



**HAL**  
open science

# L'apport de la Constructibilité au pré-design.Évaluation et support au choix des solutions techniques.

Francesca Contrada

► **To cite this version:**

Francesca Contrada. L'apport de la Constructibilité au pré-design.Évaluation et support au choix des solutions techniques.. Génie civil. Université Paris-Est, 2019. Français. NNT : 2019PESC1006 . tel-02869716

**HAL Id: tel-02869716**

**<https://theses.hal.science/tel-02869716v1>**

Submitted on 16 Jun 2020

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# UNIVERSITÉ — — PARIS-EST

Thèse

En vue de l'obtention du titre de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE PARIS-EST

Ecole doctorale: SIE

Spécialité : Sciences de l'ingénieur

## **L'apport de la Constructibilité au pré-design. Evaluation et support au choix des solutions techniques.**

Francesca CONTRADA

Thèse soutenue le 09/01/2019

### Composition du Jury :

VIRGONE Joseph	Professeur, Université Lyon 1	Rapporteur
FABRIZIO Enrico	Professeur, Politecnico di Torino	Rapporteur
CAPONE Pietro	Professeur, Università di Firenze	Examineur
GOBIN Christophe	Docteur d'Etat, Ecole Spéciale des Travaux Publics	Directeur
KINDINIS Andrea	Enseignant Chercheur, Ecole Spéciale des Travaux Publics	Co-Encadrant
CARON Jean-François	Professeur, Ecole des Ponts ParisTech	Co-Encadrant
ALLAB Yacine	Docteur Ingénieur, LHIRR Paris	Invité



A mes parents et à mon frère





## Résumé

Les nouveaux bâtiments exigent le respect et la garantie de niveaux de performance de plus en plus élevés en terme d'efficacité énergétique, de confort des usagers, d'impact environnemental et de management du projet. Pour répondre à ces enjeux il est envisageable que la conception s'appuie sur des méthodes d'aide à la décision multicritères et d'évaluation de la performance globale ; de plus, une conception plus efficiente est en mesure de favoriser le recours à des solutions techniques et technologiques nouvelles, capables de mieux répondre aux exigences de performance attendue. Dans ce cadre, les méthodes actuellement utilisées pour l'accompagnement en conception, se montrent non exhaustives ainsi que difficilement exploitables en pré-design, à cause du manque de temps, d'information et de moyens mis à disposition. Le début de la conception représente pourtant une étape prépondérante puisque les choix opérés à ce moment influencent la suite du processus de construction. En même temps, la prise de décision à cette étape n'est généralement pas confortée par des analyses robustes, ce qui favorise la prise en compte de solutions techniques bien connues et remet les choix à une étape plus avancée de la conception. Cela implique des inefficacités en conception, des risques de dégradation de la performance et, plus en général, un obstacle à l'innovation, des surcoûts et un non-respect du délai établi.

Dans l'objectif de contribuer à une meilleure gestion de la phase de pré-design et de supporter la prise de décision du concepteur, la thèse fait appel à la discipline de la constructibilité. En visant à assurer la performance de l'ouvrage, la constructibilité concentre, en effet, l'intérêt sur le bon déroulement du processus, en fournissant un cadre pour l'anticipation des efforts.

Avec cette thèse nous proposons une méthode de vérification de la pertinence du pré-design vis-à-vis des spécifications programmatiques et de la faisabilité technique de l'ouvrage. L'évaluation proposée repose sur l'analyse de sept critères : la simplicité de la solution, la simplicité de gestion, la possibilité de vérification, la disponibilité des compétences, la soutenabilité, l'économie et la pertinence/robustesse vis-à-vis des fonctions d'usage. Chacun des critères permet la prise en compte de l'ensemble des étapes du cycle de vie du bâtiment.

Cette méthode permet à l'assistant à la maîtrise d'ouvrage de vérifier la cohérence des solutions proposées et, au concepteur de baser le design sur une comparaison multicritère d'un panel de solutions techniques.

