Convention n° : 1404C0064

Méthode d'analyse pour la faisabilité technico-économique d'une surélévation de bâtiments urbains exploitant les procédés industrialisés

Rapport de synthèse

10 Novembre 2016

Sommaire

Introduction **3**
1. Outil de diagnostic structurel de la capacité portante du bâtiment **7**
2. Choix des solutions constructives de surélévation **14**
2.1. Etude des interfaces structurelles et d'enveloppe 14
2.1.1. Analyse de l'état de conservation des matériaux de structure 14
2.1.2. Matrice d'analyse de la performance thermique des éléments de bâti 14
2.2. Choix du système constructif 18
2.2.1. Présentation des fiches composants 18
2.2.2. Systèmes constructifs industrialisés recensés: avantages et inconvénients 19
2.3. Principes pour l'étude de la structure rapportée 23
2.4. Exemples de réalisations 24
3. Outil d'évaluation économique **25**
4. Evaluation énergétique et environnementale **28**
4.1. Démarche 29
4.2. Evaluations énergétiques 30
4.3. Pour la partie environnementale, deux cas d'extension ont été simulés 33
5. Industrialisation **35**
Conclusion et perspectives de développement issues de la démarche Lign2toit ... **37**

Introduction

En rupture avec les pratiques au cas par cas couramment utilisées, la finalité du projet est de mettre au point un nouveau modèle de démarche technico-économique permettant à la fois la création de logements en zones tendues et l'amélioration du bilan énergétique des bâtiments existants. Il s'agit de doter la filière construction d'un guide de prise de décision capable d'accélérer les résultats attendus par les politiques publiques à forts enjeux sociétaux. Le modèle vise à accroître l'efficience de l'outil de production de la ville et à stimuler les échanges entre intervenants de l'acte de construire.

Le concept du projet Lign2toit s'appuie sur la densification verticale en milieu urbain et péri-urbain. En plus d'être compatible avec l'apport d'isolation thermique sur le bâtiment initial, la surélévation mesurée (création d'un ou deux étages supplémentaires) crée des surfaces supplémentaires au cœur du maillage urbain et constitue une des solutions efficaces de réhabilitation énergétique du parc existant.

Sur les considérations de performance énergétique, économique et environnementale, la surélévation présente une réelle solution pour réévaluer le parc immobilier français. Les surfaces aériennes présentent un potentiel considérable pour répondre à la problématique de la densité urbaine et en même temps « d'embarquer la rénovation énergétique » !

Cette réelle opportunité permet ainsi de valoriser le patrimoine concerné, voire de reclassifier architecturalement le bien. Ainsi la rénovation énergétique globale du bâtiment initial se positionne comme passage obligé.

Face aux possibilités offertes par le gisement aujourd'hui quasiment inexploité des réserves foncières aériennes disponibles en haut des parcs d'immeubles existants, Lign2toit a pour objectif de contribuer à la mise en place d'une méthode d'évaluation complète pour un projet de surélévation et d'amélioration du bâtiment existant, véritable complément technique de la démarche FREEZ.

Pour ce faire, plusieurs outils méthodologiques[1] ont été conçus et développés pour aider à la prise de décision du maître d'ouvrage :

- un outil de diagnostic structurel de la capacité portante du bâtiment
- un catalogue multi-matériau des principaux composants industriels disponibles sur le marché pour la structure et l'enveloppe de la surélévation
- un outil d'évaluation des performances énergétiques et impacts environnementaux
- un outil d'appréciation économique en coût global

Le milieu urbain dense, où la demande est forte, forme le périmètre de l'étude. Les bâtiments existants à usage résidentiel et tertiaire en sont la cible avec leur éventail de typologies : matériaux de l'existant, formes et hauteurs, aspects urbains et architecturaux.

[1] La responsabilité des organismes à l'origine de la conception et du développement de la démarche et des outils méthodologiques ne saurait être engagée suite à l'utilisation de ces derniers.

L'étude présente l'éventail des possibilités d'interfaces structurelles et thermiques entre l'existant et la surélévation et montre l'existence de solutions constructives et architecturales en les illustrant par un certain nombre d'exemples.

L'examen des impacts environnementaux et économiques de cas d'étude apporte un complément de réponse à l'ensemble des préoccupations lors de la prise de décision.

Connaissances amont et lien avec FREEZ

Le projet Lign2toit se concentre sur les aspects technico-économiques de l'extension verticale des bâtiments. Le volet juridico-administratif propre aux opérations de surélévation n'y est pas abordé. Ces aspects ont été étudiés précédemment dans le cadre du projet "Freez-Financement de la réhabilitation par la surélévation ou l'extension". Cette étude co-financée par l'ADEME et réalisée dans le cadre de INEF4 par Nobatek et FCBA avec le GREThA s'est terminée fin 2014.

Un des livrables de cette étude a été de définir les points à prendre en considération pour faire une première approche de faisabilité. Cela est notamment passé par l'établissement d'une liste de l'ensemble des questions juridiques, urbanistiques et réglementaires à traiter pour connaître l'ensemble des contraintes du projet.

La première famille de questions était relative à la faisabilité administrative et juridique. Cela comprend notamment la détermination des contraintes liées au Code de l'urbanisme, au PLU (gabarits, prospects, création de places de stationnements...) et aux architectes des bâtiments de France (ABF). Cela intègre également les questions liées aux spécificités de l'intervention au sein d'une copropriété (vote par les copropriétaires, coût du droit à construire,...).

Un deuxième aspect à prendre en compte, concerne le contexte réglementaire lié au droit de la construction. Au-delà des contraintes standards pour un projet de réhabilitation, il faut également étudier les spécificités d'un chantier de surélévation: accessibilité des étages créés, non-aggravation de la vulnérabilité du bâtiment aux séismes, exigences au niveau de la sécurité incendie, …

La troisième catégorie est liée à la faisabilité économique. Il faut alors prendre en compte non seulement le coût de la surélévation en elle-même (matériaux, main d'œuvre, études) mais également le surcoût éventuel pour un projet en surélévation (renforcement des structures, raccordement aux réseaux, adaptation escaliers, contraintes d'accès...), l'augmentation des taxes et impôts ou encore l'éventuel coût de commercialisation des logements créés. En ce qui concerne les recettes, les aides publiques, exonérations fiscales et économies d'énergie sont à intégrer en plus de la plus-value de la valeur du logement ou du loyer ou le produit de la vente.

Au-delà de ces paramètres, il faut également étudier les aspects intervention en site occupé et acceptabilité par les habitants, riverains et collectivités locales. Dans le cas d'un projet de surélévation, au-delà des nuisances habituels d'un chantier, les "locaux" peuvent percevoir l'intervention comme une densification à outrance entraînant un phénomène d'entassement.

Processus Lign2Toit pour conduire l'étude de faisabilité

Le périmètre du projet vise une grande variété de typologies de bâtiments, privés ou publics, résidentiels ou tertiaires. De fait, la démarche proposée a pour ambition d'amorcer et d'accompagner les réflexions lors de l'étape de faisabilité avant d'engager des coûts plus importants pour une étude approfondie. Véritable outil d'aide à la décision, la démarche s'adresse à des professionnels avertis (architecte, bureau d'études, service

techniques des collectivités,...) pour faciliter les échanges avec les décideurs: propriétaires ou copropriétaires, privés ou publics, administrateurs de biens ou administrateurs judiciaires, etc.

La méthodologie proposée repose sur trois étapes de travail successives, chacune accompagnée d'un outil adapté : la capacité technique de portance par le bâtiment existant, l'analyse comparée des scénarios de réhabilitation énergétique et une première approche économique.

L'étude de faisabilité technique constitue l'étape clé de la décision de poursuivre ou non un projet de surélévation. La réflexion méthodologique proposée dans Lign2toit vise tous les types de destinations d'ouvrages multi-étagés, mais s'applique particulièrement au domaine du résidentiel.

Périmètre d'utilisation

Il est à noter que les spécificités de la conception d'ouvrage en zones sismiques ne sont pas traitées dans la présente démarche.
La période d'après 1974 ayant connu des règlementations thermiques successives, elle n'a pas été considérée dans cette première version de l'outil.

Etapes élémentaires du diagnostic sur site permettant d'évaluer la faisabilité technique d'une surélévation

L'objectif de l'étude Lign2toit étant de déterminer une première faisabilité technique avant d'engager une étude plus poussée, le niveau de connaissance du bâtiment existant requis est relativement faible. Il est toutefois nécessaire que les utilisateurs collectent l'ensemble des données suivantes à partir de l'observation du bâtiment.

a) Les fondations de l'ouvrage existant et la capacité portante du sol constituent les premiers points clés à étudier ainsi que l'implantation éventuelle dans une zone sismique. L'analyse des bâtiments environnants notamment en cas de dent creuse peut s'avérer très utile mais ne remplacera pas une reconnaissance géotechnique du sol.

b) La seconde étape porte sur la reconnaissance des éléments porteurs de l'ouvrage existant : murs, poteaux, poutres,… Pour cela, il peut s'avérer indispensable de pratiquer des essais destructifs locaux ou des prélèvements afin de s'assurer de la compatibilité entre les plans recueillis et l'ouvrage réellement édifié. L'analyse peut amener à considérer que seule une désolidarisation de la construction nouvelle reprise par un portique indépendant du bâtiment existant constitue une réponse satisfaisante.

c) L'étude de la couverture existante peut révéler des informations sur les cheminées et les systèmes de ventilation en place qui souvent varient selon l'âge de la construction. Les conduits peuvent parfois participer au soutien de l'ouvrage, mais aussi être dispersés en de nombreux points de l'étage et créer ainsi autant de points sensibles qu'il conviendra de traiter tout particulièrement dans le projet.

d) Enfin, les installations techniques (électricité, eau, chauffage,..) peuvent parfois être maintenues en l'état ou nécessiter leur mise aux normes, indépendamment des conséquences de la surélévation. Lorsqu'elles sont maintenues, il convient de vérifier si ces éléments peuvent être reliés au système pour les nouveaux niveaux ou s'il est préférable de mettre en œuvre deux systèmes dissociés.

CARACTÉRISTIQUES DU BATIMENT		
Générales		
	nombre étages	
	emprise au sol	

Dernier étage		
Nature	Comble perdu	
	comble habité	
	Terrasse	

Structure (assurer la cohérence de la descente de charge)		
murs ou piliers	type	
	nombre étages	
	balcon	
Façade	habillage décoratif ou structurel	
	matériaux	

planchers	Nature	
	épaisseur	

Ce diagnostic est déterminant pour définir la solution constructive et la stratégie d'exécution des travaux.

<u>Reconnaissance des éléments porteurs de l'existant</u>

Cas avec toitures terrasses :

- avec murs de façade porteurs
- avec murs de refend porteurs
- sur structure poteaux-poutres avec remplissage

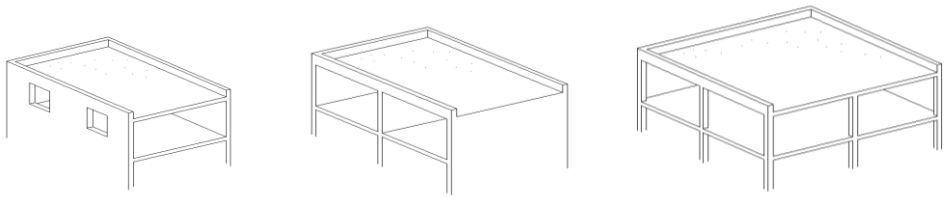


Figure 1 _ 3 cas de configurations constructives représentatives avec toitures terrasses

Dans ces 3 cas, la structure rapportée de la surélévation pourra s'appuyer directement ou par l'intermédiaire d'une structure de répartition type podium sur les murs ou structures existantes porteuses si ceux-ci peuvent reprendre la charge rapportée.

Cas avec toitures pentées :

- avec fermes reposant sur des murs de façade porteurs
- avec pannes s'appuyant sur des murs de refend porteurs
- avec comble habitable à la Mansart avec murs de façade porteurs

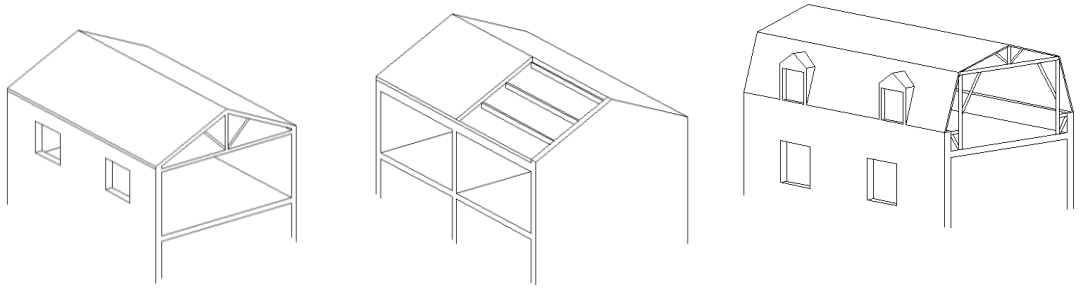


Figure 2 _ 1 cas de configuration constructive avec comble perdu et 2 cas avec combles habitables

Dans ces 3 cas:

- Si le dernier niveau ou le bâtiment n'est pas occupé durant les travaux, on pourra procéder à l'enlèvement préalable de la toiture pour intervenir de façon similaire aux cas de toitures terrasses.
- Si le chantier est effectué avec occupation du bâtiment sauf du dernier niveau dans les cas de combles habitables, la surélévation d'un ou plusieurs niveaux se déroulera en 4 grandes étapes pour la réalisation de la structure nouvelle :
  1. Ouverture de la base des rampants et mise en œuvre des poutres reposant sur les murs de façade
  2. Elévation des façades ou structures de la surélévation
  3. Pose de la nouvelle toiture
  4. Enlèvement de la toiture existante

1. Outil de diagnostic structurel de la capacité portante du bâtiment[2]

Rappel : Le diagnostic préalable d'un immeuble en fonction de sa typologie ne peut en aucun cas se substituer à une analyse approfondie de l'édifice et de son environnement. Les typologies décrites ci-après ont pour seul objectif de conduire à une évaluation des enjeux d'un programme de surélévation.

Afin de déterminer la capacité portante du bâtiment existant, notre démarche s'appuie sur des données issues de recherches bibliographiques, en particulier les constatations historiques (tableau 1). En fonction de l'appartenance à une typologie historique de construction, il est possible d'estimer la composition des murs porteurs et d'évaluer la résistance des matériaux constitutifs (Cf. rapport phase 1).

Typologie historique	Période	Mur de façade-rue
XVII° au XIX° siècle	avant 1850	Pierre de taille
		Moellons

[2] Voir rapport de tâche 1 pour plus de détails

			Pan de bois
Haussmannien	1850	1914[2]	fer + pierres locales en remplissage
Faubourien			pierres locales, moellons, briques pleines mixte des 3 matériaux béton à partir de 1895
HBM	1920[3]	1930	brique pleine
	1930	1940	brique pleine, mâchefer début du parpaing de ciment et de la brique creuse
Moderne	1920	1940[2]	ossature béton armé + remplissage parpaings ou briques pleines
Reconstruction	1944[2]	1953	parpaing de ciment, moellon, brique creuse
Rationaliste	1950	1960	ossature béton armé + remplissage parpaings ou briques
Clacissisme moderne			parpaing de ciment, brique creuse, BA + remplissage
Grand-ensemble I	1954	1966	voiles béton
Grand-ensemble II	1967	1974	voiles béton 15 à 25 cm
Petit collectif	après 1970		ossature béton armé + remplissage parpaings ou briques
Urbain			voiles béton

Tableau 1 _ Typologie historique et composition des murs de Façade

Méthode d'analyse du potentiel

L'outil de caractérisation de la typologie des murs permet, en l'observant de reconnaître le bâtiment existant et renseigne sur le nombre potentiel de niveau de surélévation possible.

