de dégager une cartographie des toitures « aisément » végétalisables, le dernier paramètre concernant la pente du toit est traité de manière binaire : Le toit est-il plat ou non ? Pour répondre à cette question, c'est la toiture du volume principal qui est considérée. Toute toiture de pente inférieure à 5% est assimilée à une toiture plate.

Le lecteur peut remarquer que le critère caractérisant l'exposition au soleil des toitures n'est pas retenu. Utilisé dans les travaux de Wilkinson & Reed (2009), il s'est avéré extrêmement discriminant dans le contexte du centre d'affaires de Melbourne. Pour le cas de Liège, il y a probablement quelques toitures à l'ombre mais leur nombre reste limité grâce à des gabarits de construction plus modérés. De plus, Wilkinson & Reed étudient un panel de toitures plus large avec des pentes allant de 2% à 30°. En restreignant l'étude aux toitures avec des pentes inférieures à 5% dans un contexte où les hauteurs des bâtiments restent relativement raisonnables, la notion d'exposition semble moins pertinente.

Ce travail de caractérisation du bâti permet d'identifier les typologies les plus intéressantes pour une rénovation énergétique et plus précisément l'implantation d'une toiture verte.

### d] Analyse structurelle

Sur la base des typologies les plus pertinentes issues de la cartographie SIG, cette analyse simplifiée vise à évaluer des possibilités de végétalisation des toitures. Au cours du XX<sup>ème</sup> siècle, les normes ont largement évolué et à l'image de Castletown & al. (2010) au Royaume-Uni, il semble opportun de se demander si la capacité portante de certains bâtiments n'est pas aujourd'hui sous-utilisée au regard des Eurocodes actuellement en vigueur. Pour répondre à cette question deux approches permettent d'apporter des éléments de réponses.

Une première approche retrace l'évolution des normes. Alors que les études précitées écartent automatiquement les structures légères type acier, elles sont ici réexaminées ainsi que les normes concernant les structures en béton et la prise en compte du vent. Dans ces domaines, les connaissances et les modèles mathématiques ont largement évolué au XX<sup>ème</sup> siècle. Il est donc légitime de s'interroger sur les différences entre les constructions de début du XX<sup>ème</sup> siècle et celles d'aujourd'hui.

Une telle analyse permet une approche globale très intéressante dans le cadre de ce rapport. Malgré une certaine inertie entre la publication des normes et l'application sur le terrain, ce rapport pose le principe que la date de publication fait foi dans le changement des méthodes de construction et de dimensionnement. Les années marquant une évolution majeure permettent d'établir une catégorisation des bâtiments par année de construction.

Cette première phase n'a pas pour but de chiffrer exhaustivement les différences entre les multiples versions de chaque norme. Travail d'autant plus complexe lorsque des modes de pensée sont complètement remis en question à travers des modifications normatives majeures. Dès lors comment justifier le regain d'intérêt pour les structures métalliques?

Une seconde approche vient compléter cette observation du cadre réglementaire. Elle consiste en une étude de vérification du dimensionnement basée sur les Eurocodes en vigueur. Cette vérification est réalisée sur 3 bâtiments. Chaque bâtiment a été construit dans un cadre normatif et réglementaire différent afin de colorer au mieux les potentiels de chaque typologie. Cette vérification sera réalisée pour plusieurs scénarios. L'existant évidemment, mais aussi 6 autres scénarios testant différentes typologies de toitures vertes. Les 6 scénarios se différencient par la charge supplémentaire en toiture (Tab. 3).

Toiture verte...	extensive			semi-intensive		intensive
Scénarios	n°1	n°2	n°3	n°4	n°5	n°6
Surcharges liées à l'implantation d'une TV (kg/m <sup>2</sup> )	50	80	100	150	200	400

Tableau 3 : Surcharges par scénarios de végétalisation

## 2 - Liège rive droite, quartier aux multiples visages

Le site d'étude, entre la dérivation et la colline de la chartreuse est relativement vaste et permet d'apprécier un panel de typologies bâties et de formes d'urbanisations variées retraçant le passé industriel de Liège mais aussi sa métamorphose au cours des dernières décennies. Pour ne citer que quelques uns des ces visages nous pouvons évoquer, au nord, Droixhe marqué par ses halles industrielles plus ou moins récentes et ses tours d'habitations des années 70, le Longdoz, épice de l'urbanisation de la rive Est mais aujourd'hui, associé irrémédiablement à la Médiacité ou encore les Vennes traversées par le boulevard de Froidmont plus communément appelé «Boulevard de l'automobile».

Ses éléments symboliques peuvent fausser les enjeux perçus pour chaque quartier. Dans ce chapitre, chacun des critères est étudié indépendamment des autres. Les cartographies et analyses de données permettent d'objectiver les perceptions et de construire une méthode reproductible sur d'autres terrains d'étude.

### a] Quelles surfaces?

Une approche quantitative permet de confirmer cette impression de diversité observée sur le terrain d'étude. Le premier indicateur le plus exhaustif en terme de données et peut être le plus significatif est celui des surfaces bâties. Avec plus de 9500 entités traitées (9586 exactement), la surface moyenne par toiture est d'environ 160m<sup>2</sup> mais l'écart-type de plus de 792 m<sup>2</sup> indique une grande diversité parmi les typologies.

Une autre manière d'aborder cette diversité est de constater que les 100 plus grandes toitures de la rive Est de Liège représentent 30% de la surface totale des toits de cette même zone.

Le graphique ci-dessous exprime la répartition des 981 toitures de plus de 200m<sup>2</sup> présentes sur le terrain d'étude, par intervalle de surface.

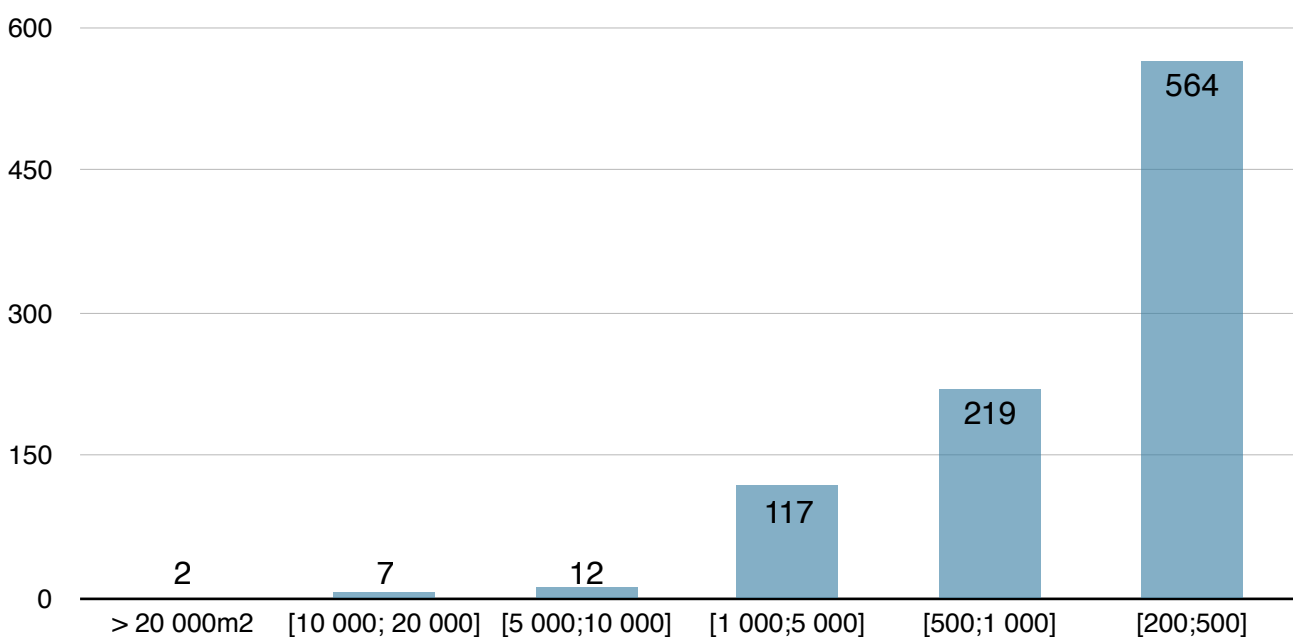


Figure 11: Nombre de toitures par intervalle de surface



Géographiquement, les grandes surfaces sont essentiellement localisées le long du boulevard de Froidmont et au nord auprès de la gare de Bressoux, comme le montre la carte n°1. Néanmoins, plusieurs grandes surfaces bâties sont disséminées dans les îlots en dehors des ces deux zones. Certaines de ces constructions sont des écoles, des établissements religieux ou encore l'hôpital, mais les établissements privés sont loin d'être minoritaires dans ces quartiers marqués par leur passé industriel. Les îlots complètement dépourvus de grandes surfaces construites sont rares. Au nord d'Amercoeur et dans les Vennes la densité de surfaces de plus de 1000 m<sup>2</sup> est tout de même plus faible et peut s'expliquer par la taille moyenne des îlots plus petits dans ces zones, facteur corrélé à une densité d'habitations élevée.



Carte 7: Localisation des grandes surfaces bâties

## b] Gisement de toitures plates

Les techniques actuelles permettent de végétaliser des toitures plates mais aussi des murs et des toitures en pente. Cependant les mises en oeuvre les plus simples et les mieux maîtrisées restent sur les toitures plates. Afin de hiérarchiser les potentiels de végétalisation selon les toitures, le critère de pente maximum utilisé dans d'autres études présentés précédemment est repris ici. La pente maximum pour une toiture dite « plate » est fixée à 5%.

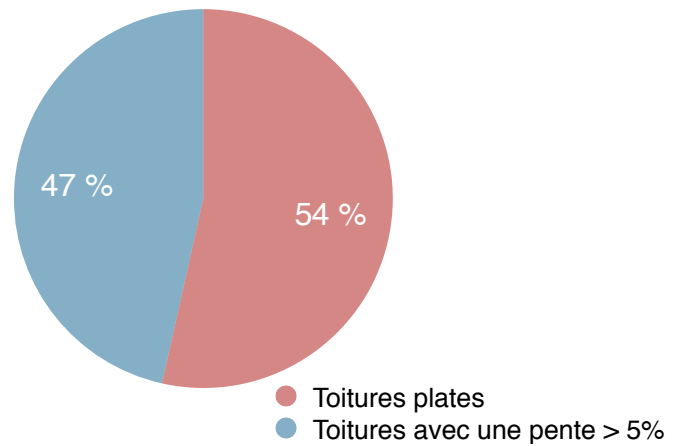
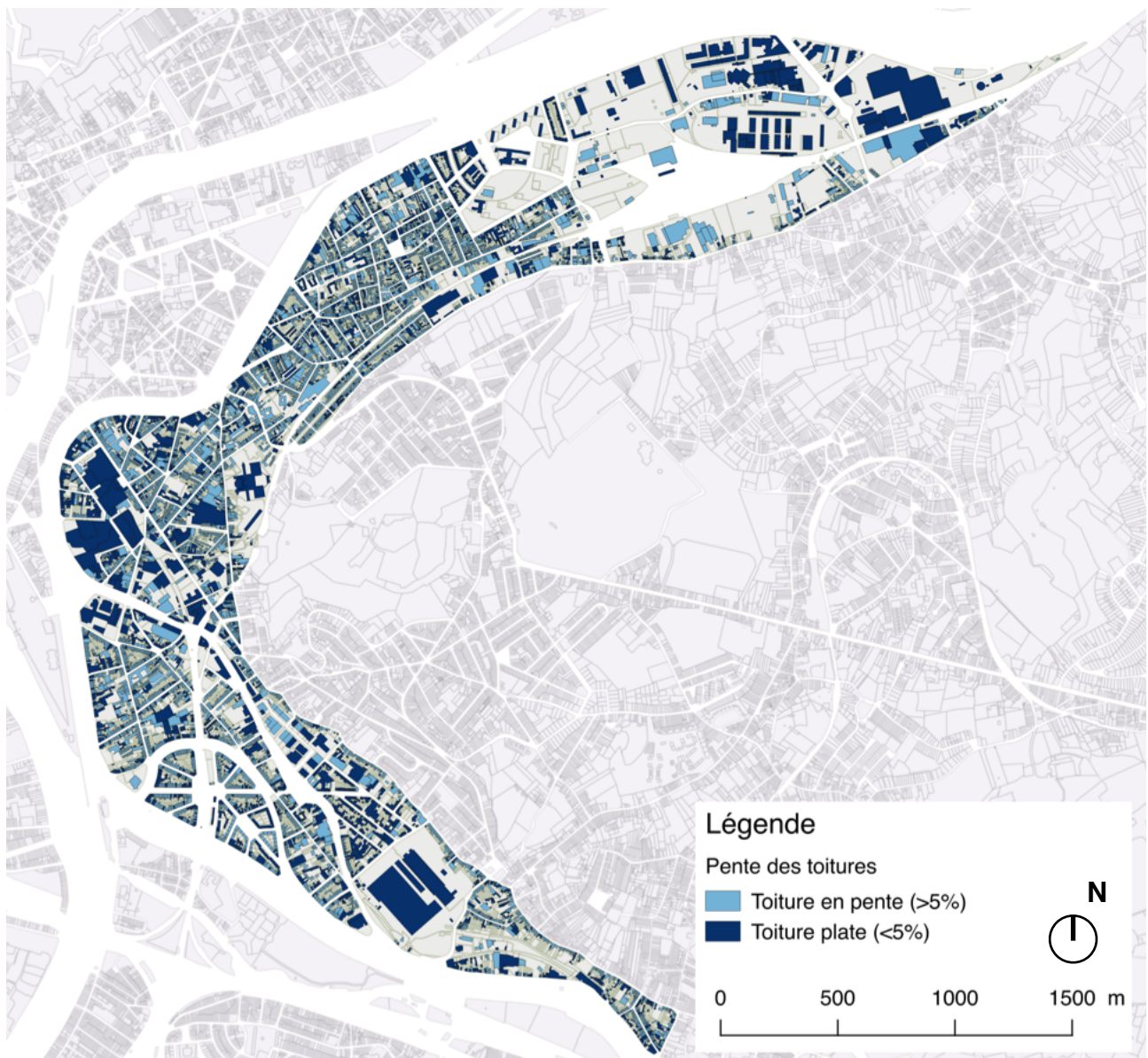


Figure 12: Répartition toits plats et toits en pente pour la rive Est de Liège



Carte 8: Répartition toits plats et toits en pente pour la rive Est de Liège

A travers ce filtre « binaire » qu'est ce critère de pente, le site présente un visage extrêmement intéressant. Les toitures plates, sont en terme de surfaces, majoritairement présentes. Elles représentent une surface d'environ 82 hectares soit 53,5% des 153 hectares de toitures du terrain d'études. Bien que de nombreuses habitations à toitures plates existent, cette surface de toits plats conséquente s'explique notamment par la présence de nombreux entrepôts, halles industrielles et autres grandes surfaces.

Ainsi parmi les 100 plus grandes toitures de la zone (surface > 1675m<sup>2</sup>) qui représentent à elles seules 30% de la surface totale des toits, 68 sont plates. Chiffre encore plus frappant : 9 des 10 plus grandes toitures de la rive Est de Liège (>8000m<sup>2</sup>) sont des toitures plates.

D'un point de vue méthodologique, il est important de souligner que pour un volume composé de plusieurs toitures, c'est la toiture du volume principal qui détermine la toiture de l'ensemble du bâtiment. Cette simplification est discutable et sera discutée dans le chapitre III - Analyse des résultats.

### c] Un bâti ancien?

Au delà des morphologies, les années de constructions sont aussi très variées. Le cadastre 2010 fournit une base de donnée importante mais incomplète puisque 8957 des 9586 entités ont leur année de construction renseignée.

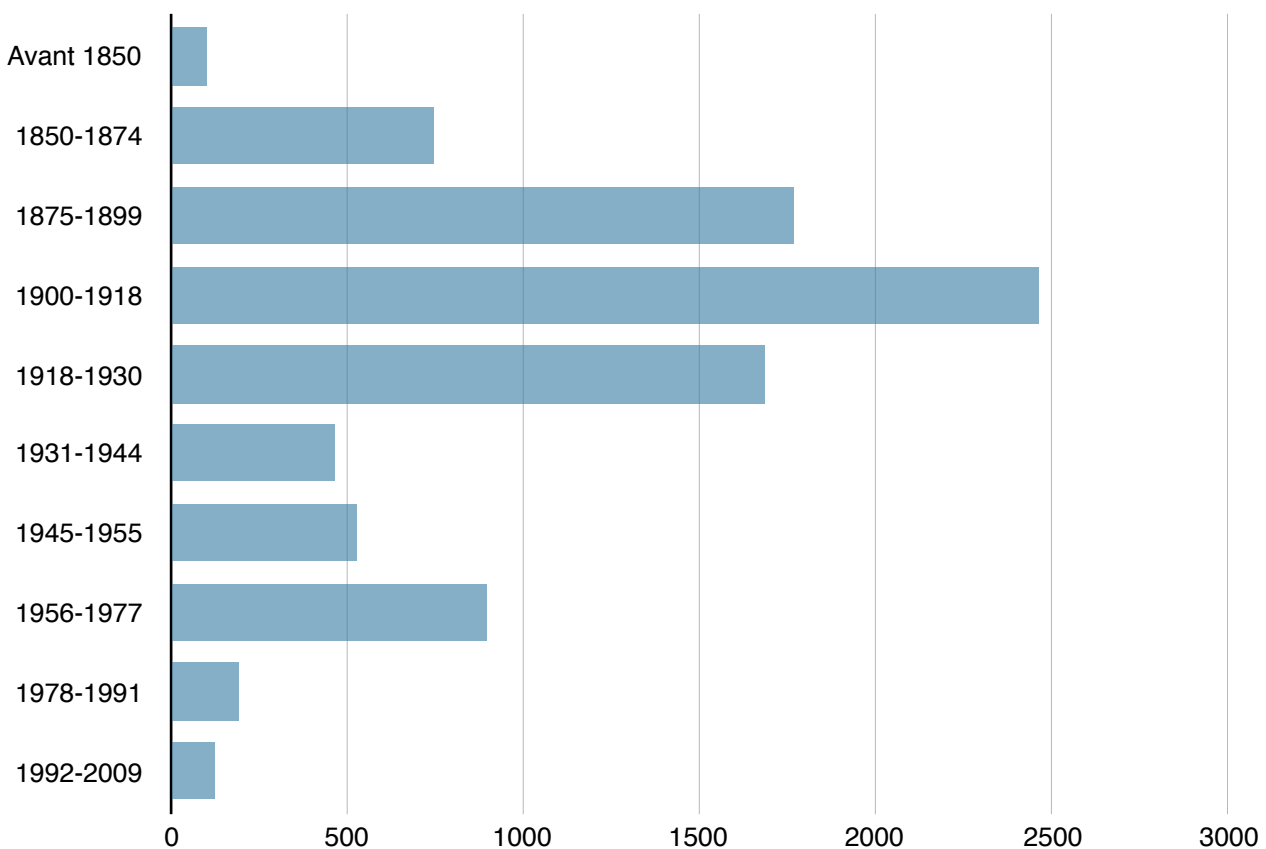
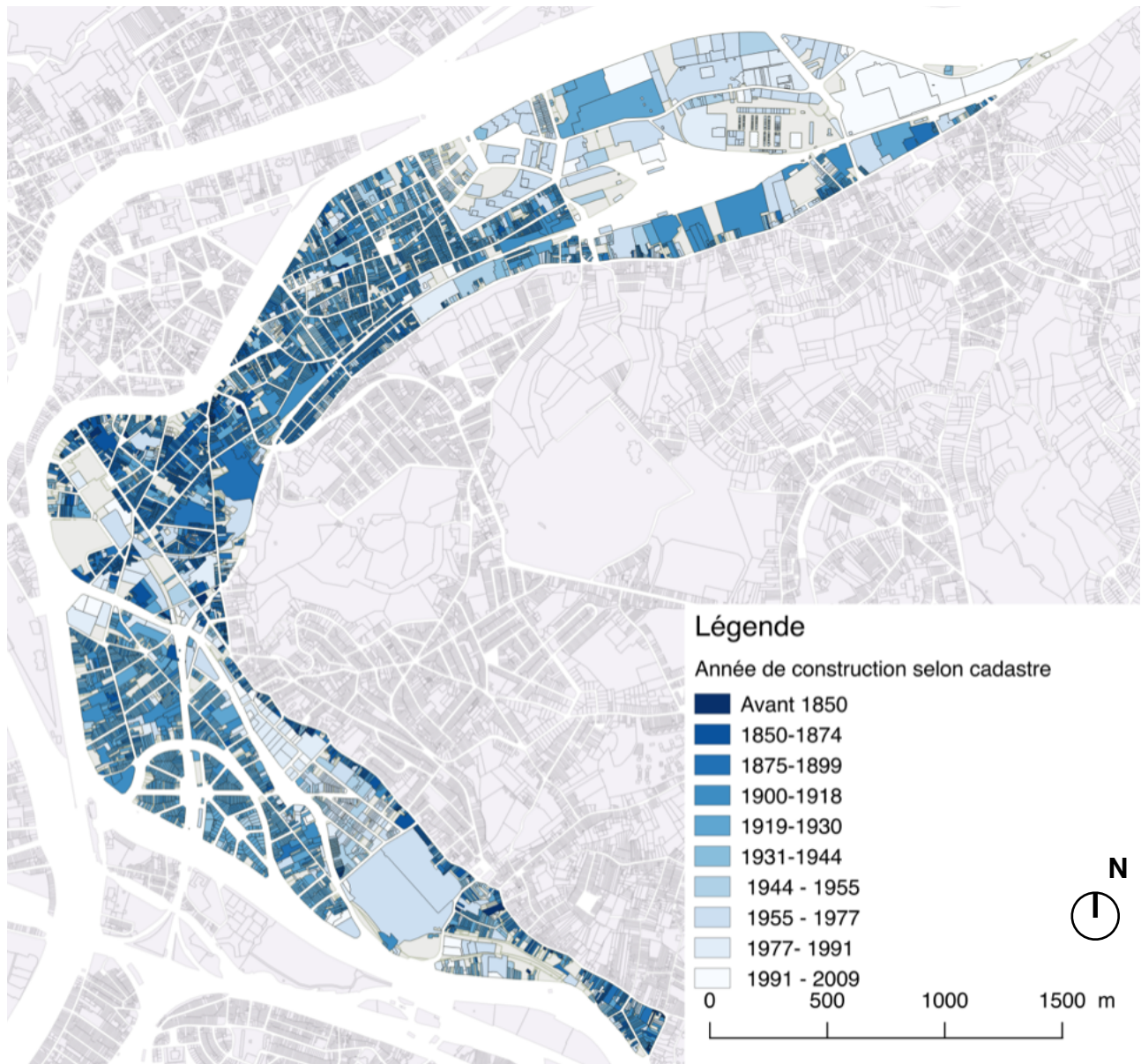


Figure 13: Nombre de parcelles construites par période

Diverses hypothèses émises par des acteurs rencontrés au cours de ce travail peuvent expliquer pour partie ces données lacunaires. Une perte d'information lors de la fusion

des communes fût ainsi évoquée. Une autre hypothèse concerne une communication perfectible entre le service cadastral et le gouvernement wallon lorsque celui prend directement en charge les projets via l'article 127 du CWATUP (Code Wallon de l'Aménagement du Territoire, de l'Urbanisme, du Patrimoine). Une cartographie des parcelles concernées par ces données lacunaires est disponible est commentée dans l'analyse des résultats (III-1) mais leur localisation ne permet pas de conclure de façon probante. De plus l'objectif diffère de celui de notre étude et les données disponibles fournissent déjà un échantillon représentatif.



Carte 9: Catégorisation par années de construction des bâtiments de l'échantillon

La justification des périodes sera précisée dans le chapitre suivant sur les normes et l'évolution du cadre réglementaire dans la construction. Le graphique (Fig. 13) permet déjà de mettre en évidence la part du bâti ancien non négligeable vis à vis du bâti des 40 dernières années. L'essor économique de la révolution industrielle puis plus tard des « Trente glorieuses » se retranscrit sur ce diagramme par un nombre considérable de constructions nouvelles durant ces périodes.

Le diagramme (Fig. 14) présente la répartition des années de construction de manière plus détaillée. Avant 1931 le cadastre ne fournit pas les dates précises de construction mais regroupe dans une même catégorie les bâtiments d'une même période.

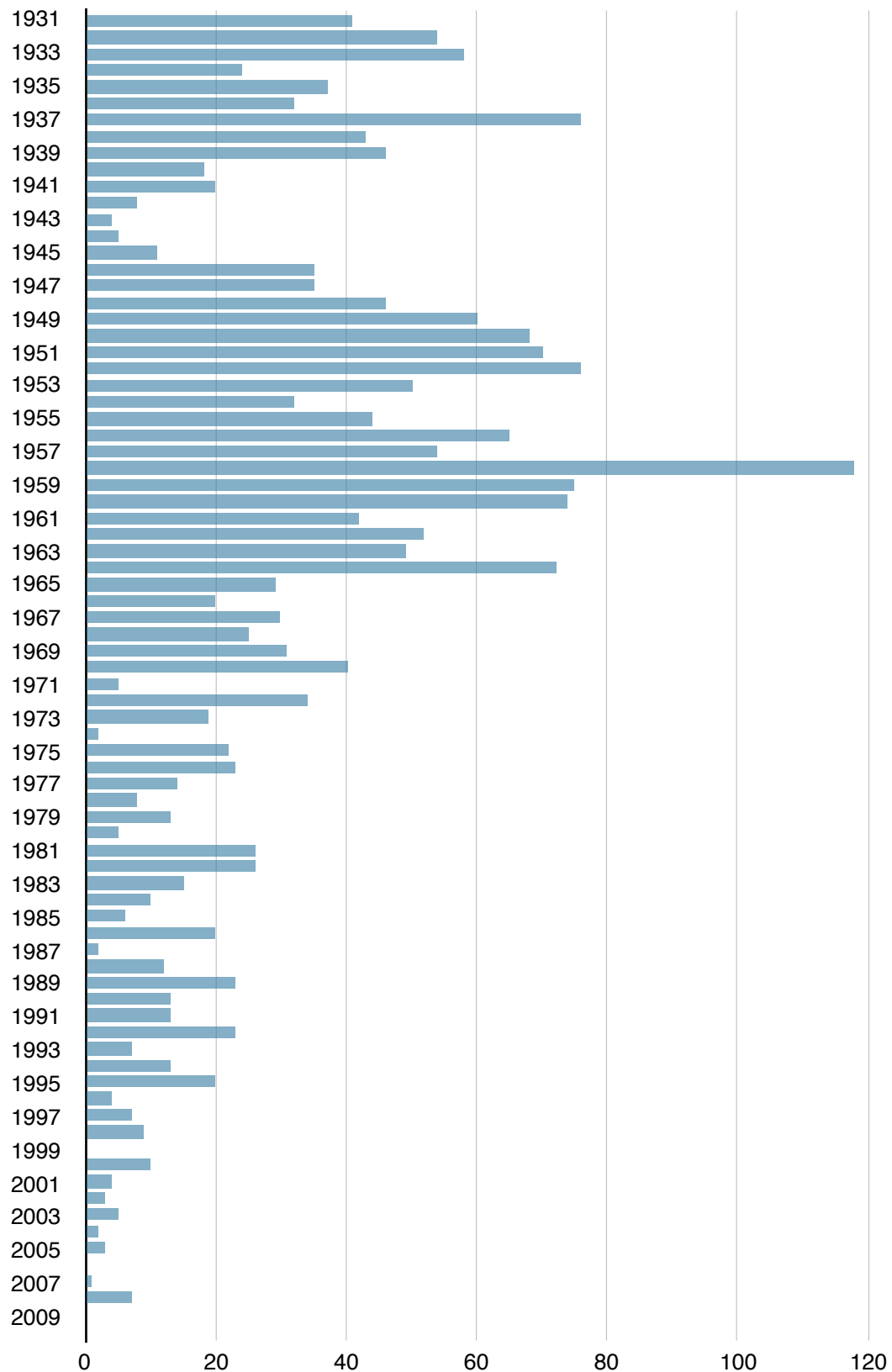


Figure 14: Années de construction sur les parcelles de l'échantillon construite après 1930

Le diagramme détaillé (Fig; 14) permet de montrer l'impact d'événements de durée inférieure aux ères de développement de plusieurs décennies évoquées précédemment. Ainsi durant la seconde guerre mondiale, peu de constructions furent érigées. Dans les années suivantes, le besoin de reconstruction et la forte croissance économique des « Trente glorieuses » permirent un fort développement du parc immobilier avec une apogée de 118 nouvelles constructions atteinte en 1958. Les crises économiques et la réduction de la disponibilité foncière peuvent expliquer la diminution du nombre de constructions depuis une quarantaine d'années.

Dès lors, le constat peut être le suivant, une part importante du stock bâti est ancien et même vétuste au regard des progrès effectués dans les techniques de construction et particulièrement dans l'isolation des bâtiments. Le SDER souligne d'ailleurs à l'échelle wallonne, qu'« à l'horizon 2020, il faudrait fortement augmenter le taux de rénovation et d'isolation du parc de logements anciens pour passer d'environ 9 000 logements améliorés par an en 2010 à environ 35 000 logements par an en 2020» (Gouvernement Wallon, 2013, p. 18). Pour le cas de la rive Est de Liège, en 2010, la majeure partie des constructions de l'échantillon (plus de 96%) est antérieure à l'année 1977. Or cette année marque un tournant dans les méthodes de calculs de dimensionnement structurel avec l'instauration des Eurocodes et des calculs semi-probabilistes précisés par la suite. Au-delà de ce tournant méthodologique, Wilkinson & Reed (2009) soulignent un large consensus édictant que durant les 5-7 années suivant la construction, des adaptations mineures sont nécessaires mais qu'après 20 -25 ans des travaux majeurs de réparations doivent être envisagés.

Bien qu'une part du bâti ancien, nécessite d'être démolie ou démantelée à la suite d'un manque d'entretien et de dégradations trop importantes, une éventuelle réserve structurelle due à l'évolution des méthodes de calcul pourrait concerner une part importante du bâti de la rive est.

### 3 - Structure: cadre réglementaire et normatif

#### a] Evolution globale des normes (d'après Gao, 1996)

Longtemps l'expérience du bâtisseur fut la seule garantie de la tenue du bâtiment. Avec le siècle des ingénieurs et l'innovation dans les matériaux, l'empirisme ne permet plus à lui seul le développement des nouvelles structures. Les premières normes dans la construction voient le jour. Celles-ci reposent sur la méthode des contraintes admissibles. Le principe de sécurité de cette méthode repose sur une inéquation simple.

$$S \leq R_{\text{adm}} = \frac{R_{\text{rup}}}{K}$$

Les contraintes maximales calculées (S) doivent être inférieures ou égales à une contrainte dite admissibles  $R_{\text{adm}}$ . Cette dernière étant elle-même déduite de la contrainte de ruine du matériau  $R_{\text{rup}}$  et d'un coefficient de sécurité conventionnelle (K).

*« Leurs valeurs avaient été arbitrairement fixées sur la base de propriétés mécaniques des matériaux utilisés. La prise en considération des améliorations de la production d'aciers, de la conception et la construction des structures a amené à relever les contraintes admissibles de calcul, en diminuant les coefficients de sécurité K. » (Gao, 1996, p. 2).* Ainsi les évolutions des normes reposant sur les contraintes admissibles mettent en lumière des potentiels structuraux sous exploités.

En cherchant à améliorer leur précision globale, la nécessité de séparer précision des charges et précisions des résistances devient manifeste. Les Eurocodes reposent aujourd'hui sur ce principe de coefficients de sécurité appliqués d'une part aux actions ( $S_k$ ) et d'autre part aux résistances ( $R_k$ ).

$$\gamma_S S_k \leq \frac{R_k}{\gamma_R}$$

Bien qu'ayant largement évolué depuis ses prémices aux début du XXème siècle, le cadre normatif dans un contexte de recherche d'optimisation et d'économie des matériaux continue d'être modifié, précisé... Les Eurocodes ne font pas exception à la règle.