Trois cas d'étude illustrent la méthode développée ; la performance globale en amont du projet est évaluée et analysée pour un nouveau collège en Ile de France et pour une surélévation d'un bâtiment existant en Italie. Une troisième application présente l'utilisation de la méthode dans le cas de prise de décision entre plusieurs solutions d'enveloppe, intégrant composants traditionnels ou « adaptatifs ». Cela permet d'une part, d'engager une réflexion quant à la possibilité d'adopter des solutions technologiques innovantes dès le pré-design, et, d'autre part, d'évaluer les implications sur le processus que ce choix peut comporter.



## Abstract

New buildings have to respect and assure increasingly high levels of performance related to energy efficiency, comfort of users, environmental impact and project management. In order to answer to these issues, the project concept needs to be founded on multicriteria methods of choice and on the global performance evaluation; moreover, a more efficient design offers access to technical solutions and new technologies capable of better meeting the expected performance requirements. In this contest, the current methodologies used as support in the design phase are not exhaustive and difficult to process in the pre-design one, for the lack of time, information and resources. The beginning of the conception represents, nevertheless, a dominating stage because choices operated at this moment influence the continuation of the construction process. At the same time, the decision-making at this stage is not generally consolidated by strong analyses that favours the well-known technical consideration of solutions and puts back choices to a more advanced stage of the project sequences. It implies ineffectiveness in conception, risks of performance degradation and, more generally, an obstacle to the innovation, additional costs and the failure to meet the established deadline. In the objective to contribute to a better management of the pre-design phase and to support the decision-making of the designer, the thesis involves the discipline of the constructibility. To assure the performance of the structure, the constructibility engages, indeed, interest on the good development of the process, by providing a framework for the anticipation of the efforts. With this thesis, a method is proposed in order to check the relevance of the pre-design towards the programmatic specifications and towards the technical feasibility of the building. The suggested evaluation relies on seven criteria: the simplicity of the solution, the simplicity of the management, the expertise availability, the sustainability, the economy and the relevance / robustness towards the functions of use. Each of the criteria allows the consideration of all the stages of the building life cycle. This method let the consultant programme manager verify the coherence of the advised solutions and let the designer base the project on a multicriteria comparison between several technical solutions.

Three study cases illustrate the developed method; the global performance in the upstream phases is evaluated and analysed for a new school in the Parisian area and for the raising of an existing building in Italy. A third application presents the use of the method in case of decision-making between several envelope solutions, integrating traditional or “adaptive” components. This both admit to embark upon the possibility of adapting innovative technological solutions from the pre-design stage, and to assess the process implications that this choice may include.



# Table des matières

<b>Introduction .....</b>	<b>11</b>
<b>Chapitre 1 : La décision en pré-design et la notion de constructibilité.....</b>	<b>15</b>
1.1. Le cycle de vie du bâtiment et le cadre législatif disciplinant la phase de conception en France et à l'étranger .....	16
1.2. La problématique du pré-design : prise de décision et évaluation .....	22
1.3. Les démarches permettant l'anticipation des efforts : le processus Intégré et la discipline de Constructibilité .....	27
1.3.1. Le Processus de Conception Intégré .....	28
1.3.2. « Les définitions » de constructibilité à l'international et les retours d'expérience.....	30
1.3.3. La constructibilité en France .....	32
Conclusions du chapitre 1 et définition de la problématique et des objectifs de thèse .....	33
<b>Chapitre 2 : Les bases pour la proposition d'une nouvelle méthode d'évaluation .....</b>	<b>35</b>
2.1. L'approche performancielle et sa mise en place.....	36
2.1.1. Approche fonctionnelle .....	38
2.1.2. Le bâtiment comme un système .....	40
2.2. Etat de l'art des outils et des méthodes afférant à la constructibilité .....	47
2.2.1. Principes et concepts de la constructibilité .....	47
2.2.2. Les approches intégrant la constructibilité dans le domaine de la construction .....	52
2.3. Etat de l'art des méthodes d'accompagnement et d'évaluation de la performance du bâtiment en pré-design.....	58
2.3.1. Outils donnant des directives.....	58
2.3.2. Les outils d'évaluation de la performance .....	60
2.3.3. Les outils de classification .....	67
2.4. L'évaluation et l'aide au choix multicritère.....	74
2.4.1. Les méthodes multicritères utilisées pour les évaluations du bâtiment .....	74
2.4.2. L'application des méthodes pour l'aide au choix de l'enveloppe du bâtiment .....	77
Conclusions du chapitre 2.....	78
<b>Chapitre 3 : Définition d'une nouvelle méthode. ....</b>	<b>81</b>
3.1. Principes généraux de la méthode .....	82
3.2. Détermination des critères pour la méthodes d'évaluation .....	84
3.2.1. Les causes de la dégradation de la performance du bâtiment .....	84
3.2.2. Le diagnostic de pertinence et la méthode « 4A ».....	87