Ce résultat est obtenu avec comme hypothèse une surélévation à système constructif identique.
L'outil de diagnostic structurel permet de traduire, à partir de la situation existante, le nombre de niveau de surélévation potentiel en poids admissible par le bâtiment existant. L'objet de Lign2toit est de fournir des solutions constructives des différentes filières existantes et de les mixer en fonction des conditions existantes et des performances attendues.

Cet outil permet de faire le lien avec le catalogue des solutions constructives dont une des caractéristiques des fiches renseigne sur le poids unitaire des systèmes constructifs.

Après renseignement des caractéristiques du bâtiment étudié, l'outil additionne les poids des murs de façades, murs pignons, murs de refends, planchers et de la couverture pour obtenir le poids du bâtiment existant.
En comparant le nombre de niveaux constaté et le nombre de niveau maximal de la typologie, on détermine le poids admissible supplémentaire à système constructifs constant.

[3] Les périodes 1914-1920 et 1940-1944 correspondent aux deux guerres mondiales pendant lesquelles il y a eu peu de construction

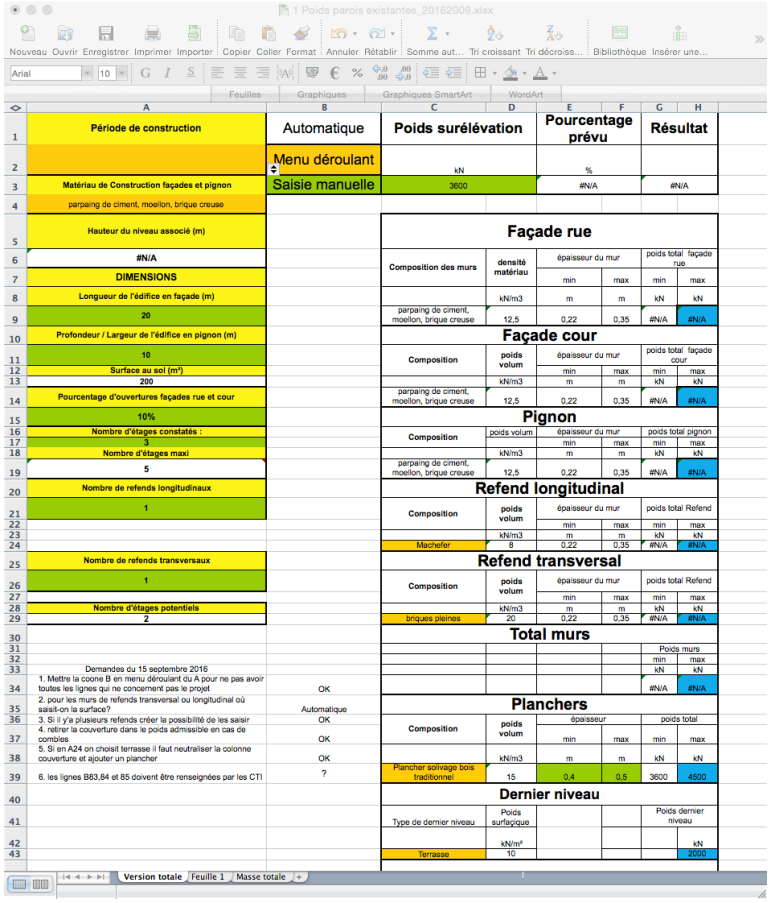
Ce poids obtenu est rapporté au poids total du bâtiment existant pour calculer un pourcentage de poids supplémentaire. Il peut être divisé en 3 catégories de complexité croissante du point de vue des dispositions constructives à prendre pour la surélévation:

- 0% à 5%
- +5% à 7%
- +7% à 10%

Le didacticiel suivant montre pas à pas la démarche à suivre pour utiliser cet outil développé à partir d'Excel.

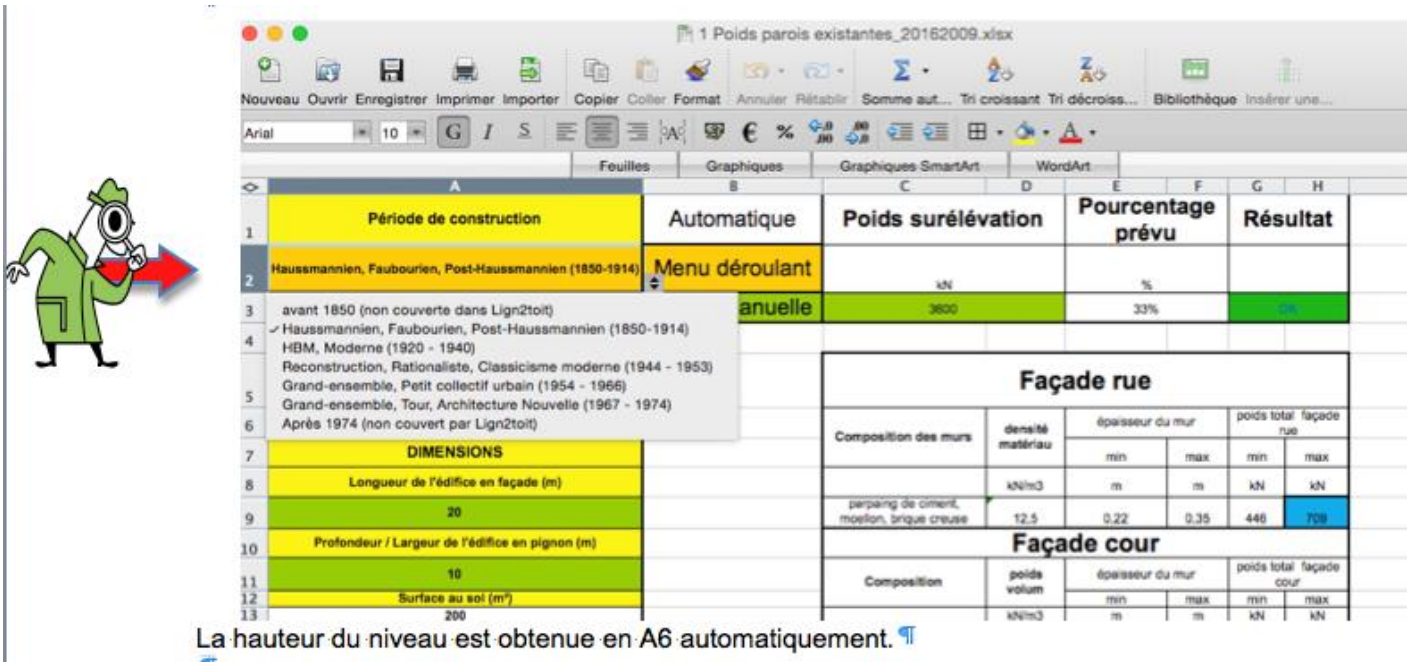
Présentation générale:

La fenêtre comporte un code couleur ;



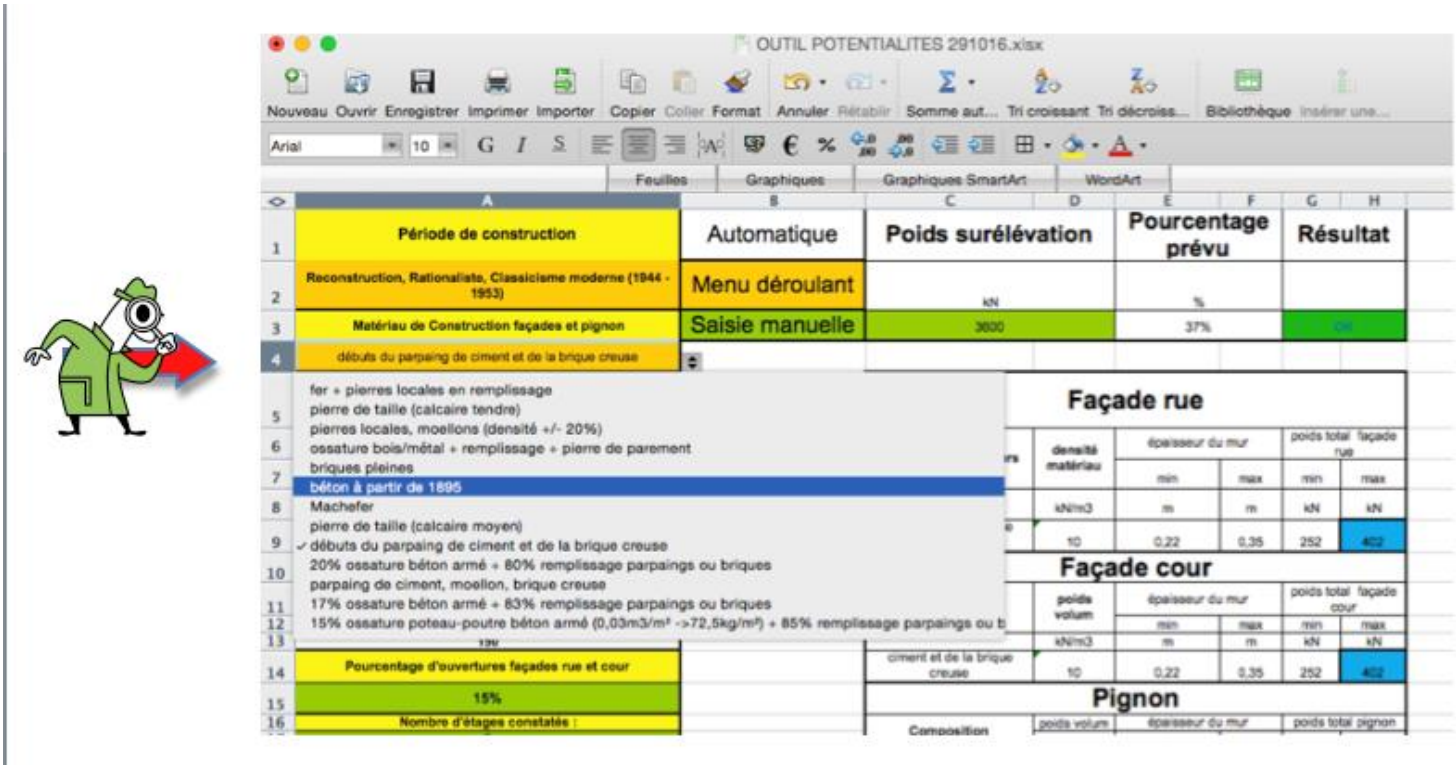
Titres en **JAUNE**
Menus déroulants en **ORANGE**
Saisie manuelle en **VERT**
Résultats en **BLEU**

1ère étape : **Choisir la période de construction** A2



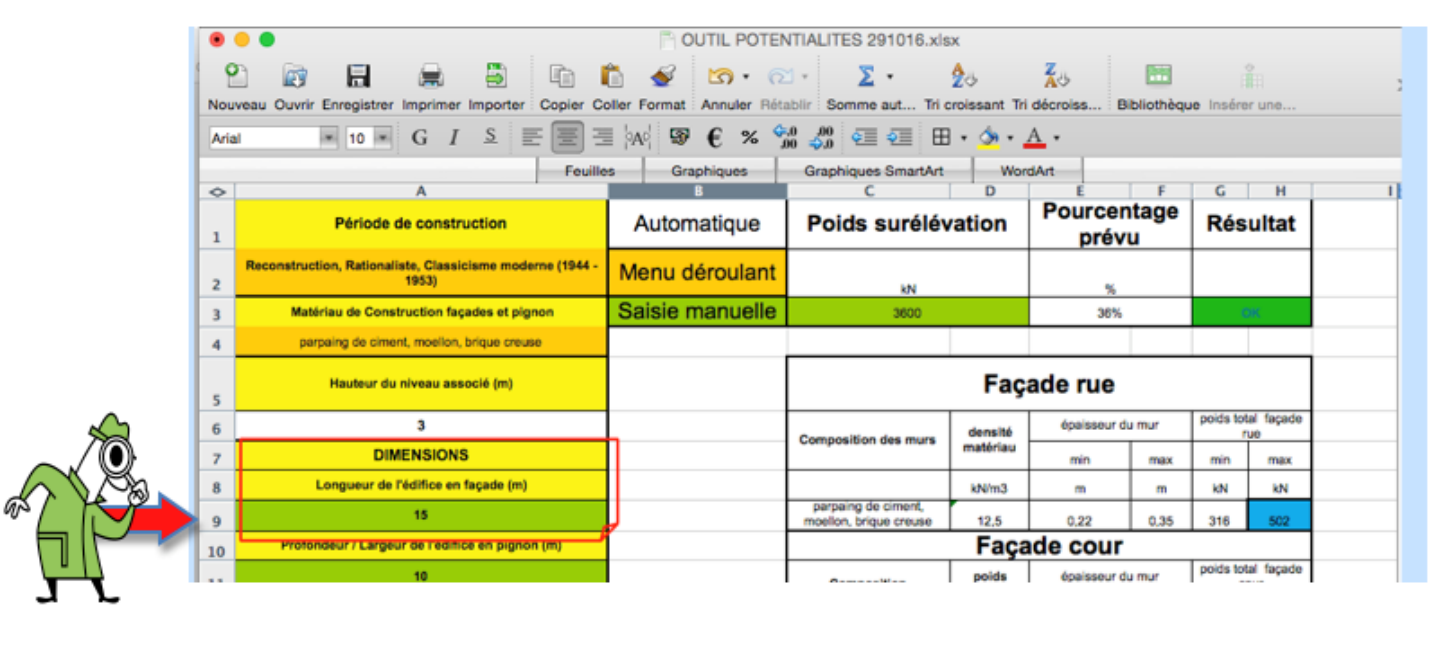
La hauteur du niveau est obtenue en A6 automatiquement.