Dans le cadre de ce mémoire, il est intéressant d'observer l'évolution des normes concernant la résistance des principaux matériaux de construction que sont l'acier et le béton. Du point de vue des actions, la progression des modèles pour la prise en compte du vent est la plus remarquable.

## b) Evolution des normes liées aux résistances

**Le Béton (armé)**

Les travaux de Germain (2006) centrés sur le flambement dans les colonnes en béton armé permettent une prise en compte globale retranscrite par cette chronologie.

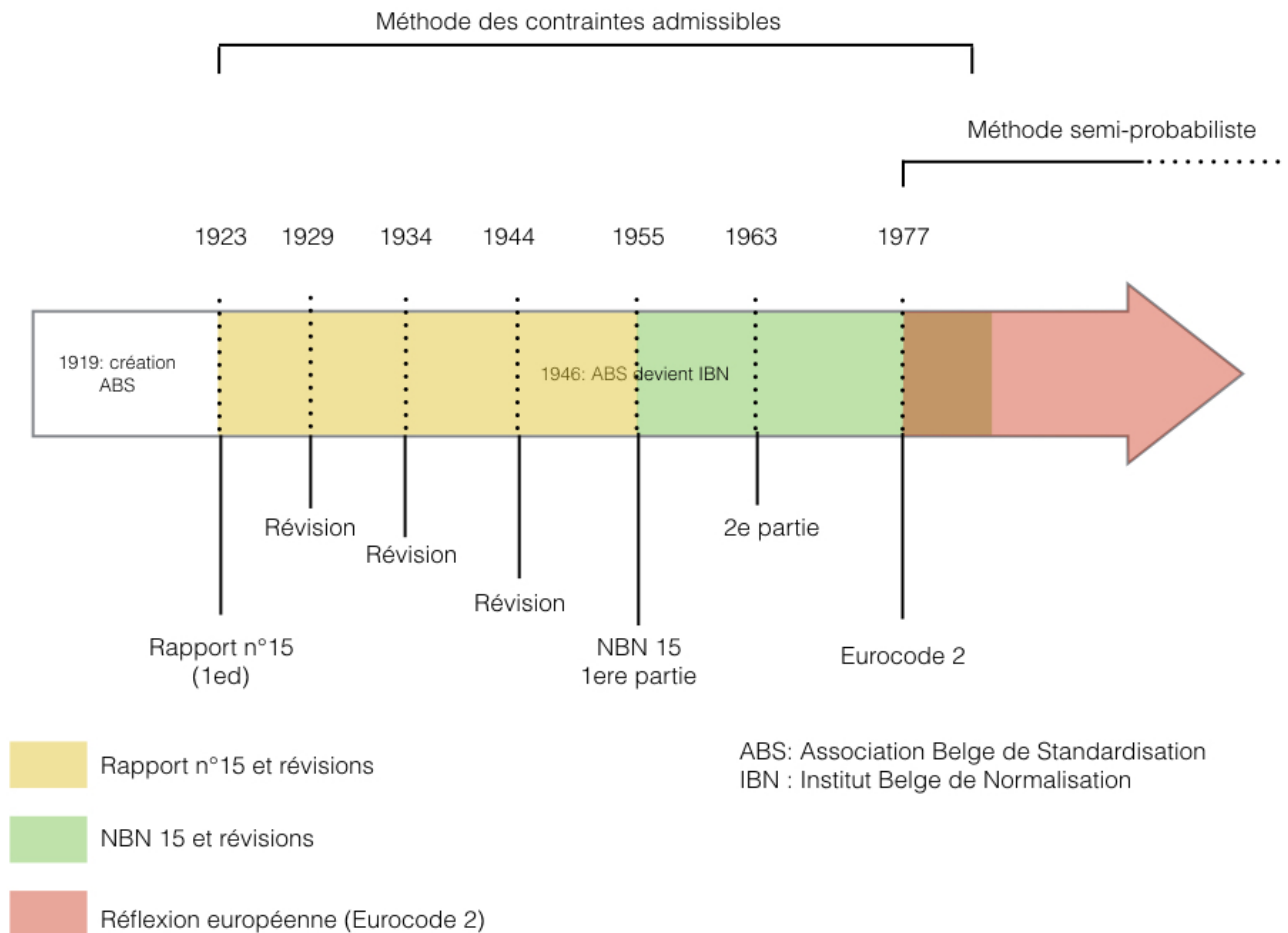


Figure 15 : Evolution des normes concernant le béton armé

Après la première guerre mondiale, les matériaux évoluent très vite et les normes doivent être régulièrement révisées. En 1953, les lacunes des éditions précédentes sont trop importantes et l'IBN décide alors de lancer un travail de fond en deux étapes. Ces travaux aboutiront à la publication de la première partie de la NBN 15 en 1955 permettant de répondre aux lacunes des éditions précédentes. En 1963, la seconde partie de la NBN 15 vient compléter les connaissances de l'époque.

Le changement le plus important reste néanmoins la publication des Eurocodes qui bouleverse les méthodes de calcul. « *La norme passe, à ce moment, du calcul aux contraintes admissibles à celui aux états-limites (ultimes ou de service).* » (Germain, 2006, p. 5).



## L'acier

À l'origine les normes sur les aciers concernaient aussi bien les ponts métalliques que les charpentes en acier. Ce n'est que plus tard, en 1959, que la distinction a été effectuée.

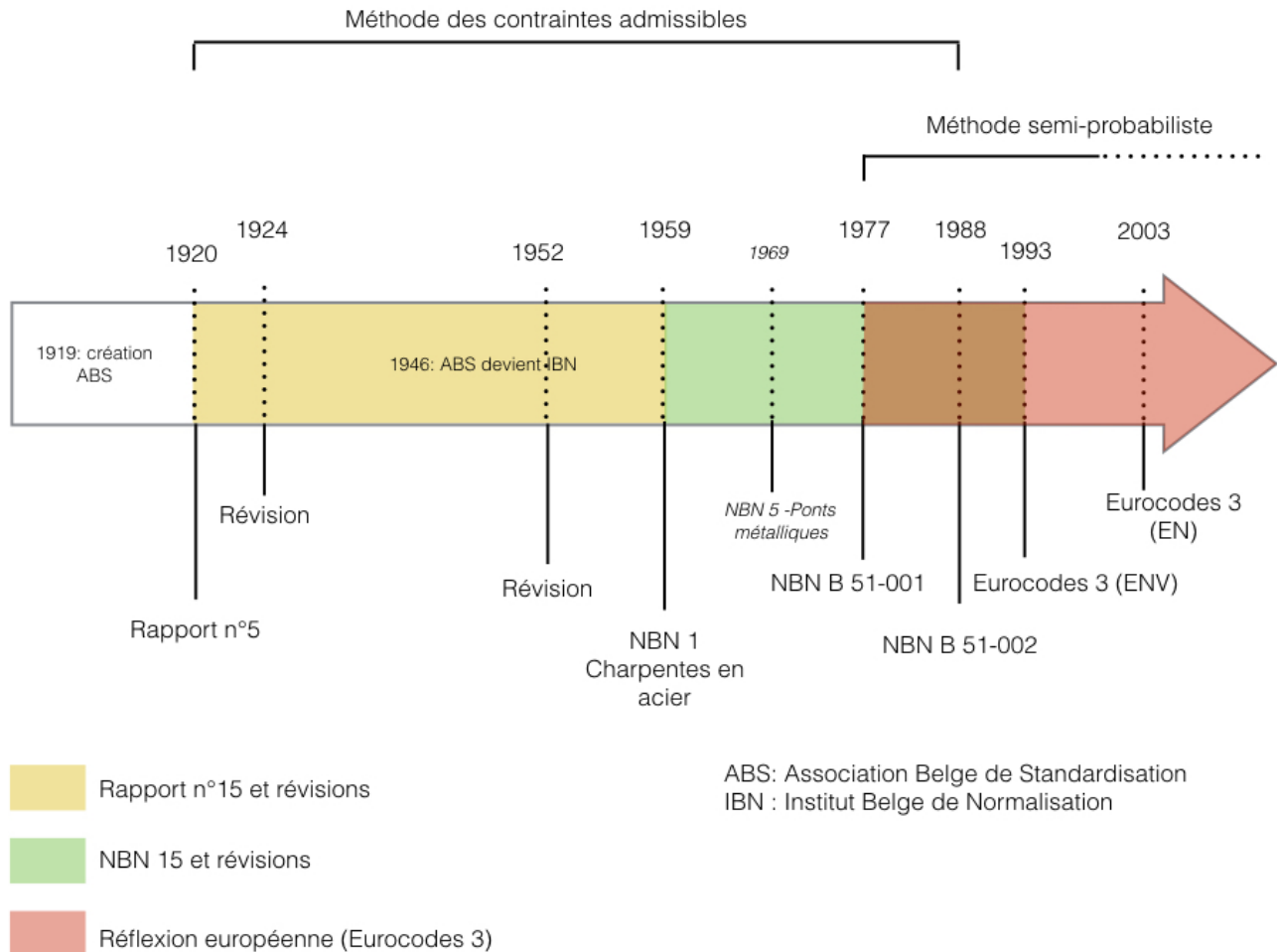


Figure 16 : Evolution des normes concernant les aciers

En 1977, alors que la méthode semi-probabiliste a fait ses preuves, la publication de la norme B51-001 utilisant encore la méthode des contraintes admissibles est à vocation transitoire. En 1988, la méthode semi-probabiliste est définitivement adoptée avec la norme NBN B 51-002.

Par la suite les Eurocodes 3 d'abord sous forme provisoire (ENV) puis sous forme définitive (EN) établissent le cadre normatif.

## c] Evolution des normes liées aux Actions

**Le Vent**

Du point de vue des actions, c'est la charge de vent qui a le plus évolué. Du point de vue des normes, la prise de conscience de son impact sur les structures s'est faite relativement tard comme le montre la chronologie (Fig. 17). En 1944, il ne s'agit que d'un rapport provisoire. En 1955, l'action du vent est mentionnée dans la NBN 15 destinée aux ouvrages en béton armé. Il faut finalement attendre 1960 et la NBN 460 pour voir une norme instruisant les charges de vent.

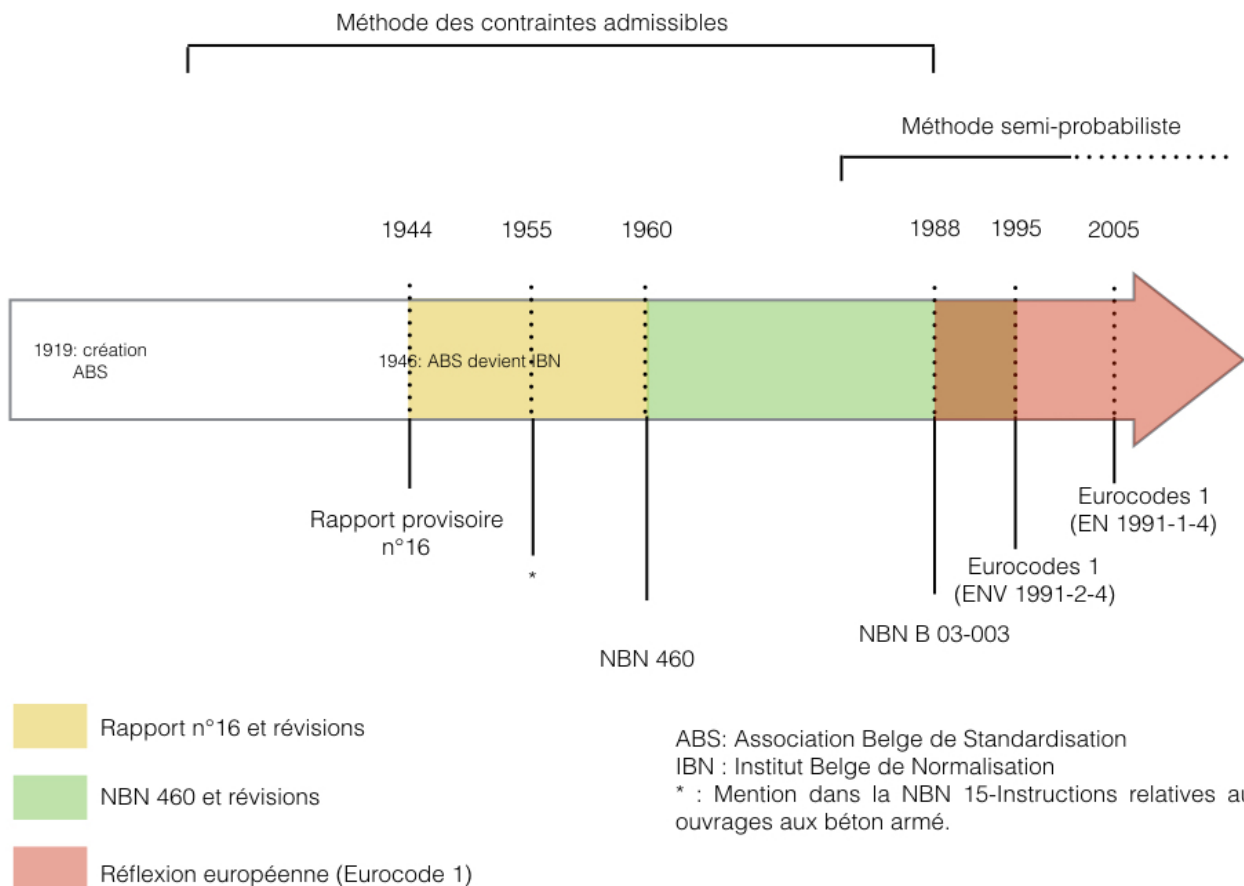


Figure 17 : Evolution des normes concernant les charges de vent

## d] Conclusions

La connaissance des matériaux et des actions s'est affinée au cours du temps, les méthodes de calcul, les coefficients et la prise en compte des phénomènes comme le flambement ont évolué. Ce travail n'a pas pour ambition de chiffrer l'impact exact d'une modification des normes sur la capacité structurale de l'ensemble bâti mais de justifier l'intérêt à porter aux structures acier.

Le chapitre suivant, à travers 3 exemples s'attache à évaluer et quantifier l'existence d'un potentiel structural dans des constructions en ossatures métalliques. Les résultats de ces études permettront de valider ou non l'intérêt d'intégrer les structures acier dans les réflexions globales de végétalisation.

## 4 - Structure: étude de cas

### a] Choix des modèles d'études

Alors que les différents auteurs sont relativement confiants à l'égard de la végétalisation des structures en béton armé, ils restent très prudents ou parfois écartent la possibilité de végétaliser des structures légères à l'image des études de l'APUR à Paris et de Wilkinson et Reed (2009) à Melbourne déjà citées précédemment. Ce travail vise en partie à préciser le potentiel de ces structures en acier présentent dans le bassin liégeois.

Parmi les plans récupérés lors des investigations, 3 ont été sélectionnés pour leur structure composée de portiques en acier dont les éléments sont dans des dimensions dites « standards » et des surfaces de toitures relativement conséquentes ( $> 200\text{m}^2$ ). Enfin ces trois bâtiments sont localisés dans les deux zones à fort potentiel en matière de grandes surfaces bâties : Droxhe et le long du boulevard de Froidmont, deux pôles de développement économique pour Liège.

Les bâtiments sont ici succinctement contextualisés. Les détails géométriques et techniques seront précisés dans chaque cas.



66 Avenue Albert 1er, 4030 Liège

Ce regroupement d'entrepôt (en rouge sur la photo ci-contre) appartient aujourd'hui aux établissements Vrancken, une entreprise de climatisation et chauffage. Les entrepôts initiaux datent selon le cadastre des années 50. Depuis, deux extensions ont été ajoutées. Nous nous intéresserons à la plus grande des deux. Construite en 1984, elle présente une surface en toiture d'environ  $320\text{m}^2$ .

*Figure 18 : Vue aérienne du cas d'étude n°1*

### 42 Avenue Georges Truffaut, 4020 Liège

Bâtiment aujourd'hui détruit, cet atelier de boucherie de 1963 devait probablement faire partie du complexe des abattoirs situé juste à côté. Dans cette zone industrielle entre la gare de Bressoux et la Meuse, « les boîtes à chaussures » sont fréquentes. C'est d'ailleurs aussi la typologie du bâtiment qui remplaça l'atelier bien que la nouvelle structure soit en béton.

Bien que détruit, ce bâtiment a été retenu pour illustrer cette période des années 60, décennie riche en modifications importantes du point de vue des normes mais

utilisant toujours la méthode des contraintes admissibles. Cet exemple présente également un intérêt en ce qui concerne les techniques utilisées pour le complexe de couverture. Détaillée par la suite, cette toiture est relativement lourde pour une structure acier et offre d'autres perspectives dans les stratégies de végétalisations envisageables.

22 Rue des trois grands, 4030 Liège

Le troisième et dernier bâtiment étudié se trouve lui aussi à proximité du boulevard de Froidmont. Aujourd'hui occupé par le groupe LMP (un grossiste et fabricant de chauffage central), il changea plusieurs fois de propriétaire, chacun aménageant cet entrepôt selon ses besoins. Les plans initiaux n'existant plus, c'est grâce à l'un de ses aménagements effectué en 1990, que les plans ont pu être récupérés.

Construit selon le cadastre en 1956, c'est le plus ancien des trois cas d'étude. Cet exemple permet ainsi d'évaluer le potentiel des bâtiments construits avec les premières normes et méthodes de dimensionnement. Bien que plusieurs mises à jour aient été effectuées en 1956, l'état des normes est considéré comme lacunaire par l'Institut belge de normalisation. Les travaux de fond ont commencé l'année précédente avec le sujet du béton armé. Le sujet de l'acier ne sera abordé qu'en 1959 avec la distinction des charpentes en acier et des ponts. Un an plus tard, la NBN 1960 marque la prise en compte à part entière des effets du vent.



*Figure 19 : Vue aérienne du cas d'étude n°3*

## b] Hypothèses générales

Pour rappel, ces travaux visent une approche structurelle simplifiée afin de justifier ou non la pertinence de la mise à l'écart des structures en acier dans les études urbaines de végétalisation des toitures. Ils ne permettent en aucun cas de s'affranchir d'une étude structurelle standard pour la réalisation de travaux sur ces bâtiments. Les hypothèses faites pour l'ensemble des bâtiments sont présentées dans ce chapitre. Certaines hypothèses sont discutables et seront discutées.

### Charge de neige

L'annexe nationale aux Eurocodes concernant les charges de neige permet de simplifier grandement les calculs. De nombreuses simplifications s'expliquent par un relief moins accentué et un climat plus doux que dans d'autres régions de l'Europe.

Ainsi la NBN EN 1991-1-3 ANB, conseille de ne pas prendre en compte les charges, accumulations ou conditions exceptionnelles en Belgique.

Les différents bâtiments étudiés se situant dans la plaine alluviale à une altitude d'environ 60m au dessus du niveau de la mer, la charge de neige est déterminée par la formule :

$$s = \mu_1 \times C_e \times C_t \times s_k$$

Où :  $\mu_1 = 0,8$  pour une toiture à un versant de pente  $< 30^\circ$

$$C_e = 1$$

$$C_t = 1$$

$s_k$ : la charge caractéristique de neige selon l'altitude du bâtiment, en-dessous de 100m au dessus du niveau de la mer,  $s_k = 0,5 \text{ kN.m}^{-2}$

Soit  $s = 0,4 \text{ kN.m}^{-2}$ , pour la suite des calculs.

### Charge de vent

Les modèles de vents sont plus complexes, le détail des calculs est fourni en annexe. Pour une toiture plate, les Eurocodes conseillent de modéliser la toiture en sous zones.

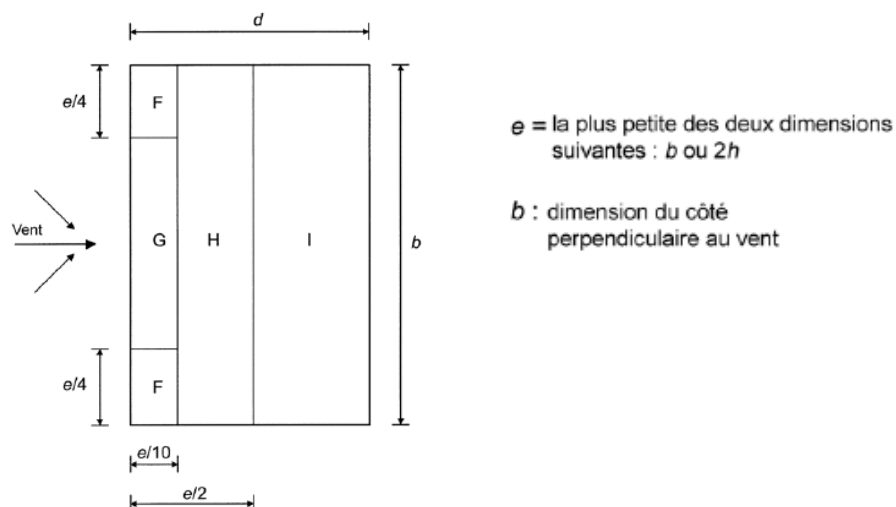


Figure 20 : Zonage des pressions liées au vent sur une toiture plate (NBN EN 1991-1-4, 2005)

Dans l'optique d'une démarche simplifiée, une valeur globale de charge de vent ( $w$ ) est retenue pour toute la toiture.

Comme le montre le tableau ci-dessus qui reprend les calculs pour la toiture du Cas1 (extension hall industriel à Grivegnée), les différences par zone sont extrêmement importantes avec parfois un facteur 10.

	Zone F	Zone G	Zone H	Zone I
Surface (m <sup>2</sup> )	4,9	20,6	121,5	170,9
w (N/m <sup>2</sup> )	900,19	416,91	84,25	238,44

Tableau 4 : Pression du vent pour chaque zone de toiture

Prendre le cas le plus défavorable n'est ici pas pertinent, car les charges les plus élevées s'appliquent aux zones F, qui sont de toutes petites zones en comparaison des zones H et I.

La valeur globale est donc calculée via une méthode proportionnelle. De manière générale la valeur obtenue pour les cas d'étude est d'environ 0,2 kN/m<sup>2</sup>.

La valeur exacte sera précisée pour chaque cas.

## Matériaux

L'absence d'essais in situ ou en laboratoire, ainsi que le peu de données recueillies sur site et sur plans nécessitent des hypothèses quant aux matériaux de construction. Les cas choisis reprennent des typologies de hangars aux structures composées de portiques en acier. La forme en double T des profilés, écarte l'hypothèse de la fonte et oriente vers les aciers de construction.

Parmi les aciers de construction, l'option retenue de l'acier S235 semble être la plus pertinente au vue du contexte historique et économique mais permet aussi une marge de sécurité en utilisant le cas le plus défavorable.

Néanmoins cette hypothèse de l'acier S235 gagnerait à être précisée dans une étude plus poussée, pour plusieurs raisons.

Le S235 changea de nom plusieurs fois (cf encadré p. 53), il se généralise rapidement durant l'entre-deux-guerres. Selon, J-M Bleus (entretien du 27/04/2017), cette hypothèse du S235 reste acceptable jusqu'à l'entre-deux-guerres mais avant la première guerre mondiale elle est très discutable. C'est pourquoi dans la démarche exposée par la suite, les bâtiments construits avant 1919, ne sont pas intégrés dans les bâtiments à fort potentiel de végétalisation.

Les Eurocodes sont basés sur des normes matériaux garantissant les caractéristiques de chaque acier. Avant 1985, elles ont elles aussi évoluées. Elles ne font pas partie de l'étude mais soulèvent deux nouvelles questions: La réduction des coefficients de sécurité appliqués aux actions fournis par les eurocodes est-elle la conséquence d'une précision accrue dans la connaissance des matériaux et des normes encadrant leur production? En partie, probablement. Y a-t-il un autre potentiel structural à mettre en lumière dans l'évolution de ces normes ? Peut-être.

Avec les anciennes normes, les aciers de construction étaient classés selon leur résistance à la rupture symbolisée par la lettre A suivie de la résistance à la rupture exprimée en daN/mm<sup>2</sup> : exemple A37. Puis ils furent classés selon leur limite élastique symbolisée par la lettre E suivie de la limite élastique exprimée en daN/mm<sup>2</sup> : exemples : E24. Depuis 1992, et la norme NBN EN 10027 d'origine européenne, classe les aciers selon leur usage :

la lettre S (Structure) pour un usage général de construction métallique

la lettre E (Engine) pour construction mécanique.

Cette lettre est suivie de la limite élastique (Re) exprimée en méga-pascal (MPa) puis éventuellement d'un indice qui classe l'acier selon sa qualité (JR, Jo,...).

La nuance la plus courante S235 JR équivaut à l'E24 ou à un A37 dans les anciennes normes. C'est un acier de construction soudable, doux.

(d'après [www.aciersspeciaux.fr](http://www.aciersspeciaux.fr))

Lors d'un entretien avec J-M Bleus, le 27/04/2017, celui-ci soulève un autre point intéressant. « *Il n'est pas rare aujourd'hui de trouver du S355 déclassé à la place du S235* ». Ainsi certains éléments de structure bien que n'arrivant pas à satisfaire toutes les caractéristiques mécaniques de la classe S355, auraient un potentiel structural plus important que celui estimé à travers la considération d'un S235.

Pour conclure ce point, l'hypothèse du S235 est plausible et pertinente. Elle permet d'assurer une certaine sécurité de calcul à travers la prise en compte d'un cas défavorable mais une étude structurelle plus fine pourrait mettre en avant un potentiel structural différent et hypothétiquement plus élevé.

## c)Analyse des modèles

**Cas 1 : Hall Industriel Avenue Albert 1er, 66 (Grivegnée)**

Les plans de cette extension d'un hall industriel datent de 1984. Occupé actuellement par les établissements Vrancken, le bâtiment traverse l'îlot. L'extension étudiée vient s'implanter côté nord-est avec une façade sur l'avenue Albert 1er.



Figure 21 : à gauche: vue arienne du hall; à droite: Façade sur l'avenue Albert 1 er

Cet extension offre une surface plate (pente 1%) potentiellement végétalisable d'un peu plus de 320m<sup>2</sup>, à une hauteur moyenne de 7,90m.

Les plans et coupes donnent des informations sur la structure. Cinq portiques de 14,55m de long sont positionnés tous les 5,35m et constituent l'ossature de cette extension.

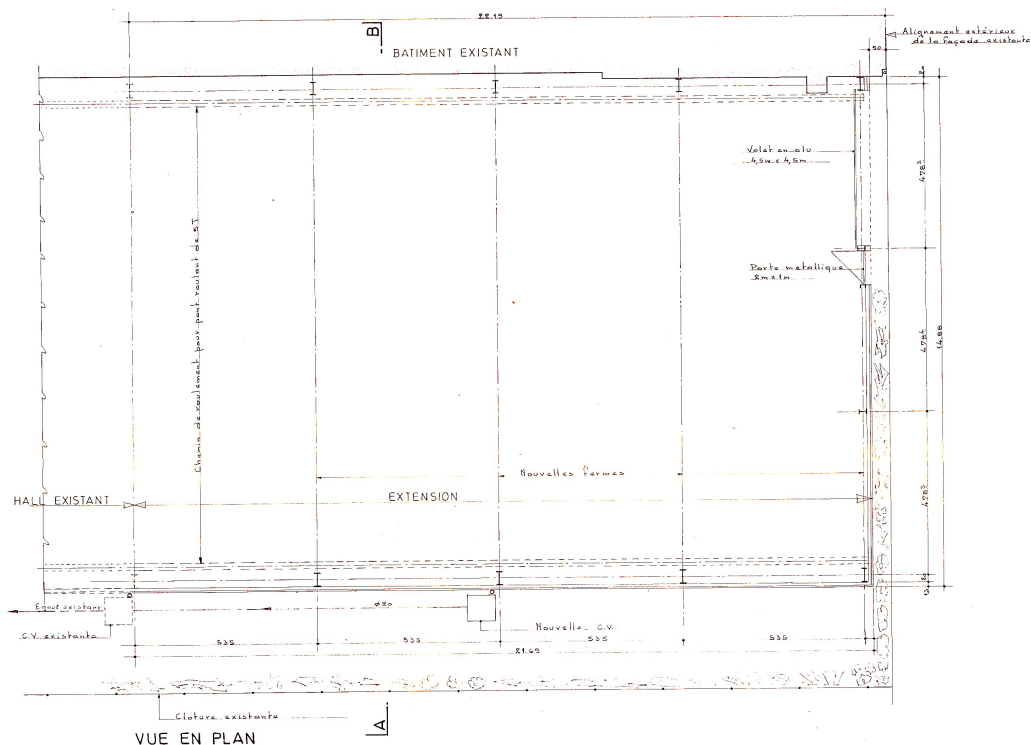


Figure 22 : Plan de l'extension, cas n°1 (Source : Archives de Liège)



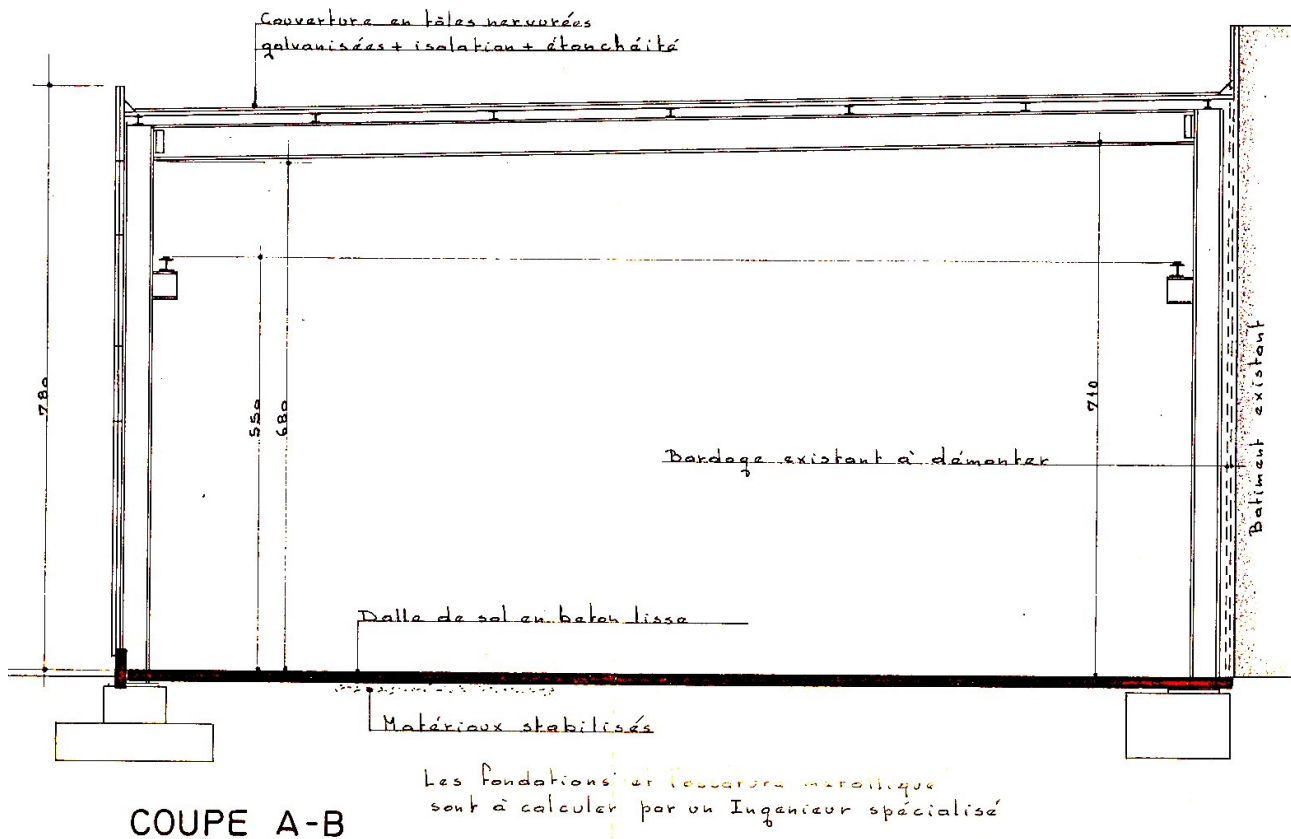


Figure 23 : Coupe de l'extension, cas n°1 (Source : Archives de Liège)

### Hypothèses

Afin de déterminer quels efforts interviennent dans les éléments de la structure, il est nécessaire d'établir un modèle. Les éléments prépondérants sont les liaisons entre les éléments structuraux pour connaître la transmission des efforts. Le modèle retenu pour ce portique est isostatique.