3.2.3. L'adaptation de la méthode « 4A » au pré-design et la définition des critères d'évaluation.....	89
Conclusions du Chapitre 3.....	95
<b>Chapitre 4 : Méthode d'évaluation et support au choix pour le pré-design.....</b>	<b>97</b>
4.1. Introduction : rappel de la problématique et justification de la méthodologie.....	98
4.2. Présentation du système d'évaluation .....	100
4.2.1. La simplicité de la solution (CC1) .....	101
4.2.2. La possibilité de vérification (CC2).....	103
4.2.3. La disponibilité des compétences (CC3) .....	105
4.2.4. La simplicité de gestion (CC4) .....	106
4.2.5. La pertinence/robustesse vis-à-vis des fonctions d'usage (CC5) .....	108
4.2.6. La soutenabilité environnementale (CC6).....	110
4.2.7. L'économie en exploitation (CC7) .....	113
4.3. Evaluation des sept critères de constructibilité .....	115
4.4. Analyse et agrégation des sous-critères et des indicateurs .....	124
4.4.1. Exemple d'agrégation et d'évaluation des critères .....	127
4.5. Attribution des intensités d'importance pour les divers sous-critères .....	129
4.6. Représentation de l'évaluation .....	132
Conclusions du Chapitre 4.....	137
<b>Chapitre 5 : Application de la méthode .....</b>	<b>139</b>
5.1. Application de la méthode afin d'évaluer un pré-design (contrôle/autocontrôle).....	140
5.1.1. Application n°1 : nouveau bâtiment en Ile de France.....	140
5.1.2. Application n°2 : surélévation d'un bâtiment en Italie.....	155
5.2. Application de la méthode pour le choix entre une façade adaptative et une façade intégrant des protections solaires (aide au choix) .....	168
5.2.1. Préambule : l'innovation technologique et les obstacles à l'intégration.....	168
5.1.3. Application 3 : Module de bureau .....	168
Conclusions du chapitre 5.....	188
<b>Conclusions et perspectives.....</b>	<b>189</b>
<b>Références .....</b>	<b>193</b>
<b>ANNEXE A – Fiches des découpages recensés .....</b>	<b>209</b>
<b>ANNEXE B – Indicateurs et normes de référence pour le critère CC5 .....</b>	<b>219</b>
<b>ANNEXE C – Exemples de calcul des indicateurs .....</b>	<b>236</b>