2ème étape: **Choisir le matériau de Construction façades et pignon** A4

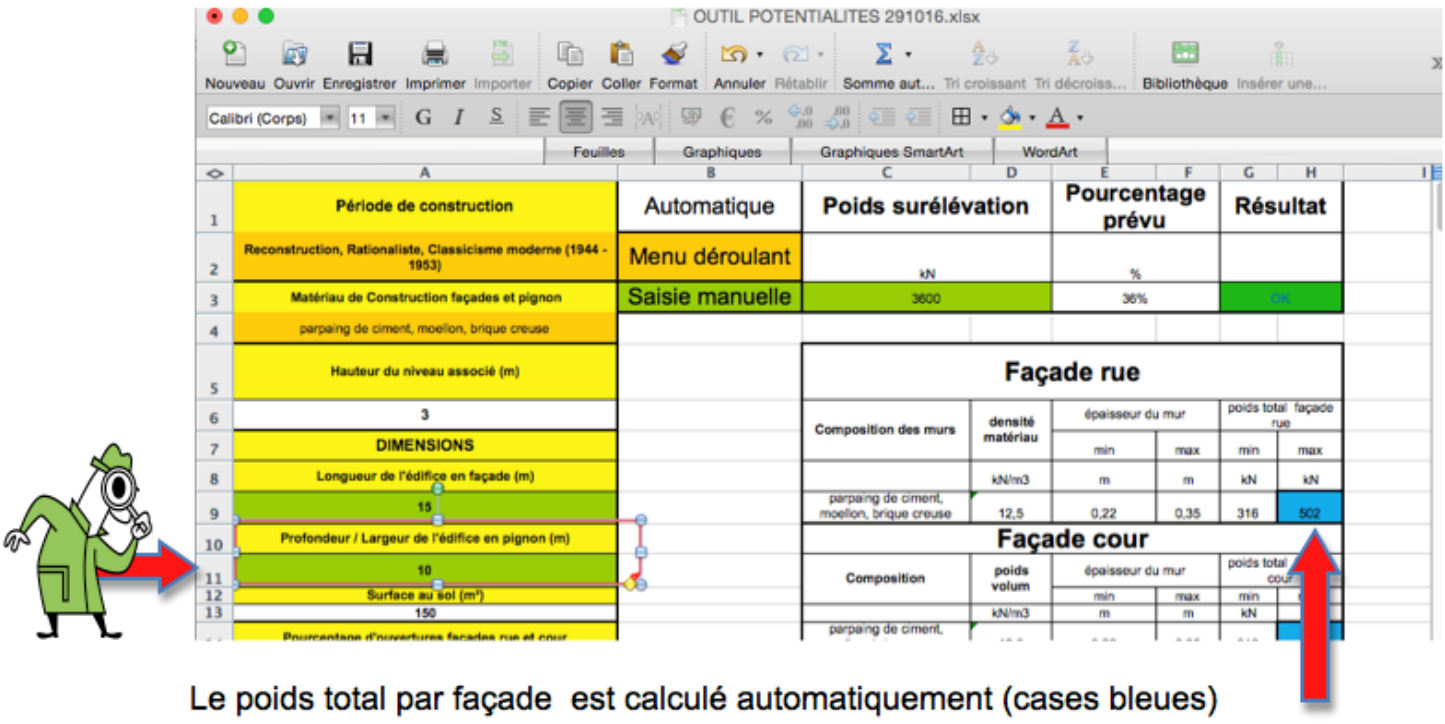


Le tableau des façades est rempli automatiquement, avec les poids et les épaisseurs de murs en fonction du matériau renseigné.

3ème étape : renseigner la **longueur de l'édifice en façade (m)** A9



4ème étape : renseigner la **largeur de l'édifice en façade (m)** A11



Le poids total par façade est calculé automatiquement (cases bleues)

5ème étape : renseigner le **pourcentage d'ouvertures façades rue et cour A15**

DIMENSIONS
Longueur de l'édifice en façade (m)
20
Profondeur / Largeur de l'édifice en pignon (m)
10
Surface au sol (m²)
200
Pourcentage d'ouvertures façades rue et cour
10%
Nombre d'étages constatés :
3
Nombre d'étages maxi
5
Nombre de refends longitudinaux

	matériau				
		min	max	min	max
	kN/m3	m	m	kN	kN
parpaing de ciment, moellon, brique creuse	12,5	0,22	0,35	446	709
Façade cour					
Composition	poids volum	épaisseur du mur		poids total façade cour	
		min	max	min	max
	kN/m3	m	m	kN	kN
parpaing de ciment, moellon, brique creuse	12,5	0,22	0,35	446	709
Pignon					
Composition	poids volum	épaisseur du mur		poids total pignon	
		min	max	min	max
	kN/m3	m	m	kN	kN
parpaing de ciment, moellon, brique creuse	12,5	0,22	0,35	248	394
Refend longitudinal					

Ce pourcentage retranche les baies du poids total des murs de façades.

6ème étape : renseigner le **nombre d'étages constatés : A17**

En A19 le nombre d'étages maximum est calculé automatiquement ce qui permettra d'en déduire en A29 le nombre d'étages potentiels de surélévation.

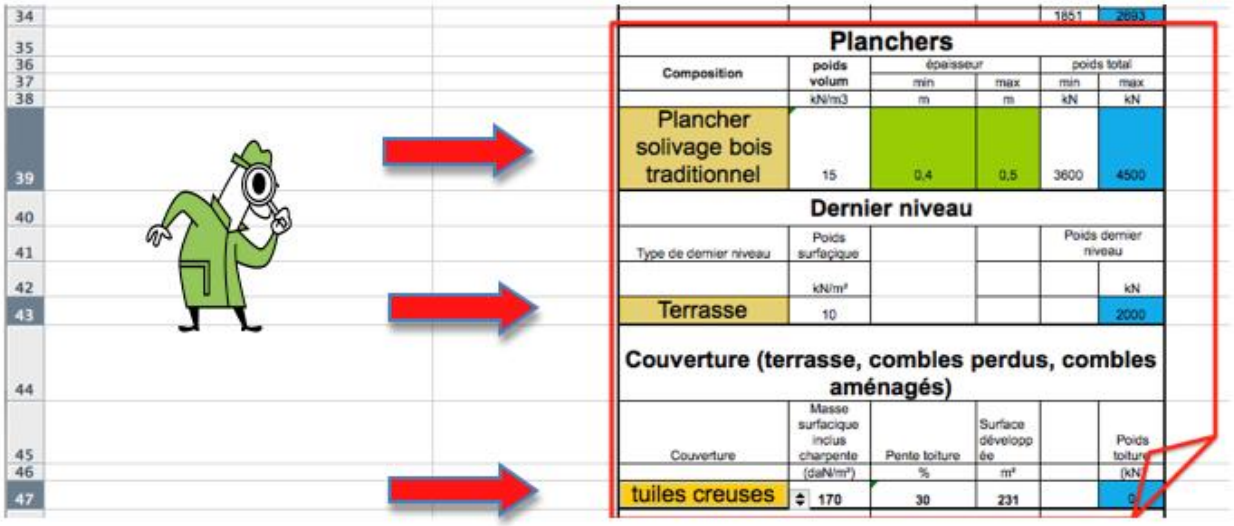
7ème étape : renseigner le **nombre de refends longitudinaux et transversaux constatés : A21 & A26**

16	Nombre d'étages constatés :
17	3
18	Nombre d'étages maxi
19	5
20	Nombre de refends longitudinaux
21	1
22	
23	
24	
25	Nombre de refends transversaux
26	1
27	
28	Nombre d'étages potentiels de surélévation
29	2

Composition	poids volum	épaisseur du mur		poids total pignon	
		min	max	min	max
	kN/m3	m	m	kN	kN
parpaing de ciment, moellon, brique creuse	12,5	0,22	0,35	248	394
Refend longitudinal					
Composition	poids volum	épaisseur du mur		poids total Refend	
		min	max	min	max
	kN/m3	m	m	kN	kN
Machefer	8	0,22	0,35	317	252
Refend transversal					
Composition	poids volum	épaisseur du mur		poids total Refend	
		min	max	min	max
	kN/m3	m	m	kN	kN
briques pleines	20	0,22	0,35	396	630

La composition des refends doit aussi être renseignée leur poids est calculé automatiquement à partir des dimensions de la façade et de la profondeur renseignées **en A9 et A11**

8ème étape : renseigner la **composition des planchers d'étage et leur épaisseur E39 et F39, du dernier niveau et de la couverture constatée : C33, C43 & C47**



Planchers					
Composition	poids volum	épaisseur min	épaisseur max	poids total min	poids total max
	kN/m3	m	m	kN	kN
Plancher solivage bois traditionnel	15	0,4	0,5	3600	4500

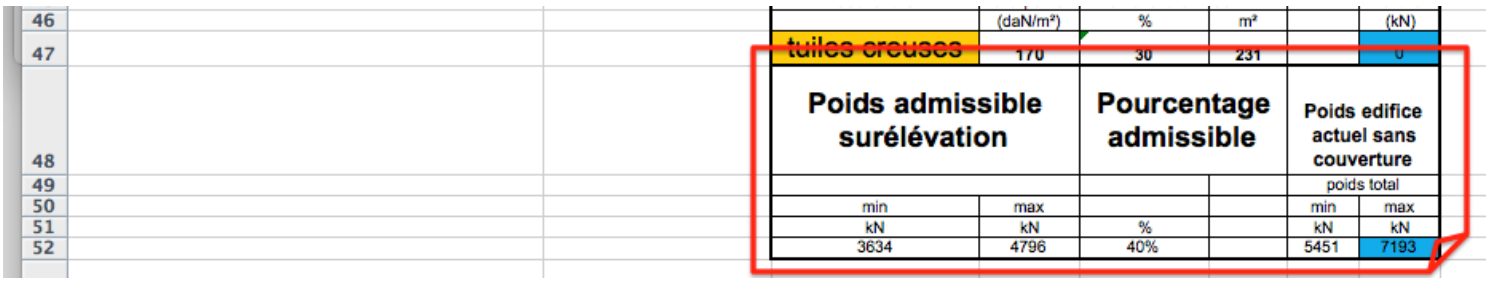
Dernier niveau					
Type de dernier niveau	Poids surfacique			Poids dernier niveau	
	kN/m²				kN
Terrasse	10				2000

Couverture (terrasse, combles perdus, combles aménagés)					
Couverture	Masse surfacique inclus charpente	Pente toiture	Surface développée		Poids toiture
	(daN/m²)	%	m²		(kN)
tuiles creuses	170	30	231		0

RESULTATS :

L'ensemble des données permet de calculer

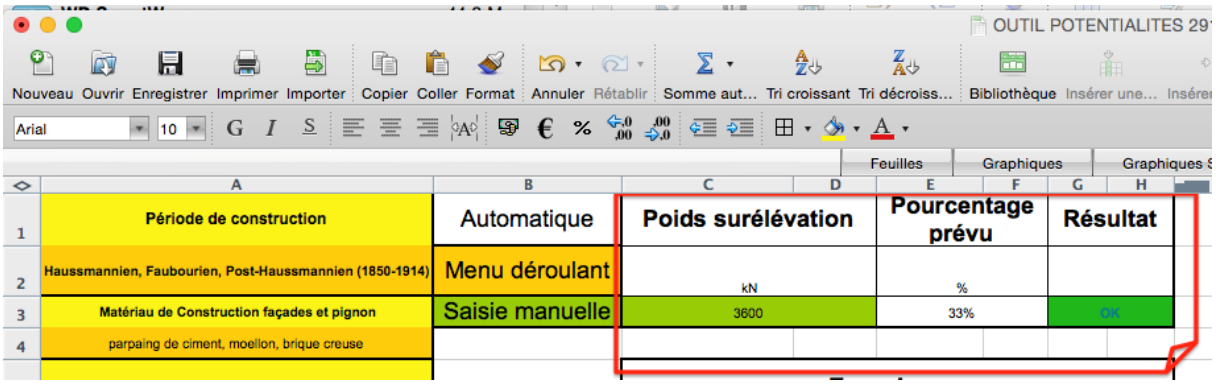
- le poids admissible de surélévation en valeur absolue
- le poids admissible de surélévation en pourcentage
- le poids du bâtiment sans couverture



	(daN/m²)	%	m²		(kN)
tuiles creuses	170	30	231		0

Poids admissible surélévation		Pourcentage admissible		Poids edifice actuel sans couverture	
				poids total	
min	max			min	max
kN	kN	%		kN	kN
3634	4796	40%		5451	7193

Le poids total de la surélévation calculé à l'aide des fiches des systèmes constructifs est renseigné en C3, le pourcentage prévu de la surélévation se calcule à partir du poids de la surélévation rapporté au poids du bâtiment actuel. Si ce pourcentage est supérieur, inférieur ou égal au pourcentage admissible le résultat en GH3 est **OK,** ou **REDUIRE**



Période de construction	Automatique	Poids surélévation	Pourcentage prévu	Résultat
Haussmannien, Faubourien, Post-Haussmannien (1850-1914)	Menu déroulant	kN	%	
Matériau de Construction façades et pignon	Saisie manuelle	3600	33%	OK
parpaing de ciment, moellon, brique creuse				

L'étape 1 d'analyse de la capacité portante du bâtiment existant étant menée à bien, un poids admissible a été déterminé. Avant d'étudier les solutions constructives de surélévation (voir « catalogue de solutions »), il y a lieu d'analyser le contexte constructif existant prenant en compte:

- le type et la localisation des appuis verticaux pour la **gestion des interfaces structurelles** (façades porteuses, murs de refend, structure poteaux-poutres)
- le type de toiture existante (toit-terrasse, combles perdus, combles aménagés) et le scénario d'intervention (avec ou sans rénovation énergétique de l'existant) pour la **gestion des interfaces d'enveloppes**
- le déroulé du chantier suivant l'accessibilité ou non aux engins de levage (présentés dans le rapport phase 3)

L'occupation ou non des locaux durant les travaux de surélévation aura également des incidences capitales sur la conception et l'organisation des choix constructifs et des travaux.

Afin d'alimenter cette analyse, des opérations de surélévations caractéristiques ont été étudiées et répertoriées sous forme de fiches (voir Annexe du rapport de Phase 2).

2. Choix des solutions constructives de surélévation[4]

2.1. Etude des interfaces structurelles et d'enveloppe

2.1.1. Analyse de l'état de conservation des matériaux de structure

L'identification du type de structure existante du bâtiment permettra de déterminer si les points d'appui de la nouvelle structure rapportée pourront être ponctuels dans le cas de structure poteaux-poutres ou devront être réparties pour limiter les contraintes localisées sur les murs de façade ou de refend en maçonnerie ou en béton banché ou encore sur les planchers.

Autour de la zone destinée à accueillir les éléments de l'extension verticale, le matériau support peut être endommagé ou détérioré. Ces dégradations éventuelles dépendent de la nature du matériau : acier, béton, bois, maçonnerie. Par défaut, il est toujours conservateur de supposer que le support est endommagé risquant de réduire ses capacités portantes.

2.1.2. Matrice d'analyse de la performance thermique des éléments de bâti

Le traitement des interfaces d'enveloppe entre la surélévation et le bâtiment existant sont intimement liés à la stratégie de rénovation retenue. Plusieurs options sont possibles :

1. Surélévation et rénovation globale de l'existant (scénario 4 de l'évaluation énergétique)
2. Surélévation et rénovation partielle de l'existant
3. Surélévation sans rénovation de l'existant (scénario 3 de l'évaluation énergétique)

Quelle que soit l'option choisie, l'opération doit se faire en connaissance des contraintes réglementaires thermiques à respecter pour la surélévation RT 2012 et pour la rénovation de l'existant éventuellement RT ex.

[4] Voir rapport de tâche 2 pour plus de détails

Nous avons cherché à identifier tous les cas possibles en termes de nouvelle isolation (représentée en rouge), à l'interface de la surélévation (représentée en vert) avec le bâtiment existant (représenté en bleu) afin d'évaluer l'impact sur le traitement du pont thermique.

Pour cela, la réflexion a été séparée en 2 tableaux selon le type d'isolation de la surélévation :

- Isolation Thermique par l'Extérieur (ITE) : Tableau 2
- Isolation Thermique par l'Intérieur (ITI) : Tableau 3

Puis, 4 grands types d'interventions possibles pour réaliser la surélévation ont été identifiés (en colonnes):

1. Surélévation alignée verticalement au nu de l'existant, et en appui direct sur l'existant
2. Surélévation en retrait par rapport à l'existant, et en appui direct sur l'existant
3. Surélévation alignée verticalement au nu de l'existant, avec les charges reprises par un portique
4. Surélévation en retrait par rapport à l'existant, avec les charges reprises par un podium

Divisés chacun en 2 cas :

- La paroi de la surélévation est en pente (P)
- La paroi de la surélévation est verticale (V)

Pour croiser enfin avec 5 natures de travaux possibles sur le bâtiment existant (en lignes) :

a. Pas de travaux d'isolation sur le bâtiment existant
b. Ajout d'isolation thermique sur les parois verticales du bâtiment existant par l'extérieur
c. Ajout d'isolation thermique sur les parois verticales du bâtiment existant par l'intérieur
d. Ajout d'isolation thermique sur le plancher côté surélévation[5]
e. Ajout d'isolation thermique sur le plancher côté bâtiment existant[6]

La qualité thermique de l'interface surélévation/existant rénové est évaluée de façon comparative, avec 3 niveaux (+++, ++ et +), du plus au moins performant, afin de souligner les ponts thermiques résiduels importants à traiter.