Figure 24 : Modèle structurel du portique

La rotule en pied de poteau peut s'expliquer par la présence du bâtiment existant qui empêche la mise en place d'une semelle assimilable à un encastrement. Les poutres sont fixées aux poteaux par des pièces intermédiaires, des équerres de fixation. Avec ce type d'assemblage, la présence de jeu, même limité permet d'assimiler ces liaisons à des rotules. Ce modèle a des conséquences sur les vérifications effectuées par la suite puisqu'aucun moment n'est transmis de la poutre aux poteaux.

À propos des charges déjà évoquées précédemment, elles sont précisées dans le tableau ci-dessous.

Charges	Cas existant
Poids propre toiture	0,30 kN/m <sup>2</sup>
Charge de vent	0,21 kN/m <sup>2</sup>
Charge de neige	0,4 kN/m <sup>2</sup>
Charge d'exploitation	0,2 kN/m <sup>2</sup>

Tableau 5 : Charges de calcul

Le complexe en toiture est composé d'une couverture en tôles nervurées galvanisées, d'une isolation et d'une étanchéité. Ne disposant pas de plus d'informations, l'hypothèse posée est d'une charge de 25 kg/m<sup>2</sup> auxquels s'ajoutent 5kg/m<sup>2</sup> d'éventuelles techniques spéciales.

Les plans et coupes font état de l'existence d'un pont roulant initialement. Celui-ci ne sera pas pris en compte dans les calculs. Son démontage libère un potentiel structural sur ses appuis, les poteaux mais n'augmente en rien la capacité de la toiture. Or la suite mettra en évidence que se sont les poutres qui sont dimensionnantes et non les poteaux.

Sur base des dimensions relevées sur les plans et des catalogues d'Arcelor-mittal ([sections.arcelormittal.com](http://sections.arcelormittal.com)) pour les profilés HE et IPE, deux types de poutres courantes peuvent correspondre, les profilés IPE 450 et IPE 500. Pour les poteaux, il s'agit probablement de profilés de type IPE 400.

Les résultats de chaque vérification sont présentés ici de manière synthétique. Une note de calcul en annexe précise les résultats intermédiaires et la démarche suivie.

### Vérification des poutres en flexion (ELU)

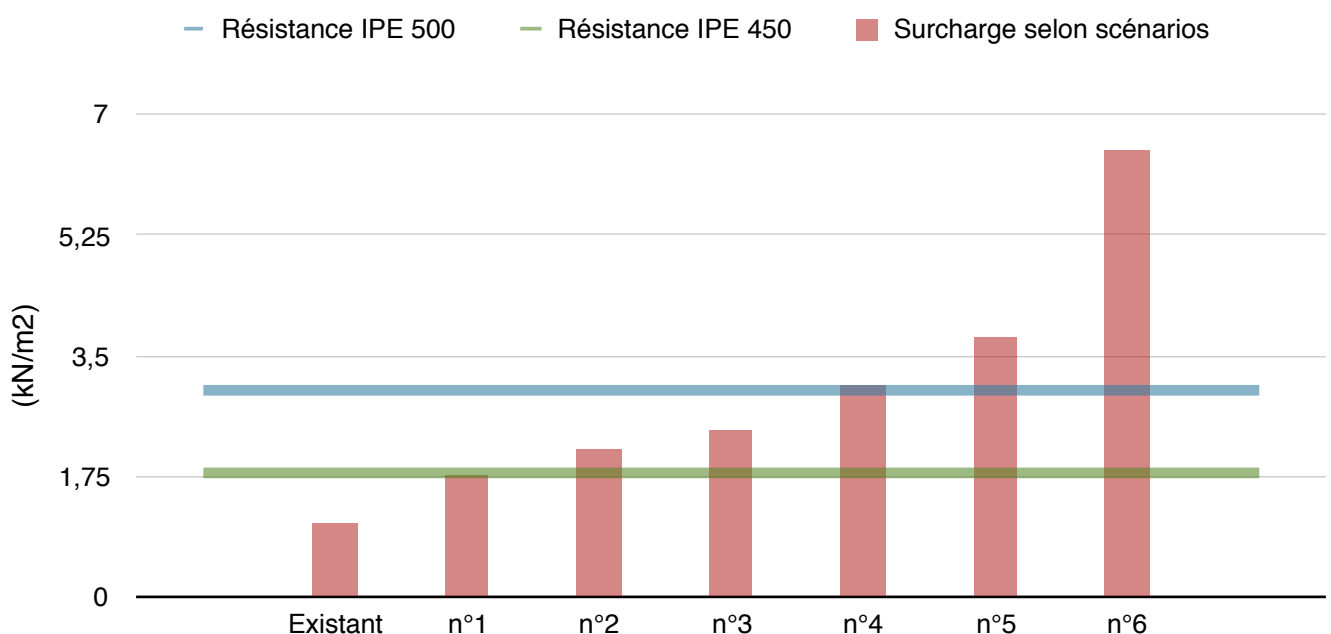


Figure 25 : Charge admissible en flexion selon profilé IPE

Le graphique montre l'intérêt de mesures précises des dimensions des IPE. Puisque l'IPE 500 en S235 permet les scénarios 1, 2 et 3 soit une charge supplémentaire pouvant aller jusqu'à plus de  $100\text{kg/m}^2$ . Du point de vue de la flexion, une toiture semi-intensive est alors envisageable.

A contrario, le cas de l'IPE 450 offre très peu de marge de manoeuvre. À  $0,06\text{kN/m}^2$  près soit environ  $6\text{kg/m}^2$  le scénario n°1 est théoriquement possible mais à cette échelle et aux approximations de calcul près, ce scénario est difficilement envisageable. Pour information, la charge linéaire générée par le poids propre de l'IPE est à elle seule d'environ  $77,6\text{kg/m}$ .

Pour assurer la pertinence de certains scénarios, il est nécessaire de vérifier d'autres caractéristiques des éléments structuraux. Pour les poutres, la flèche admissible est aussi un paramètre important.

### Vérification de la flèche des poutres (ELS)

Dans ce type de bâtiment industriel, l'inesthétique d'une déformation est rarement la priorité. L'hypothèse retenue est donc celle d'une flèche maximum de  $L/200$ , L étant la longueur de la poutre (ici  $14,55\text{m}$ ).

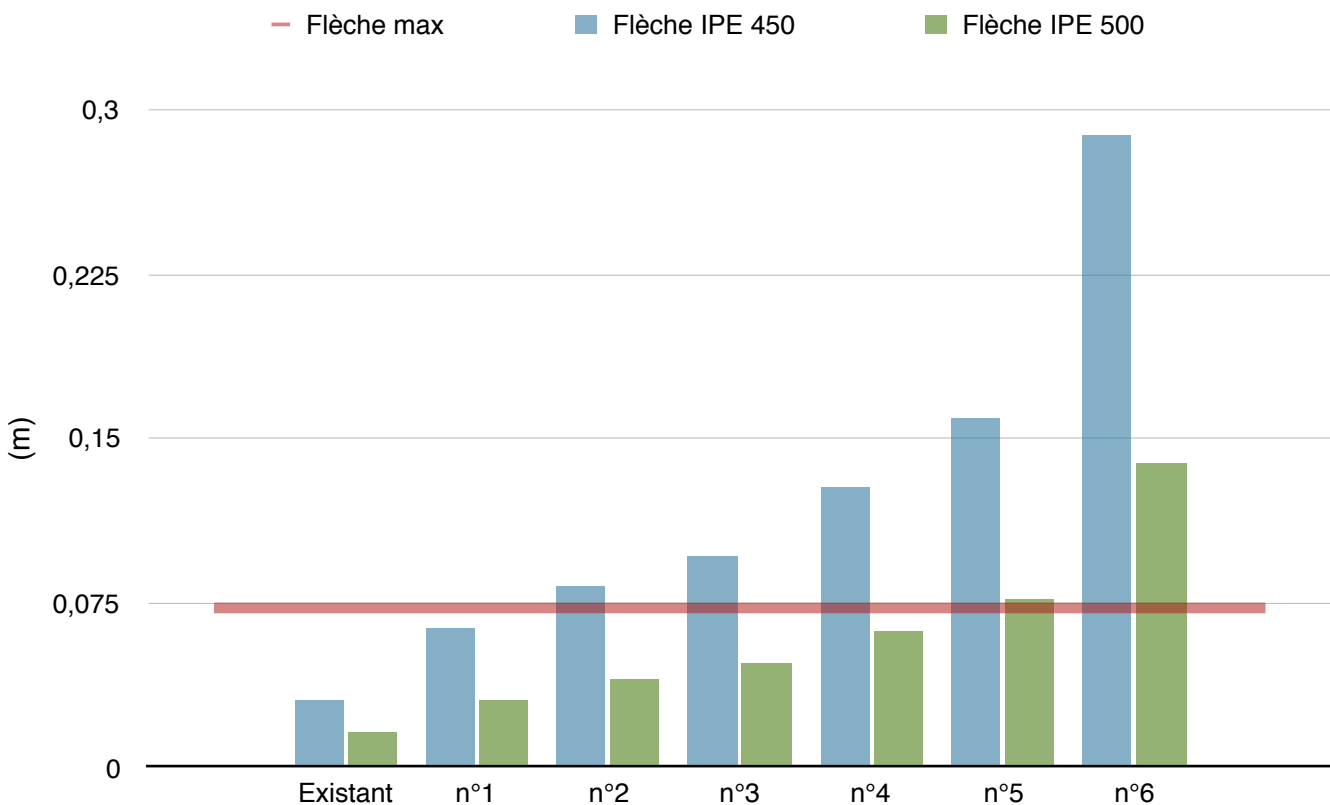


Figure 26: Flèche selon cas de charges des toitures

À l'image des résultats obtenus pour la vérification en flexion, l'IPE 500 bien que plus lourd, permet un éventail de scénarios plus large grâce à ses performances mécaniques plus importantes que l'IPE 450. Ce dernier peut uniquement supporter la surcharge du scénario n°1. Comme pour la vérification en flexion, la marge avec la valeur seuil est relativement faible.

L'IPE 500, quant à lui, peut supporter la surcharge du scénario 4 bien que celui-ci soit écarté par la vérification en flexion.

### Vérification des poteaux en compression (ELU)

La compression des poteaux est rarement dimensionnant, comme le confirme le graphique ci-dessous.

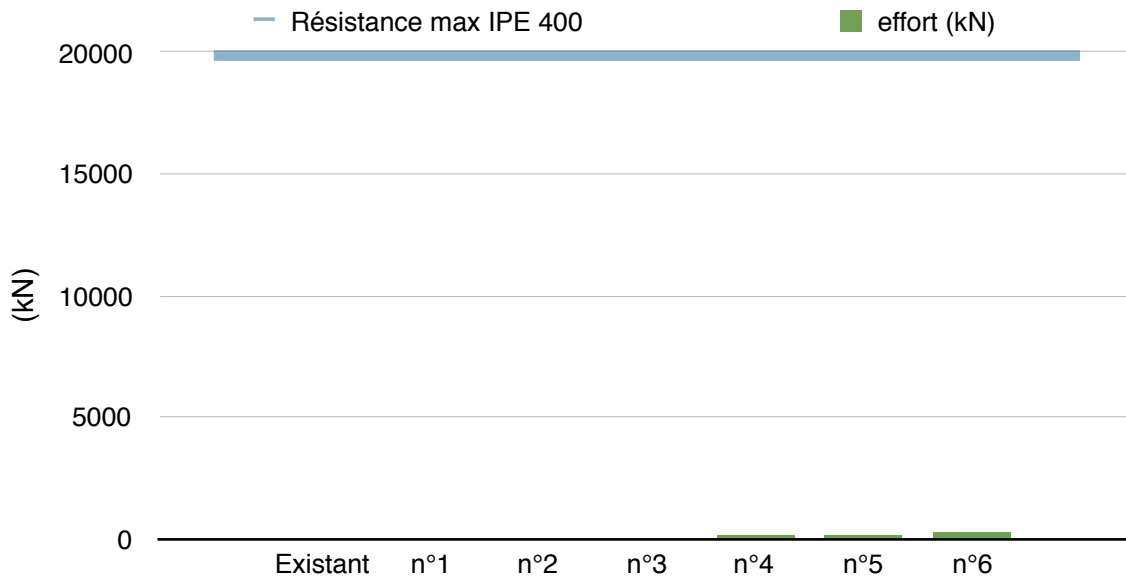


Figure 27: charge admissible en compression

### Vérification des poteaux au flambement (ELU)

Le critère de flambement est généralement plus contraignant mais ici les poteaux ne sont pas dimensionnants. À l'image du graphique ci-dessous où le potentiel structural est plus important que la charge envisagée par les différents scénarios.

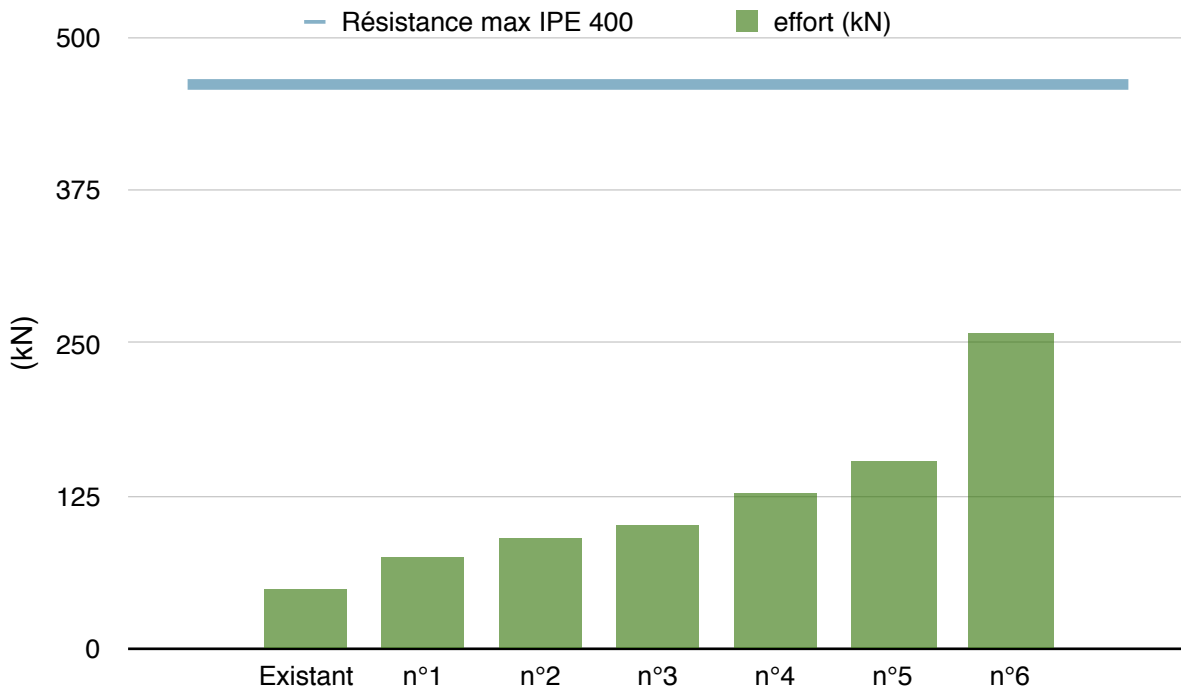


Figure 28: Charge admissible au flambement

L'importance du potentiel s'explique en grande partie par la charge du pont roulant aujourd'hui démonté.

## Synthèse

Ce premier exemple est ambigu, la structure en IPE 450 offre très peu de potentiel alors que l'autre structure possible avec des poutres en IPE 500 permet 3 scénarios différents de végétalisation. Ce potentiel n'est pas négligeable puisque le scénario n°3 fait intervenir une surcharge de  $100\text{kg/m}^2$ , soit des toitures semi-intensives légères.

Les exemples suivants n'en sont que d'autant plus intéressants pour mieux comprendre l'impact de l'évolution des normes sur le dimensionnement des structures.

## **Cas 2 Atelier de boucherie, Avenue Georges Truffaut, 42**

L'obtention des plans de ce bâtiment est une opportunité saisie lors des demandes de consultation des archives. Malgré le travail des archives de Liège, de nombreux permis de construire ont été perdus.

La demande initiale de permis concernait un bâtiment voisin datant des années 60. Une incompréhension permit la consultation des plans de l'atelier de boucherie. Lors d'une demande ultérieure il s'est avéré que les plans du bâtiment voisin avaient disparu et que l'obtention des plans ci-dessous est une chance résultant d'un quiproquo. Aujourd'hui détruit et remplacé par un bâtiment accueillant un vendeur de matériel pour entrepreneur, l'atelier de boucherie construit en 1963 est révélateur des modalités de construction de l'époque. Il permet ainsi de colorer le potentiel structural des bâtiments de ces années.

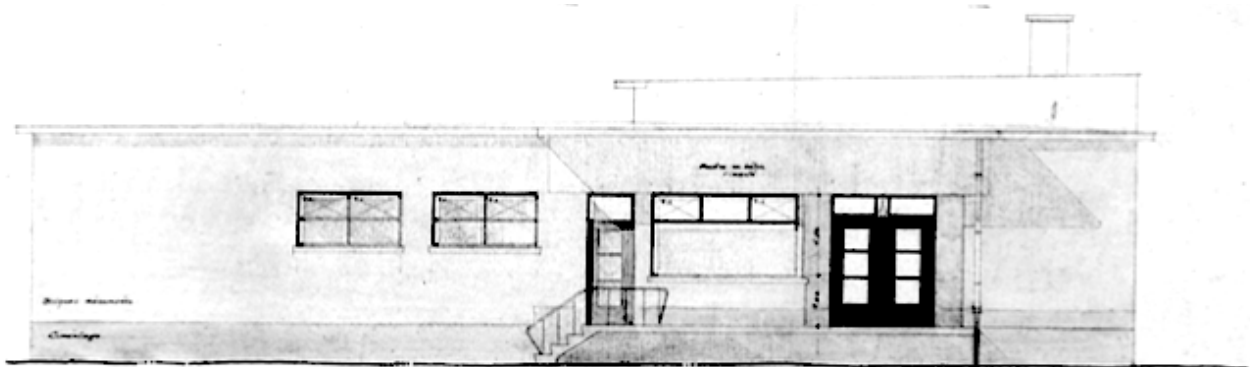


Figure 29: Façade Est (entrée du bâtiment) (Source : Archives de Liège)

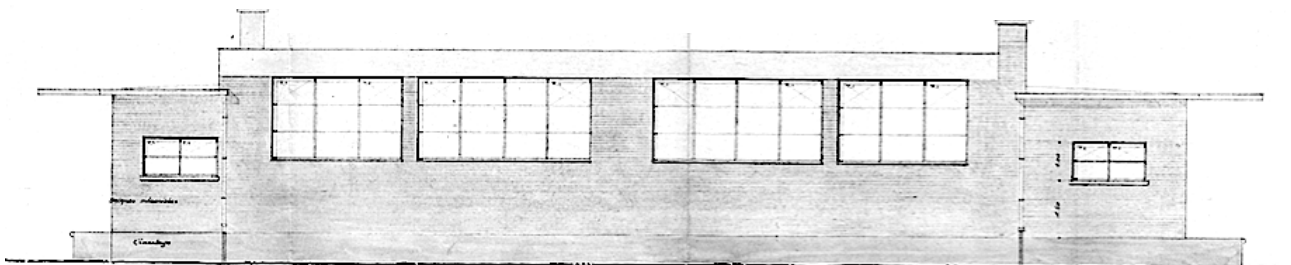


Figure 30: Façade Nord (façade à rue) (Source : Archives de Liège)

Les deux autres façades sont disponibles en annexes. La volumétrie extérieure permet de distinguer deux volumes. Ces deux volumes se distinguent aussi structurellement. Dans cette étude nous nous intéresserons au volume le plus haut, le coeur de l'atelier (cf plans) équipés de portiques en acier.

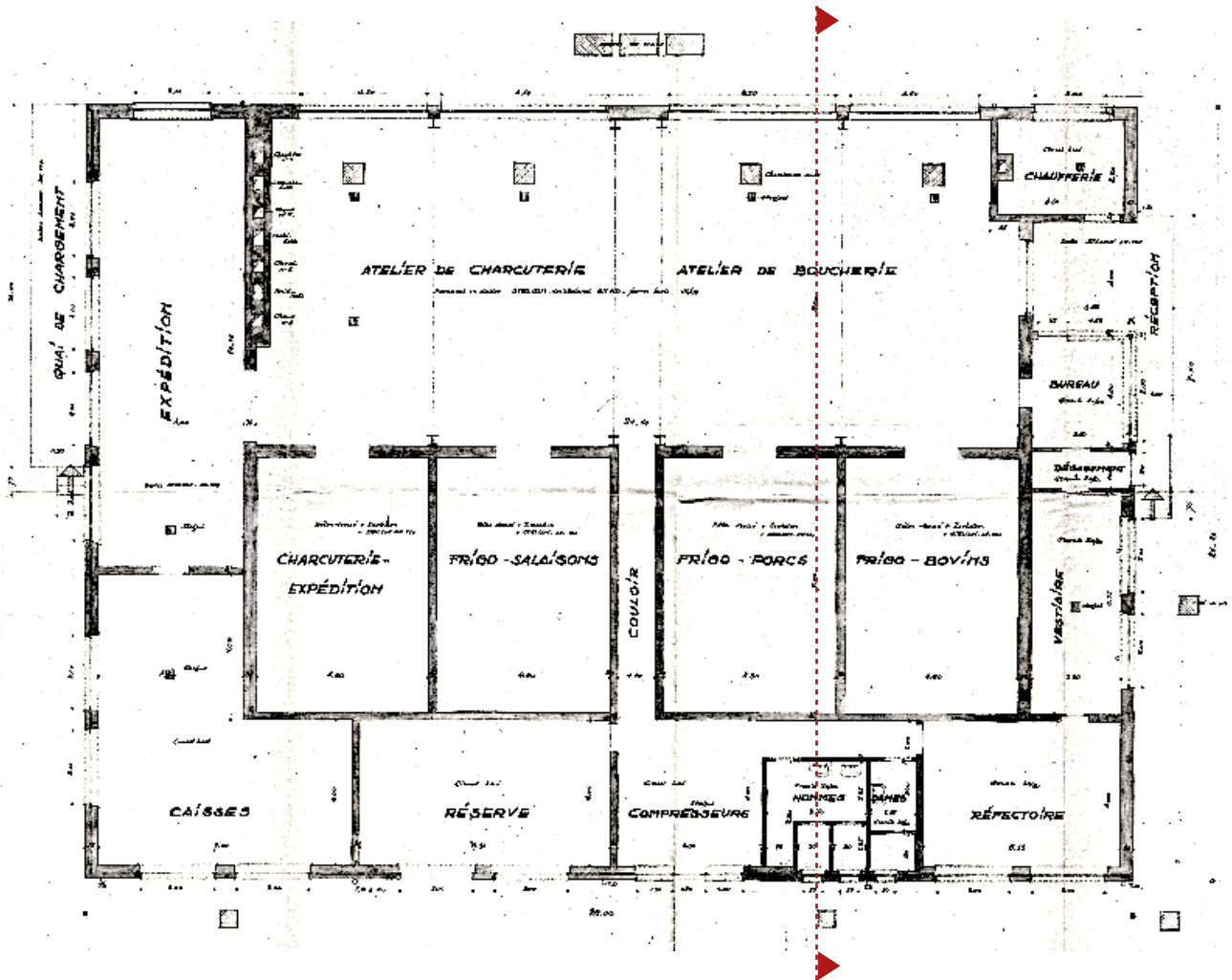


Figure 31: Plan cas n°2 (Archives de Liège)

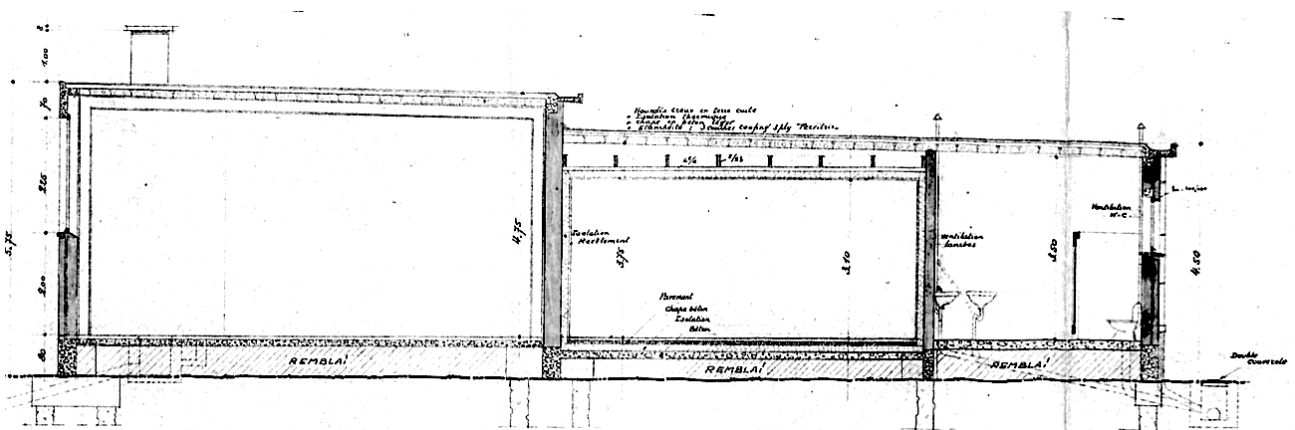


Figure 32: coupe transversale cas n°2 (Archives de Liège)

### Hypothèses

La coupe semble faire état d'un portique en un seul tenant. Cela semble étonnant, l'hypothèse retenue est que la poutre est soudée aux poteaux. Après discussion avec J-M. Bleus, professeur à l'Université de Liège de conception structurale, le modèle retenu pour ce portique est le suivant.



Figure 33: Modèle structurel du portique

Contrairement au cas 1, l'absence de bâtiment à proximité permet de supposer que les semelles sont dimensionnées assez largement et s'affranchissent de la mauvaise qualité des sols grâce aux pieux. Ainsi les pieds de poteaux sont modélisés par des encastremements. Pour les liaisons poteaux-poutres, le système d'assemblage bien que différent du cas 1 est néanmoins assimilable à une rotule.

Le complexe en toiture est ici composé de hourdis creux en terre cuite recouvert d'une chape de compression en béton léger, d'une isolation et d'une étanchéité. Cette technique est généralement utilisée comme plancher, ici l'architecte l'utilise comme toiture. Presque 2 fois plus léger que le béton ce système impose néanmoins une charge conséquente sur la structure. Les données fournies par les différents entrepreneurs français et belge consultés sont reprises ci-dessous.

Entreprise	Charge	Epaisseur
ECHO et Douterloigne	245 kg/m <sup>2</sup>	17 cm
	215 kg/m <sup>2</sup>	13 cm
Stalton	225 kg/m <sup>2</sup> (y compris la couche de compression)	16cm (12+4)

Tableau 7: Données fournisseurs pour les complexes de hourdis creux en terre cuite

Nous supposons ici que la charge est de 225 kg/m<sup>2</sup>. Lorsque que l'on compare cette charge à celle d'un complexe de toiture verte, le scénario d'un remplacement de la toiture prend tout son sens. La mise en place d'une toiture verte semi-intensive pourrait être envisagée. Pour rappel les scénarios de végétalisation envisagés:

Toiture verte...	extensive			semi-intensive		intensive
	n°1	n°2	n°3	n°4	n°5	n°6
<b>Scénarios</b>						
<b>Surcharges liées à l'implantation d'une TV (kg/m<sup>2</sup>)</b>	50	80	100	150	200	400

Tableau 8 : Surcharges par scénario de végétalisation

L'étude menée ci-dessous analyse comme dans les autres cas, la mise en place d'une toiture verte sur l'existant, permettant ainsi une intervention sans perturbation majeure de l'activité dans le bâtiment.

Pour cette toiture, la charge de vent est légèrement plus faible que le cas précédent.  $0,20 \text{ kN/m}^2$  contre  $0,21 \text{ kN/m}^2$  pour le cas 1. La charge de neige quant à elle reste identique.

Sur base des dimensions relevées sur les plans et des catalogues d'Arcelor-mittal pour les profilés HE et IPE, les profilés HE 260A et HE 260B sont les plus probablement utilisés pour les poutres et poteaux. Utiliser un profilé carré pour une poutre peut paraître étonnement du point de vue de l'inertie mais d'après les données, poutres et poteaux ont strictement les mêmes dimensions.

Comme pour le cas 1, les résultats de chaque vérification sont présentés ici de manière synthétique. Une note de calcul en annexe précise les résultats intermédiaires.

### Vérification des poutres en flexion (ELU)

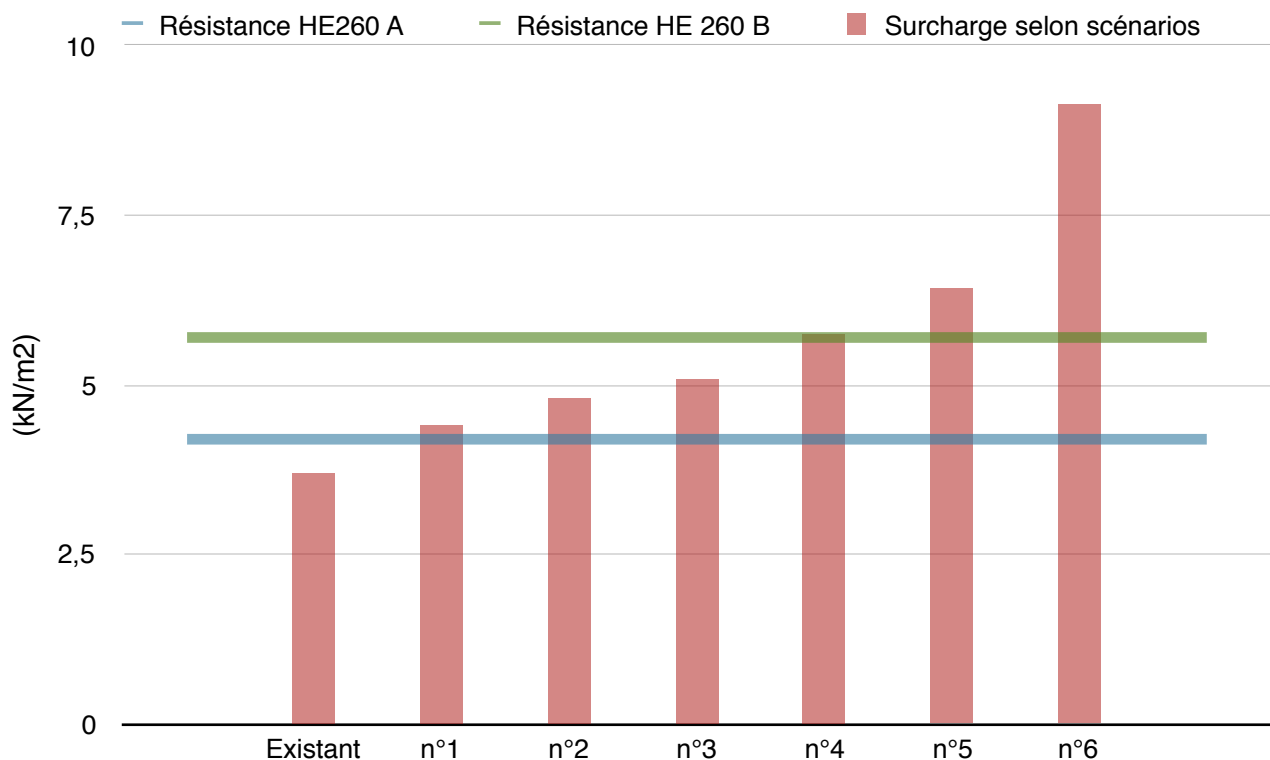


Figure 34: Charge admissible en flexion selon profilé IPE

La vérification en flexion permet d'écartier immédiatement la végétalisation de la toiture pour une structure en profilés HE 260A. À l'inverse les HE 280B semblent avoir un potentiel intéressant puisque les scénarios n°1, 2 et 3 sont envisageables du point de vue de la flexion.