## Acronymes et grandeurs récurrents

ACV	Analyse de cycle de vie
AHP	Analytic Hierarchy Process (Procédure hiérarchique d'analyse)
AMO	Assistant à la maîtrise d'ouvrage
APD	Avant-projet détaillé
APS	Avant-projet sommaire
AQC	Agence Qualité de la Construction
ASE	Annual Sunlight Exposure (Exposition solaire annuelle) [%]
AVP	Avant-projet
BDAS	Buildable Design Appraisal System
BREEAM	Building Research Establishment's Environmental Assessment Method
CAS	Constructability Appraisal System
CC <sub>i</sub>	Concepts de constructibilité avec $i = 1$ à $23$
CC <sub>n</sub>	Critères de constructibilité de la méthode proposée avec $n = 1$ à $7$
CII	Construction Industry Institut
CIIA	Construction Industry Institut of Australia
CLT	Cross-Laminated Timber (Bois lamellé-croisé)
CPE	Contrat de Performance Energétique
CPs	Principes de constructibilité
DA	Daylight Autonomy (Autonomie lumineuse) [%]
ESQ	Esquisse
EXE	Etudes d'exécution
FLJ	Facteur de Lumière de Jour [%]
GTB	Gestion Technique du Bâtiment
HQE	Haute Qualité Environnementale
LEED	Leadership in Energy and Environmental Design
MOA	Maîtrise d'ouvrage
MOE	Maîtrise d'œuvre
PC	Permis de construire
PCI	Processus de Conception Intégré
PMV	Predicted Mean Vote [-]
PPD	Predicted Percentage of Dissatisfied [%]
RIBA	Royal Institute of British Architects
sDA	Spatial Daylight Autonomy (Autonomie spatiale lumineuse) [%]



## Introduction

La réduction de la demande énergétique et de l'émission de CO<sub>2</sub> sont deux des plus importants enjeux du secteur de la construction. Environ un tiers des consommations d'énergie en Europe est dû au chauffage, au refroidissement, à la ventilation et l'éclairage des bâtiments (BPIE, 2011). Selon le rapport du 2013 de l'IEA (IEA, 2013), les consommations énergétiques pour le refroidissement augmenteront fortement en 2050 : de 150% globalement et jusqu'à 600% dans les Pays les plus développés. Le cadre des nouvelles constructions offre des bonnes possibilités de mise en place de dispositifs de réduction de la demande d'énergie finale et de production d'énergie renouvelable. Par ailleurs, le potentiel pour une définitive décarbonisation et une autonomie de production de l'énergie (Marszal, et al., 2011) demeure possible en réfléchissant au changement d'échelle, à travers la réalisation des îlots et des quartiers à énergie positive.

Le cadre réglementaire français s'intéresse de plus en plus à cette problématique, mais, de manière générale, la performance du bâtiment ne repose pas seulement sur les enjeux énergétiques et environnementaux. Du point de vue de l'exploitant, la performance représente la réponse que l'ouvrage fournit vis-à-vis des exigences d'usage. Pour les acteurs du processus de construction, la performance du bâtiment représente une série d'objectifs à atteindre à travers une démarche la plus efficace possible. Dans ce cadre, les certifications, de plus en plus nombreuses, fournissent des démarches et des moyens pour arriver à considérer à la fois la performance environnementale et d'autres aspects, comme le confort des usagers, et le management du projet. Le nombre d'acteurs et d'enjeux s'élargisse et la performance devient de plus en plus un sujet délicat.

De même, le cycle de vie du bâtiment concerne plusieurs étapes et divers acteurs qui interagissent entre eux. Cela rend le processus complexe. C'est à partir des exigences exprimées dans le programme que le maître d'ouvrage définit les objectifs de performance auxquels le produit final (le bâtiment) devra répondre à travers ses principes techniques. L'équipe de conception se base sur ce cahier de charge pour réaliser le projet. Par contre, tout au long du processus de conception et de réalisation, il est possible de rencontrer des incohérences ou des ambiguïtés qui peuvent porter au changement de la performance établie dans les phases initiales.

Le passage de l'exigence (demande) à la matérialité (offre), à travers la conception, engage un processus itératif dans lequel les niveaux de performance prévus peuvent subir des changements. Le retard dans la prise de décision ou le manque d'engagement des divers acteurs peuvent avoir un impact sur l'efficacité du processus, qui ne parvient plus à respecter les délais fixés, et sur l'efficacité du produit, c'est à dire sur le résultat final attendu.