[5] La réglementation thermique n'impose pas d'isolation horizontale sous le plancher de la surélévation mais l'opportunité de le faire en phase de travaux peut apporter des améliorations thermique et acoustique pour un coût minime.

[6] Cette solution est techniquement réalisable mais ne se rencontre que très rarement en situation de travaux.

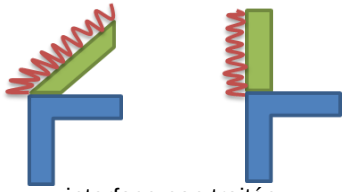
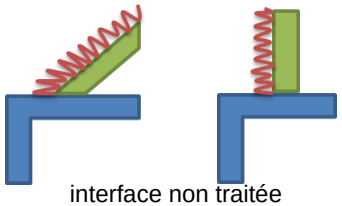
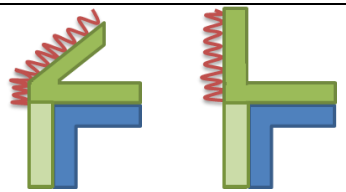
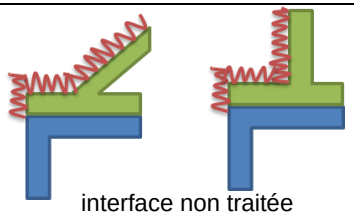
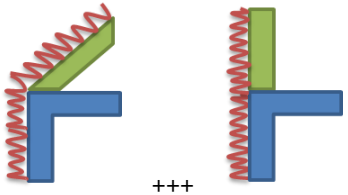
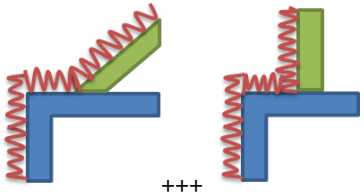
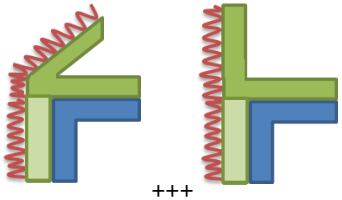
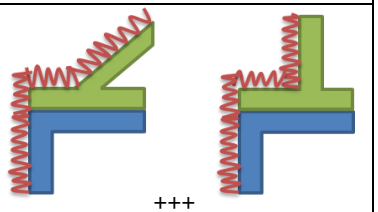
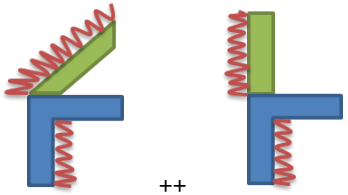
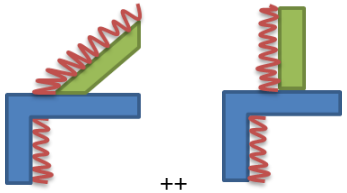
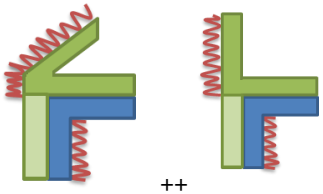
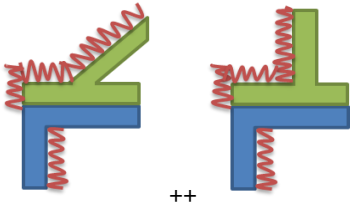
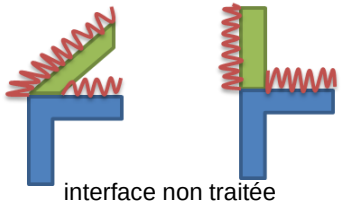
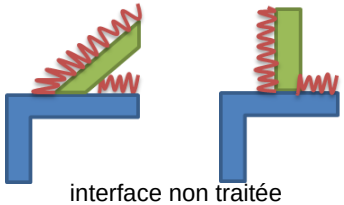
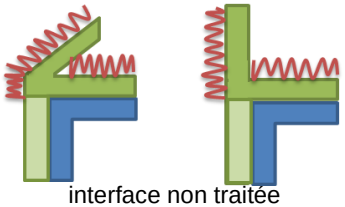
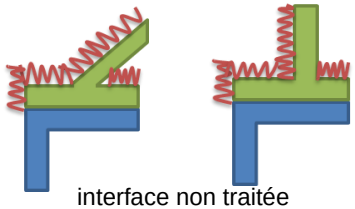
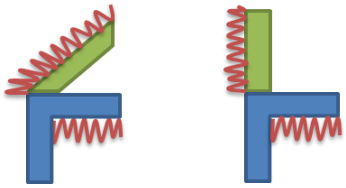
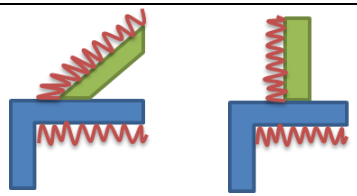
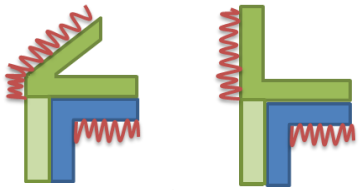
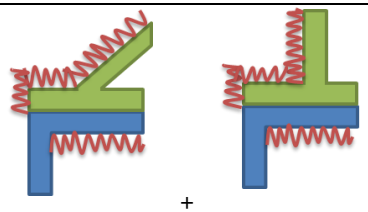
Nature des travaux sur le bâtiment existant	**1.** Alignement vertical au nu de l'existant – Appui direct sur l'existant		**2.** Retrait par rapport à l'existant – Appui direct sur l'existant		**3.** Alignement vertical au nu de l'existant – Reprise de charges par portique		**4** Retrait par rapport à l'existant – Reprise de charges par podium	
N° commentaire	**P**	**V**	**P**	**V**	**P**	**V**	**P**	**V**
a. non isolé Comportement thermique de l'interface surélévation/existant rénové								
interface non traitée			interface non traitée		interface non traitée		interface non traitée	
b. ITE verticale Comportement thermique de l'interface surélévation/existant rénové								
+++			+++		+++		+++	
c. ITI verticale Comportement thermique de l'interface surélévation/existant rénové								
++			++		++		++	
d. ITI horizontale (côté surélévation) 5 Comportement thermique de l'interface surélévation/existant rénové								
interface non traitée			interface non traitée		interface non traitée		interface non traitée	
e. ITI horizontale (côté existant) 6 Comportement thermique de l'interface surélévation/existant rénové								
+			+		+		+	

Tableau 2_ Matrice d'analyse de la performance thermique en ITE

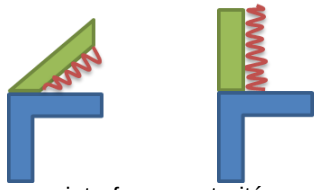
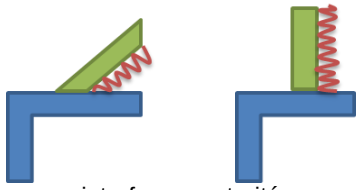
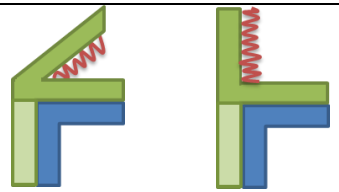
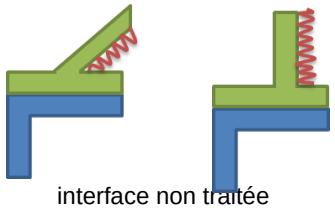
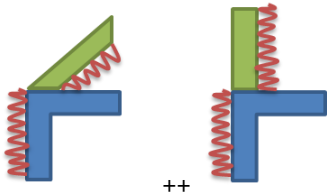
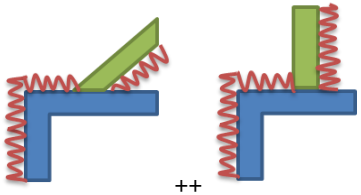
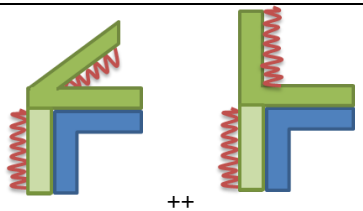
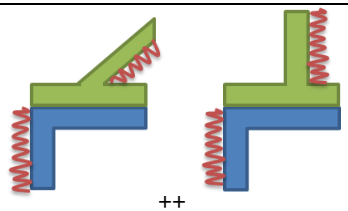
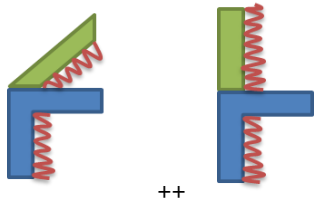
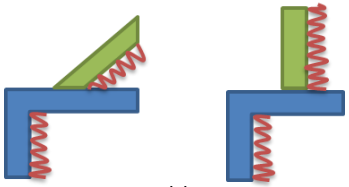
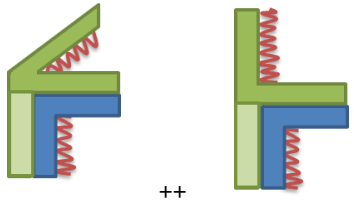
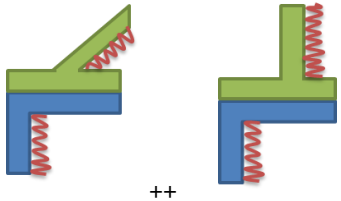
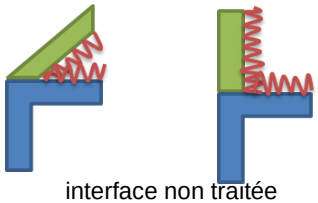
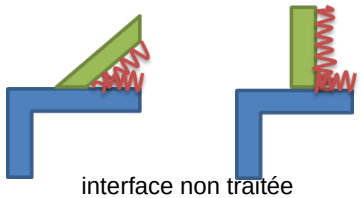
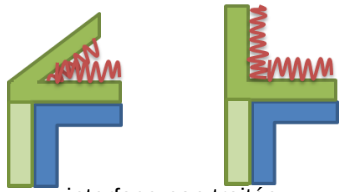
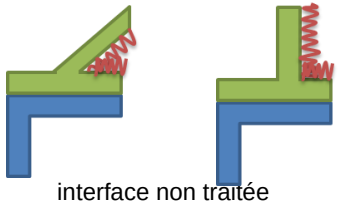
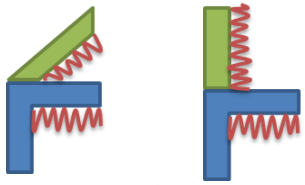
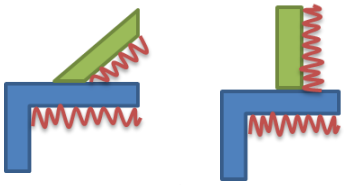
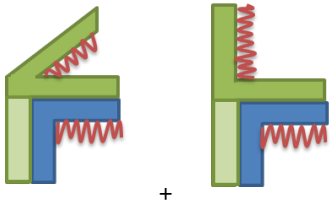
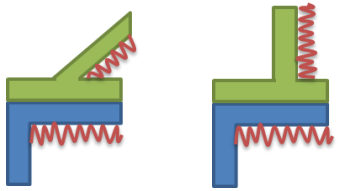
Nature des travaux sur le bâtiment existant	**1.** Alignement vertical au nu de l'existant – Appui direct sur l'existant		**2.** Retrait par rapport à l'existant – Appui direct sur l'existant		**3.** Alignement vertical au nu de l'existant – Reprise de charges par portique		**4** Retrait par rapport à l'existant – Reprise de charges par podium	
N° commentaire	**P**	**V**	**P**	**V**	**P**	**V**	**P**	**V**
f. non isolé Comportement thermique de l'interface surélévation/existant rénové								
	interface non traitée		interface non traitée		interface non traitée		interface non traitée	
g. ITE verticale Comportement thermique de l'interface surélévation/existant rénové								
	++		++		++		++	
h. ITI verticale Comportement thermique de l'interface surélévation/existant rénové								
	++		++		++		++	
i. ITI horizontale (côté surélévation) 5 Comportement thermique de l'interface surélévation/existant rénové								
	interface non traitée		interface non traitée		interface non traitée		interface non traitée	
j. ITI horizontale (côté existant) 6 Comportement thermique de l'interface surélévation/existant rénové								
	+		+		+		+	

Tableau 3 _ Matrice d'analyse de la performance thermique en ITI

2.2. Choix du système constructif

2.2.1. Présentation des fiches composants

Dans la démarche Lign2Toit, le choix des procédés constructifs pour la réalisation de la surélévation se fait en fonction de plusieurs critères :

- le poids de surélévation potentiel
- le poids cumulé des différents composants sélectionnés
- leurs modes d'assemblage avec l'existant
- les contraintes de chantier (levage, site occupé,...)

Afin de proposer des solutions constructives de surélévation, un premier catalogue de solutions industrialisées (étendu bien que non exhaustif) a été établi. La connaissance de la typologie du bâtiment existant permet de déterminer les exigences sur la portée minimale, le poids maximal du système de surélévation issu du diagnostic structurel présenté précédemment ainsi que les contraintes éventuelles concernant l'accès au chantier (dimensions des éléments, levage,…).

A partir de ces informations et afin de déterminer le poids de la surélévation, une sélection sera faite dans le catalogue de fiche (annexe du rapport tâche 1) afin de composer une solution globale multi-matériaux pour le clos-couvert à partir d'éléments de structure et d'enveloppe compatibles
Les composants illustrés sur les fiches présentées permettent de remplir une ou plusieurs fonctionnalités nécessaires à la surélévation envisagée :

- le plancher
- la structure
- la façade
- la couverture

La démarche proposée est de composer une solution constructive, à l'image d'un bouquet, formée d'un ou plusieurs des composants présentés sur les fiches.

Le poids ainsi obtenu (somme des poids des composants) sera à comparer au poids de surélévation potentiel estimé en tâche 1.

Une fiche descriptive est complétée pour chacun des systèmes ou produits inscrits au catalogue.
Chaque fiche du catalogue comprend des informations sur la composition du système traité, le principal matériau constitutif (bois, béton, acier, terre cuite, autres) et les dimensions et portées courantes.
Le mode de validité sur le marché français est mentionné pour justifier de la reconnaissance technique des produits et systèmes (cf rapport tâche 3).

Pour chaque système référencé, une évaluation du degré de préfabrication (de 1 à 5) est mentionnée en prenant en compte le rapport entre le temps de fabrication en atelier et le temps de mise en œuvre sur chantier ainsi que le rôle du système dans la fonction à remplir:

1 les éléments (1D) sont tous assemblés sur site
2 les éléments (1D) sont pré-assemblés ou les composants (2D) doivent être associés sur site à d'autres pour remplir la fonction
3 ensemble d'éléments (1D) remplissant l'une des fonctions ou panneaux 2D partiellement équipés ou mono-fonction

4 Les panneaux 2D totalement équipés qui remplissent à eux seuls leur fonction ou module 3D partiellement équipé

5 Le module 3D pré équipé est déposé et fixé sur l'ouvrage existant

Lorsque l'élément ne permet pas à lui seul de remplir la fonction, la liste des éléments complémentaires nécessaires guidera l'utilisateur dans la composition du module global.