### Vérification des la flèche des poutres (ELS)

En conservant l'hypothèse d'une flèche maximum de  $L/200$ ,  $L$  étant la longueur de la poutre (ici 9,00m), les résultats obtenus sont les suivants.

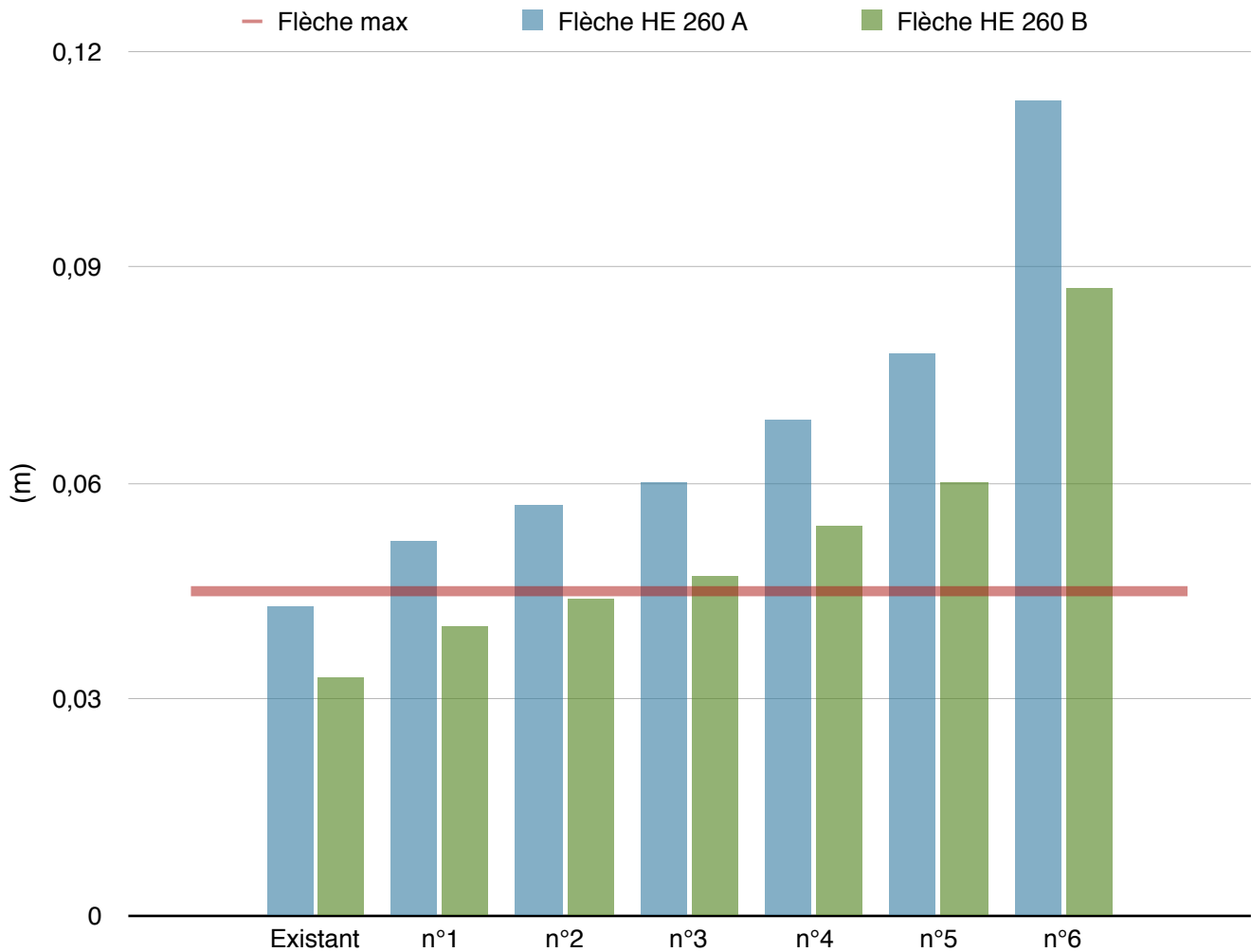


Figure 35: Flèche selon cas de charges des toitures

Pour le HE260A, la vérification de la flèche confirme les résultats précédents. En maintenant le complexe de toiture en hourdis creux, aucune végétalisation n'est possible. Dans le cas d'une structure composée de profilé HE 260B, les scénarios 1 et 2 restent envisageables mais le scénario de végétalisation n°3 doit être écarté car la déformation est trop importante.

Les profilés de section carré ou ronde sont bien plus adaptés pour les poteaux, nous pouvons donc d'ores et déjà supposer que les vérifications en compression et au flambement ne seront pas contraignantes. Ces hypothèses sont confirmées par les graphiques ci-dessous exprimant les résultats des vérifications pour le profilés HE 260 B.

**Vérification des poteaux en compression (ELU)**

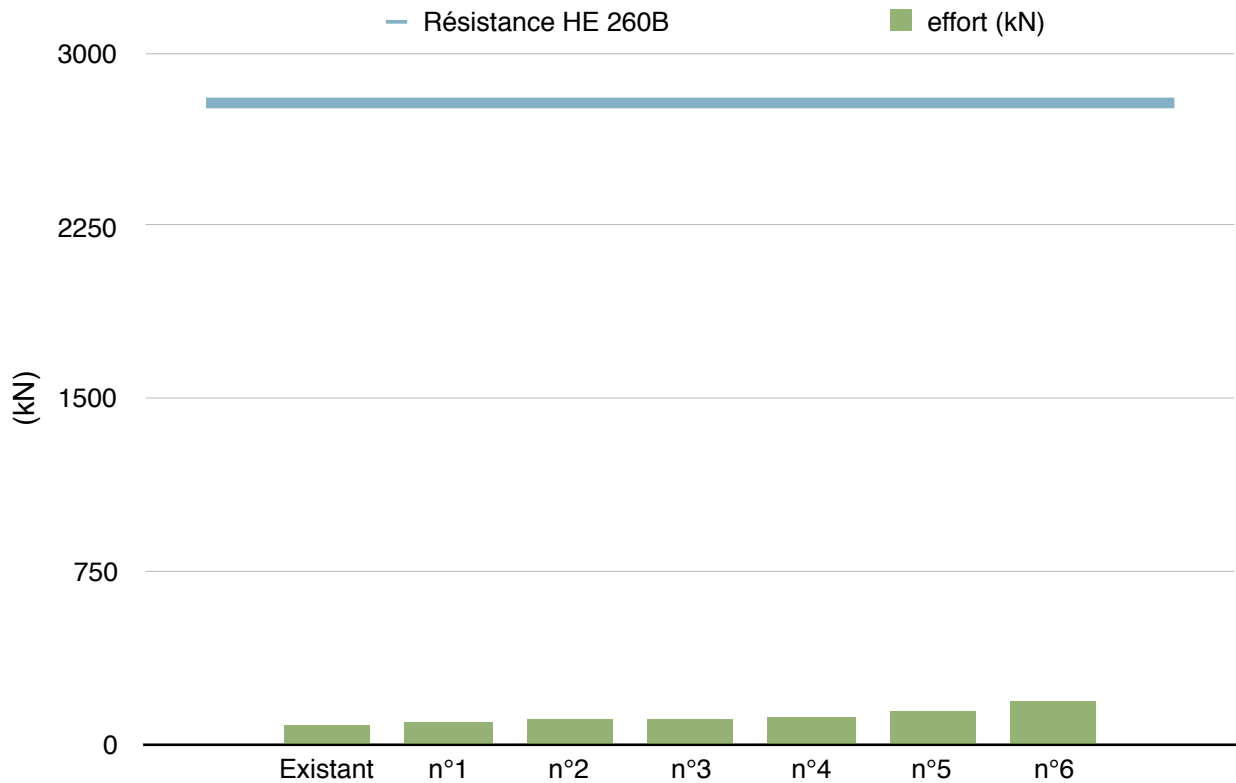


Figure 36: charge admissible en compression pour le profilés HE 260B

**Vérification des poteaux au flambement (ELU)**

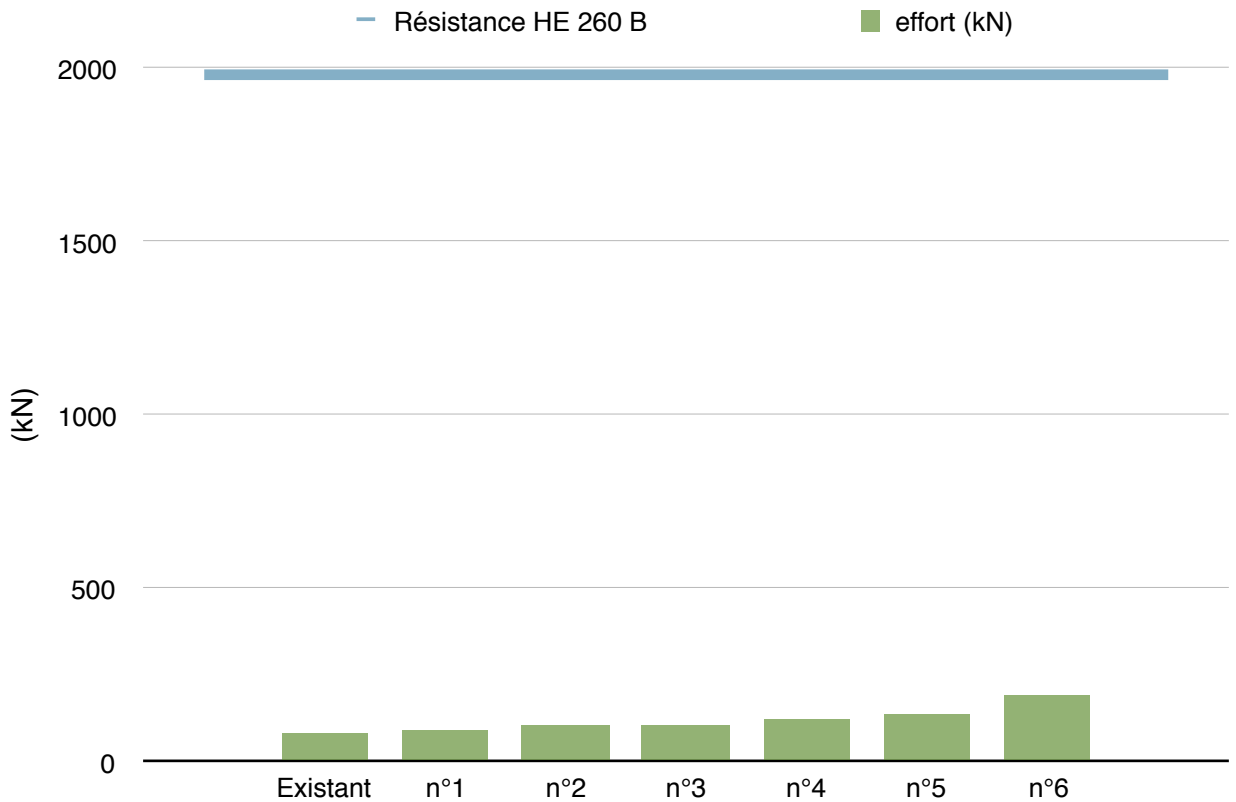


Figure 37: charge admissible au flambement pour le profilés HE 260B

## Synthèse

Ce cas d'atelier de boucherie bien qu'aujourd'hui détruit est riche d'enseignements. Premièrement, des rénovations d'ampleur plus conséquentes durant lesquelles la toiture serait entièrement remplacée peuvent s'avérer très intéressantes car la structure pourrait ici supporter des complexes de végétalisation relativement lourds comme les toitures semi-intensives.

Dans un second temps, cet exemple illustre les faiblesses méthodologiques de l'approche. Pour des dimensions globales similaires, deux profilés peuvent correspondre HE 260 A et HE 260 B. Ces derniers se différencient essentiellement par les dimensions de leur âme et de leur semelle. En apparence mineures ces dimensions ont un impact important sur les caractéristiques des profilés. Dans ce cas, cet impact se traduit par la possibilité ou non de végétaliser la toiture.

L'ambiguïté mise en lumière dans le premier cas d'étude est ainsi maintenue. Des deux structures probables, l'une, offre un potentiel très intéressant tandis que l'autre permet une végétalisation qu'avec un démantèlement de la toiture en place.

### Cas 3 Hangar Rue des trois grands, 22 (Grivegnée)

Pour ce troisième et dernier cas d'étude, les plans de cet entrepôt ont été récupérés grâce à une demande de permis effectuée en 1990 pour réaliser des baies. Cette demande a nécessité un relevé du bâtiment existant, construit en 1956 selon le cadastre.

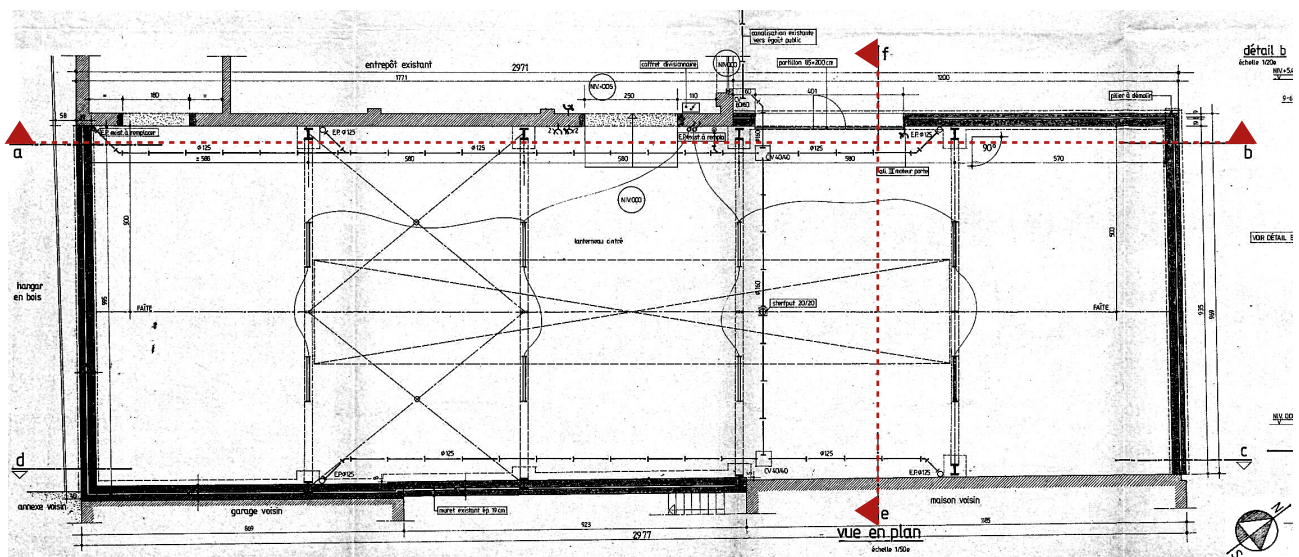
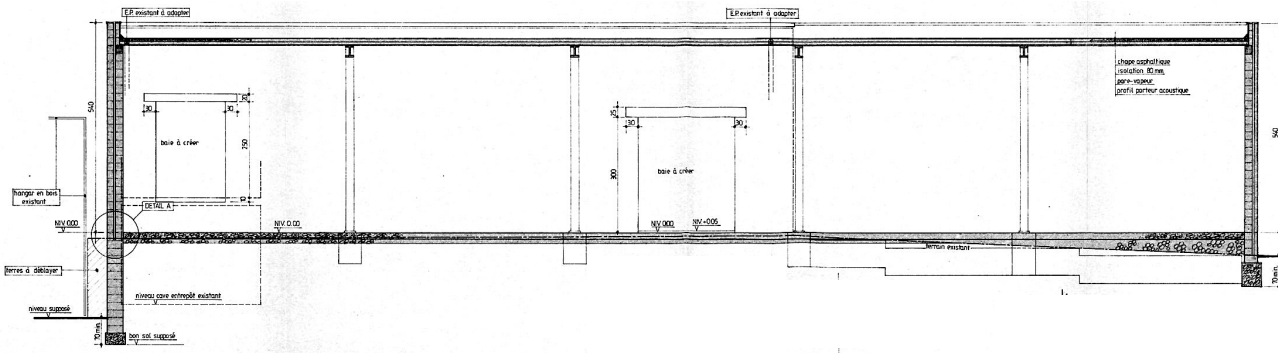


Figure 38: Plan du cas n°3 (Archives de Liège)

La toiture atteint une surface totale d'un peu plus de 280 m<sup>2</sup> incluant un lanterneau de 48 m<sup>2</sup> à 5m au dessus du sol.



Pour cet assemblage, la visite sur site a permis de confirmer l'hypothèse d'un assemblage par boulonnage. Les liaisons poteaux-poutres seront donc modélisées par des rotules ne permettant pas la transmission de moments.

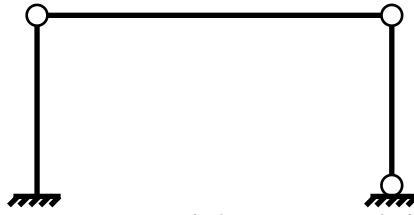


Figure 42 : Modèle structurel du portique

Dans un souci de simplification des modèles, le lanterneau ne sera pas ici pris en compte. Après discussion et consultation de fiches produits, il a été estimé que sa composition en fibre de verre et résine de polyester est plus légère que le complexe utilisé pour le reste de la toiture. Le lecteur doit ainsi garder à l'esprit que ne pas prendre en compte l'impact limité du lanterneau et remplacer la surface qu'il occupe par le complexe utilisé pour le reste de la toiture est une hypothèse légèrement défavorable.

Les charges prises en compte dans l'analyse sont les suivantes :

Charges	Cas existant
Poids propre toiture	0,30 kN/m <sup>2</sup>
Charge de vent	0,18 kN/m <sup>2</sup>
Charge de neige	0,4 kN/m <sup>2</sup>
Charge d'exploitation	0,2 kN/m <sup>2</sup>

Tableau 9 : Charges de calcul du cas n°3

Pour les profils utilisés, les poteaux et poutres sont identiques. En comparant avec le catalogue d'Arcelor-Mittal 3 profils peuvent correspondre les IPE 300, 330 et 360. Les résultats des scénarios de charges sont présentés ci-dessus par critère de vérification.

### Vérification des poutres en flexion (ELU)

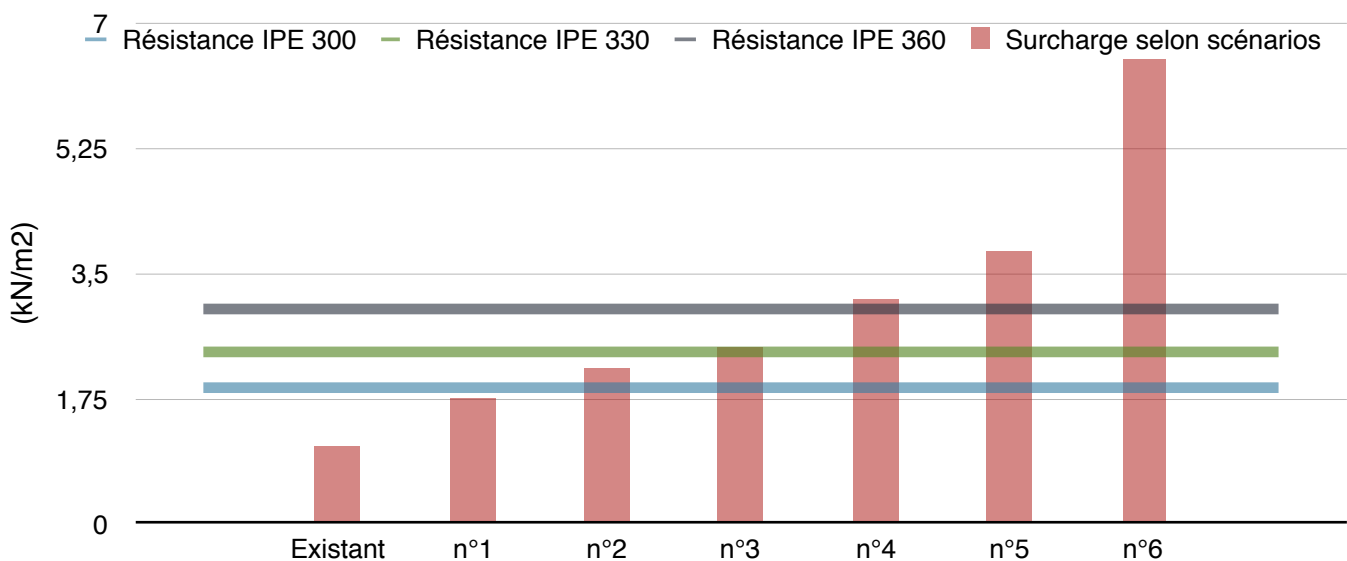


Figure 43: Charge admissible en flexion selon profilé IPE

Le profilé le plus faible, l'IPE 300, permet d'envisager une végétalisation légère à l'image des bâtiments étudiés précédemment. Les IPE 330 et 360 étant plus résistants, ils offrent évidemment plus de potentiel, avec même une végétalisation semi-intensive envisageable pour l'IPE 360.

### Vérification de la flèche des poutres (ELS)

En conservant l'hypothèse d'une flèche maximum de  $L/200$ ,  $L$  étant la longueur de la poutre (ici 9,65m), les résultats obtenus sont les suivants.

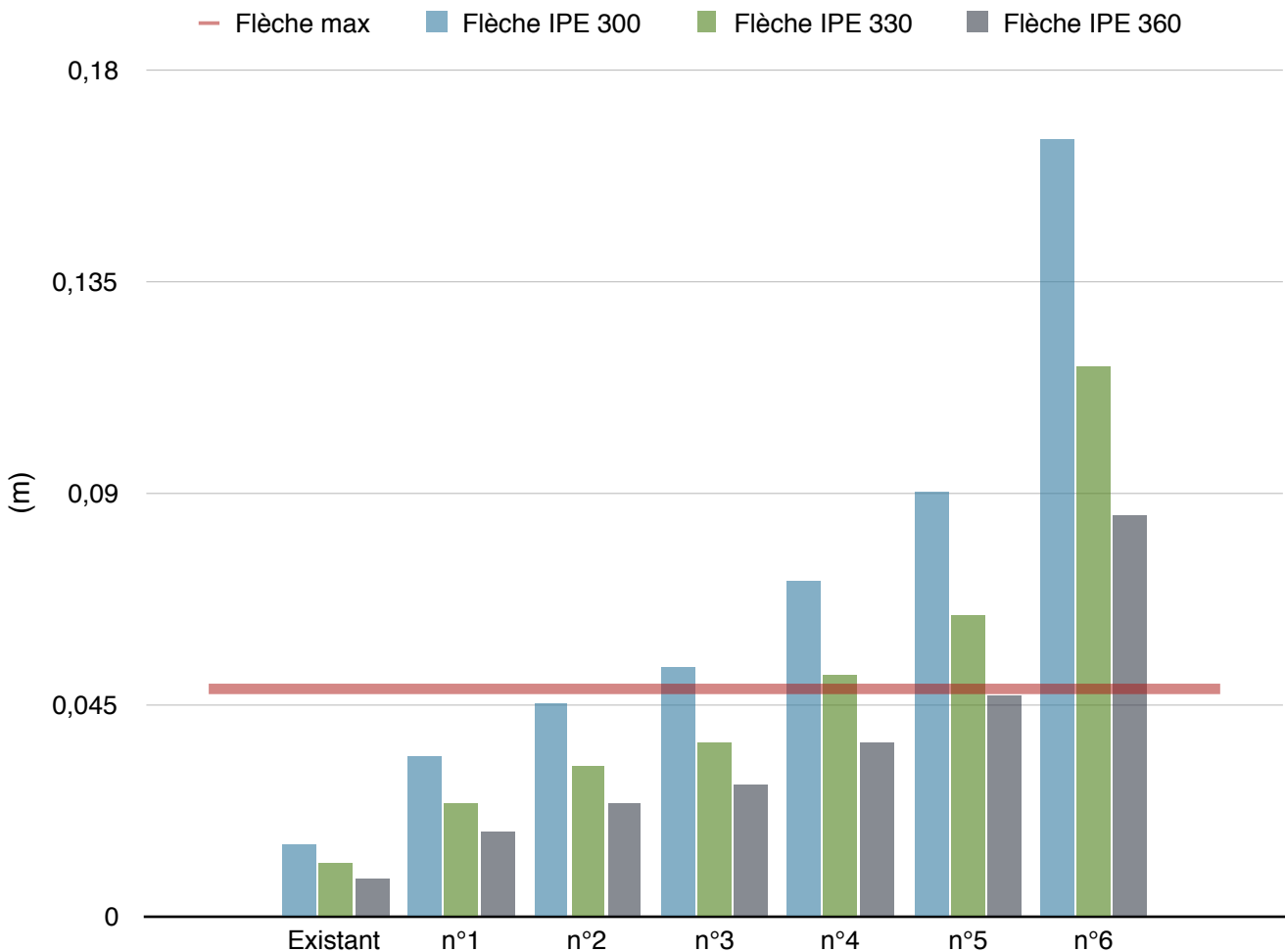


Figure 44: Flèche selon cas de charges des toitures

Les résultats indiquent que pour cette structure, la flexion est plus contraignante que la flèche.

### Vérification des poteaux en compression (ELU)

Les exemples précédents indiquent que les poutres sont très généralement les éléments structuraux dimensionnés avec le moins de marge en termes de capacité portante. Cet exemple n'échappe pas à la règle et mêmes les poteaux avec les profilés aux caractéristiques mécaniques les plus faibles ont largement la capacité d'encaisser les surcharges liées aux scénarios de végétalisation. Les vérifications présentées ci-dessous pour l'IPE 300 illustrent cette assertion.

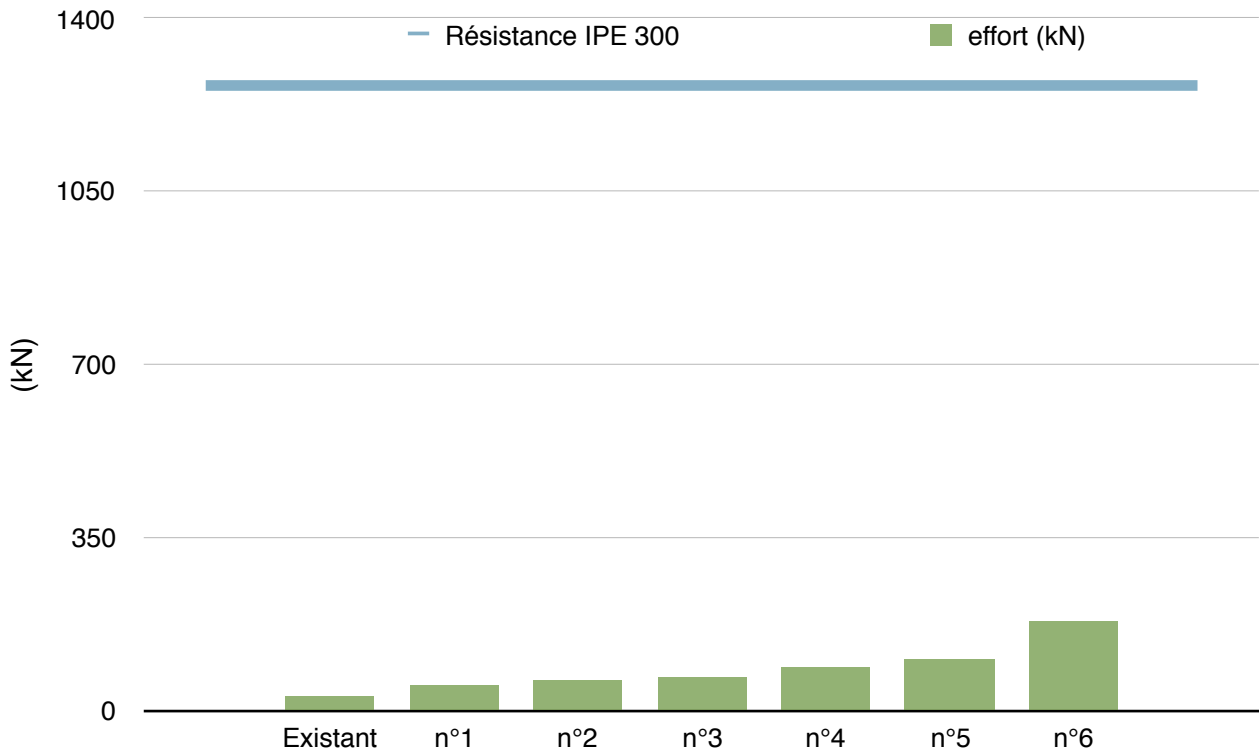


Figure 45: charge admissible en compression pour le profilé IPE 300

**Vérification des poteaux au flambement (ELU)**

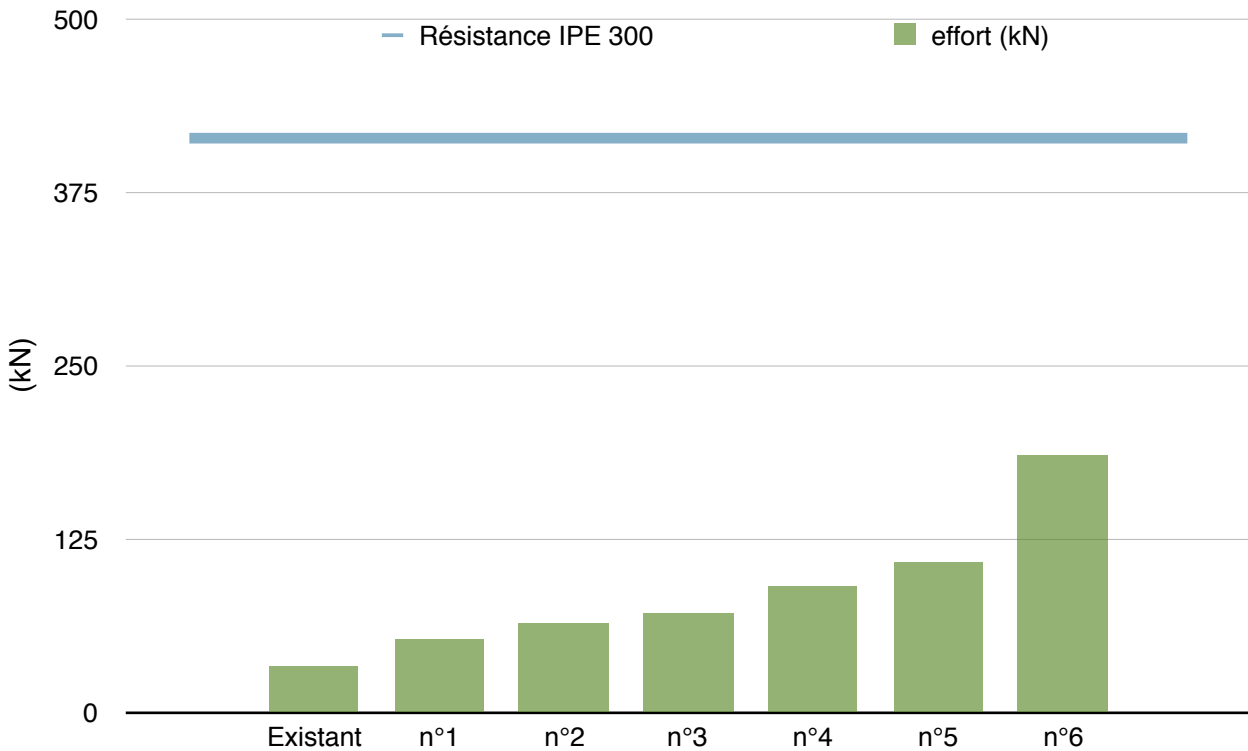


Figure 46: charge admissible au flambement pour le profilé IPE 300

## **Synthèse**

Ce cas n°3 apporte les résultats les plus optimistes, car malgré des incertitudes quant au type de profilé utilisé, tous les profilés testés par le calcul permettent au moins un scénario de végétalisation extensive. De plus, il est intéressant de rappeler que les hypothèses de charges sont défavorables puisque la surface du lanterneau est considérée chargée comme le reste de la toiture ce qui ne correspond pas à la réalité.

## **5 - Conclusion**

Les 3 exemples de bâtiments issus de 3 cadres réglementaires et normatifs différents permettent de nuancer la vision dogmatique écartant systématiquement les structures légères en acier des études de végétalisation à grande échelle. Pour chacune des structures envisagées d'après les données à disposition, un potentiel de végétalisation même infime a toujours été constaté pour au moins un type de profilés. Dans les meilleurs cas, la mise en place d'une toiture semi-intensive est même possible. Bien que les cas soutiennent la proposition de ne pas écarter les structures en acier des stratégies de végétalisation, ils confirment néanmoins que les toitures intensives ou accessibles ne sont pas envisageables car la charge engendrée est trop importante.

Il est intéressant de noter que l'exemple au potentiel le plus important est celui du bâtiment le plus ancien. Bien qu'un exemple soit insuffisant pour extrapoler à l'ensemble, il fournit néanmoins des résultats en faveur de l'hypothèse formulée à la suite de l'analyse de l'évolution du cadre réglementaire et normatif: Les connaissances techniques se sont affinées au cours du temps permettant de dimensionner de plus en plus justement les structures. Ainsi un potentiel structural est probablement présent dans les anciens bâtiments et pour un même système constructif (structure en béton ou structure en acier), les bâtiments les plus anciens semblent avoir le potentiel le plus important.

Au regard de ces conclusions, du gisement de 82 hectares de toitures plates relevé sur le terrain d'étude, de l'âge du bâti et du nombre important de grande surface bâties issues de son passé industriel, la rive Est de Liège possède probablement un potentiel de végétalisation important. Le croisement de ces informations via la cartographie SIG permet dans la suite de ce rapport de quantifier ce potentiel de végétalisation du terrain d'étude et de discuter d'une hiérarchisation des stratégies envisageables.

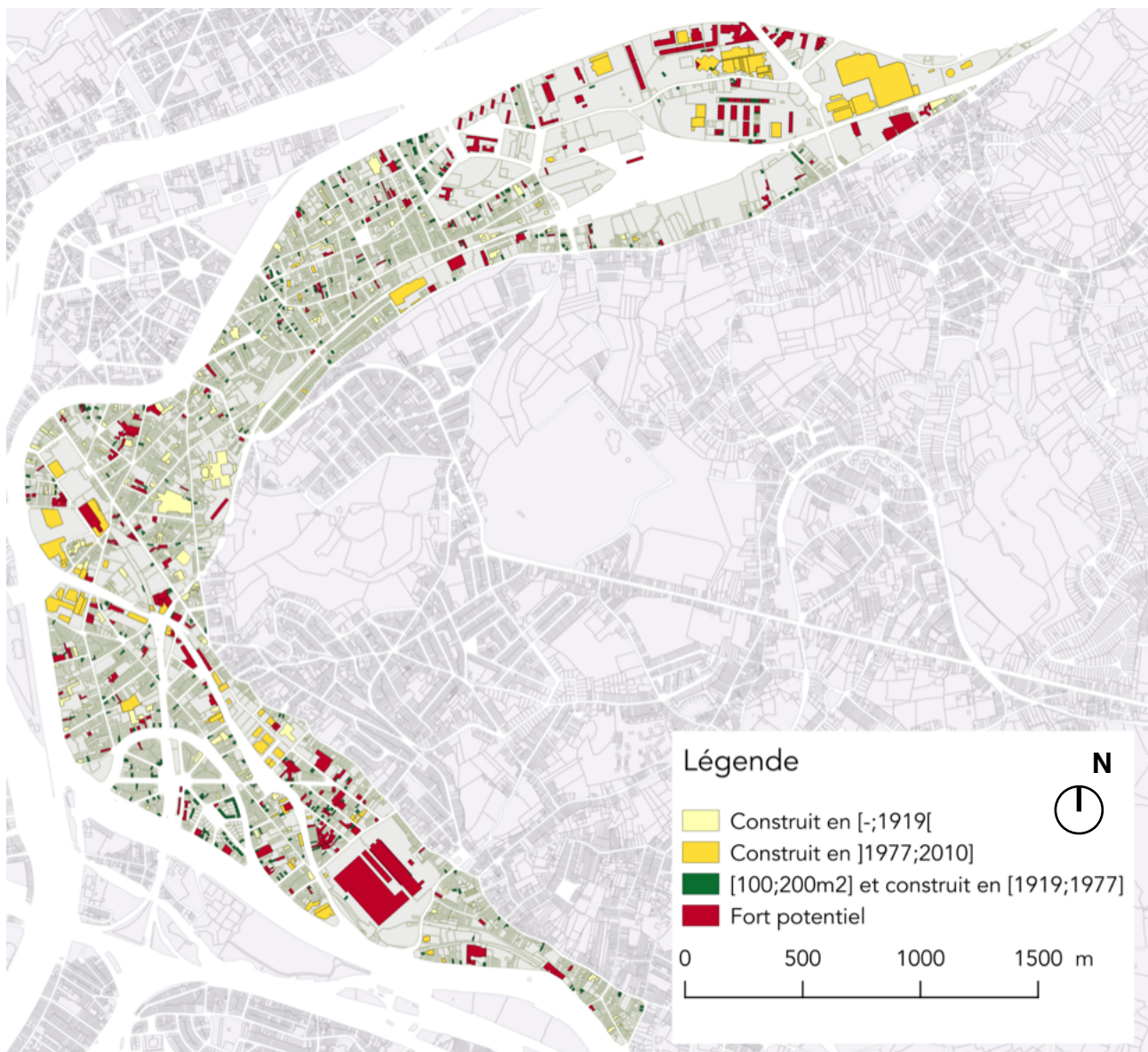




### III - Analyse des résultats

## 1 - Potentiel de végétalisation de la rive Est

En croisant les données et critères fixés dans le chapitre précédent, une hiérarchisation des toitures se dégage selon leur potentiel. Les toitures avec le plus fort potentiel, sont les toitures plates, de plus de 200m<sup>2</sup>, et construites avant l'application des Eurocodes. Les analyses structurelles ne permettent pas de chiffrer l'impact de telle ou telle évolution de la norme. Cette année seuil de 1977 est donc choisie car elle marque un tournant majeur dans les méthodes de dimensionnement mais elle permet aussi de cibler un bâti de plus de 40 ans, qui aujourd'hui nécessite probablement des rénovations d'ampleur. Ces rénovations conséquentes peuvent être l'occasion d'envisager la mise en place d'une toiture verte. La carte synthétisant ce recoupement des données est illustrée ci-dessous.



*Carte 10: Hiérarchisation du potentiel de végétalisation des toitures*

Parmi le gisement brut de quelques 82 hectares de toitures plates, 23,7 hectares, soit pratiquement 29% du gisement total de toitures plate, présentent un fort potentiel de végétalisation d'après l'étude menée. Ces chiffres sont significatifs et ouvrent des perspectives intéressantes.

Il est cohérent de retrouver le plus fort potentiel dans les zones d'activités économiques que sont Droixhe et le boulevard de Froidmont où les surfaces des toitures sont globalement plus grandes. Avec une vision à long terme, lorsque le bâti plus récent est pris en compte, le maillage est étoffé mais les pôles d'intérêts majeurs sont maintenus. Ces deux catégories représentent à elles seules environ 51% du gisement brut de toitures plates.

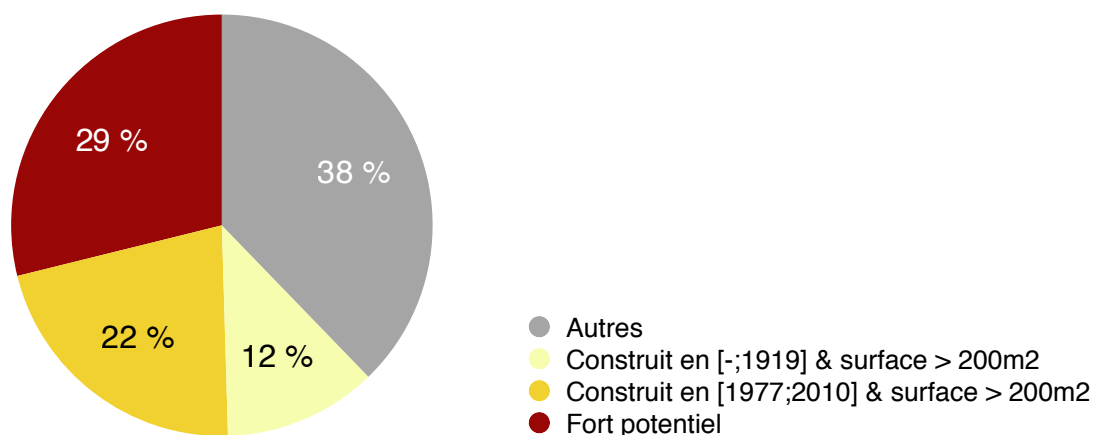


Figure 47: Surfaces cumulées des toitures plates par catégorie

En conservant ces critères sur l'année de construction et la pente mais en intégrant des surfaces plus petites (en vert), de nouvelles zones d'intérêts se démarquent. Notamment vers Bressoux et au nord d'Amercoeur ou encore dans les Vennes. Néanmoins, le nombre important de ces toitures (366 entités) représente seulement 6 % de la surface totale du gisement de toitures plates du terrain. Une réflexion sur ces toitures peut s'avérer intéressante dans une seconde phase visant à renforcer les effets bénéfiques de la végétalisation. La loi de Paréto l'écarte néanmoins des axes de réflexion prioritaire.

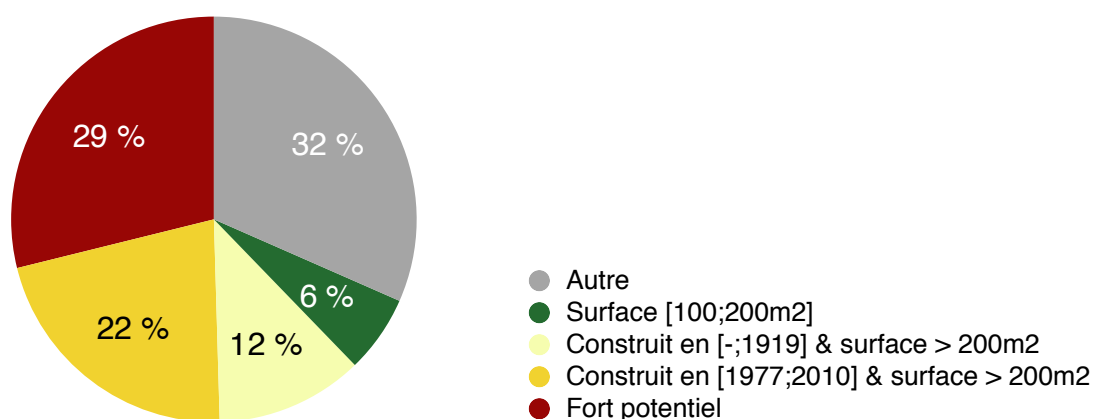


Figure 48: Surfaces cumulées des toitures plates par catégorie en intégrant les moyennes toitures

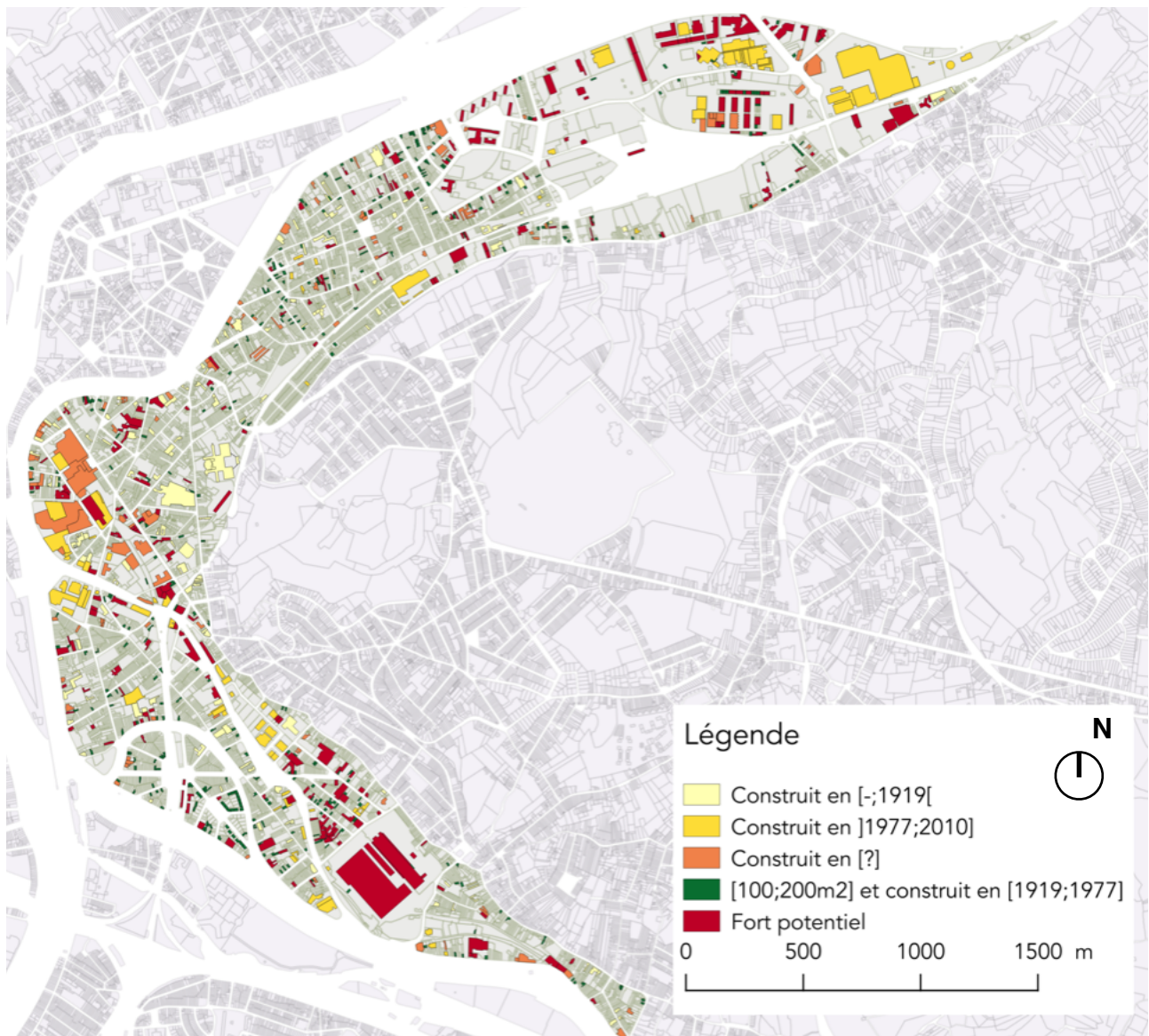
Pour être complet, il est nécessaire de rappeler qu'un peu plus de 600 parcelles ne possèdent pas d'année de construction renseignée au cadastre et n'apparaissent donc pas dans ces chiffres et cartographies. Parmi ces toitures, nous pouvons légitimement soupçonner un potentiel plus ou moins élevé de végétalisation, à l'image d'une partie de la Médiacité qui n'apparaît pas sur la carte précédente.

## 2 - Limites de l'étude

Pour interpréter au mieux les résultats obtenus, il est nécessaire de comprendre les facteurs qui peuvent nuancer cette cartographie.

### a) Années de construction

Afin de confirmer l'intérêt qu'il y aurait à renseigner toutes les années de construction, la carte ci-dessous reprend les critères de surface et de pente et intègre (en orange) les bâtiments dont l'année de construction est inconnue.



Carte 11: Hiérarchisation du potentiel de végétalisation des toitures avec bâtiment dont l'année de construction est inconnue.

Au-delà des quelques bâtiments comme la Médiacité visibles au premier coup d'oeil, la carte et surtout l'analyse de données mettent en avant un potentiel considérable de toitures en plus. Le diagramme ci-dessous reprend les surfaces cumulées par catégorie. Ainsi parmi les surfaces de plus de 200m<sup>2</sup> plates, les données lacunaires impactent 21% du potentiel en termes de surface cumulée.

Il est aussi remarquable que malgré le nombre très importants de bâtiments construits avant 1977 (cf. II-2-c)Un bâti ancien ?), la surface cumulée de bâtiment à toiture plate de plus de 200 m<sup>2</sup> construit après 1977 est loin d'être négligeable avec 34% de la surface totale. Ce phénomène peut s'expliquer par une généralisation de la typologie dite en « boîte à chaussures » au détriment des toitures à sheds pour les très grandes surfaces. Ainsi sur les 30 plus grandes toitures du terrain, 12 furent construites avec certitude après 1977. Parmi ces 12 toitures, 11 sont plates et représentent à elles seules 9,5 hectares soit 53,8% de la surface totale des toitures de plus de 200m<sup>2</sup> bâties après 1977.

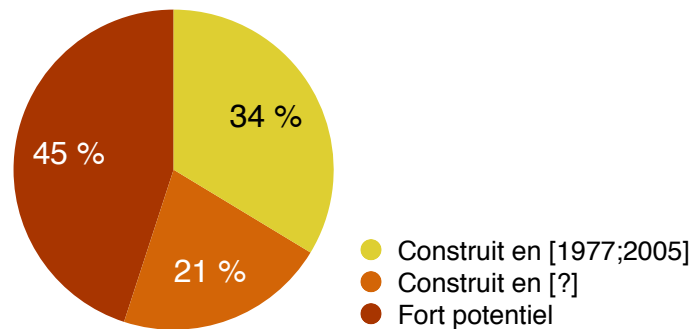


Figure 49: Surfaces cumulées des toitures plates de plus de 200m<sup>2</sup> par année de construction

Dès lors, l'intégration des bâtiments dont l'année de construction n'est pas connue représente un potentiel important mais d'autres paramètres viennent aussi nuancer ces résultats.

## b] Rénovations antérieures

Parmi la base de données du cadastre, la date de la dernière modification nécessitant un permis est généralement renseignée. Plus le bâtiment est ancien et plus il est probable que le bâtiment ait déjà été rénové. Une rénovation importante impactant la structure du bâtiment fausse alors le résultat obtenu avec la méthode utilisée dans ce mémoire qui ne tient compte que de l'année de construction. Néanmoins ce critère de la date de dernière modification soumise à permis n'a pas été retenu pour deux raisons.

Comme les années de construction, les données des années de modification sont incomplètes. Dès lors leur prise en compte nuance d'autant plus les résultats obtenus. Deuxièmement, la base de données cadastrale n'indique pas la teneur de la rénovation. Il peut certes, s'agir d'une rénovation importante qu'il serait pertinent de prendre en compte mais il peut tout aussi bien s'agir de travaux plus modestes ou n'impactant en rien la structure du bâtiment. De tels travaux ont d'ailleurs permis d'accéder à deux des trois plans supports des études de cas. L'ajout d'une annexe (cas 1) et la création d'une baie dans une paroi non porteuse (cas 3). Prendre en compte ces permis ne semble pas judicieux et globalement ces travaux sont plus fréquents que les rénovations lourdes modifiant la structure du bâtiment.

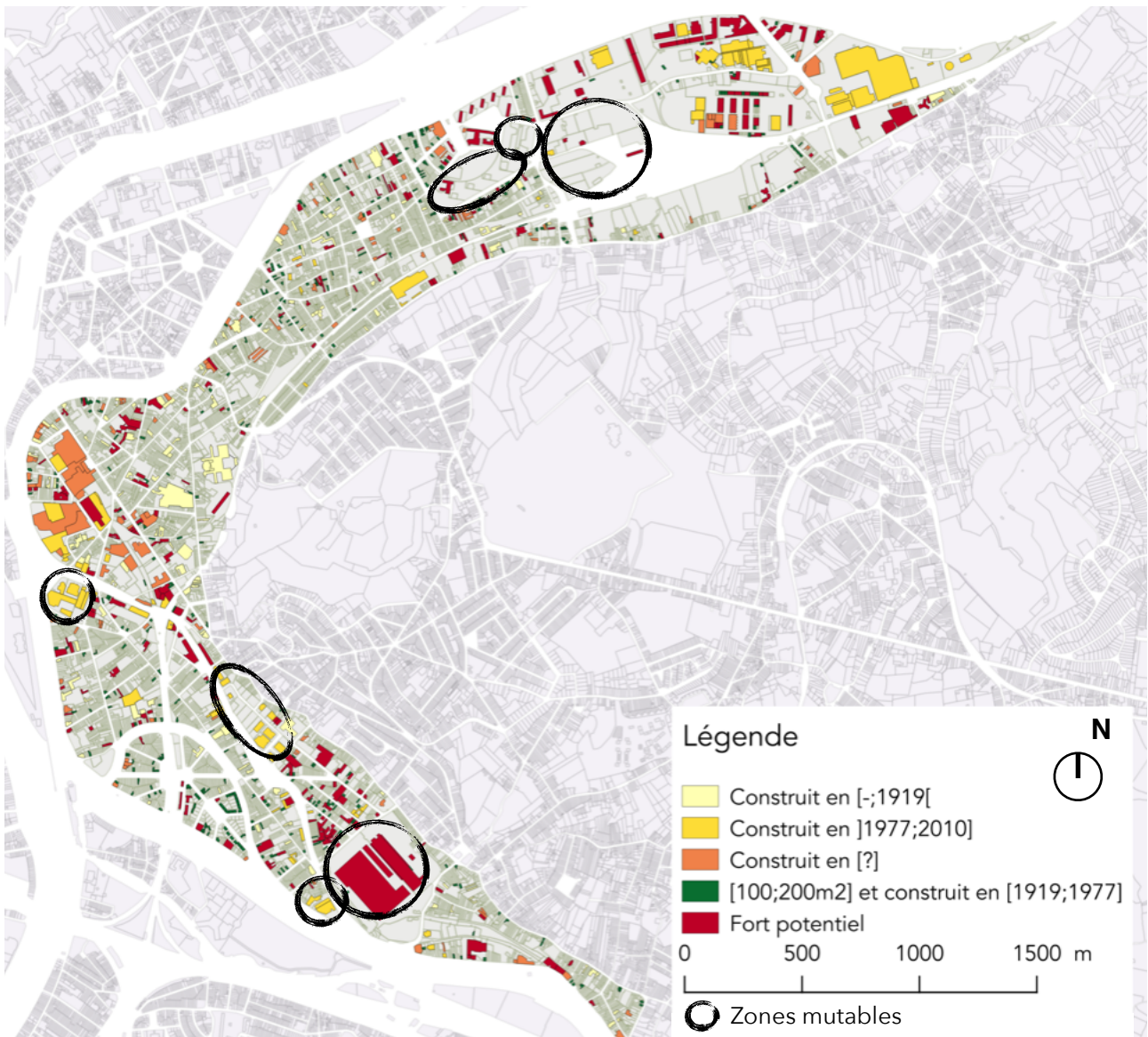
Ainsi les dates des rénovations sans indication de la teneur des travaux est un critère incomplet qui n'a pas été retenu dans cette étude mais que le lecteur doit garder à l'esprit dans l'interprétation des résultats de ce mémoire.

## c) Intérêt urbanistique

Végétaliser ou démanteler? La question a été posée lors d'un entretien avec le service d'urbanisme de Liège. Elle est d'autant plus pertinente qu'en intégrant les structures en acier, l'étude intègre de nombreux hangars industriels dont l'intérêt urbanistique est questionnable aujourd'hui.

Durant cet entretien, les zones dites « mutables » ont été succinctement croisées avec les résultats de l'étude. Ces zones correspondent à des projets importants de la ville dans des îlots où l'intérêt urbanistique du bâti actuel est remis en question. Il est intéressant de constater que la localisation de ces projets correspond globalement aux zones avec potentiel important identifié par l'étude.

Quelques-unes de ces zones sont à Droixhe dans des îlots déjà démantelés en grande partie. Le reste des zones mutables, concernent des îlots ou bâtiments le long du boulevard de Froidmont.



Carte 12: Localisation des « zones mutables »

Le démantèlement des bâtiments le long du boulevard de Froidmont diminue nettement le potentiel de végétalisation des toitures envisageable dans une démarche de rénovation.

Cependant « l'intérêt urbanistique » plus subjectif et complexe que les critères précédemment évoqués n'a pas été intégré dans cette méthode. En effet, le démantèlement d'un bâtiment peut céder la place à de nouvelles constructions et permet d'envisager des espaces végétalisés en plein pied ou en toiture probablement de meilleure qualité que ceux envisageables en rénovation.

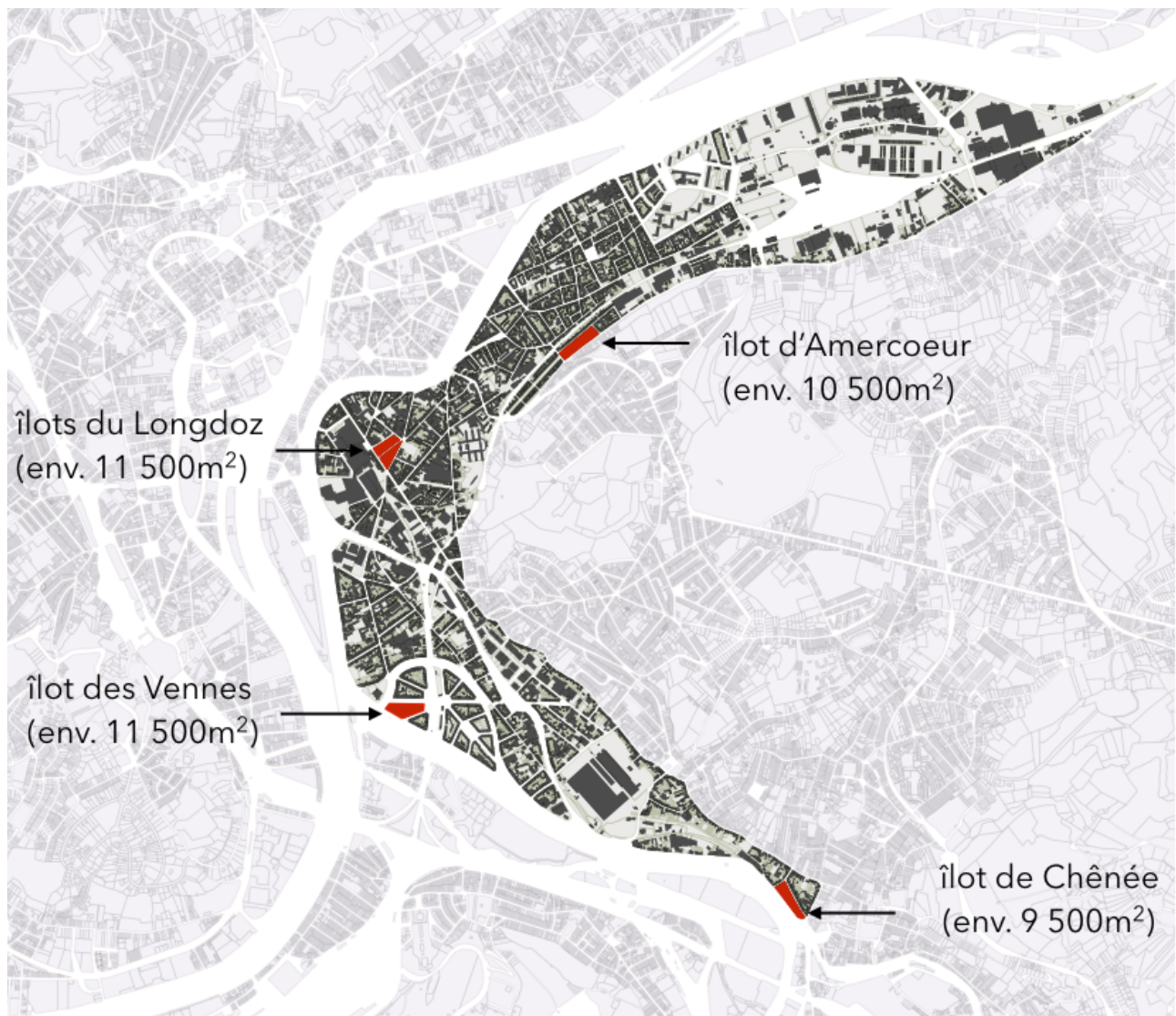
Ainsi les « zones mutables » limitent le potentiel de végétalisation dans le cadre d'une rénovation mais augmente d'un point de vue global le potentiel de végétalisation du terrain d'étude.

Ces cartographies fournissent des données significatives et nuancées mais minimisent encore le potentiel de végétalisation des toitures à Liège. En effet, à travers cette méthodologie les annexes souvent à toitures plates sont ici considérées comme des toitures en pente lorsque le volume principal est en pente. Les résultats présentés précédemment mettent en avant un potentiel compliqué à mobiliser mais bien présent parmi les moyennes toitures (entre 100 et 200m<sup>2</sup>). L'échantillonnage présenté dans le chapitre suivant se propose de pousser la réflexion parmi les très petites toitures.

### 3 - Echantillonnage des petits toits plats

Les grandes toitures sont au coeur de ce mémoire car elles présentent plus d'intérêts à être végétalisées afin d'optimiser la gestion des eaux, la limitation des coûts de mise en oeuvre ramenés au m<sup>2</sup> ou encore la limitation des démarches administratives (car moins de propriétaires). La méthodologie de cartographie permet de mettre en lumière ces grandes toitures mais elle écarte une typologie complètement différente et qui représente une surface cumulée non négligeable : les annexes.

Afin d'illustrer l'importance que pourraient représenter les annexes dans les stratégies de végétalisation, ce court chapitre présente quelques exemples d'îlots examinés plus précisément.