Une indication quant au type de levage (manuportable, engin léger, grue – cf rapport tâche 3) est donnée car cela peut avoir une influence sur le choix des solutions ou la gestion de chantier.

La figure 3 illustre le modèle des fiches qui composeront le catalogue des systèmes industrialisés.

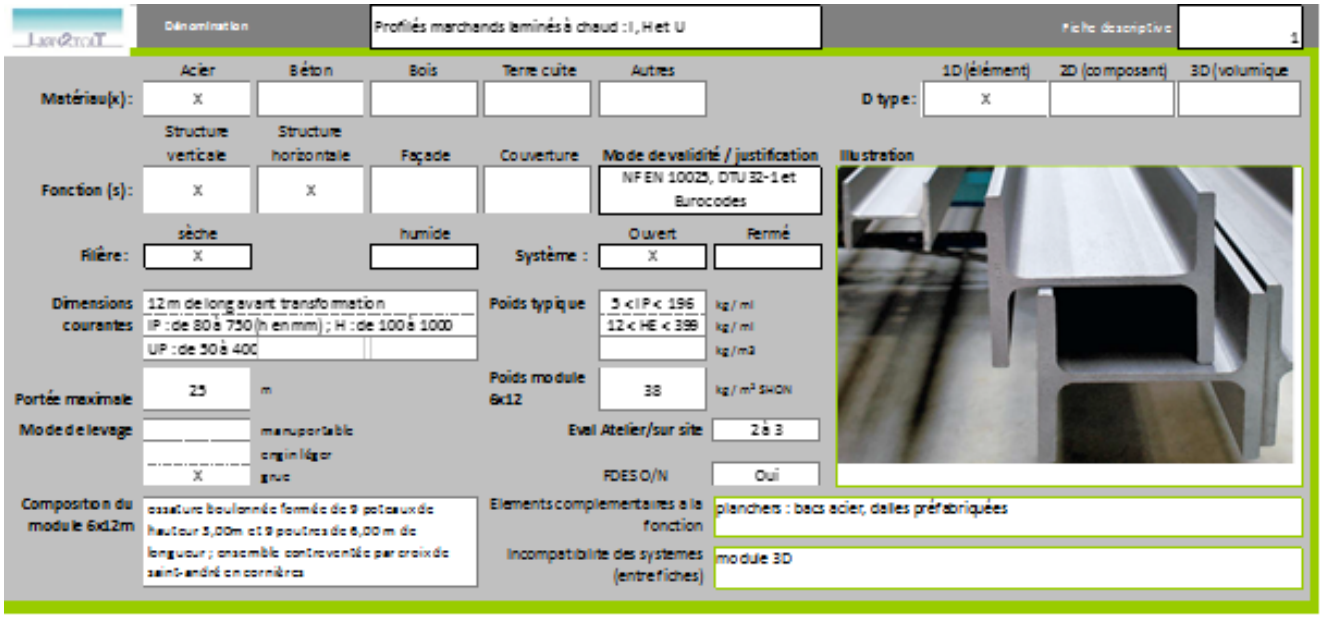


Figure 3 _ Fiche type

Afin de pouvoir comparer et combiner les systèmes, qu'ils soient linéaires, surfaciques ou volumiques, en fonction de leur poids, un gabarit de référence a été défini. Il s'agit d'un module de 6 x 12 x 3m de hauteur dont la composition est décrite pour chaque système faisant l'objet d'une fiche. A l'aide de cette surface type de 72 m², nous obtiendrons un poids surfacique équivalent (ensuite ramené à 1 m² de surface de plancher) pour permettre la comparaison et l'association des différents systèmes.

2.2.2. Systèmes constructifs industrialisés recensés: avantages et inconvénients

La première étape pour établir le catalogue a été de recenser les systèmes constructifs industrialisés existants en France et éventuellement à l'étranger et de les classer en fonction de leur volumétrie : linéaire, surfacique, volumique. En première approche, une liste des points forts et faibles concernant en particulier, le poids, la facilité de mise en œuvre, les performances mécaniques et la réponse aux exigences réglementaires a été faite pour chaque système.

Ces éléments présentés dans le tableau ci-dessous seront précisés dans la fiche descriptive par des données chiffrées et la composition des parois.

N° fiche	Dénomination	Type D	Points forts	Points faibles
1	Profilés laminés à chaud (poutrelles, cornières,…)	1D	capacité de charges et portée, légèreté de l'ossature, filière sèche, rapidité de montage, industrialisation forte	rigueur du dimensionnement, disposition du contreventement, découpes/perçages/cintrages, masse des éléments, conductivité thermique, anticorrosion si exposé
2	Brique creuse TC	1D	Manuportable, adaptable à toutes les formes, tolérances des dimensions, capacité de charge, Enveloppe et structure, performances thermiques, acoustiques, réaction et résistance au feu, sain, durable et entretien/maintenance	Masse surfacique, vitesse de mise en œuvre, soumis aux intempéries
3	Blocs courants	1D	Simple mise en œuvre bonne résistance à la compression	La masse nécessite dans certains cas un isolant rapporté et un enduit extérieur
4	Blocs en béton léger	1D	Léger, bon rendement thermique	Pose à joint mince
5	Tubes creux laminés (carrés ou ronds)	1D		Rigueur du dimensionnement, risque de déformations locales, modes d'assemblage
6	Poutres bois (lamellé-collé, massif, BMR…)	1D	Manuportable, adaptable à toutes les formes	Beaucoup de main d'œuvre sur chantier
7	Couverture Tuiles Terre Cuite	1D	Rapidité de montage, durable et entretien/maintenance	Rigueur du dimensionnement
8	Couverture Tuiles Béton	1D	Rapidité montage	Rigueur dimensionnement
9	Bardage Tuiles TC	1D	Rapidité de montage, durable et entretien/maintenance, (démontable)	Exposition aux chocs
10	Bardage béton	1D	Esthétiques, différentes dimensions, tenue dans le temps	
11	Panneaux de façade	2D	Délais de mise en œuvre esthétisme	Mise en œuvre soignée (joint)
12	bardage bois	2D	Légèreté, choix de couleurs/poses/profils	pose sur chantier, entretien, limité par PLU, euroclasse insuffisante pour certains projets

13	Bardage TC (éléments posés sur ossature métallique)	1D/ 2D	Rapidité de montage, durable et entretien/maintenance	Exposition aux chocs
14	Vêtures TC (plaquettes TC sur ETICS)	1D/ 2D	Panneaux préfabriqués ou mise en œuvre sur site, rapidité du chantier	Système sous avis technique,
15	Panneau ouvert d'ossature en acier composé de profils minces	2D	Légèreté des éléments, filière sèche, tolérances et précision des dimensions, transport et manutention	Densité de la trame, vitesse de mise en œuvre, disposition du contreventement entretien / maintenance
16	Mur en briques	2D	Préfabrication, rapidité de montage, Enveloppe et structure, performances thermiques, acoustiques, réaction et résistance au feu, sain, durable et entretien/maintenance	Masse surfacique, Engin de levage, rigueur du dimensionnement
17	Murs coffrage intégré	2D	Mise en place possible dans un espace réduit permet de réaliser des murs de grandes dimensions	Utilisation d'outils spécifiques pour le levage
18	Bac collaborant/coffrage perdu	2D	Diversité des profils, Tolérances et précision des dimensions, fabrication industrielle, flexibilité des formes	Filière humide, mise en sécurité chantier
19	voir 22			
20	Bardage acier			
21	Plateaux Acier (éléments minces type bardage pour parement intérieur d'une paroi)	2D	Légèreté des éléments, filière sèche, Tolérances et précision des dimensions, diversité des fabricants industriels	A associer à d'autres matériaux nécessité de traiter les ponts thermiques
19/22	Panneau contrecollé (CLT) horizontal ou vertical	2D	Performances mécaniques (reprise de charge, porte-à-faux,…), filière sèche, peut rester apparent en intérieur	Masse, prix plus élevé pour des projets simples
23	Panneaux sandwiches de bardage	2D	Filière sèche, tolérances et précision des dimensions, Diversité des fabricants industriels,	Feu selon nature de l'isolant, Difficile à couper sur site, traitement des raccords, Accessoires indispensables

			Thermique (selon nature de l'isolant)	
24	Panneaux sandwiches de couverture	2D	Filière sèche, Tolérances et précision des dimensions, Diversité des fabricants industriels, Thermique (selon nature de l'isolant)	Feu selon nature isolant, Difficile à couper sur site, traitement des raccords, Accessoires indispensables
25/26	Panneau ossature bois (avec/sans isolant, avec/sans revêtement)	2D	Peut embarquer isolant et revêtements, filière sèche, rapidité du chantier	Levage avec engin
27	Charpente industrielle bois	3D/ 2D	Industrialisation forte, prix, répartition des charges	L'aménagement des combles n'est possible que s'il est anticipé
28	Module 3D à ossature Acier	3D	Légèreté des modules, diversité des fabricants industriels	Mixité matériaux requise, adaptation des dimensions, gestion du confort
29	Module tridimensionnel bois	3D	Préfabrication forte, filière sèche	Manque d'adaptation aux défauts de l'existant
30	Plancher poutrelles entrevous	2D	Léger mise en œuvre	

Reconnaissance de la toiture existante

Avec une structure existante en toiture-terrasse, la surélévation est « simplement » posée sur l'ouvrage.

En présence de combles, l'opération peut relever d'un simple changement de pente ou rehaussement partiel des murs et de la toiture ou concerner l'ajout véritable d'un ou plusieurs niveaux : plusieurs moyens existent pour parvenir à satisfaire ces objectifs (cf Figure 4).

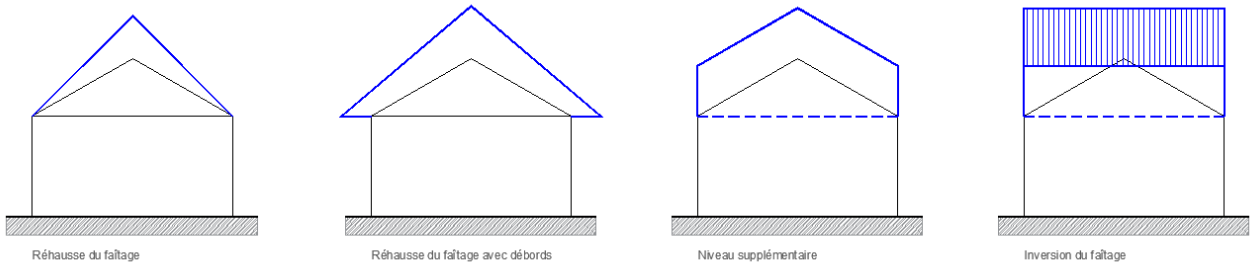


Figure 4 _ Exemples de cas représentatifs d'une surélévation avec ou sans création de niveaux supplémentaires

2.3. Principes pour l'étude de la structure rapportée

Lors de la conception d'une extension sur une construction existante, il est important d'avoir une bonne compréhension du mode avec lequel la structure fait face aux déplacements et sollicitations.

La configuration spatiale de la structure du bâtiment existant est aussi déterminante puisqu'elle transmettra les efforts à l'aide d'éléments linéaires (murs en maçonnerie par exemple) ou au travers d'appuis ponctuels (ossature poteaux-poutres). Le dispositif constructif utilisé pour les parties porteuses va conditionner directement les moyens de connexion et les détails techniques associés pour accueillir la structure de la surélévation.

La liaison entre la structure existante et la nouvelle construction peut être ponctuelle (poteau), linéaire (mur ou voile) ou même s'effectuer au travers d'un ensemble destiné au transfert des charges entre les deux parties de l'ouvrage (podium par exemple). Mécaniquement, selon que la liaison sera articulée ou encastrée, la conception des assemblages doit s'adapter pour garantir le bon comportement des matériaux et la diffusion optimisée des efforts.

Trois types de charges peuvent s'appliquer sur une liaison :

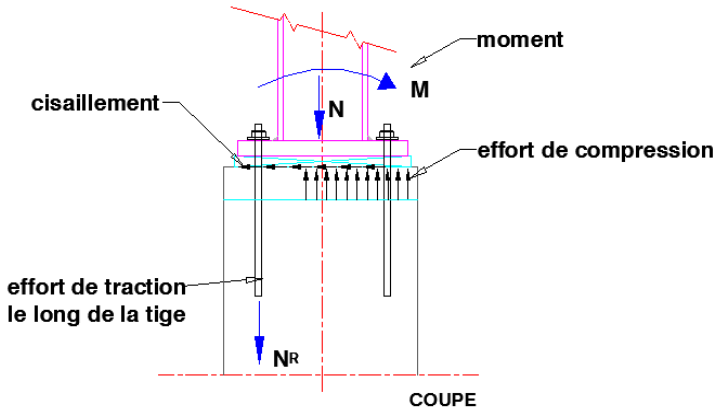


Figure 5 _ Diagramme des charges pour une jonction articulée et soumise à une compression axiale et à un moment

En fonction de la configuration du bâtiment existant, le poteau peut induire différents types d'équilibre des charges. Les situations d'implantation courantes sont décrites ci-après :

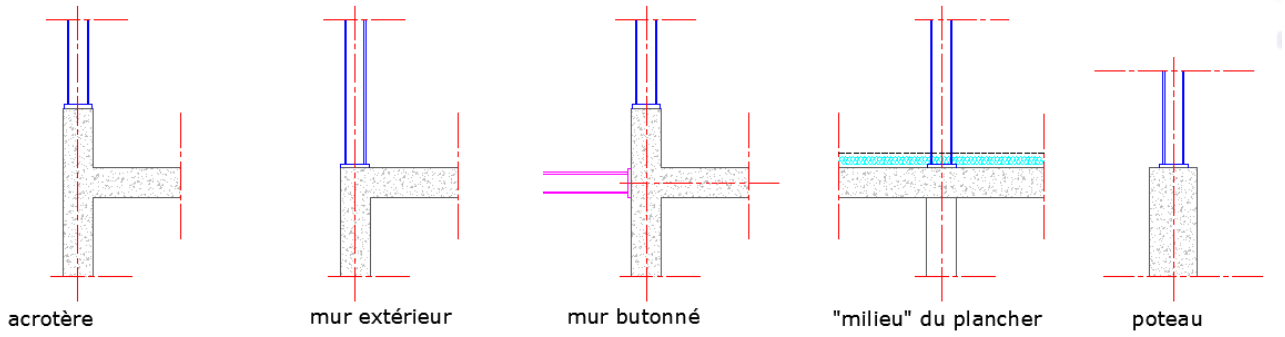


Figure 6 _ Situations courantes pour les liaisons structurelles

Le rapport tâche 2 Lign2toit présente des informations précieuses pour la conception des interfaces structurelles entre l'existant et la surélévation.

2.4. Exemples de réalisations

Quatorze projets de surélévation représentatifs du périmètre de l'étude Lign2toit (bâtiments tertiaires ou résidentiels, interventions lourdes ou limitées, avec ou sans réhabilitation de l'existant, différents matériaux, France entière) ont fait l'objet de fiches projet.