Carte 12: Localisation des îlots échantillons

Les échantillons ont tous une surface d'environ 1 hectare et sont répartis sur l'ensemble de la zone d'étude comme le montre la carte ci-dessus



## Ilot d'Amercoeur

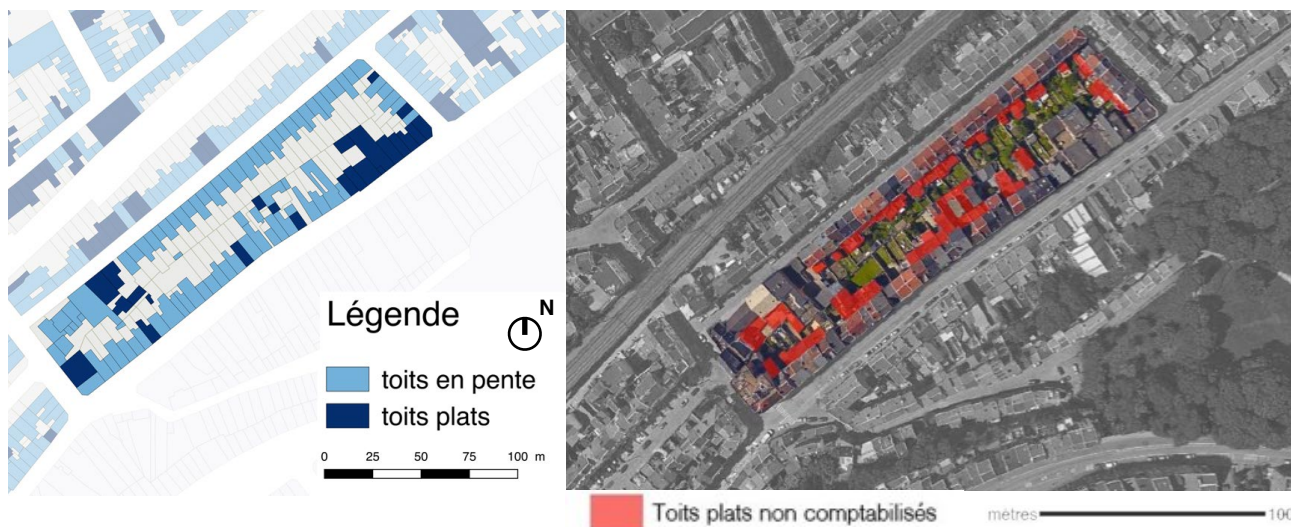


Figure 50 : à gauche : zoom sur le relevé des toits plats d'un îlot d'Amercoeur; à droite : toits plats non comptabilisés dans cet îlot

Au sein de cet îlot d'habitation, c'est un peu plus de 1700 m<sup>2</sup> de toits plats qui ne sont pas comptabilisés en tant que tel mais en tant que toitures en pente. Pour un îlot de plus de 10 000 m<sup>2</sup>, cette surface représente un peu plus de 16% de la surface totale. Les graphiques suivants permettent de comparer les résultats établis par l'approche globale (pente du toit déterminée par le volume principal à rue) et les résultats de l'analyse plus précise de l'îlot.

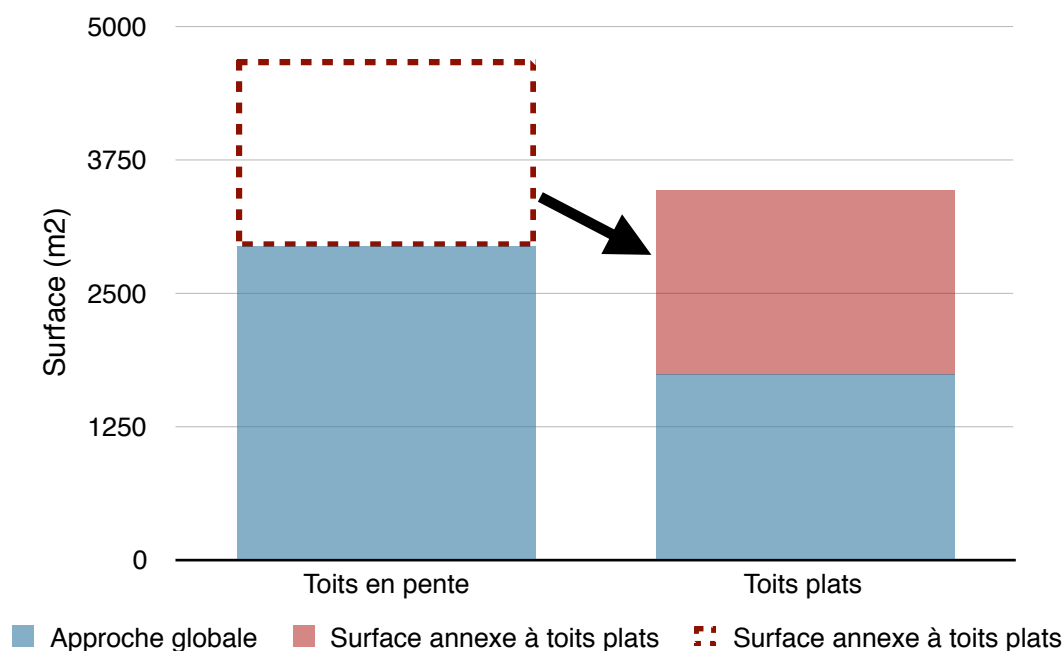


Figure 51: Comparaison entre les résultats de l'approche globale et détaillée (îlot d'Amercoeur)

Le résultat est édifiant, la prise en compte des toitures plates des annexes double le potentiel de végétalisation de cet îlot.

## Ilots du Longdoz

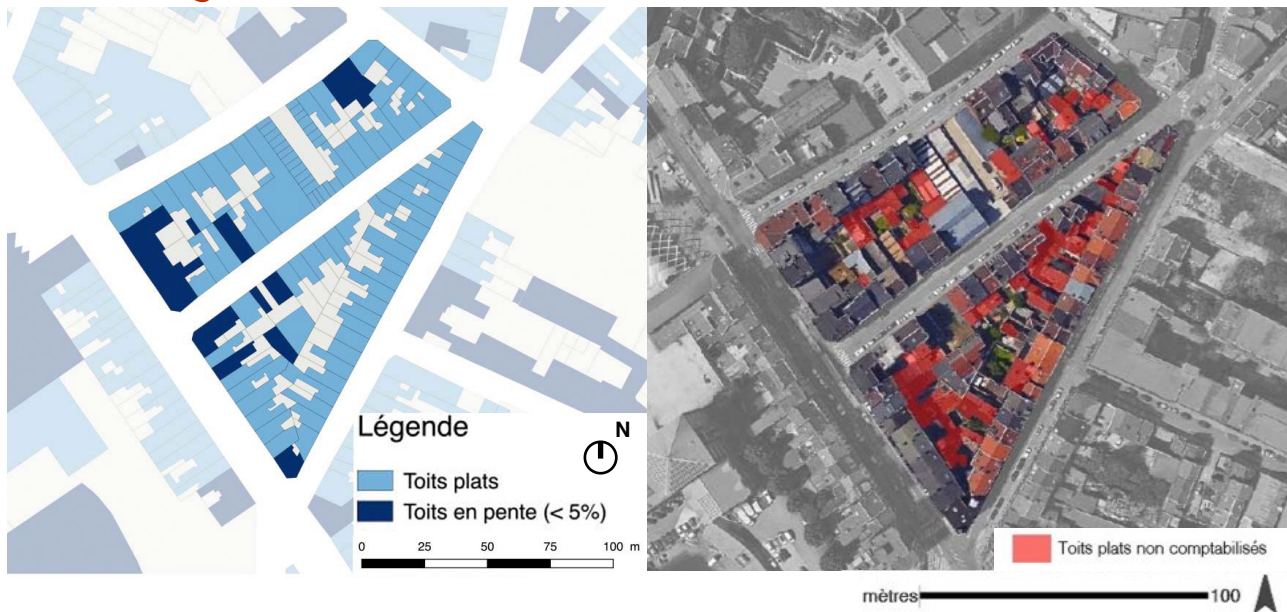


Figure 52: à gauche : zoom sur le relevé des toits plats d'un îlot du Longdoz; à droite : toits plats non comptabilisés dans cet îlot

Ces deux îlots en plein centre de la zone d'étude sont les plus dépourvus en surfaces perméables et végétales parmi les échantillons étudiés. La densité bâtie du centre-ville y est ici parfaitement illustrée. La proportion de toits plats non comptabilisés dans l'approche globale est pourtant fortement similaire à celle d'Amercoeur.

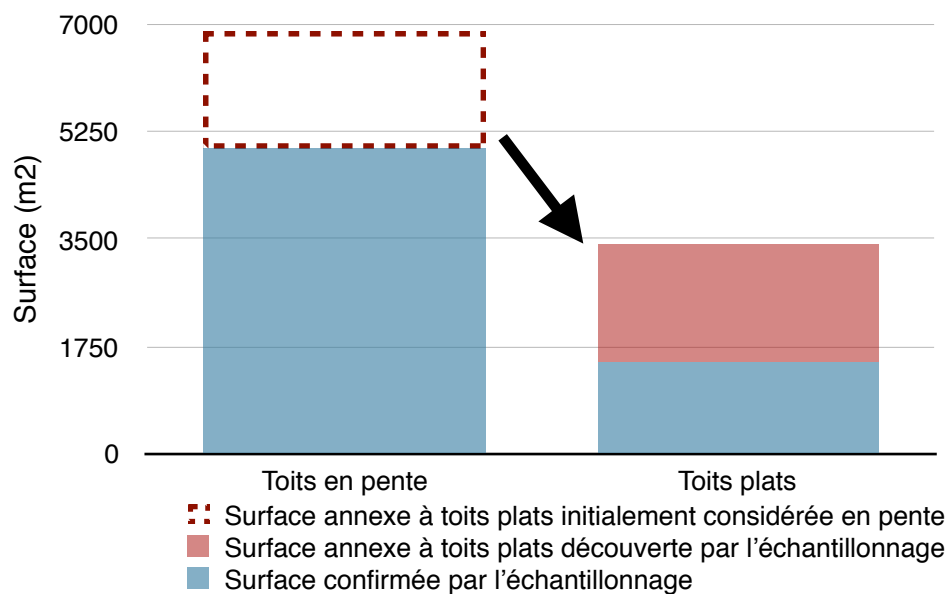


Figure 53: Comparaison entre les résultats de l'approche globale et détaillée (îlots du Longdoz)

Avec presque 1900m<sup>2</sup>, les annexes à toits plats, représentent, à l'image de îlot d'Amercoeur un peu plus de 16% de la surface de l'îlot. En les comptabilisant, le potentiel de végétalisation est dans ce cas plus que doublé puisque initialement la surface cumulée des toits plats était d'environ 1500m<sup>2</sup>. Sur des îlots aussi densément construits, les arguments en faveur des toitures vertes s'appuyant sur une meilleure gestion des eaux pluviales et une limitation des îlots de chaleur sont particulièrement pertinents.

## Ilots des Vennes

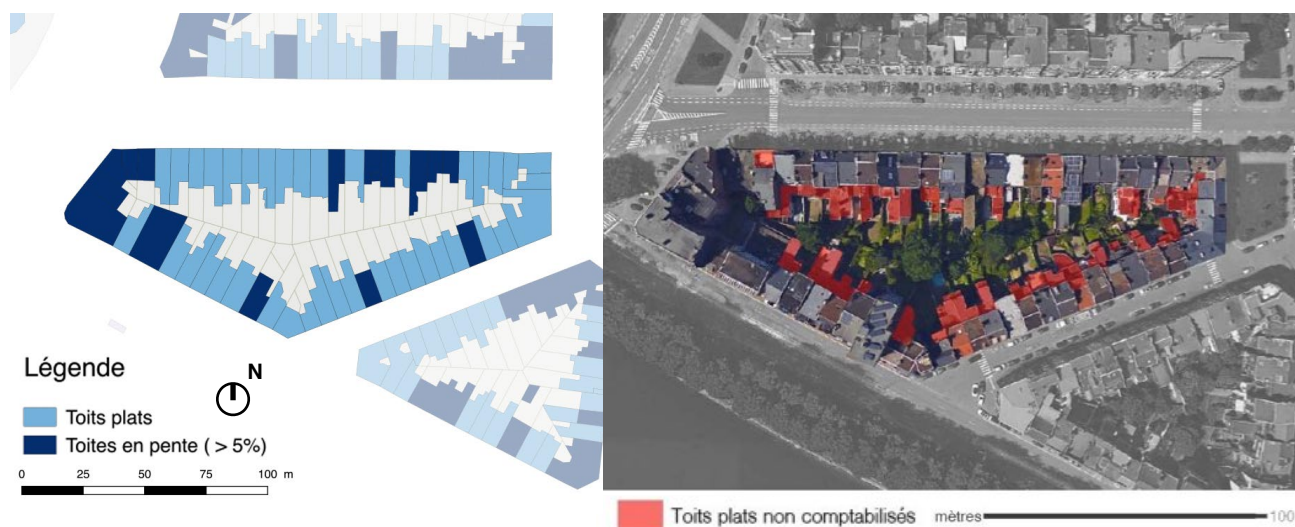


Figure 54: à gauche : zoom sur le relevé des toits plats d'un îlot des Vennes;  
à droite : toits plats non comptabilisés dans cet îlot;

Cet îlot des Vennes présente quasiment la même surface au sol que la surface cumulée des deux îlots du Longdoz. Dans ce cas l'absence de voie traversante a permis de conserver des parcelles plus grandes et des jardins en fond de parcelles.

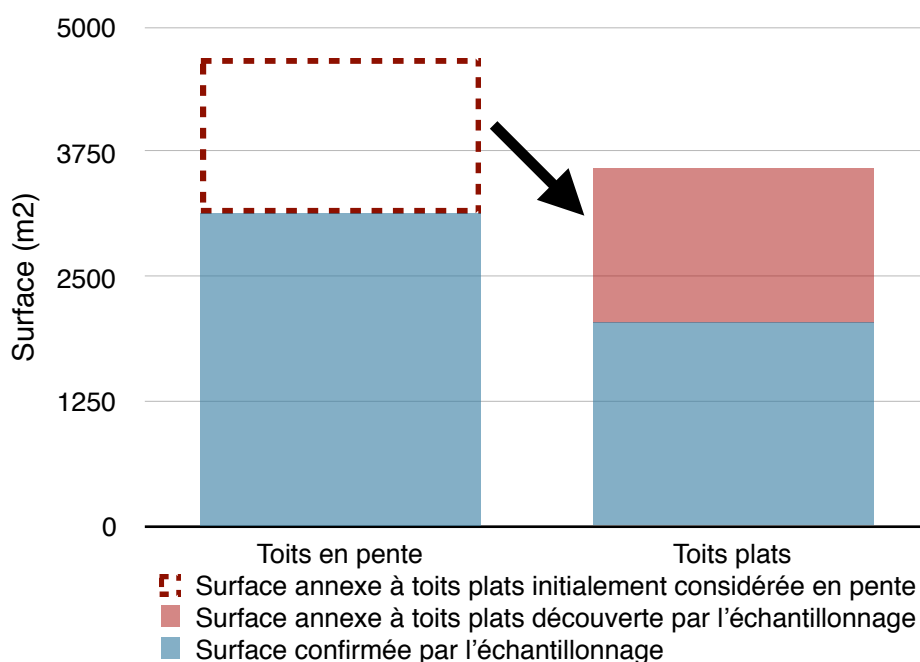


Figure 55: Comparaison entre résultats de l'approche globale et détaillée (îlot des Vennes)

Du point de vue des annexes à toits plats, leur surface cumulée de plus de 1500m<sup>2</sup> représente plus de 13% de la surface de l'îlot. C'est légèrement plus faible que les îlots observés précédemment mais le gisement lié aux annexes est néanmoins considérable. Il représente 75% de la surface de toits plats obtenue par l'approche globale.

## Ilot de Chênée



Figure 56: à gauche : zoom sur le relevé des toits plats d'un îlot de Chênée ;  
à droite : toits plats non comptabilisés dans cet îlot

L'îlot le plus excentré des 4 exemples présente un front bâti le long des quais de l'Ourthe entièrement constitué de bâtiments à toiture plate. Dès lors, les annexes de ces bâtiments lorsqu'elles sont représentées sur le cadastre ont déjà été comptabilisées avec la méthode d'approche globale. Deux annexes ont ailleurs été comptabilisées dans les surfaces à toits plats alors qu'elles possèdent une toiture en pente.

Le diagramme (Fig; 57) permet d'observer que les surfaces quasiment égales de toitures en pente et toitures plates obtenues grâce à l'approche globale sont en réalité bien différentes. L'approche détaillée permet d'affirmer que la surface cumulée des toitures plates représente presque 75% de la surface totale des toitures pour cet îlot.

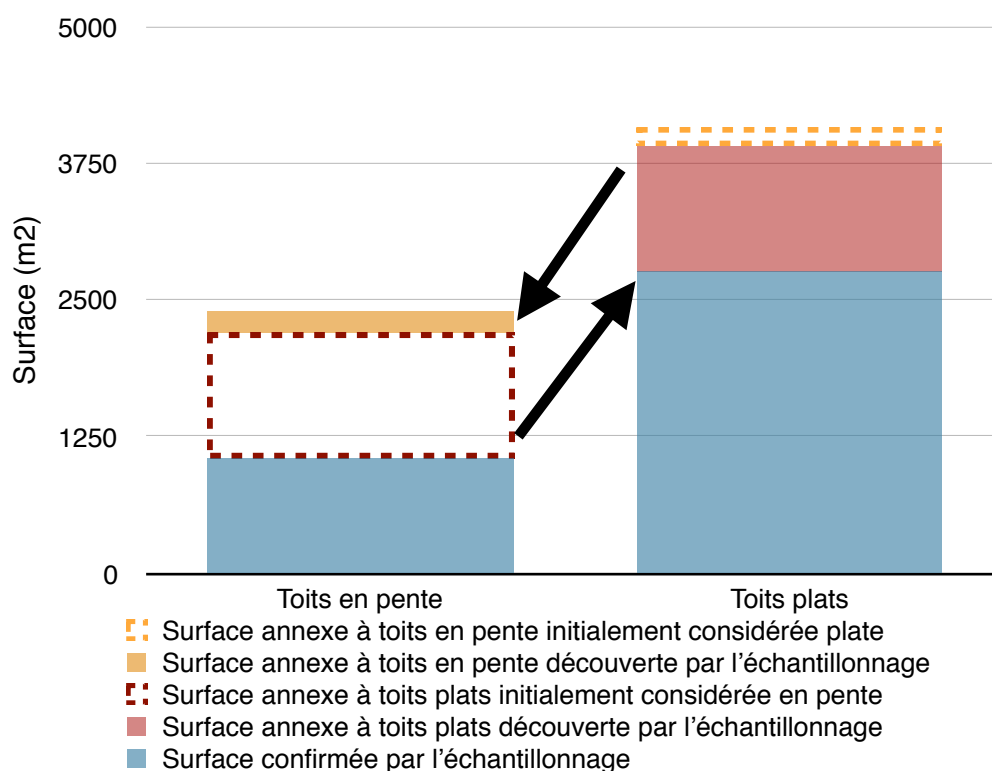


Figure 57: Comparaison entre résultats de l'approche globale et détaillée (îlot de Chênée)

## Synthèse

Ainsi ces exemples mettent en relief les résultats obtenus. Le cas d'un volume principal à toiture plate et d'un volume annexe à toiture en pente observé à Chênée reste marginal au vue des échantillons. À l'inverse, le cas d'un volume principal à toiture en pente et d'un volume annexe à toiture plate est bien plus présent. Ainsi le potentiel de végétalisation des petites surfaces est largement sous-estimé à travers l'approche utilisée.

Au vue de la diversité des îlots et des typologies bâties, il est difficile d'extrapoler de manière pertinente ces constatations à l'ensemble du site d'étude mais le lecteur doit garder à l'esprit que dans la catégorie des petites surfaces (<50m<sup>2</sup>) le potentiel de végétalisation est largement sous-évalué notamment dans les îlots d'habitations.

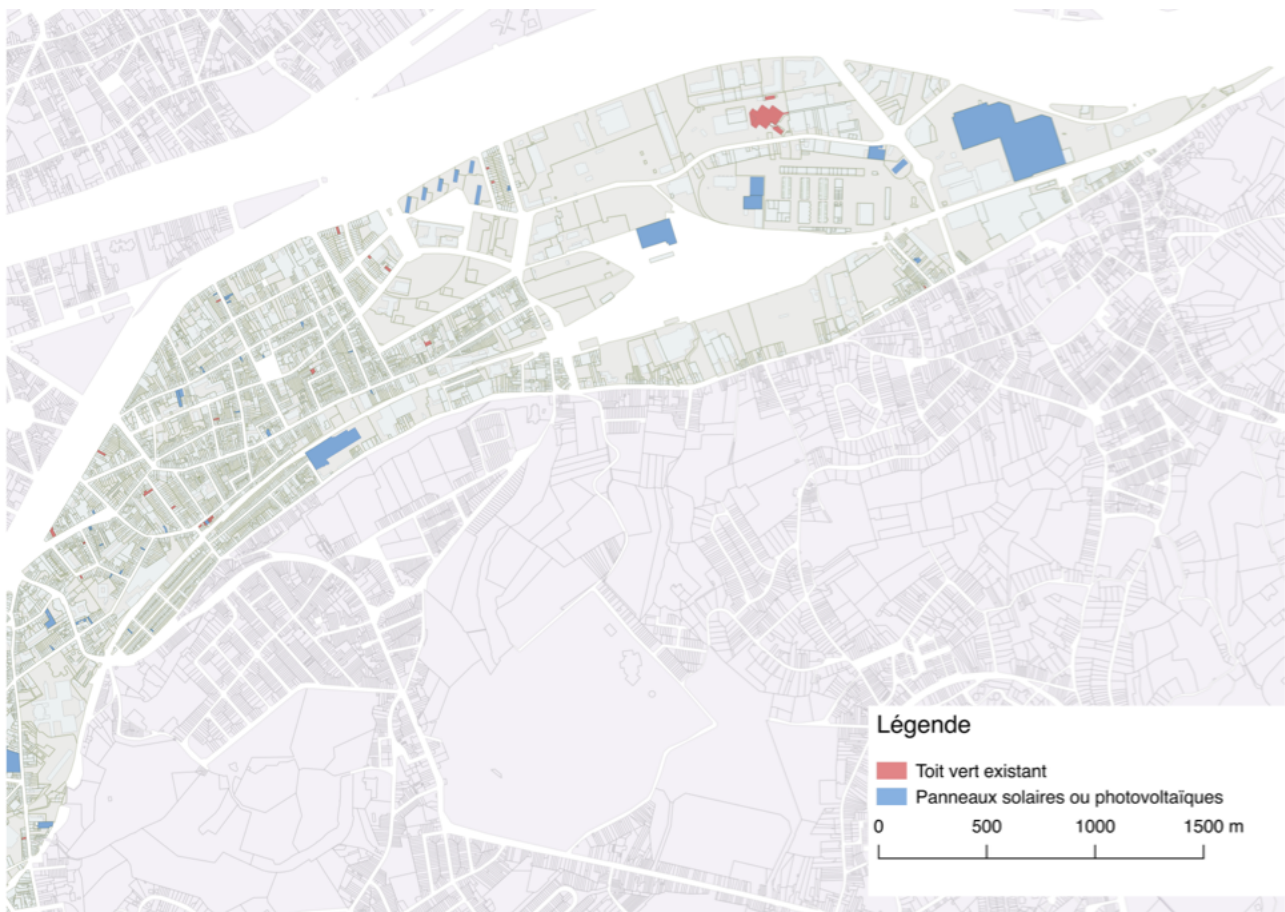
De ce potentiel conséquent et sous évalué, ne pouvons nous pas envisager qu'une partie soit déjà exploitée ?

## 4 - Des toitures déjà appropriées?

Parmi les nombreuses autres possibilités d'appropriation de la toiture, deux solutions sont généralement opposées aux toitures vertes pour des toitures inaccessibles en milieu urbain: les panneaux (solaires et/ou photovoltaïques) et les bassins d'orage.

Les bassins d'orage profitent notamment du durcissement des exigences réglementaires dans le domaine de la gestion de l'eau. Bien qu'ils présentent des avantages nettement moins diversifiés que les toitures vertes, ils sont plus efficaces que ces dernières pour la gestion des eaux pluviales. Néanmoins la concurrence de ce type de solution reste limitée car ces installations sont onéreuses et ne sont envisagées que sur les nouveaux projets.

Malgré l'âge moyen du parc immobilier et la volonté de limiter la consommation énergétique voire même de produire de l'énergie, il est étonnant de constater à quel point, les toitures restent sous-utilisées sur la rive Est de Liège. Les résultats de la cartographie SIG permettent d'en mesurer l'ampleur (cf Cartes 13 et 14).

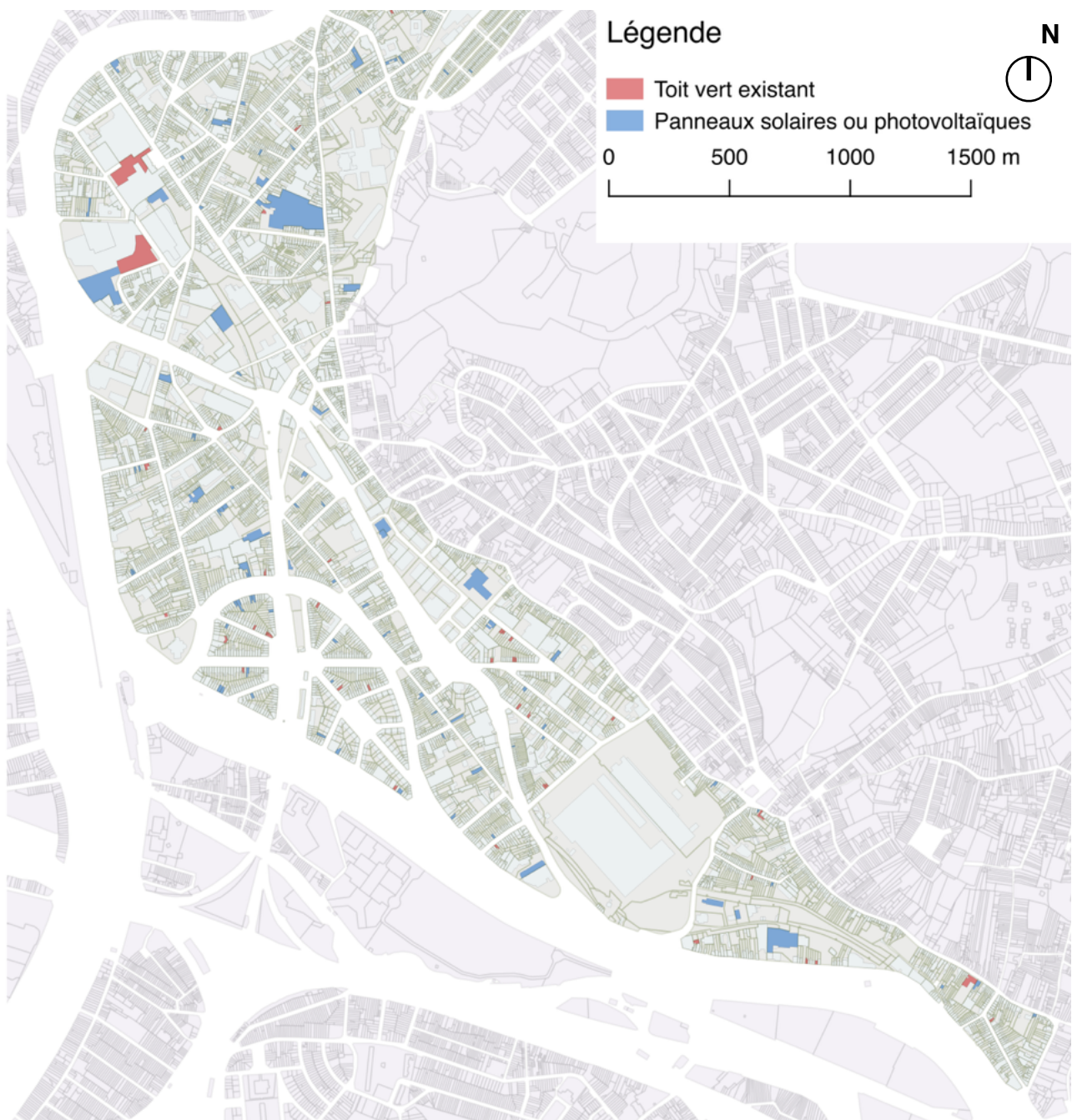


Carte 13: Toits verts ou équipés de panneaux solaires et/ou photovoltaïques en 2014  
Zone Nord de la zone d'étude

Sur base de vues satellites datant de la période allant de octobre 2013 à juillet 2014, seules 64 toitures vertes ont pu être dénombrées et une seule toiture a potentiellement une végétalisation intensive.

En toute rigueur deux points méthodologiques doivent être précisés. Toutes les toitures vertes sont comptabilisées, qu'elles soient végétalisées artificiellement ou colonisées spontanément car les vues satellites ne permettent généralement pas de les différencier.

Deuxième point crucial, certains sédums sont difficiles à différencier des toitures recouvertes de gravier qui avec le temps ont été colonisées par des mousses. En cas de doutes, les toitures ont été classées dans la catégorie des toitures végétalisées. Ainsi le nombre de 64 toitures vertes est très probablement surestimé.



Carte 14: Toits verts ou équipés de panneaux solaires et/ou photovoltaïques en 2014  
Zone Sud de la zone d'étude

Malgré cette surestimation, le nombre de toitures vertes est presque dérisoire face aux 9586 entités de l'échantillon, il représente moins de 0,7% des toitures. Pour comparaison, le nombre de toitures équipées de panneaux solaires et/ou photovoltaïques est lui aussi anecdotique avec 128 entités (soit le double des toitures vertes) il concerne environ 1,34% du stock bâti étudié.

Dernier constat, le cas, pourtant envisageable, d'une toiture verte équipée de panneaux solaires et/ou photovoltaïques n'a jamais été observée. Cette observation illustre une réalité liégeoise récurrente et malheureusement fautive qu'est l'opposition entre panneaux solaires et toitures vertes.

*« Quand on suggère de faire une toiture végétale, on nous dit : oui mais moi je veux mettre des panneaux photovoltaïques » (23/05/2017)*

Ce verbatim issu d'un entretien avec les services d'urbanisme de la ville de Liège marque les réticences, ou plutôt, la méconnaissance présente dans l'esprit des porteurs de projet.

Sous réserve d'une réflexion sur le choix des essences plantées, l'installation de panneaux solaires peut tout à fait être envisagée sur une toiture verte et peut même s'avérer bénéfique selon la fiche technique 4.2 émise par Bruxelles environnement. *« Les toitures vertes, le substrat, les plantations et leur évapo-transpiration permettent d'améliorer le rendement des installations photovoltaïques. Elles auront un rôle sur le rafraîchissement des panneaux photovoltaïques en été »* (IBGE, 2010, p. 7-8). En effet en période estivale, les cellules photovoltaïques surchauffent et ont tendance à perdre en efficacité, le rafraîchissement causé par les toitures vertes limite dans une modeste mesure cette perte d'efficacité. La fiche technique 4.2 présente aussi deux avantages résultants de la combinaison des panneaux solaires et de la toiture verte que sont *« l'intégration du lestage des panneaux solaires avec le complexe de toiture verte »* et la *« protection physique des membranes d'étanchéité et des circuits solaires »* (IBGE, 2010, p. 14)

Cette opposition met en évidence de nombreux à priori de la part du grand public. Cette méconnaissance des techniques de végétalisation des toitures est aussi constatée par les services d'urbanisme auprès de professionnels du bâtiment et soulève des enjeux plus larges de sensibilisation.

*« Le frein, aujourd'hui c'est l'inconnu, tout ce que j'entends à propos des toitures vertes c'est: je ne sais pas ce que c'est » (23/05/2017)*



## 5 - Conclusions

Les résultats sont significatifs, parmi les 82 hectares de toitures plates relevées sur le terrain d'étude, 23,7 hectares présentent un fort potentiel de végétalisation au minimum extensive. La représentation abstraite des chiffres clés (Fig. 58) de cette étude permet de visualiser autrement l'ampleur de ce potentiel de végétalisation.

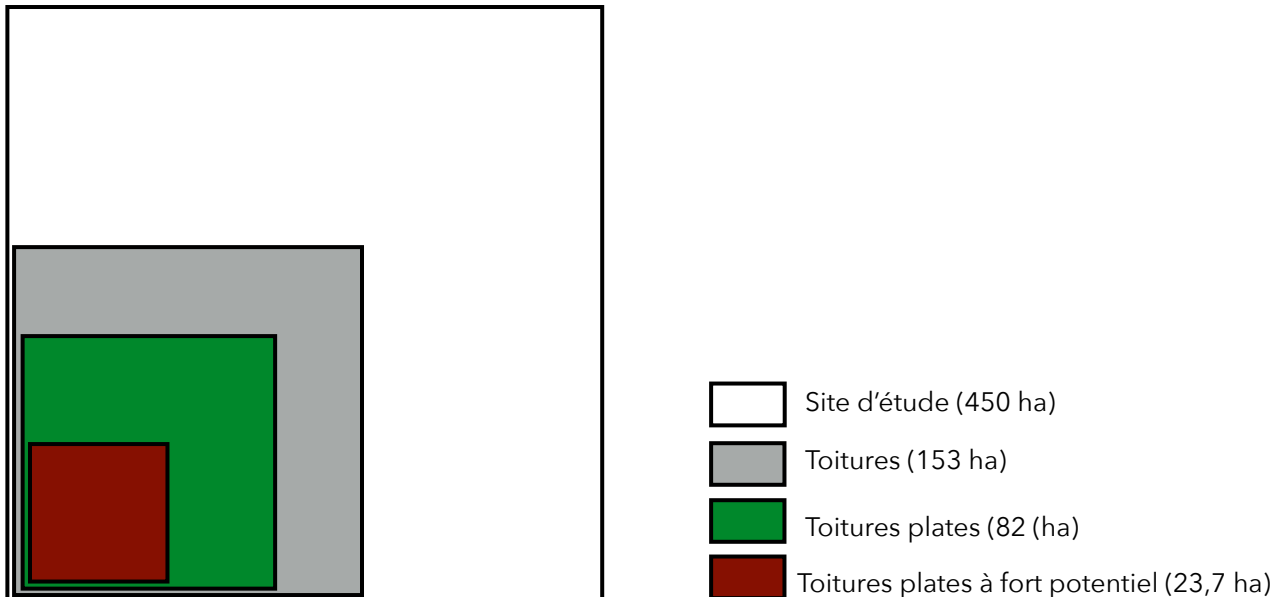


Figure 58: Représentation des surfaces cumulées clés de l'étude

Certes, ce potentiel est nuancable par de probables rénovations déjà effectuées ou les projets privilégiant le démantèlement des structures existantes plutôt que leur rénovation. Il reste néanmoins un gisement conséquent qui laisse par ailleurs entrevoir un autre gisement très important parmi les petites surfaces. Cependant, le nombre élevé de propriétaires concernés et les bénéfices plus limités que peuvent en tirer chaque propriétaire complexifient nettement les pistes d'interventions sur ces typologies. Ce travail ne s'y attarde que très succinctement afin de faire prendre conscience aux lecteurs de toutes l'étendue du potentiel.

Un potentiel global étonnamment peu exploité car malgré des critères de relevé favorisant une surestimation du nombre de toitures vertes, ce dernier reste extrêmement faible avec seulement 64 toitures vertes existantes en 2014. Ce chiffre met d'autant plus en perspective les possibilités et l'intérêt d'une réflexion incitant les liégeois à investir leur toitures.

Quels facteurs influencent positivement ou négativement les dynamiques de végétalisation? Quels sont les leviers d'actions et les stratégies possibles de la ville de Liège, des professionnels? À l'image, du chapitre « 4 - Des toitures déjà appropriées ? », mettant en évidence les aprioris des porteurs de projets, les réponses à ces questions vont bien au-delà d'une analyse de données structurelles et géométriques. Divers éléments de réponses ont pu être construits grâce aux rencontres et discussions menées avec différents acteurs du bassin liégeois. Ils sont développés dans le chapitre suivant.



## IV - Perspectives

Cette dernière partie synthétise et analyse les échanges menés au cours de ce travail avec les différents acteurs du bassin liégeois (pouvoirs publics, milieu professionnel ou encore universitaire). Ces différents points de vue ont permis de faire évoluer la réflexion et de dépasser le simple constat d'un potentiel structurel ou non pour tel ou tel bâtiment. La ville est un organisme complexe soumis à différentes tensions parfois contradictoires. Sans entrer dans des considérations sociologiques ou économiques détaillées, cette dernière partie s'attache à discuter des différents points de vue et proposer des éléments de réponse pour expliquer l'état constaté du terrain et des pistes pour répondre aux différents freins que rencontre le développement des toitures vertes dans le bassin liégeois.

## 1 - Cadre réglementaire et administratif

Liège contrairement à d'autres villes, n'impose pas de végétalisation systématique des toitures. A Bruxelles depuis l'entrée en vigueur du Règlement Régional d'Urbanisme le 3 janvier 2007, « *Les toitures plates non accessibles de plus de 100 m<sup>2</sup> doivent être aménagées en toitures verdurisées.* » (RRU : titre I, chapitre 4, article 13, p. 19). Au-delà du seuil surfacique relativement bas, c'est la clarté des éléments pris en compte qui est favorable à l'implantation des toitures vertes.

À Liège, les demandes de permis sont actuellement soumises à l'avis du service d'urbanisme mais la décision finale revient au collège. La sensibilité du décideur politique et du responsable d'urbanisme joue alors un rôle prépondérant dans le conditionnement du permis de construire.

Dans ce contexte, la remise en question du demandeur qui se voit conditionner son permis par l'implantation d'une toiture verte dans son projet est légitime. Dès lors, l'objectivisation des critères conditionnant les permis est primordiale. Cette objectivisation est possible grâce à la mise en place d'outils comme un Master plan ou un « plan végétal » sur le modèle des plans lumières qui formalisent les souhaits de la ville en matière d'éclairage public.

## 2 - Master plan ou plan végétal

Ce travail de fin d'étude, dans sa modeste mesure, s'inscrit dans une démarche largement entamée par les services d'urbanisme d'objectivisation des critères justifiant la végétalisation de telle ou telle toiture. Bien que l'imposition systématique d'une toiture verte dans un cadre réglementaire clair ne soit pas encore d'actualité, les études comme le Plan de développement de la nature (PCDN) en partenariat avec les universitaires de Gembloux agro bio-tech ou encore la réflexion en cours sur le coefficient de biotope sont des outils qui permettent au service d'urbanisme d'étayer leurs avis par des faits.

À terme, ces études pourraient être synthétisées et formalisées au sein d'un Master plan. Ce dernier, en reprenant les modèles développés à Seraing ou le plan-guide du projet de l'île de Nantes, établirait les politiques d'investissements de la ville dans les espaces publics et les grandes lignes envisagées pour l'aménagement des différents îlots. C'est à travers ces lignes directrices d'aménagements des îlots que

pourrait être intégré ce travail sur le potentiel de végétalisation des toitures de la rive Est.

Cet outil, lorsqu'il n'est pas réglementaire, a fait ses preuves notamment dans les exemples pré-cités de Seraing et Nantes. Au-delà d'un excellent outil de communication auprès des habitants, des acteurs locaux et régionaux, un tel document permet de répondre aux enjeux de flexibilité mais aussi de prédictibilité nécessaires pour attirer les investisseurs et autres promoteurs sans lesquels la rive Est ne peut être réaménagée.

Sans modification du cadre réglementaire, la décision finale concernant les permis revient, comme c'est le cas actuellement, au collège des Bourgmestre et Echevins. Néanmoins une formalisation des diverses réflexions à travers la réalisation d'un Master plan ou «plan végétal» serait assurément favorable au développement des toitures vertes à Liège.

### **3 - Mise en relation des acteurs**

Au-delà d'une méconnaissance des techniques, le grand public se retrouve confronté à un nombre restreint d'entrepreneurs locaux avec le savoir-faire nécessaire à la mise en place de toitures vertes (3 recensés en province de Liège). Ce nombre limité de professionnels peut décourager certains initiateurs projets essuyant plusieurs refus d'entrepreneurs n'ayant pas ces compétences. Dès lors, des initiatives plus globales comme le projet SUN (Sustainable Urban Neighbourhoods) sont intéressantes pour favoriser la mise en relation et la sensibilisation du grand public avec les acteurs locaux.

Une autre piste évoquée avec le service d'urbanisme est le recensement de tous les entrepreneurs compétents pouvant intervenir sur le bassin liégeois. Ce recensement peut s'accompagner d'une base de données constituant un accès plus aisé à l'information et aux détails des différentes toitures réalisables par chacun des entrepreneurs. Ce travail existe déjà pour des savoir-faire concernant des éléments patrimoniaux, pourquoi ne pas s'en inspirer? Une telle facilité d'accès à l'information soutiendrait la démarche de végétalisation des toitures liégeoises.

En France, ce réseau a acquis en 2002 un statut et un nom à travers la création de l'ADIVET (association française des toitures et façades végétales). Il regroupe aujourd'hui différents acteurs de la construction et du paysage, qu'ils soient professionnels, universitaires, industriels ou encore décideurs et collaborent avec les centres de recherches comme le CSTC (équivalent français du CSTB). Aujourd'hui le poids de cette association l'amène à participer à la rédaction de guide de bonnes pratiques, à organiser des événements promouvant les techniques de végétalisation ou encore proposer des actions de formations et de sensibilisation.

## 4 - Les projets publics et les reconnaissances comme leviers d'action

Les projets publics comme la Médiacité ou la reconnaissance de projets intégrant les toitures vertes sont des outils en faveur du développement de ces dernières. Les projets symboliques permettent d'aller au-delà des difficultés évoquées précédemment et mettent naturellement en relation les acteurs locaux professionnels, politiques et administratifs.

L'autre avantage non négligeable des projets publics est leur visibilité. Ainsi, les habitants prennent conscience des avantages (au minimum esthétiques) et des possibilités existantes dans la construction. Cette visibilité efface une part de méconnaissance sur les toitures vertes, frein précédemment cité.



Figure 59: Vue aérienne Delhaize, Grand Prix d'architecture 2015 de la ville de Liège

Cette visibilité peut être étendue à d'autres bâtiments privés à travers la reconnaissance ou les prix d'architecture. À l'image du Delhaize, rue de Fragnée à Liège lauréat du prix d'architecture de la ville de Liège 2015 déjà évoqué dans l'état de l'art (I-2-b]-Esthétique).

Ce prix a mis en avant une conception durable et notamment l'utilisation d'une toiture verte. Il fut ensuite relayé par des revues professionnelles et a ainsi permis de sensibiliser un public plus large que les acteurs du projet et les voisins ayant une vue sur cette toiture invisible depuis l'espace public.

## 5 - Incitation financière et montage juridique

Les détracteurs de la toiture verte avancent généralement l'argument du surcoût engendré par la mise en oeuvre. Bruxelles environnement dans son Info-fiche éco-construction pour professionnels (2007) faisait l'estimation suivante:

Type	Coût(€/m <sup>2</sup> hors TVA)
Toiture verte extensive	30 - 60
Toiture verte intensive (selon la superficie)	60 -120

*Tableau 10: Coût d'une toiture verte (ordre de grandeur), sans prise en compte d'amélioration de l'étanchéité, ni d'un renforcement de la structure portante*

Les toitures vertes sont intéressantes économiquement à long terme grâce à l'augmentation de la durée de vie du complexe d'étanchéité et la limitation de la facture énergétique. Cette vision à long terme n'est que peu incitative, c'est pourquoi de nombreuses villes souhaitant favoriser le développement des toitures vertes ont mis en place des primes. Ces dernières sont généralement proportionnelles à la superficie de la toiture. Les montants sont variables mais pour fournir un ordre d'idée, Bruxelles attribue depuis 2015 une prime énergie de :

20 à 40€/m<sup>2</sup> de toiture verte extensive selon les revenus et un bonus de 30€/m<sup>2</sup> pour les toitures vertes intensives. Cette subvention est accordée pour une superficie maximum de 100 m<sup>2</sup> par bâtiment.

À Liège, une prime similaire a existé pendant presque 4 ans grâce à un règlement approuvé par le conseil communal en avril 2009. Cependant le montant de 10€/m<sup>2</sup> et les plafonds de 250€/logement et 1000€/bâtiment n'ont pas suscité l'intérêt des Liégeois. Dès lors, plusieurs stratégies s'offrent à la ville de Liège. Leur mise en place n'est pas exclusive et la combinaison de plusieurs stratégies est envisageable.

La solution la plus évidente touche directement le portefeuille du propriétaire. En reconsidérant l'octroi de la prime avec des montants plus élevés ou en diminuant la taxation des propriétaires de toitures vertes la ville adopterait une stratégie qui à déjà fait ses preuves ailleurs mais qui nécessite l'allocation d'un budget pouvant s'avérer relativement conséquent.

Une autre stratégie rejoint l'idée de sensibilisation évoquée précédemment. Avec la mise en place d'un simulateur en libre accès, la ville ou les entrepreneurs peuvent sensibiliser le public au retour sur investissement.

La dernière piste proposée et déjà évoquée dans l'état de l'art (I-2-b]-Esthétique) a été développée par V. Loiseau en 2011, dans son mémoire de fin d'étude. Ce travail est d'autant plus pertinent qu'il a été effectué à Liège dans le quartier de St Léonard. En partant du constat que la toiture verte bénéficie au propriétaire, à la ville de manière globale mais aussi aux voisins notamment, ceux-ci ayant une vue sur la toiture. V.

Loiseau s'est posée la question de la monétarisation de ces avantages parmi lesquels nous pouvons citer une plus-value immobilière via l'amélioration du cadre paysager. À travers l'évaluation de plusieurs montages financiers et juridiques comme par exemple la copropriété, V. Loiseau propose une stratégie intéressante pour diminuer les coûts du propriétaire sans nécessiter l'intervention financière de la ville. Si la ville ne souhaite pas intervenir financièrement, il est néanmoins dans son intérêt de travailler avec les professionnels du milieu pour sensibiliser le grand public à ces solutions alternatives et encore méconnues.



# Conclusion



À travers les différentes stratégies d'amélioration de l'enveloppe d'un bâtiment, la première partie de ce mémoire a permis de mettre en avant les différents atouts de la toiture verte. Alors que les toitures traditionnelles se restreignent au rôle de protection contre les intempéries, la toiture verte est bénéfique selon différentes échelles d'observations. À l'échelle de la ville, une condition est néanmoins récurrente pour tirer pleinement parti des toitures vertes. Seul l'impact d'une toiture verte sur l'environnement urbain est marginal, il est nécessaire de réfléchir à des stratégies globales d'aménagement du territoire.

Dans ce cadre, ce mémoire propose un outil d'évaluation du potentiel de végétalisation des toitures de la rive Est de Liège. Ce site relativement vaste de 450 hectares possède très peu d'espaces verts et l'imperméabilisation globale du site est importante. De plus, ce site s'est développé avec l'ère industrielle, une époque où personne ne soupçonnait que le charbon et le pétrole viendraient à manquer. Alors que « *la Wallonie affirme une volonté d'anticipation et de développement durable* » (Gouvernement Wallon, 2013, p. 6) en faisant la part belle aux rénovations et revitalisations urbaines, ce site semble être particulièrement opportun pour estimer le potentiel de végétalisation des toitures.

Dans un contexte au passé industriel si marqué, les bâtiments aux structures en acier sont relativement fréquents. Parmi les études menées dans d'autres villes du globe, seule l'étude menée à Sheffield remet en question le consensus qui écarte systématiquement les structures en acier d'une potentielle végétalisation. Deux facteurs légitiment cependant ce questionnement.

Premièrement, la connaissance des matériaux, la compréhension des phénomènes structuraux et les modèles de calculs évoluent. Cette évolution permet au législateur d'affiner les normes au cours des années. Les anciens bâtiments construits dans le cadre d'anciennes normes sont donc probablement surdimensionnés aux vues des normes actuellement en vigueur.

Deuxièmement, les progrès techniques des 30 dernières années ont permis d'alléger considérablement les complexes utilisés pour végétaliser les toitures.

Au regard de ces deux informations, il semble pertinent de réévaluer l'intérêt que représentent les structures en acier. Une analyse structurelle simplifiée, réalisée sur 3 bâtiments du site, construits à des époques différentes permet de justifier la prise en compte des structures en acier. Certes, leur potentiel est relativement limité et il n'est pas envisageable sans travaux majeurs, de rendre ces toitures accessibles ou de les équiper de toitures vertes intensives. Néanmoins dans certains cas la végétalisation extensive et parfois même semi-intensive est possible.

En tenant compte de ces résultats une cartographie et une hiérarchisation des potentiels de la rive Est ont pu être établis . Pour cela, différents critères ont été croisés. Les pentes des toits, leur surface ainsi que leur année de construction ont permis de caractériser le gisement. Les résultats obtenus sont significatifs. Parmi les quelques 82 hectares de toitures plates du site, 23,7 hectares présentent un fort potentiel de végétalisation.

De ce potentiel conséquent, une part anecdotique est aujourd'hui exploitée. La dernière partie synthétise les entretiens, discussions et réflexions menés pour comprendre ce constat et envisager des stratégies de développement des toitures vertes à Liège.

Parmi les pistes proposées, la sensibilisation du grand public et le rôle moteur de la ville de Liège sont des éléments récurrents. Les services d'urbanisme, grâce aux nombreuses études menées ou en cours disposent d'outils qui leurs permettent de construire une réflexion globale, aujourd'hui inaccessible aux autres acteurs locaux. Au-delà de l'évolution du cadre réglementaire ou de la réinstauration de primes, des outils comme le Master plan, les projets publics ou la mise en valeurs de certaines réalisations sont des outils de pédagogie et de sensibilisation pertinents.

Ce travail s'inscrit dans cette démarche globale et propose sa modeste contribution pour la rive Est de Liège. Il a pour but d'apporter un éclairage nouveau et des pistes de réflexions dans l'aménagement du territoire en soutenant l'intégration de tous les acteurs dans cette démarche. Le développement durable de la cité ardente passe par l'implication de chacun. La réglementation en vigueur ne saurait prendre la responsabilité de tous les maux de la ville car l'environnement et l'amélioration du contexte urbain sont l'affaire de tous.

"L'important n'est pas de convaincre, mais de donner à réfléchir"  
Bernard Werber, Le père de nos pères, 1998.

# Table des figures

## Introduction

### I - Etat de l'art

Figure 1: Schéma de composition d'une toiture végétalisée. (CSTC, 2006, p. 7) .....	12
Figure 2: Projet sélectionné pour le site de l'ancien tri-postal de Matabiau (Toulouse).....	15
Figure 3: Ruissellements cumulés sur 24h pour deux toitures de pente à 20°. L'une végétalisée et l'autre non, à Leuven (Belgique), avril 2003. (Mentens et al., 2006, p. 218).....	17
Figure 4: Débit évacué par différentes toitures durant un orage. (CSCT, 2006, p. 4).....	17
Figure 5: Impact des scénarios de végétalisation du quartier du Pin sec sur le bilan hydrique. (Musy & al., 2014, p.76).....	18
Figure 6: Dépôt WiesenPlatz BVB (Bâle).(naturetoit.blogspot.be) .....	22
Figure 7 : Augustenborg Botanical Garden (Malmö, Suède) .(www.trendhunter.com) .....	23
Figure 8 : Piscine Molitor (Paris, France). (www.jardinsdefrance.org) .....	23
Figure 9: Mairie de Chicago (Etats-Unis). (landarchs.com).....	24

### II - Etude de la rive Est de Liège

Figure 10: Schéma organisationnel du travail de fin d'étude .....	30
Carte 1: Terrain d'études et limites administratives des quartiers.....	31
Carte 2: Présence du végétal dans l'espace public.....	32
Carte 3: Orhtophotoplans à infrarouges, Vennes et Boulevard de Froidmont .....	33
(Service public de Wallonie, 2015 ) .....	33
Carte 4: Orhtophotoplans à infrarouges, Droixhe .....	33
(Service public de Wallonie, 2015).....	33
Carte 5: Zones inondables, scénario de période de retours extrême, Liège (Service public de Wallonie, 2017) .....	34
Carte 6: Travail en cours de la ville de Liège sur le coefficient de biotope par surface .....	35
Figure 11: Nombre de toitures par intervalle de surface .....	38
Carte 7: Localisation des grandes surfaces bâties .....	39
Figure 12: Répartition toits plats et toits en pente pour la rive Est de Liège .....	40
Carte 8: Répartition toits plats et toits en pente pour la rive Est de Liège.....	40
Figure 13: Nombre de parcelles construites par période.....	41
Carte 9: Catégorisation par années de construction des bâtiments de l'échantillon .....	42
Figure 14: Années de construction sur les parcelles de l'échantillon construite après 1930.....	43
Figure 15 : Evolution des normes concernant le béton armé .....	46
Figure 16 : Evolution des normes concernant les aciers.....	47
Figure 17 : Evolution des normes concernant les charges de vent .....	48
Figure 18 : Vue aérienne du cas d'étude n°1 .....	49
Figure 19 : Vue aérienne du cas d'étude n°3 .....	50

Figure 20 : Zonage des pressions liées au vent sur une toiture plate (NBN EN 1991-1-4, 2005).....	51
Figure 21: à gauche: vue arienne du hall; à droite: Façade sur l'avenue Albert 1 er .....	54
Figure 22 : Plan de l'extension, cas n°1 (Source : Archives de Liège) .....	54
Figure 23 : Coupe de l'extension, cas n°1 (Source : Archives de Liège) .....	55
Figure 24 : Modèle structurel du portique.....	55
Figure 25 : Charge admissible en flexion selon profilé IPE.....	56
Figure 26: Flèche selon cas de charges des toitures.....	57
Figure 27: charge admissible en compression.....	58
Figure 28: Charge admissible au flambement .....	58
Figure 29: Façade Est (entrée du bâtiment) (Source : Archives de Liège).....	59
Figure 30: Façade Nord (façade à rue) (Source : Archives de Liège) .....	59
Figure 31: Plan cas n°2 (Archives de Liège).....	60
Figure 32: coupe transversale cas n°2 (Archives de Liège) .....	60
Figure 33: Modèle structurel du portique .....	61
Figure 34: Charge admissible en flexion selon profilé IPE.....	62
Figure 35: Flèche selon cas de charges des toitures.....	63
Figure 36: charge admissible en compression pour le profilés HE 260B .....	64
Figure 37: charge admissible au flambement pour le profilés HE 260B.....	64
Figure 38: Plan du cas n°3 (Archives de Liège) .....	65
Figure 39: Coupe a-b du cas n°3 (Archives de Liège) .....	66
Figure 40: Coupe e-f du cas n°3 (Archives de Liège).....	66
Figure 41: Détails d'assemblage poteau-poutre.....	66
Figure 42 : Modèle structurel du portique.....	67
Figure 43: Charge admissible en flexion selon profilé IPE.....	67
Figure 44: Flèche selon cas de charges des toitures.....	68
Les résultats indiquent que pour cette structure, la flexion est plus contraignante que la flèche.....	68
Figure 45: charge admissible en compression pour le profilé IPE 300.....	69
Figure 46: charge admissible au flambement pour le profilé IPE 300 .....	69
<b>III - Analyse des résultats</b>	
Carte 10: Hiérarchisation du potentiel de végétalisation des toitures .....	72
Figure 47: Surfaces cumulées des toitures plates par catégorie .....	73
Figure 48: Surfaces cumulées des toitures plates par catégorie en intégrant les moyennes toitures.....	73
Carte 11: Hiérarchisation du potentiel de végétalisation des toitures avec bâtiment dont l'année de construction est inconnue. ....	74
Figure 49: Surfaces cumulées des toitures plates de plus de 200m2par année de construction .....	75
Carte 12: Localisation des « zones mutables ».....	76

Carte 12: Localisation des îlots échantillons .....	78
Figure 50 : à gauche : zoom sur le relevé des toits plats d'un îlot d'Amercoeur; .....	79
à droite : toits plats non comptabilisés dans cet îlot.....	79
Figure 51: Comparaison entre les résultats de l'approche globale et détaillée (îlot d'Amercoeur).....	79
Figure 52: à gauche : zoom sur le relevé des toits plats d'un îlot du Longdoz; .....	80
à droite : toits plats non comptabilisés dans cet îlot.....	80
Figure 53: Comparaison entre les résultats de l'approche globale et détaillée (îlots du Longdoz) .....	80
Figure 54: à gauche : zoom sur le relevé des toits plats d'un îlot des Venues; .....	81
à droite : toits plats non comptabilisés dans cet îlot;.....	81
Figure 55: Comparaison entre résultats de l'approche globale et détaillée (îlot des Venues) .....	81
Figure 56: à gauche : zoom sur le relevé des toits plats d'un îlot de Chênée ; .....	82
à droite : toits plats non comptabilisés dans cet îlot.....	82
Figure 57: Comparaison entre résultats de l'approche globale et détaillée (îlot de Chênée).....	82
Carte 13: Toits verts ou équipés de panneaux solaires et/ou photovoltaïques en 2014 .....	84
Zone Nord de la zone d'étude .....	84
Carte 14: Toits verts ou équipés de panneaux solaires et/ou photovoltaïques en 2014 .....	85
Zone Sud de la zone d'étude .....	85
Figure 58: Représentation des surfaces cumulées clefs de l'étude .....	87

#### **IV - Perspectives**

Figure 59: Vue aérienne Delhaize, Grand Prix d'architecture 2015 de la ville de Liège .....	91
---	----

#### **Conclusion**

# Table des tableaux

<b>Introduction</b> .....	<b>6</b>
<b>I - Etat de l'art</b> .....	<b>9</b>
Tableau 1 : Exemples d'épaisseurs de sol pour des toitures végétalisées intensives et extensives définies par différents auteurs. (Berndtsson, 2010, p.352) .....	13
Tableau 2: Catégorisation des toitures vertes. (CSTC, 2006, p. 7).....	13
<b>II - Etude de la rive Est de Liège</b> .....	<b>29</b>
Tableau 3 : Surcharges par scénarios de végétalisation .....	37
Tableau 4 : Pression du vent pour chaque zone de toiture.....	52
Tableau 5 : Charges de calcul .....	56
Tableau 7: Données fournisseurs pour les complexes de hourdis creux en terre cuite.....	61
Tableau 8 : Surcharges par scénario de végétalisation .....	61
Tableau 9 : Charges de calcul du cas n°3.....	67
<b>III - Analyse des résultats</b> .....	<b>71</b>
<b>IV - Perspectives</b> .....	<b>88</b>
Tableau 10: Coût d'une toiture verte (ordre de grandeur), sans prise en compte d'amélioration de l'étanchéité, ni d'un renforcement de la structure portante .....	92
<b>Conclusion</b> .....	<b>94</b>

## Bibliographie

- Akbari, H., Matthews, H. D., & Seto, D. (2012). The long-term effect of increasing the albedo of urban areas. *Environmental Research Letters*, 7(2), 024004.
- Aouididi, A., Boström, L., Johansson, B., Johansson, E., & Åstrand, J. (1989). Toitures plates en Tunisie: études d'étanchéité et propositions d'améliorations. (Report TVBM; Vol. 3041). Division of Building Materials, LTH, Lund University.
- APUR (2013) *Étude sur le potentiel de végétalisation des toitures terrasses à Paris*. [http://www.apur.org/sites/default/files/documents/vegetalisation\\_toitures\\_terrasses.pdf](http://www.apur.org/sites/default/files/documents/vegetalisation_toitures_terrasses.pdf). (Consulté le 03/11/2016)
- Ascione, F., Bianco, N., de' Rossi, F., Turni, G., & Vanoli, G. P. (2013). Green roofs in European climates. Are effective solutions for the energy savings in air-conditioning?. *Applied Energy*, 104, 845-859.
- Berndtsson, J. C. (2010). Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: a review. *Ecological Engineering*, 36(4), 351-360.
- Berndtsson, J. C., Emilsson, T., & Bengtsson, L. (2006). The influence of extensive vegetated roofs on runoff water quality. *Science of the Total Environment*, 355(1), 48-63.
- Brenneisen, S. (2006). Space for urban wildlife: designing green roofs as habitats in Switzerland. *Urban habitats*, 4(1), 27-36.
- Castleton, H. F., Stovin, V., Beck, S. B., & Davison, J. B. (2010). Green roofs; building energy savings and the potential for retrofit. *Energy and buildings*, 42(10), 1582-1591.
- Connelly, M., & Hodgson, M. (2008). Sound transmission loss of extensive green roofs- Field test results. *Canadian Acoustics*, 36(3), 74-75.
- Coutts, A. M., Daly, E., Beringer, J., & Tapper, N. J. (2013). Assessing practical measures to reduce urban heat: Green and cool roofs. *Building and Environment*, 70, 266-276.
- CSTC. (2006). Les toitures vertes. *Note d'information technique 229*
- CSTC. (2007). Toitures vertes : évacuation des eaux pluviales. *Les dossiers du CSTC, Cahier n°2*
- Currie, B. A., & Bass, B. (2008). Estimates of air pollution mitigation with green plants and green roofs using the UFORE model. *Urban Ecosystems*, 11(4), 409-422.

- DGO4. (2012). *Plan d'action NZEB en vue de la transposition de l'article 9 du Recast de la Directive européenne relative à la performance énergétique des bâtiments (Directive 2010/31/CE du 19 Mai 2010)* (p. 6). SPW
- Dunnett, N., & Kingsbury, N. (2008). *Planting green roofs and living walls*. Portland, OR: Timber Press.
- Germain, O. (2006). *Contribution à l'analyse du comportement et au dimensionnement des colonnes élancées en béton armé*. (Thèse de Doctorat). Université libre de Bruxelles, Bruxelles.
- Gouvernement bruxellois (2007). *Règlement Régional d'Urbanisme (RRU)*. <http://urbanisme.irisnet.be/lesreglesdujeu/les-reglements-durbanisme/le-reglement-regional-durbanisme-rru>. (Consulté le 15/05/2017)
- Gouvernement wallon. (2013). *Schéma de développement de l'espace régional (SDER) : Une vision pour le territoire wallon*. SPW Editions. Wallonie.
- Gouvernement wallon. (2016). *Code Wallon de l'Aménagement du Territoire, de l'Urbanisme et du Patrimoine (CWATUP)*. [http://spw.wallonie.be/dgo4/tinymvc/apps/amenagement/views/documents/juridique/cwatup\\_CWATUP\\_20171229.pdf](http://spw.wallonie.be/dgo4/tinymvc/apps/amenagement/views/documents/juridique/cwatup_CWATUP_20171229.pdf). (Consulté le 10/03/2017)
- Gao, Y. (1996). *Modèles probabilistes et possibilistes pour la prise en compte de l'incertain dans la sécurité des structures* (Thèse de doctorat), Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris.
- GIEC. (2014). *Changements climatiques 2014: Rapport de synthèse*. [https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/SYR\\_AR5\\_FINAL\\_full\\_fr.pdf](https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/SYR_AR5_FINAL_full_fr.pdf). (Consulté le 20/11/2016)
- IBGE - Bruxelles Environnement. (2010). *Info fiches-éco-construction. Une toiture verte: un coin de verdure dans la ville*. [http://document.environnement.brussels/opac\\_css/electfile/IF%20Eco%20construction%20TER02%20Part%20FR](http://document.environnement.brussels/opac_css/electfile/IF%20Eco%20construction%20TER02%20Part%20FR) (Consulté le 03/05/2017)
- IBGE - Bruxelles Environnement. (2010). *Rapport technique - bâtiments exemplaires. Fiche 4.2 : La Compatibilité entre les panneaux solaires et la conception des toitures vertes*. [http://document.environnement.brussels/opac\\_css/electfile/IF%20RT%20BATEX%20Fiche4.2.%20Toitures%20FR.pdf](http://document.environnement.brussels/opac_css/electfile/IF%20RT%20BATEX%20Fiche4.2.%20Toitures%20FR.pdf). (Consulté le 03/05/2017)
- Institut Belge de Normalisation. (2007). *NBN EN 1991-1-3 ANB. Eurocode 1 : Actions sur les structures - Partie 1-3: Actions générales - Charges de neige*. <https://www.mynbn.be/nbnframework/>. (Consulté le 13/04/2017)



- Institut Belge de Normalisation. (2005). *NBN EN 1991-1-4. Eurocode 1: Actions sur les structures - Partie 1-4: Actions générales - Actions du vent (+ AC:2010)*. <https://www.mynbn.be/nbnframework/>. (Consulté le 13/04/2017)
- Kolokotsa, D., Santamouris, M., & Zerefos, S. C. (2013). Green and cool roofs' urban heat island mitigation potential in European climates for office buildings under free floating conditions. *Solar Energy*, *95*, 118-130.
- Lassalle, F. (2006). *Végétalisation extensive des terrasses et toitures: guide technique: conception et mise en oeuvre, aspects réglementaires, données économiques, exigences et solutions*. Le Moniteur.
- Lazzarin, R. M., Castellotti, F., & Busato, F. (2005). Experimental measurements and numerical modelling of a green roof. *Energy and Buildings*, *37*(12), 1260-1267.
- Lindhqvist, T., & Lifset, R. (2003). Can we take the concept of individual producer responsibility from theory to practice?. *Journal of industrial ecology*, *7*(2), 3-6.
- Liu, K. K. Y., & Baskaran, B. A. (2004). Green roof infrastructure-Technology demonstration, monitoring and market expansion project.
- Loiseau, V. (2011). *Toits verts et rénovation urbaine: Monétarisation et internalisation de l'externalité paysagère*. (Mémoire de Master non publié). Université de Liège.
- Mentens, J., Raes, D., & Hermy, M. (2006). Green roofs as a tool for solving the rainwater runoff problem in the urbanized 21st century?. *Landscape and urban planning*, *77*(3), 217-226.
- Munby, B. (2005). *Feasibility study for the retrofitting of green roofs*. Civil and Structural Engineering, (Department of Civil and Structural Engineering CIV405 Final Report), University of Sheffield.
- Musy, M., Bozonnet, E., Briottet, X., Gutleben, C., Lagouarde, J. P., Launeau, P., ... & Sabre, M. (2014). *Rapport final Projet ANR-09-VILL-0007 VegDUD Programme Villes Durables 2009* (Doctoral dissertation,IRSTV FR CNRS 2488).
- Ouldboukhite, S. E., Belarbi, R., & Sailor, D. J. (2014). Experimental and numerical investigation of urban street canyons to evaluate the impact of green roof inside and outside buildings. *Applied Energy*, *114*, 273-282.
- Peck, S., and Kuhn, M. (2000). *Design Guidelines for Green Roofs*, Toronto: Environment Canada.