Figure 7 _ Aperçu d'ensemble des projets faisant l'objet d'une fiche

Ces retours d'expérience permettent d'illustrer les différents axes de travail présentés dans le présent rapport. En effet, les fiches présentent notamment les contraintes des projets, que ce soit au niveau de la structure existante ou du chantier, les caractéristiques des ouvrages après interventions ainsi que les systèmes constructifs mis en œuvre et leur niveau de préfabrication.
Ces fiches disponibles en annexe concernent les projets suivants :

- Hôtel Ibis de Nemours
- Foyer de migrants de la Rue Tolbiac (Paris)
- Création de 6 logements Rue des Amandiers (Paris)
- Le centre de secours du Vésinet
- L'ancien centre de tri postal « la Nef » (Tours)
- L'université de Créteil
- Le môle Seegmuller (Strasbourg)
- Surélévation à Colombes

- Surélévation en région toulousaine
- Changement de pente de toiture à Saint-Malo
- Surélévation avec réutilisation de la charpente (Isère)
- Création d'un duplex à Suresnes
- Surélévation par portiques à Boulogne
- Surélévation sur 3 niveaux Rue du Tage (Paris)

3. Outil d'évaluation économique

Une fois la capacité portante évaluée, il convient à l'occasion d'un projet de surélévation de pouvoir estimer les coûts à engager et les valorisations économiques potentiellement attendues pour s'assurer de la pertinence du projet visé.
Pour mener à bien une première estimation économique, il est nécessaire de prendre en compte plusieurs paramètres :

- les coûts relevant du domaine de la construction : démolition, construction neuve ou en réhabilitation, photovoltaïque,
- la valeur à la vente des biens immobiliers selon leur destination et leur localisation géographique,
- les surfaces à créer,
- les frais liés à l'exploitation énergétique au cours de la vie de l'ouvrage qui dépendent du type d'énergie.

La démarche proposée par Lign2Toit est de composer la première version d'une méthode d'évaluation économique à partir de ces diverses données.

Les notions économiques sont toujours délicates à aborder dans le domaine de la construction. C'est particulièrement vrai lorsqu'il s'agit de travaux sur un bâti existant placé en cœur de ville : l'état de conservation de l'ouvrage en place, les conditions de l'opération sont autant de facteurs complexes qui influent souvent énormément sur les coûts opérationnels de démolition et de construction. Cependant, il est possible de déterminer quelques ratios de prix de construction selon qu'il s'agit de construction neuve, de réhabilitation ou encore de démolition.
Les éléments économiques disponibles et recueillies au cours des dernières années ont également permis d'établir un prix « moyen » de rénovation énergétique de l'enveloppe d'un bâtiment, en ne retenant qu'un renforcement de l'isolation thermique et le changement des menuiseries extérieures.

Le deuxième groupe de données recensées porte sur la consommation moyenne en kWh par m² et par an établis selon la période de construction de l'édifice. Pour une application au logement, sont ainsi distinguées les typologies suivantes :

- le bâtiment existant (250 kWh/m².an),
- le bâtiment ayant subi une rénovation énergétique (150 kWh/m².an),
- le bâtiment neuf conforme à la RT en vigueur (50 kWh/m².an)
- et le bâtiment bénéficiant d'un apport d'énergies renouvelables (25 kWh/m².an)

A ces ratios de consommation énergétique ont été associés les montants hors taxes du kilowatt heure tels que facturés à ce jour par les fournisseurs d'énergie gaz ou électricité.

Par ailleurs, il existe de nombreuses sources indiquant des valeurs de biens immobiliers rapportés au mètre carré. Pour le logement, les informations fournies portent sur le prix de vente des ouvrages neufs ou anciens ; pour les bureaux, le prix indiqué est plus souvent affecté à la location du mètre carré à l'année. Toutes ces données sont bien sûr localisées sur le territoire français et très généralement traitent des grandes métropoles.

Le projet Lign2Toit a décidé de retenir pour sa démarche les valeurs relatives à Paris, à l'Ile-de-France et à la ville de Bordeaux, proposées par les études sectorielles et périodiquement actualisées d'un grand professionnel du secteur de l'immobilier : CBRE.

Résidentiel	**VENTES : appartement & maison**	
moyennes territoriales	Neuf / Rénové	Etat d'usage
Bordeaux	3 420,00 €	3 100,00 €
Paris	10 544,00 €	8 020,00 €
Ile de France	4 744,00 €	4 300,00 €
		2 940,00 €
France (moyenne)	3 887,00 €	

CBRE residential market view_janv. 2016

Tableau 4 _Prix de ventes

Bureaux - € HT HC/m².an	Neuf / Rénové	Etat d'usage
Bordeaux	155,00 €	120,00 €
Paris Centre Ouest	555,00 €	414,00 €
Croissant Ouest	288,00 €	213,00 €
La Défense	435,00 €	330,00 €
Paris Nord Est	337,00 €	256,00 €
Paris Sud	434,00 €	342,00 €
1e couronne	230,00 €	149,00 €
2e couronne	157,00 €	109,00 €
Moyenne IdF	299,00 €	219,00 €

CBRE etudes et recherche_1T 2016
CBRE France office_2015

Tableau 5 _Prix locatif au m²

Enfin, à ces ratios « généralistes », il faut ajouter les données spécifiques au projet visé : surface de plancher et de façade de l'existant, surface envisagée pour la surélévation, voire pour l'installation de panneaux photovoltaïques. La durée d'exploitation projetée est aussi un élément déterminant pour la prise en compte des dépenses énergétiques en phase d'exploitation et pour le calcul du retour sur investissement.

L'ensemble des données réunies dans le tableau ci-dessous permettent ensuite de conduire une série de calculs fondés sur les scénarios utilisés pour l'évaluation des performances énergétiques présentés au chapitre 4 :

- scénario 1 : bâtiment existant non rénové (utilisé comme référence),
- scénario 2 : bâtiment existant rénové énergétiquement
- scénario 3 : surélévation seule, sans rénovation énergétique,
- scénario 4 : surélévation avec rénovation énergétique du bâti existant,
- scénario 5 : mise en place de panneaux photovoltaïques en plus du scénario 4

Ici, ces cinq scénarios ont été mis en perspective avec l'hypothèse d'une démolition intégrale de l'existant, suivie d'une reconstruction neuve incorporant les surfaces prévues pour la surélévation.

Approche économique comparative présentation des principes

HYPOTHESES ECO						
Prix (€/m² SDP)	construction neuve :	1 500,00 €	Construc. sur ancien :	2 500,00 €	coût photovoltaïque :	
	Démolition totale :	780,00 €	Rénov."RT" enveloppe :	375,00 €	Valorisation Rénovation	1,20
Cons. énergie - kWh/m².an	existant :	250	neuf "RT" :	50	Type énergie :	Gaz
	moy. Après rénov :	150	avec "gain" PV :	25	Prix € HT kWh :	0,038 €

PROJET						
Localisation :	Paris		Usage :	Résidentiel	Durée d'exploitation (an)	N
prix neuf (€/m²) :	10 500,00 €	prix ancien (€/m²) :	8 020,00 €			
bât.existant (R+4)	Nb niveaux existant :	n	Surface existante (m²)	X	surf. façades existant :	W
R+6, soit 2 niv.supp	Surface créée (m²) :	Y	Surface PV créée	Z		#N/A

SCENARIOS		DEMOLITION	CONSTRUCTION	EXPLOITATION N ans	BILAN Coûts Fin de vie	Total coûts sur N ans/m²	VALEUR PATRIMONIALE
SCEN 1	existant non rénové			250 kWh/m².an * X * N	total ligne SCEN1		X * "ancien"en ligne E13
	Démolition Tot + Neuf	X * "démolition" (D6)	(X+Y) * "Neuf" (D5)	50 kWh/m².an * (X+Y) * N			(X+Y) * neuf C13
SCEN 2	Existant rénové	cf.légende (1)	W * "rénov RT (F6)	150 kWh/m².an * X * N	total ligne SCEN2	total dépenses /surf	X * ancien E13 *coeff.H6
SCEN 3	Surélévation seule	cf. légende (1)	Y * "sur ancien (F5)	(250 * X + 50 *Y) * N	total ligne SCEN3		X* ancien E13 + Y* NeufC13
SCEN 4	Surélévation + réno energ	=démol SCEN2 + SCEN3	W*(F6) + Y*(F5)	(150 * X + 50 * Y) * N	total ligne SCEN4		X*anc.E13 *H6 + Y*neuf C13
SCEN 5	Surélev + Réno + PV	=démol SCEN2 + SCEN3	W*(F6) + Y*(F5) + Z*(H5)	(150 * X + 25 * Y) * N	total ligne SCEN5		X*anc.L13 *H6 + Y*neuf L13 + Z

(1) Démolitions partielles
50 à 150 € / fenêtre
60 kg/m² de toiture

(2) hyp. Énergétiques

	Coût annuel exploitation	Temps de retour (année) Exploitation	Temps de retour (année) Exploitation + Patrimoine
SCEN 1	250 kWh/m².an * X	scénario de référence	scénario de référence
	50 kWh/m².an * (X+Y)	somme des différences des	somme des (différences des
SCEN 2	150 kWh/m².an * X	montants de démolition et	montants de démolition et
SCEN 3	(250 * X + 50 *Y)	et de construction	de construction + patrimoine)
SCEN 4	(150 * X + 50 * Y)	divisée par	divisée par
SCEN 5	(150 * X + 25 * Y)	diff coûts exploitation	diff coûts exploitation

** données à renseigner*

** résultats obtenus*

Pour le scénario 1, aucune forme de travaux n'entre en jeu ; seules les dépenses d'exploitation énergétique sont comptabilisées. La valeur patrimoniale est calculée en fonction de la valeur connue à ce jour.

Pour le scénario 2, le bâtiment subit quelques déposes (menuiseries) et des travaux de renfort d'isolation. A ces montants s'ajoutent les frais de consommation d'énergie pour un bâtiment rénové. Sa valeur patrimoniale est améliorée selon un coefficient placé dans le tableau.

Pour le scénario 3, il n'y a que la démolition de la couverture, ce qui permet d'accueillir la surélévation. La partie existante a une consommation équivalente à celle du scénario 1, alors que la surélévation est conforme à la RT des ouvrages neufs. De même, la valeur patrimoniale considère chacune des deux parties de l'ouvrage fini.

Pour le scénario 4, on retrouve les données du scénario 2 pour l'existant et celles propres à la surélévation. Les consommations énergétiques et leurs coûts sont déterminés sur cette même base de répartition.

Enfin, le scénario 5 est proche du scénario 4 avec la prise en compte des montants liés aux panneaux photovoltaïques : dépenses de mise en place et apports d'énergie réduisant la consommation d'énergie finale.

A partir de l'ensemble de ces informations, il est possible alors de fournir le total des frais engagés sur toute la durée d'exploitation fixée, les coûts énergétiques annuels et par extension d'estimer le nombre d'années avant un possible retour sur investissement des sommes investies en travaux. Ce dernier calcul est mené avec d'une part les seuls coûts énergétiques et d'autre part avec la prise en compte de la valeur patrimoniale complète.

Pour tester la pertinence de la méthode proposée, une évaluation est conduite sur le bâtiment de Chelles, utilisé comme cas d'étude pour les études énergétiques et environnementales. Les résultats sont montrés dans le tableau suivant :

Approche économique comparative — exemple d'application n°1 : Chelles

HYPOTHESES ECO

Prix (€ HT/m² SDP)	construction neuve :	1 500,00 €	Construction sur ancien :	2 500,00 €	coût photovoltaïque :	2 307,69 €
	Démolition totale :	670,00 €	Rénov."RT" enveloppe :	375,00 €	Valorisation Rénovation	1,20
Cons. énergie - kWh/m²SRT.an	existant :	250	neuf "RT" :	50	Type énergie :	Electricité
	moy. Après rénov :	150	avec "gain" PV :	25	Prix € HT kWh :	0,093 €

PROJET

Localisation :	IdF	Usage :	Résidentiel		Durée d'exploitation (an)	30
neuf	4 800,00 €	ancien	4 300,00 €			
bât. existant (R+?) :	Nb niveaux existant :	5	Surface existante (m²)	1500,00	surf. façades existant :	1080,00
surélévation projetée :	nb niveaux créés :	1	Surface créée (m²) :	300,00	Surface PV créée	300,00

SCENARIOS		DEMOLITION	CONSTRUCTION	EXPLOITATION N ans	TOTAL Coûts Fin de vie	Total coûts sur N ans/m²	VALEUR PATRIMONIALE
SCEN 1	existant non rénové	-	-	421 875,00 €	421 875,00 €	281,25 €	6 450 000,00 €
	Démolition Tot + Neuf	1 005 000,00 €	2 700 000,00 €	101 250,00 €	3 806 250,00 €	2 114,58 €	8 640 000,00 €
SCEN 2	Existant rénové	49 000,00 €	405 000,00 €	253 125,00 €	707 125,00 €	471,42 €	7 740 000,00 €
SCEN 3	Surélévation seule	201 000,00 €	750 000,00 €	438 750,00 €	1 389 750,00 €	772,08 €	8 490 000,00 €
SCEN 4	Surélévation + réno energ	250 000,00 €	1 155 000,00 €	270 000,00 €	1 675 000,00 €	930,56 €	9 180 000,00 €
SCEN 5	Surélev + Réno + PV	250 000,00 €	1 847 307,69 €	261 562,50 €	2 358 870,19 €	1 310,48 €	9 872 307,69 €

(1) Démolitions partielles

50 à 150 € /fenêtre
60 kg/m² de toiture

(2) hyp. Énergétiques

	Coût annuel exploitation	Temps de retour (année) Exploitation	Temps de retour (année) Exploitation + Patrimoine
SCEN 1	14 062,50 €	*scénario de référence*	*scénario de référence*
	3 375,00 €	347	142
SCEN 2	8 437,50 €	81	-149
SCEN 3	14 625,00 €	sans retour sur la durée	sans retour sur la durée
SCEN 4	9 000,00 €	278	-262
SCEN 5	8 718,75 €	392	-248

** données à renseigner*

** résultats obtenus*

Dans cet exemple d'application, on constate que les coûts alloués à l'exploitation énergétique annuelle ont fortement baissés lorsqu'une intervention d'amélioration énergétique a eu lieu. A l'inverse, la valeur patrimoniale s'élève significativement dès lors que des travaux sont entrepris et les montants obtenus couvrent assez nettement les dépenses engagées.

Ainsi, l'évaluation du retour sur investissement montre ici que les seuls gains énergétiques ne permettent pas d'amortir les coûts de travaux, mais aussi que la prise en compte de l'intégralité de la valeur patrimoniale écrase aussitôt le montant des frais.
L'étude des performances énergétiques permettra de conforter ou d'enrichir les observations de cette approche économique

La méthode à ce stade est intéressante, malgré ses faiblesses. Il conviendrait certainement d'approfondir cet aspect en considérant notamment un principe d'actualisation dans le temps ou encore la valeur du droit à construire sur le dernier niveau cédé par une copropriété.

4. Evaluation énergétique et environnementale[7]

Comme énoncé en introduction, les considérations de performance énergétique, économique et environnementale, la surélévation présente une réelle solution pour réévaluer le parc immobilier français. Les extensions verticales libèrent un gisement considérable pour optimiser la densité urbaine et en même temps « *embarquer la rénovation énergétique* » ! Cette réelle opportunité permet ainsi de créer une ressource opportune pour le bâtiment concerné. Ainsi la rénovation énergétique globale du bâtiment initial se positionne comme un passage obligé. Ceci permettra de baisser les charges des ménages et réussir à atteindre les

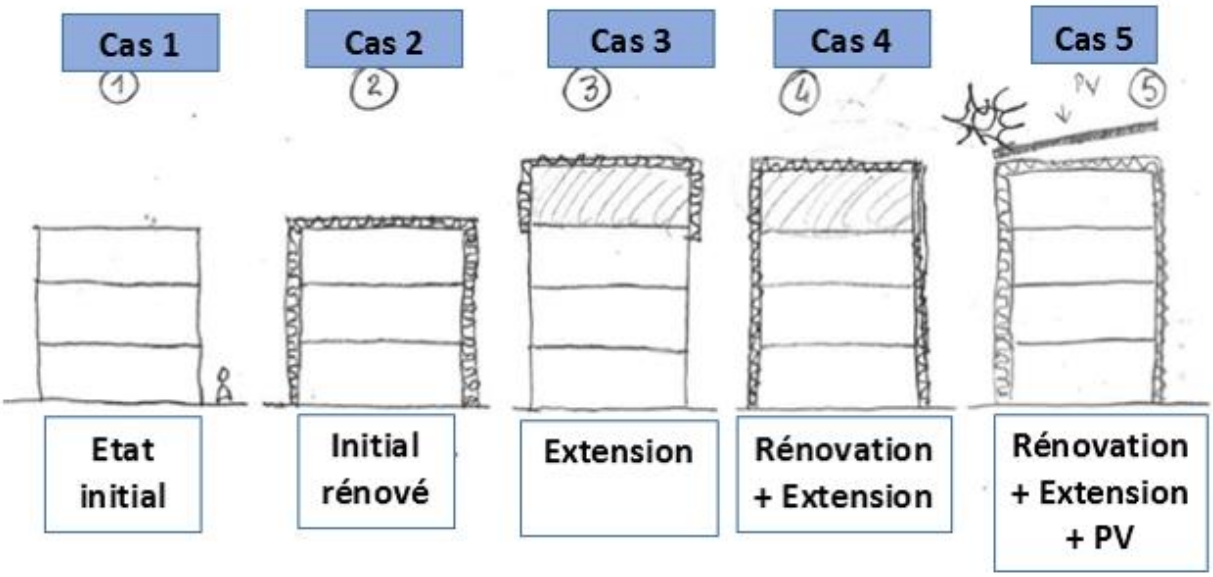
[7] Voir rapport de tâche 4 pour plus de détails

objectifs fixés par l'état dans le cadre de la transition énergétique, soit réduction de la consommation énergétique finale de 50% en 2050 par rapport à 2012 et de 40% les émissions de gaz à effet de serre en 2030 par rapport à 1990.

4.1. Démarche

Cette partie de l'approche globale proposée par Lign2Toit comporte une démarche d'évaluation des performances énergétiques et une appréciation des impacts environnementaux.
Pour effectuer une évaluation énergétique, la démarche proposée par Lign2Toit repose sur une présentation comparée de 5 scénarii appliqués à un cas d'étude :

- Scénario 1 : Bâtiment initial non rénové
- Scénario 2 : Bâtiment initial rénové
- Scénario 3 : Bâtiment initial non rénové + extension
- Scénario 4 : Bâtiment initial rénové + extension
- Scénario 5 : Bâtiment initial rénové + extension + panneaux photovoltaïques



Domaine étudié

Afin de compléter la démarche, des études comparatives portent sur la performance énergétique et les impacts environnementaux.

Les simulations énergétiques et environnementales sont fondées sur deux typologies spécifiques, bâtiment ancien (faubourien) et bâtiment récent (cf. ci-dessous).

Dates de construction	Typologie 1 (<1948)	Typologie 2 (entre 1948 et 1974)
Type	Petit Collectif	Grand Collectif
Nom Opération	Affre	Grande Prairie A
Année	1880	1960
Nbre de logements	9	68
SHON	609,6	5254
nbre d'étages	7	5
taux de vitrage (SV/Mext)	32%	32%
Aperçu (coté rue)		
Energie chauffage	Elec ou Gaz collectif	Elec & Gaz (48-74)
plancher	métallique IAO	Béton non isolé
murs (isolant, ép)	pierre (rue)/brique (cour)	Béton non isolé
baies vitrées	Simple vitrage	Simple Vitrage
toiture	combles perdus	toiture terrasse
ventilation	ventilation naturelle	Ventilation naturelle

Tableau 6 _ Présentation des deux cas d'étude

4.2. Evaluations énergétiques

Les investigations portent sur **3 zones climatiques** de la métropole soit ; H1a (région parisienne), H2b (région angevine) et H3 (région marseillaise).

Important : Il importe de souligner les aspects méthodologiques particuliers au sujet des extensions. En effet, le bâtiment existant est approché via les Règles Th Ex relatives aux bâtiments existants. Selon la situation, l'extension peut être calculée via les règles de la construction neuve, Règles BCE2012. *In fine*, l'évolution de la règlementation thermique des bâtiments existants va permettre d'uniformiser les approches et aboutir vers une méthode commune.

Prestations d'améliorations énergétiques

Nous précisions ci-après les choix pris pour les évaluations des performances énergétiques et environnementales après travaux de rénovation.

Isolation thermique des murs extérieurs :

- Avant 1948 (typologie 1) : ITI des façades côté rue / ITE des façades côté cour
- Après 1948 (typologie 2) : ITE sur toutes les façades

Performance prestations isolation bâti :
Source : niveau de rénovation « NFI », Nouvelle France Industrielle (cf. rapport)

Equipements chauffage et ECS, ventilation

- Energie Gaz : chaudière à condensation, radiateurs robinets thermostatiques, pompes à débit variable.
- Energie Électricité : convecteur avec contrôle d'ambiance, ballon électrique
- Ventilation mécanique basse pression, hygro-réglable.

Définitions des extensions

Deux configurations d'extensions sont prévues en fonction du mode constructif et du nombre de niveaux :

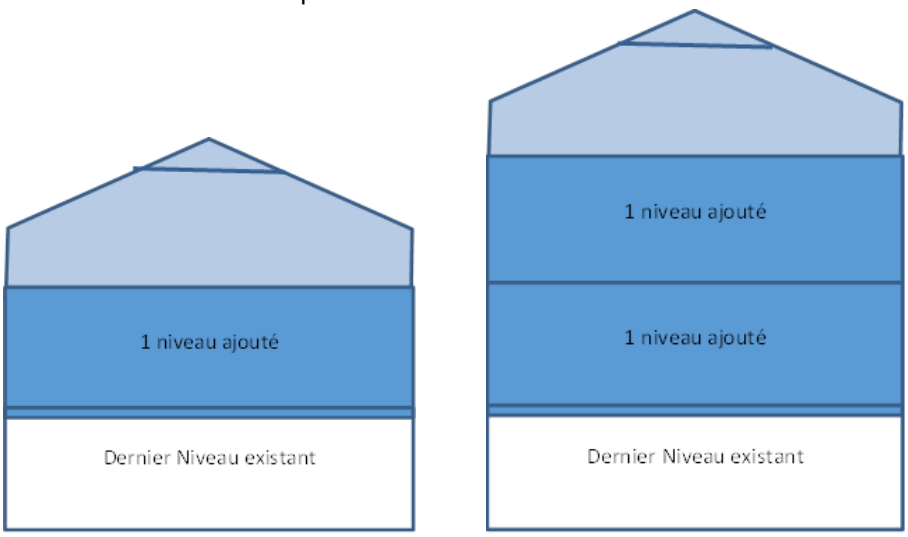


Figure 7_ Deux configurations de surélévation

Association de modes constructifs des cas étudiés

- Façade en briques isolantes
- Charpente en bois

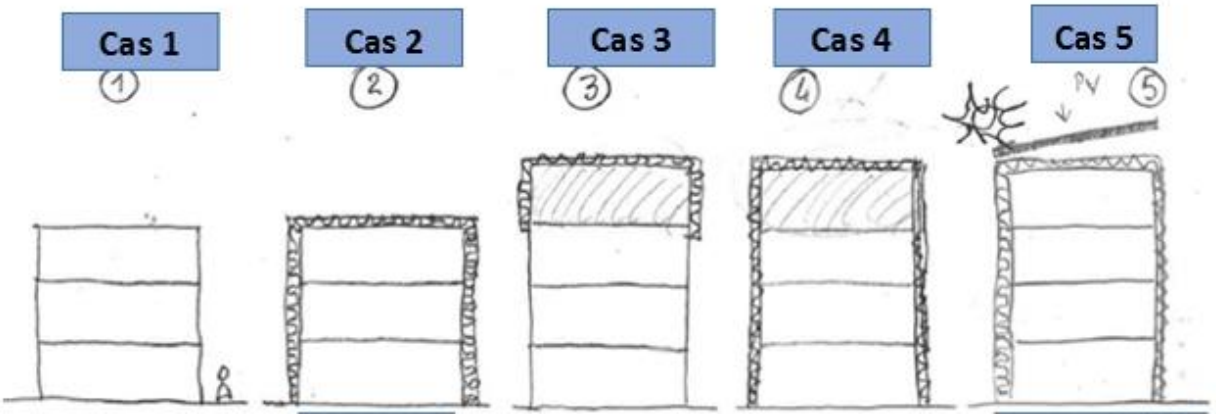
→ R + 1 + Combles aménagés

- Panneaux de façade béton armé
- Ossature métallique

→ R + 2 + Combles aménagés

Résultats

Nous proposons de positionner les résultats obtenus des impacts selon les différents scénarii et pour être synthétique, n'en retenir les grandes tendances à partir de moyennes des résultats des nombreuses simulations.



Scénario 1 Etat initial	Scénario 2 Initial rénové	Scénario 3 Initial + extension	Scénario 4 Initial rénové + extension	Scénario 5 Initial rénové + extension + PV
Base 100	**≈ 26**	**≈ 70**	**≈ 20**	**BEPOS !**

Tableau 7 _ : Perspectives d'évolution des consommations fonction des scénarios

Le tableau ci-dessus illustre l'opportunité de la complémentarité « extension verticale » et « rénovation » du bâtiment existant. La situation initiale est considérée comme la base 100 pour les consommations énergétiques. Pour être synthétique, il s'agit bien sûr de moyennes révélant les tendances ; moyennes sur les trois zones climatiques, les deux énergies, les deux typologies de bâtiments étudiés, et pour les 4 scénarios d'améliorations. A noter que les impacts environnementaux suivraient des tendances comparables avec d'éventuelles sensibilités selon l'énergie utilisée.

Il est important de bien retenir que les résultats atteignables sont parfaitement similaires à ceux attendus pas les seuils expérimentaux « Energie/ Carbone » proposés récemment par l'administration (cf. http://www.rt-batiment.fr/batiments-neufs/experimentation-energie-carbone/experimentation-energie-carbone-pour-les-batiments-neufs.html).

Le scénario 5 peut autoriser des niveaux BEPOS, cibles possibles selon évidemment des paramètres liés au contexte de la parcelle (nombre de niveaux, possibilité d'intégrer des capteurs photovoltaïques, énergie *in situ*,…) et de l'implication de la collectivité locale avec d'éventuelles prolongations vers l'extérieur de la parcelle (ilot, quartier, territoire,…).

A noter qu'il sera possible d'optimiser et améliorer ces résultats selon les solutions techniques mises en œuvre, plus ou moins innovantes :

- Mutualisation et/ ou complémentarité des actions : cas de renforcement des fondations, possibilité recours à la géothermie,…
- Autres systèmes énergétiques : pompe à chaleur double usage, réseau de chaleur urbain, gaz solaire, biomasse, systèmes de récupération (eaux usées, serveurs numériques,…).
- Adaptations des familles de solutions aux différentes zones climatiques.

En ce qui concerne les résultats attendus, on notera que les scénarii 4 et 5 tendent vers les niveaux de seuils des plus performants « énergie/ carbone » attendus par l'approche de labels expérimentaux de la DHUP. Il s'agit là d'un enseignement déterminant de Lign2toit !

4.3. Pour la partie environnementale, deux cas d'extension ont été simulés.

Cas 1 : Extension en ossature métallique et bardage béton
L'extension est composée d'un étage et combles aménagés sur le bâti ancien. Les façades sont en ossature métallique isolée entre montant. Une isolation thermique extérieure est mise en place sous un bardage béton et toiture en couverture acier
Cas 2 : Extension en ossature bois et bardage terre cuite
L'extension est composée d'un étage et combles aménagés sur le bâti ancien. Les façades sont en ossature bois isolées entre montant. Un bardage en terre cuite est mis en place ainsi qu'une toiture en tuiles.

L'outil utilisé pour modéliser les différentes extensions est ELODIE, logiciel a été édité par le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment ce qui n'a pas permis de prendre en compte le module D qui valorise les bénéfices et charges au-delà du système.

En premier lieu, nous avons décidé d'évaluer les émissions de CO2, avant de procéder à une analyse multicritère avec plus d'impacts environnementaux.

A l'image du nouveau label d'Etat « Energie-Carbone », dans les simulations d'émissions de CO2 menées pour chacun des deux cas d'étude, certains lots ont été traités forfaitairement (en jaune), d'autres ont pu être détaillés.
Ces derniers sont ceux relatifs aux parties d'ouvrage directement visées par l'étude Lign2toit : structure, façade, couverture. Les histogrammes suivants présentent les résultats des seules surélévations.