- Pirès, A. (1997). Échantillonnage et recherche qualitative: essai théorique et méthodologique. *La recherche qualitative. Enjeux épistémologiques et méthodologiques*, 113-169.
- Ruellan, G. (2016). La rénovation du bâti résidentiel en Belgique.
- Savoie-Zajc, L. (2006). Comment peut-on construire un échantillonnage scientifiquement valide?. *Recherches qualitatives*, 99-111.
- Singh, M. K., Mahapatra, S., & Teller, J. (2013). An analysis on energy efficiency initiatives in the building stock of Liege, Belgium. *Energy Policy*, 62, 729-741.
- Wilkinson, S. J., & Reed, R. (2009). Green roof retrofit potential in the central business district. *Property Management*, 27(5), 284-301.
- Williams, N. S., Lundholm, J., & Scott MacIvor, J. (2014). FORUM: Do green roofs help urban biodiversity conservation?. *Journal of applied ecology*, 51(6), 1643-1649.
- Wong, N. H., Cheong, D. W., Yan, H., Soh, J., Ong, C. L., & Sia, A. (2003). The effects of rooftop garden on energy consumption of a commercial building in Singapore. *Energy and buildings*, 35(4), 353-364.
- Yuen B., Nyuk Hien W., 2004, Resident perceptions and expectations of rooftop gardens in Singapore, *Landscape and Urban Planning*, 73, 263-276.

## Périodiques

Morel Journel, G. (2017, avril). Vert démagog, entretien avec Federico Ferrari. *d'architectures*, (252), 24-25.

## Webographie

Évolution de la réglementation PEB:

<http://energie.wallonie.be/fr/reglementation-wallonne-sur-la-peb.html?IDC=7224>

Statistiques sur l'artificialisation des sols :

<https://www.iweps.be/indicateur-statistique/artificialisation-du-sol/>

Coefficient de biotope:

[http://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/landschaftsplanung/bff/fr/bff\\_berechnung.shtml](http://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/landschaftsplanung/bff/fr/bff_berechnung.shtml)

Sites de cartographie

<http://geoportail.wallonie.be/>

Photos toitures vertes:

<http://www.darchitectures.com/vert-demago-entretien-avec-federico-ferrari-a3438.html>

<http://naturetoit.blogspot.be/2014/07/le-wiesenteppich-de-bale.html>

<http://www.trendhunter.com/trends/augustenburg-botanical-garden>

<http://www.jardinsdefrance.org/piscine-molitor-un-jardin-sur-le-toit/>

<https://landarchs.com/how-the-chicago-city-hall-green-roof-is-greening-the-concrete-jungle/>

Histoire des aciers S 235 :

<http://www.aciersspeciaux.fr/aciers-de-construction/>

Catalogue Arcelor-Mittal:

<http://sections.arcelormittal.com/fr/produits-services/gamme-de-produits.html>

## **Entretiens**

Bleus Jean-Marie, Département d'Architecture Site Saint Luc, Université de Liège.

Rencontré le 27/04/2107

Demonceau Jean-François, Département ArGEnCo, Université de Liège. Rencontré le

16/12/2016 puis le 18/04/2017

Michaud-Nérard Gaëlle, Département de l'urbanisme de la ville de Liège. Rencontrée le

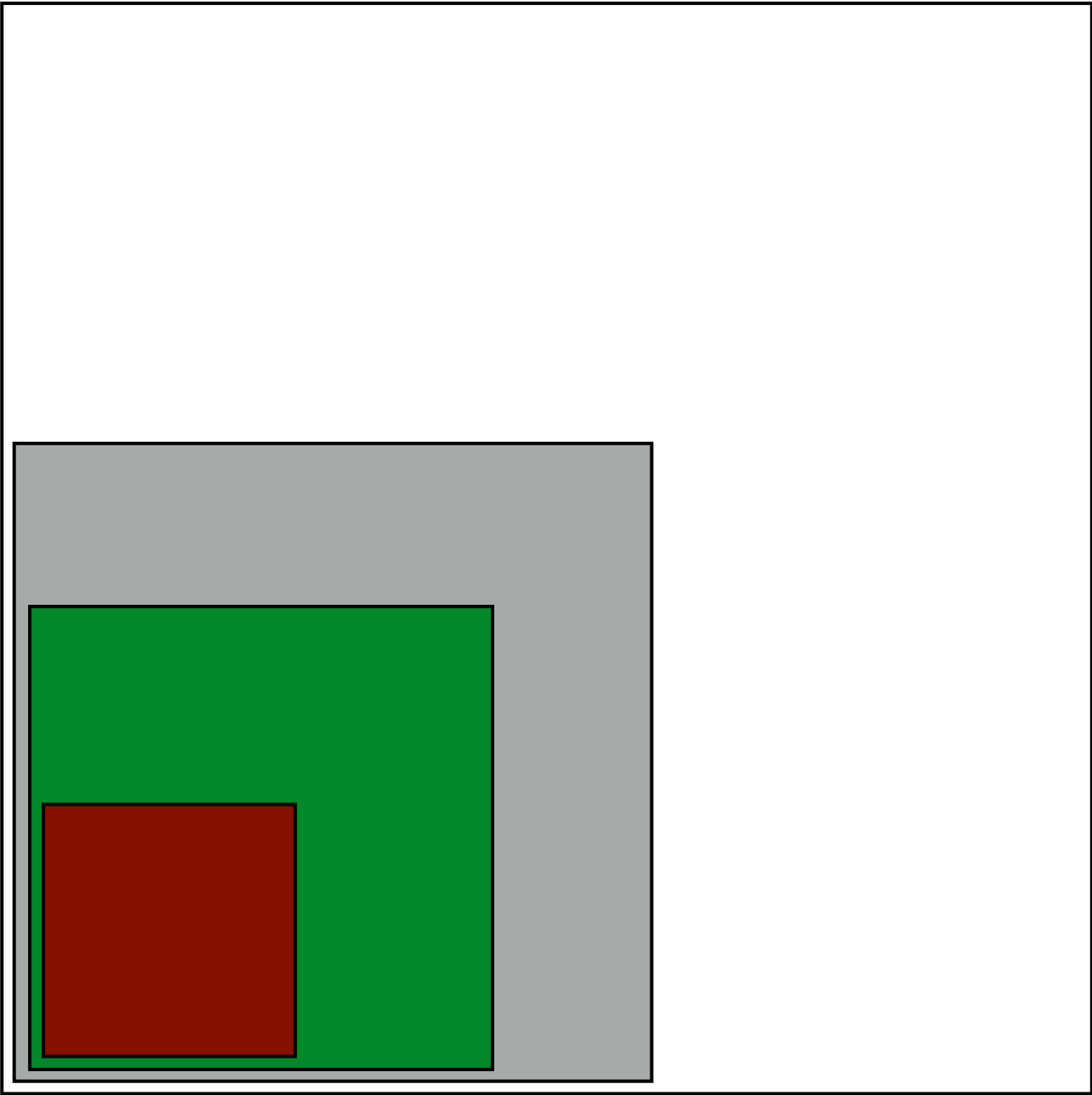
09/11/207

Lesage Vincent, Michaud-Nérard Gaëlle & Veithen Anne-Marie, Département de

l'urbanisme de la ville de Liège. Rencontrés le 23/05/2017

Ruelle Christine, Centre de Recherche sur la Ville, le Territoire et le Milieu rural (Lepur),

Université de Liège. Rencontrée le 18/11/2016



Annexes

## Note de calcul

La présente note de calcul détaille la méthode appliquée aux 3 cas d'études. Les valeurs et hypothèses appliquées sont celle du cas n°1. La méthode utilisée est celle préconisée par les Eurocodes 3 ou NBN EN 1993-1-1 (2005) qui est actuellement la norme en vigueur pour le dimensionnement des structure en acier.

Au vue des formes en double T, la fonte peut être écartée et l'hypothèse de poteau en acier est la plus probables. Parmi les différents aciers, celui retenu pour les calculs est le plus couramment utilisé : le S235. De même pour les poutres, l'hypothèse de l'acier S235 est retenue.

	Existant (kN/m <sup>2</sup> )
Poids propre (pp)	0,30kN/m <sup>2</sup>
Vent (w)	0,21kN/m <sup>2</sup>
Neige (s)	0,4kN/m <sup>2</sup>
Exploitation(q)	0,2kN/m <sup>2</sup>

Remarque: le poids propres des IPE portant la toiture est intégré plus tard dans le calcul. Plusieurs scénarios de végétalisation sont testés. La surcharges engendrées sont explicitées dans le tableau ci-dessous. Ces surcharges viennent s'ajouter au poids propre de la toiture.

Scénario	1	2	3	4	5	6
Surcharges liées à l'implantation d'une TV (kg/m <sup>2</sup> )	50	80	100	150	200	400

Tableau des coefficient  $\psi$  d'après NBN EN 1990 ANB (2012)

	$\psi_0$	$\psi_1$	$\psi_2$
Charges d'exploitations Catégorie H: toiture	0	0	0
Actions de la neige	0,5 (ou 0,3) <sup>(1)</sup>	0	0
Actions du vent sur les bâtiments	0,6 (ou 0,3) <sup>(1)</sup>	0,2	0

(1) Quand une action variable de courte durée - moins d'un mois - (par exemple, une charge de neige, une action du vent) accompagne dans une combinaison une autre action variable de courte durée (action variable dominante ou action variable d'accompagnement principale),  $\psi_0 = 0,3$ .

Relevé sur plan		
Longueur des IPE	14,55	m
Entraxe portique	5,35	m

- Cas de charges états limites ultimes (ELU)

Parmi les cas de charges, le plus défavorables est le suivant :

$$\gamma_G \cdot G_k + \gamma_Q \cdot s + \gamma_Q \cdot \Psi_0 \cdot w + \gamma_Q \cdot \Psi_1 \cdot q_k$$

Avec  $G_k$ : les charges permanentes (poids propres toitures + poids propres des IPE + surcharges toitures vertes)

$$\gamma_G = 1,35$$

$$\gamma_Q = 1,50 \quad \text{si défavorable (0 si favorable)}$$

- Cas de charges aux états limites de services (ELS)

Parmi les cas de charges, le plus défavorables est le suivant :

$$G_k + \Psi_1 \cdot w + \Psi_2 \cdot s$$

En fonction des scénarios de végétalisation on obtient donc les cas de charges suivants

Scénario	Existant	1	2	3	4	5	6
<b>Surcharges liées à l'implantation d'une TV (kg/m<sup>2</sup>)</b>	0,35	50	80	100	150	200	400
<b>ELU (kN/m<sup>2</sup>)</b>	1,07	1,75	2,15	2,4225	3,10	3,77	6,47
<b>ELS(kN/m<sup>2</sup>)</b>	0,39	0,89	1,19	1,39	1,89	2,39	4,34

## Vérification des poutres en flexion (ELU)

Données fournisseur pour le matériaux				
S235	Limite d'élasticité:	$f_y$	235	MPa
	Module élastique :	$W_{el,y}$	2008	cm <sup>3</sup>
	Résistance en flexion :	$MRd = f_y \cdot W_{el,y}$	471,88	kN.m
Données propres à chaque profilé				
IPE 450	Masse linéique :	$m_l$	77,6 soit environ 0,776	kg.m <sup>-1</sup> kN.m <sup>-1</sup>
IPE 500	Masse linéique :	$m_l$	90,7 soit environ 0,907	kg.m <sup>-1</sup> kN.m <sup>-1</sup>

Ainsi la charge linéique maximale est obtenue par la formule suivante:

$$p_{l,max} = \frac{M_{Rd} \cdot 8}{l^2} - m_l$$

Avec l'entraxe des portiques, on estime la charge surfacique maximale :

$$p_{s,max} = \frac{p_{l,max}}{l_{entraxe}}$$

Pour chaque profilés on obtient :

$$\text{IPE 450 : } p_{s,max} = 1,8 \text{ kN.m}^{-2}$$

$$\text{IPE 500 : } p_{s,max} = 3,0 \text{ kN.m}^{-2}$$

Ainsi pour chaque profilé on compare la résistance et la charge résultant des différents scénarios. (Cf études de cas)

## Vérification de la flèche (ELS)

La limite de déformation retenue pour des bâtiments industriels de type hangar ou entrepôt est de  $L/200$ . « L » étant la longueur de la poutre.

La charge est considérée comme uniformément répartie, la flèche se calcule donc avec la formule suivante :

$$f = \frac{5.p.l^4}{384.E.I}$$

Avec E: le module d'Young de l'acier : 210 000 Mpa

I : le moment d'inertie de la section de la poutre (en  $\text{mm}^4$ )

l: la longueur de la poutre entre deux appuis, ici  $l = L$  (en mm)

$p$  : la charge linéique incluant le poids de la poutre ( $p_{l,\max} + m_l$ ) ( $\text{N}\cdot\text{mm}^{-1}$ )

Scénarios	Existant	n°1	n°2	n°3	n°4	n°5	n°6
$p$ ( $\text{N}\cdot\text{mm}^{-1}$ )	2,61	5,28	6,89	7,96	10,63	13,31	24,01
f(mm)	31,3	63,5	82,8	95,6	127,7	159,9	288,4

## Vérification en compression

L'effort ramené dans les poteaux se détermine par la formule:

$$\frac{L}{2} \cdot (e \cdot p_{s,ELU} + 1,35 p_{poutre})$$

avec e : l'entraxe entre portiques & L: la longueur des portiques

Le fabricant fournit l'aire de la section. Pour le cas n°1, l'IPE 400 a une section de  $845 \text{ cm}^2$ .

Un acier S235 a une résistance en compression  $f_y$  ( $=f_{yd}$ ) de 235 Mpa soit environ  $2350 \text{ kg}\cdot\text{cm}^{-2}$ .

Donc l'IPE 400 peut supporter en compression une charge de

$$845 \times 2350 = 19,8 \cdot 10^5 \text{ kg} = 19,8 \cdot 10^3 \text{ kN}$$

En comparant avec les scénarios de charge à l'ELU, il est évident que ce n'est pas ce critère qui est dimensionnant.

Scénarios	Existant	n°1	n°2	n°3	n°4	n°5	n°6
Effort (kN) avec poutre en IPE 450	49,2	75,5	91,2	101,8	128,0	154,3	259,4
Effort (kN) avec poutre en IPE 500	50,5	76,8	92,5	103,0	129,3	155,6	260,7



## Vérification du flambement

Dans des colonnes élancées soumises à de la compression, le flambement est généralement le critère déterminant dans le dimensionnement des poteaux. Les chapitres 6.3.1 et 6.3.2 de la norme EN 1993-1-1 (2005) expliquent la méthode de prise en compte du flambement pour les profilés en acier.

L'axe faible des profilés étudiés est l'axe z, c'est lui qui sera dimensionnant. Pour rappel le profilé du cas 1 est un IPE 400.

La résistance de calcul de la barre comprimée au flambement  $N_{b,Rdz}$  est donnée par:

$$N_{b,Rdz} = \frac{\chi \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M1}}$$

Avec  $\gamma_{M1}$ : 1,00 selon EN 1993-1-1 (2005)

A est l'aire de la section du profilé (ici 8 450mm<sup>2</sup>)

$f_y$  la limite d'élasticité (ici 235 Mpa)

$\chi$ : un coefficient de réduction qui se déduit des courbes de flambement

### • Calcul de $\chi$

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \quad \text{mais} \quad \chi \leq 1,0$$

où  $\phi = 0,5[1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2]$  &  $\bar{\lambda} = \frac{L_{cr}}{i_z} \cdot \frac{1}{\lambda_1}$

Avec  $\alpha$  : un facteur d'imperfection, ici sur l'axe  $\alpha$  faible (z), vaut 0,34

$L_{cr}$  : la longueur de flambement dans le plan de flambement considérée. Ici  $L_{cr}$  = hauteur du poteau = 7,0 m

$i_z$  : le rayon de giration par rapport à l'axe z, (donnée fournisseur, pour un IPE 400,  $i_z=39,5$  mm)

$$\lambda_1 = \pi \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 93,9 \sqrt{\frac{235}{f_y}} = 93,9$$

Ainsi  $\bar{\lambda} = 1,89$  &  $\phi = 2,57$

Finalement  $N_{b,Rdz} = \frac{\chi \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = 461 \cdot 10^3 \text{ N}$

pour l'IPE 400 issu du catalogue arcelormittal et mise en oeuvre dans le cas n°1.

## Détail chiffré des cas d'étude

### Cas 1 : Hall Industriel Avenue Albert 1er, 66 (Grivegnée)

Poutres		
IPE 450, S235		
<b>Données</b>		
fy=fyd	235 Mpa soit	2350 kg/cm <sup>2</sup>
W <sub>el,y</sub>	1160 cm <sup>3</sup>	
Mrd	2726000 kg.cm soit	272,6 kN.m
poids IPE	77,6 kg/m	
L	14,55 m	
Module d'Young	210000 N/mm <sup>2</sup>	
I <sub>y</sub>	231300000 mm <sup>4</sup>	

<b>Flexion (ELU)</b>		
p <sub>linéairemax</sub>	9,53 kN/m soit	9,53 N/mm
entraxe portiques	5,35 m	
p <sub>surfaciquemax</sub>	1,78 kN/m <sup>2</sup>	

Scénarios	existant	n°1	n°2	n°3	n°4	n°5	n°6
p <sub>surfacique</sub>	1,07	1,74	2,15	2,42	3,09	3,77	6,47

<b>Flèche poutres (ELS)</b>	
Flèche max = L/200	0,07275 m

Scénarios	existant	n°1	n°2	n°3	n°4	n°5	n°6
p <sub>linéaire</sub> (kN/m=N/mm)	2,61	5,28	6,89	7,96	10,63	13,31	24,01
flèche (=5.p.l <sup>4</sup> /384EI) (mm)	31,33	63,47	82,75	95,61	127,74	159,88	288,43
flèche (m)	0,031	0,063	0,083	0,096	0,128	0,160	0,288

Poutres		
IPE 500, S235		
<b>Données</b>		
fy=fyd	235 Mpa soit	2350 kg/cm2
Wel,y	1930 cm3	
Mrd	4535500 kg.cm soit	453,55 kN.m
poids IPE	90,7 kg/m	
L	14,55 m	
Module d'Young	210000 N/mm2	
Iy	482000000 mm4	

<b>Flexion (ELU)</b>		
p_linéairemax	16,23 kN/m soit	16,23 N/mm
entraxe portiques	5,35 m	
p_surfaciquemax	3,03 kN/m2	

Scénarios	existant	n°1	n°2	n°3	n°4	n°5	n°6
p_surfacique	1,07	1,74	2,15	2,42	3,09	3,77	6,47

<b>Flèche poutres (ELS)</b>	
Flèche max = L/200	0,07275 m

Scénarios	existant	n°1	n°2	n°3	n°4	n°5	n°6
p_linéaire (kN/m=N/mm)	2,74	5,41	7,02	8,09	10,76	13,44	24,14
flèche (=5.p.l^4/384EI) (mm)	15,79	31,21	40,47	46,63	62,06	77,48	139,17
flèche (m)	0,016	0,031	0,040	0,047	0,062	0,077	0,139

Poteaux							
poteaux IPE 400							
<b>Données</b>				<b>Résistance en compression</b>			
A	845 cm2			19857,5 kN			
fy	2350 kg/cm2			<b>Résistance au flambement</b>			
Poids propre	66,3 kg/m			Nb, Rdz 460,96 kN			
<b>Scénarios</b>							
effort (kN)	existant	n°1	n°2	n°3	n°4	n°5	n°6
	49,21	75,48	91,25	101,75	128,03	154,30	259,39

<b>Flambement selon z (axe faible)</b>			
<b>Données</b>			
S235	235 Mpa	K_flam_z	1
Module d'Young	210000 Mpa	Lcrz	7000
A	8450 mm2	i_z	39,5 mm
Iy	231300000 mm4	alpha_z	0,34
Iz	13180000 mm4	lambda_z	177,215
H	7000 mm	lambda_barre_z	1,887
		phy_z	2,567
		khi_z	0,232
epsilon	1	NBrdz	460964,7 N
lambda1	93,9129729	NBrdz	46096 kg

## Cas 2 Atelier de boucherie, Avenue Georges Truffaut, 42

Poutres		
HE 260 A		
<b>Données</b>		
fy=fyd	235 Mpa soit	2350 kg/cm2
Wel,y	836,4 cm3	
Mrd	1965540 kg.cm soit	196,554 kN.m
poids HE	68,2 kg/m	
L	9 m	
Module d'Young	210000 N/mm2	
Iy	104500000 mm4	

<b>Flexion (ELU)</b>		
p_linéairemax	18,73 kN/m soit	18,73 N/mm
entraxe portiques	4,5 m	mm
p_surfaciquemax	4,16 kN/m2	

Scénarios	existant	n°1	n°2	n°3	n°4	n°5	n°6
p_surfacique	3,73	4,40	4,81	5,08	5,75	6,43	9,13

<b>Flèche poutres (ELS)</b>	
Flèche max = L/200	0,045 m

Scénarios	existant	n°1	n°2	n°3	n°4	n°5	n°6
p_linéaire (kN/m=N/mm)	10,99	13,24	14,59	15,49	17,74	19,99	28,99
flèche (=5.p.l^4/384EI) (mm)	42,77	51,53	56,78	60,28	69,04	77,80	112,84
flèche (m)	0,043	0,052	0,057	0,060	0,069	0,078	0,113

Poteaux							
HE 260 A							
<b>Données</b>				<b>Résistance en compression</b>			
A	86,8 cm2			2039,8 kN			
fy	2350 kg/cm2			<b>Résistance au flambement</b>			
poids propre HE	68,2 kg/m			Nb, Rdz 1441,5 kN			
<b>Scénarios</b>							
	existant	n°1	n°2	n°3	n°4	n°5	n°6
effort (kN)	79,61	93,28	101,48	106,95	120,62	134,29	188,96

<b>Flambement selon z (axe faible)</b>			
<b>Données</b>			
S235	235 Mpa	K_flam_z	1
Module d'Young	210000 Mpa	Lcrz	4450
A	8680 mm2	i_z	65 mm
Iy	104500000 mm4	alpha_z	0,49
Iz	36680000 mm4	lambda_z	68,46
H	4450 mm	lambda_barre_z	0,73
		phy_z	0,90
		khi_z	0,71
epsilon	1	NBrdz	1441465,5 N
lambda1	93,9129729	NBrdz	144147 kg

Poutres		
HE 260 B		
<b>Données</b>		
fy=fyd	235 Mpa soit	2350 kg/cm2
Wel,y	1148 cm3	
Mrd	2697800 kg.cm soit	269,78 kN.m
poids HE	93 kg/m	
L	9 m	
Module d'Young	210000 N/mm2	
Iy	149200000 mm4	

<b>Flexion (ELU)</b>		
p_linéairemax	25,71 kN/m soit	25,71 N/mm
entraxe portiques	4,5 m	mm
p_surfaciquemax	5,71 kN/m2	

Scénarios	existant	n°1	n°2	n°3	n°4	n°5	n°6
p_surfacique	3,73	4,40	4,81	5,08	5,75	6,43	9,13

<b>Flèche poutres (ELS)</b>	
Flèche max = L/200	0,045 m

Scénarios	existant	n°1	n°2	n°3	n°4	n°5	n°6
p_linéaire (kN/m=N/mm)	11,23	13,48	14,83	15,73	17,98	20,23	29,23
flèche (=5.p.l^4/384EI) (mm)	33,43	40,13	44,14	46,82	53,52	60,21	87,00
flèche (m)	0,033	0,040	0,044	0,047	0,054	0,060	0,087

Poteaux							
HE 260 B							
<b>Données</b>							
A	118,4 cm2						
fy	2350 kg/cm2						
poids propre HE	93 kg/m						
<b>Résistance en compression</b>							
2782,4 kN							
<b>Résistance au flambement</b>							
Nb, Rdz 1981,6 kN							
Scénarios	existant	n°1	n°2	n°3	n°4	n°5	n°6
effort (kN)	81,12	94,79	102,99	108,46	122,12	135,79	190,47

Flambement selon z (axe faible)	
<b>Données</b>	
S235	235 Mpa
Module d'Young	210000 Mpa
A	11840 mm2
Iy	149200000 mm4
Iz	51350000 mm4
H	4450 mm
epsilon	1
lambda1	93,9129729
K_flam_z	1
Lcrz	4450
i_z	65,8 mm
alpha_z	0,49
lambda_z	67,63
lambda_barre_z	0,72
phy_z	0,89
khi_z	0,71
NBrdz	1981607,0 N
NBrdz	198161 kg

### Cas 3 Hangar Rue des trois grands, 22 (Grivegnée)

Poutres		
IPE 300		
<b>Données</b>		
fy=fyd	235 Mpa soit	2350 kg/cm <sup>2</sup>
Wel,y	557 cm <sup>3</sup>	
Mrd	1308950 kg.cm soit	130,9 kN.m
poids HE	42,2 kg/m	
L	9,65 m	
Module d'Young	210000 N/mm <sup>2</sup>	
Iy	83560000 mm <sup>4</sup>	

<b>Flexion (ELU)</b>		
p_linéairemax	10,82 kN/m soit	10,82 N/mm
entraxe portiques	5,8 m	
p_surfaciquemax	1,87 kN/m <sup>2</sup>	

Scénarios	existant	n°1	n°2	n°3	n°4	n°5	n°6
p_surfacique	1,09	1,77	2,17	2,44	3,12	3,79	6,49

<b>Flèche poutres (ELS)</b>	
Flèche max = L/200	0,048 m

Scénarios	existant	n°1	n°2	n°3	n°4	n°5	n°6
p_linéaire (kN/m=N/mm)	2,38	5,29	7,03	8,19	11,09	13,99	25,59
flèche (=5.p.l <sup>4</sup> /384EI) (mm)	15,29	34,05	45,25	52,72	71,38	90,04	164,68
flèche (m)	0,015	0,034	0,045	0,053	0,071	0,090	0,165

Poutres		
IPE 330		
<b>Données</b>		
fy=fyd	235 Mpa soit	2350 kg/cm <sup>2</sup>
Wel,y	713 cm <sup>3</sup>	
Mrd	1675550 kg.cm soit	167,6 kN.m
poids HE	49,1 kg/m	
L	9,65 m	
Module d'Young	210000 N/mm <sup>2</sup>	
Iy	117700000 mm <sup>4</sup>	

<b>Flexion (ELU)</b>		
p_linéairemax	13,90 kN/m soit	13,90 N/mm
entraxe portiques	5,80 m	
p_surfaciquemax	2,40 kN/m <sup>2</sup>	

Scénarios	existant	n°1	n°2	n°3	n°4	n°5	n°6
p_surfacique	1,09	1,77	2,17	2,44	3,12	3,79	6,49

<b>Flèche poutres (ELS)</b>	
Flèche max = L/200	0,048 m

Scénarios	existant	n°1	n°2	n°3	n°4	n°5	n°6
p_linéaire (kN/m=N/mm)	2,38	5,29	7,03	8,19	11,09	13,99	25,59
flèche (=5.p.l <sup>4</sup> /384EI) (mm)	10,85	24,18	32,13	37,42	50,67	63,92	116,91
flèche (m)	0,011	0,024	0,032	0,037	0,051	0,064	0,117

Poutres		
IPE 360		
<b>Données</b>		
fy=fyd	235 Mpa soit	2350 kg/cm <sup>2</sup>
Wel,y	904 cm <sup>3</sup>	
Mrd	2124400 kg.cm soit	212,4 kN.m
poids HE	57,1 kg/m	
L	9,65 m	
Module d'Young	210000 N/mm <sup>2</sup>	
Iy	162700000 mm <sup>4</sup>	

<b>Flexion (ELU)</b>		
p_linéairemax	17,68 kN/m soit	13,90 N/mm
entraxe portiques	5,80 m	
p_surfaciquemax	3,05 kN/m <sup>2</sup>	

Scénarios	existant	n°1	n°2	n°3	n°4	n°5	n°6
p_surfacique	1,09	1,77	2,17	2,44	3,12	3,79	6,49

<b>Flèche poutres (ELS)</b>	
Flèche max = L/200	0,048 m

Scénarios	existant	n°1	n°2	n°3	n°4	n°5	n°6
p_linéaire (kN/m=N/mm)	2,52	5,44	7,18	8,34	11,24	14,14	25,74
flèche (=5.p.l <sup>4</sup> /384EI) (mm)	8,34	17,98	23,73	27,57	37,15	46,73	85,07
flèche (m)	0,008	0,018	0,024	0,028	0,037	0,047	0,085

Poteaux		
IPE 300		
<b>Données</b>		<b>Résistance en compression</b>
A	53,8 cm <sup>2</sup>	1264,3 kN
fy	2350 kg/cm <sup>2</sup>	<b>Résistance au flambement</b>
poids propre HE	42,2 kg/m	Nb, Rdz 413,6 kN

Scénarios	existant	n°1	n°2	n°3	n°4	n°5	n°6
effort (kN)	33,20	52,26	63,60	71,15	90,04	108,93	184,49

Flambement selon z (axe faible)		
<b>Données</b>		
S235	235 Mpa	K_flam_z 1
Module d'Young	210000 Mpa	Lcrz 4600
A	5380 mm <sup>2</sup>	i_z 33,5 mm
Iy	835600000 mm <sup>4</sup>	alpha_z 0,49
Iz	6040000 mm <sup>4</sup>	lambda_z 137,313
H	4600 mm	lambda_barre 1,462
		phy_z 1,878
		khi_z 0,327
epsilon	1	NBrdz 413582,6 N
lambda1	93,9129729	NBrdz 41358 kg