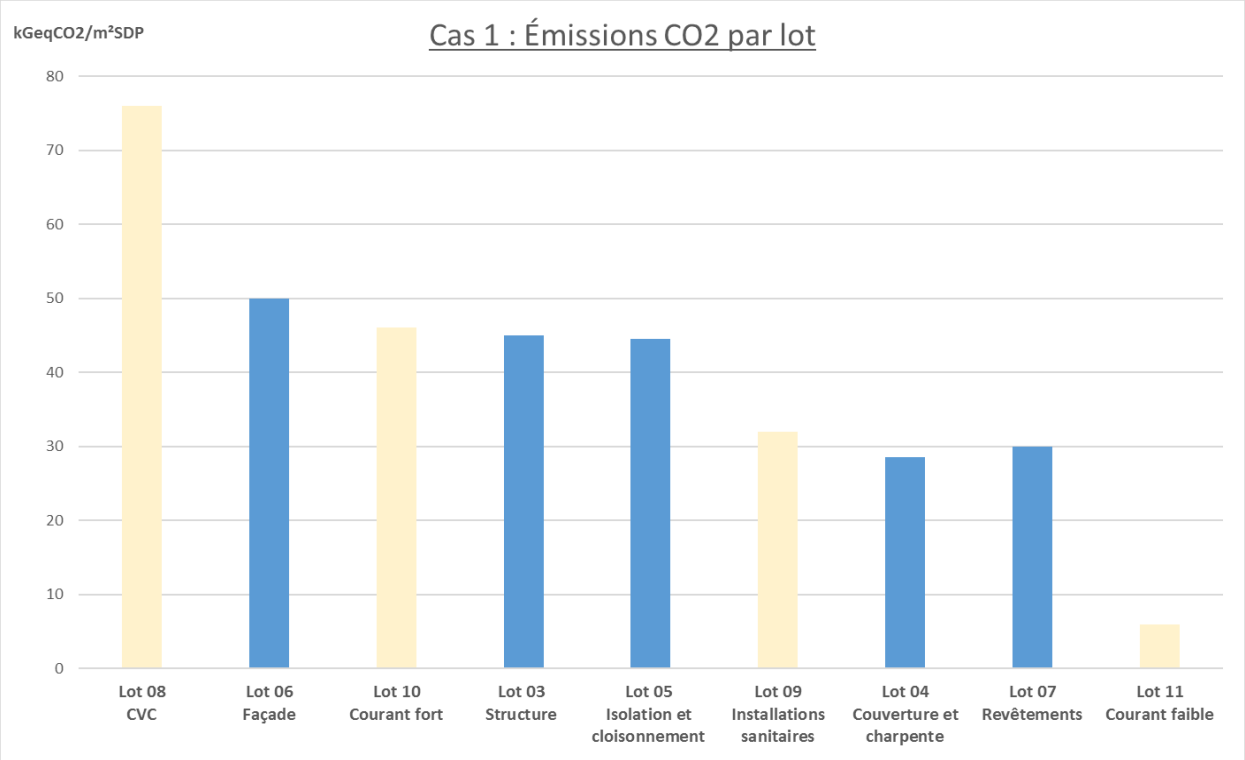


Figure 8_Niveau d'émissions de CO2 par lot pour le cas 1

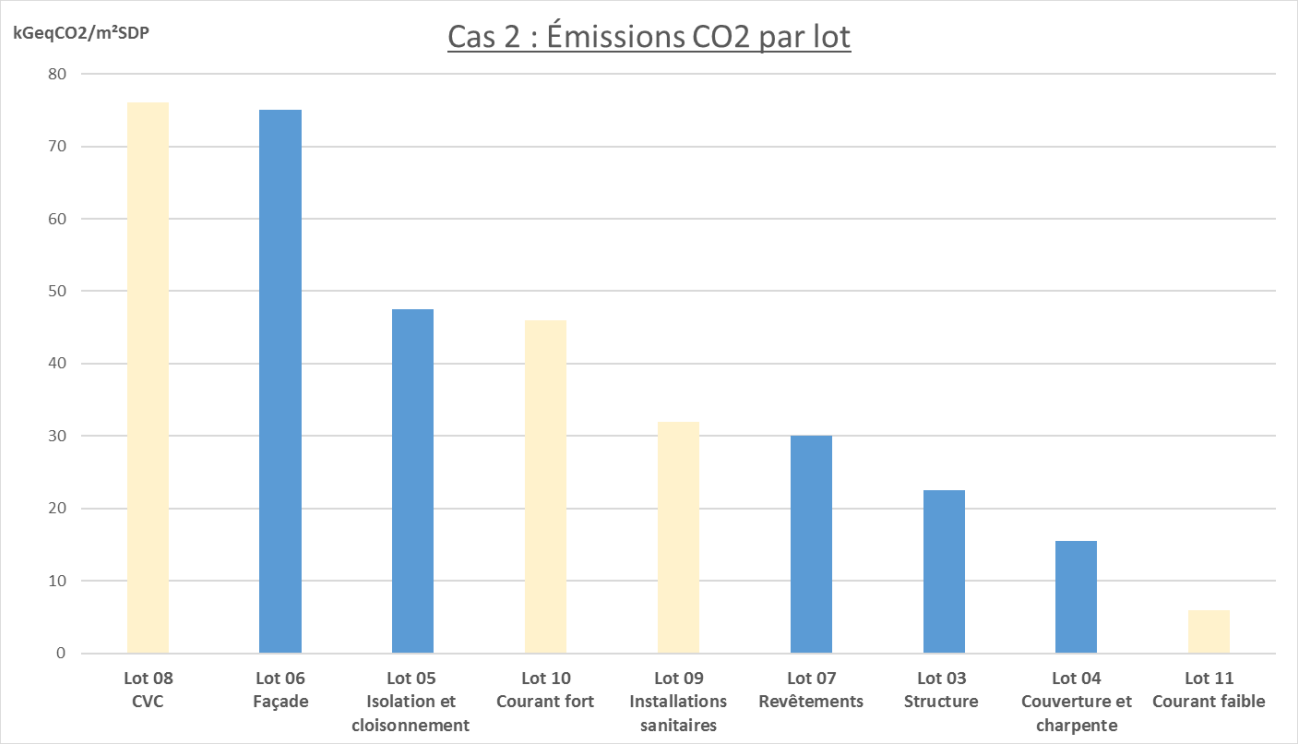


Figure 9_Niveau d'émissions de CO2 par lot pour le cas 2

Pour les deux cas, on retrouve des émissions totales des matériaux de construction de l'ordre de 350 kgeqCO2/m²SDP. Une extension sera de manière générale moins émettrice qu'une construction « classique » car elle n'est pas sujette aux émissions du lot « Infrastructure » et « Voiries et réseaux de distribution ».

Les émissions de gaz à effet de serre n'illustrent que l'indicateur «changement climatique ». Les méthodes d'évaluation des performances environnementales de bâtiment (NF EN 15978) font appel à une vingtaine d'indicateurs pour mesurer les impacts.

Dans une analyse multicritère, nous nous sommes donc intéressés aux impacts suivants :

- Consommations en énergie primaire (kWh) : Utilisation totale des ressources d'énergie primaire renouvelable et non renouvelable utilisées comme matière première.
- Consommation d'eau (L) : Utilisation nette d'eau douce
- Déchets (kg) : Inclus les déchets dangereux, non dangereux et radioactifs éliminés
- Changement climatique (kgeqCO2) : Réchauffement climatique

Si les deux cas ont les mêmes impacts sur le changement climatique et les consommations en énergie primaire, on observe des disparités sur la production de déchets et les consommations d'eau. Le cas 1 présente un score plus favorable sur l'indicateur déchet alors que le cas 2 est moins impactant d'un point de vue consommations d'eau. Au-delà de cette simple observation, il serait intéressant de mener une analyse comparée des différents scénarios.

L'analyse monocritère n'apporte qu'un éclairage très restreint au risque de donner un aperçu insuffisant, voire déformé, des impacts réels.

Une analyse multicritère est absolument nécessaire pour avoir une réflexion plus large. Elle permet de prendre en compte le contexte de l'étude et les priorités des décideurs.

5. Industrialisation[8]

Considérant la spécificité d'une opération de surélévation et la fréquente complexité de mener un tel chantier en raison de l'ouvrage existant et des conditions délicates de montage, le recours à l'industrialisation a paru constituer une voie capable d'apporter de véritables avantages pour les interventions en milieu urbain.
La partie de l'étude Lign2Toit consacrée à l'industrialisation poursuivait deux objectifs :

- observer les articulations et les points clés nécessaires et favorables au développement d'une démarche industrialisée de composants et systèmes de construction
- rappeler les pratiques et étapes remarquables d'une opération courante de construction pour les confronter aux observations précédentes.

En appui de travaux d'études et de normes internationales, conduites dès les années 80 pour ces dernières, les notions d'industrialisation des composants de construction s'appuient sur la notion de degré d'industrialisation, liée notamment à la préfabrication en usine et donc au transfert d'activité hors du chantier.
La mise au point d'un procédé industrialisé requiert d'avoir mené préalablement une analyse approfondie des principes constructifs vers lesquels se destine le procédé visé, mais aussi les intrants et extrants d'un processus industrialisé, jusqu'aux conséquences de l'influence des séries sur les équilibres et les performances, détaillées dans le rapport de tâche 3.

Le contexte général de la construction laisse penser que ce secteur d'activités est peu tourné vers l'industrialisation : mais que signifie véritablement ce terme ? Le concept d'industrialisation concerne-t-il le produit ou l'ouvrage et porte-t-il sur la conception de ce dernier, sa production ou même sur les usages et modes d'exploitation des bâtiments ?

Cette perception d'une faible part d'industrialisation peut provenir en partie des pratiques et des procédures de validation technique des composants de construction qui reposent sur la distinction entre le domaine « traditionnel » et le domaine « non traditionnel », chacun relevant d'un ensemble de textes de référence qui leur est propre. L'introduction au sein du domaine « traditionnel » peut dans certains cas s'opérer à l'issue d'une longue période de pratiques.
Un produit de construction est un produit fabriqué et mis sur le marché en vue d'être incorporé de façon durable dans des ouvrages de construction. Ses performances participent ou influent celles des parties d'ouvrages auxquels ils contribuent. Or, si les progrès des outils de production ont su faire évoluer les méthodes de travail et améliorer régulièrement la maîtrise de la qualité, on observe dans le même temps que l'outil de production sur chantier est souvent demeuré proche de celui des siècles passés, malgré l'amélioration des outillages, de la sécurité et des conditions de travail.
Plusieurs études du Puca ont montré que ce décalage d'évolutions est identifié comme l'une des difficultés à l'exploitation des performances offertes par les produits issus de l'industrialisation dans les bâtiments livrés

Le levage, point essentiel de l'organisation d'un chantier, et les moyens qui sont utilisés ont par ailleurs été présentés en détail, car il s'agit d'un point déterminant sur l'efficacité de la phase chantier et sur les choix de procédés constructifs selon leur capacité (dimensions, masse, maniabilité,…) à être manipulé par l'un des engins de levage évoqués.

Ambition déjà ancienne pour améliorer la production au sein d'un secteur fortement atomisé, l'industrialisation consiste à reporter vers des usines de préfabrication une grande partie des étapes de transformation des composants d'un système constructif en bénéficiant des avantages de lignes de production mieux équipées, facilement mécanisées et souvent plus sécurisées.
En effet, le processus d'industrialisation permet :

- De maîtriser la constance des qualités et les contrôles,
- D'optimiser les gestions d'interfaces,
- D'améliorer les délais de construction,
- De réduire les coûts de fabrication.

[8] Voir rapport de tâche 3 pour plus de détails

Bien que la construction de bâtiments paraisse traditionnellement peu industrialisée, il faut reconnaitre aussi l'existence aujourd'hui d'une large palette de solutions ou d'éléments issus de fabrications à grande échelle. Pour les ouvrages en structure et enveloppe, les produits recensés au sein des quatre grandes familles de matériaux et présentés dans les fiches (annexe du rapport tâche 1) correspondent tous à l'un des degrés d'industrialisation présentés dans le rapport tâche 3 et permettent toujours une forme d'associations.

L'essentiel de l'évolution semble davantage se concentrer vers un recours plus systématique et mieux maitrisé d'une organisation d'échanges en ingénierie concourante ainsi que de procédures opératoires mieux partagées dès les étapes de conception d'un projet.

Conclusion et perspectives de développement issues de la démarche Lign2toit

Dans le cadre de l'étude Lign2toit, un éventail d'outils et d'éléments d'analyse a été développé. Il apparaît cependant nécessaire de consolider la robustesse de ces outils et de les lier. Une fois ces étapes effectuées, il conviendra d'en faciliter leur utilisation. Cela passe par la conception et le développement d'un outil intégré plus ergonomique: comparaison entre le poids admissible de la surélévation et le module constitué à base des fiches composants, évaluation des impacts environnementaux et des performances énergétiques en fonction des composants sélectionnés, prise en compte des éléments économiques et notamment de la valorisation du droit à construire, …

Par ailleurs, une phase de test des outils développés sur un ensemble d'opération réelle doit être menée en s'appuyant sur des « bêta-testeurs ». Cela permettra de valider et optimiser la méthodologie avant une diffusion élargie. Nous devrions sans difficulté identifier ces personnes. En effet, lors des diverses interventions réalisées au cours du projet pour présenter Lign2toit, nous avons pu observer un intérêt marqué des différents acteurs de la filière. Nous notons en particulier les présentations faites lors des deux premières éditions du Colloque « Construire sur les Toits » des 7 Juillet 2015 et 3 Octobre 2016. L'accompagnement des travaux du laboratoire d'innovations de l'Ecole d'Architecture de Paris-Malaquais, encadré par Philippe Simon et Carla Deshayes, s'est déroulé sur le second trimestre 2015 et la restitution à l'OPAH2D2E, le 9 Septembre 2015, a suscité un vif intérêt. Les copropriétaires des immeubles ayant fait l'objet des travaux des étudiants présents dans l'assistance ont fait part de leur appréhension par rapport à ce type d'opération.

Un autre axe de travail pour le développement des solutions présentées dans l'étude Lign2toit concerne donc la meilleure compréhension des problématiques sociétales qui sont à l'origine de délai ou annulation d'un nombre non négligeable de projets. L'objectif serait alors de mieux communiquer auprès des riverains et habitants en amont de ce type de chantier et ainsi limiter les préjugés négatifs. Ces éléments pourraient aussi être exploités pour adapter les méthodologies d'exécution, voire les composants, aux contraintes spécifiques d'une intervention en site occupé.

La combinaison de la levée des problématiques sociétales et la simplification des approches règlementaires affecte tant la conception même de l'ouvrage que la prise de décision : elle semble décisive pour pouvoir convaincre et aider au passage à l'acte des travaux. Les premières observations sur les cas d'étude n'ont pas démenti la pertinence des solutions de surélévation pour répondre aux problématiques de la densification urbaine et de la rénovation énergétique du parc immobilier existant en zone dense. Des points de vue de la performance énergétique et environnementale, l'approche Lign2toit se situe à la croisée des chemins des futures orientations réglementaires et de surcroît aux niveaux des cibles visées par la transition énergétique. Autrement dit, le sujet des extensions (verticales notamment), permet de réunir la construction et la rénovation, ou plus précisément se servir de l'extension pour améliorer le parc, mieux utiliser l'existant, limiter sensiblement les émissions carbone « construction » en améliorant les structures existantes. Quels que soient les matériaux mis en œuvre, la rénovation d'un bâtiment existant est évidemment beaucoup moins émettrice qu'une opération de déconstruction et construction nouvelle.

Lign2toit ouvre des perspectives prometteuses en matière de création de surface comme en terme d'enjeux énergétiques et environnementaux grâce à sa position charnière « construction / rénovation ». Pour les concrétiser, nous proposons de prolonger l'étude Lign2toit par un projet qui se focalisera sur les actions suivantes :

- Consolidation de chaque outil séparément
- Intégration des outils couvrant chaque étape dans une application globale (figure 10)

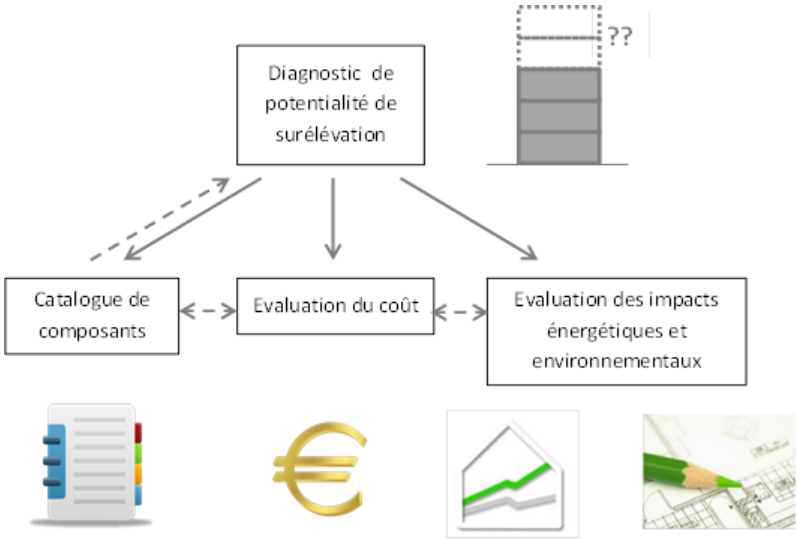


Figure 10_Outil intégré proposé

- Mise à l'épreuve de l'outil sur des opérations témoins
- Retour d'expérience avec focus sur le chantier
- Compréhension et recherche de solutions pour lever les freins sociétaux

Notre travail Lign2toit met en lumière cette opportunité décisive de participer à la massification de la rénovation du parc en générant aussi de la création de valeur (surface, amélioration énergétique,…) propice à la décision d'engagement de travaux.