Dans ce cadre, le début de la conception représente une étape prépondérante du cycle de vie du bâtiment. Les choix opérés à ce moment correspondent à une stratégie qui influence la suite de la conception, la réalisation, l'exploitation et la fin de vie de l'ouvrage. C'est à ce moment que le concepteur propose la forme et la matérialité pour répondre à un programme. C'est aussi à ce moment qu'il faut réfléchir à l'introduction de l'innovation technologique, car cela pourrait comporter des changements vis-à-vis d'autres composants du bâtiment, des analyses ultérieures et des impacts sur le déroulement des étapes futures. L'introduction de systèmes de réglage intelligent du bâtiment, par exemple, nécessitera une réflexion ultérieure quant aux composants impliqués par

la nouvelle technologie et aux logiques de contrôle dédiées. L'innovation technologique nécessite une anticipation des évaluations et l'introduction de nouveaux indicateurs plus appropriés pour la description du comportement global.

L'évaluation de la performance, réalisée pendant les étapes initiales de la conception, représente à la fois un moyen de support et de gestion du processus. Elle fournit un support très important à la décision, permettant d'effectuer le choix le plus efficace à travers une comparaison objective de plusieurs variantes (Hensen & Lamberts, 2011). D'autre part l'évaluation *in itinere* permet un suivi de la performance et, donc, une vérification en continu de son niveau.

Il s'agit de garantir la performance à travers un processus de commissionnement étalé sur l'ensemble du cycle de vie du bâtiment. Garantir la performance signifie assurer, pendant le processus, un certain niveau de performance préalablement établi.

En France le concept de garantie de performance est plutôt formalisé en termes de performance énergétique (Huet & Dauger, 2013). Dans les dernières années, elles ont été distingués :

- la garantie de performance énergétique intrinsèque et
- la garantie de résultats énergétiques.

Dans le premier cas, l'évaluation est faite en phase de conception, de réalisation et jusqu'à la livraison, faisant référence à la garantie de la prévision pendant le cycle de vie (Huet & Dauger, 2013). Cela peut être considéré comme un commissionnement réalisé pendant les diverses phases du processus. En effet, ce type de commissionnement permet de vérifier que, pendant l'avancement du projet, le niveau de consommation énergétique maximale soit respecté, pour un scénario d'usage et des consignes donnés.

La garantie de résultat, d'autre part, assure un niveau maximal de consommation énergétique réelle et mesurable et peut porter sur les phases de rénovation ou démarrer à partir de la livraison et mise au point du bâtiment (Huet & Dauger, 2013). Ce type de garantie est explicité à l'aide d'un contrat de performance énergétique (CPE) mis en place pour certaines opérations. Afin de développer et homogénéiser les types de CPE, un Observatoire des Contrats de Performance Énergétique a été lancé par l'ADEME, le CSTB et le CEREMA en 2016. Selon le rapport de l'Observatoire (Rosenstein, et al., 2017), en France en 2017 les ouvrages faisant l'objet d'un CPE étaient environ 250. La garantie de résultat permet d'étendre la période de garantie à plus que deux ans de la livraison et prévoit des sanctions dans le cas de non-respect de la performance énergétique attendue.

L'innovation concernant le processus s'installe tout doucement dans la conception et les projets faisant l'objet d'un contrat de performance énergétique demeurent naturellement plus soignés du point de vue de la conception des divers systèmes techniques. Par contre, les désordres dans le processus de construction nécessitent encore d'être résolus en mettant en place des méthodes et des approches capables d'assurer la performance au sens large de réponse à une exigence.

Afin de rassurer le processus de construction, la garantie de performance intrinsèque et le commissionnement du projet, nécessitent d'être développés du point de vue méthodologique et d'être formalisés, à travers la mise en place de nouveaux protocoles partageables par les acteurs, et, sur le plan du résultat, en mettant en place une évaluation multicritère de la performance.

La formalisation de l'évaluation de la cohérence de la conception (c'est-à-dire la garantie de la performance globale intrinsèque), et notamment du pré-design (étapes d'esquisse et d'avant-projet sommaire), vis-à-vis des exigences du programme et des enjeux de gestion du processus, représente la problématique de cette thèse.

Ce travail de thèse concerne tout d'abord une approche théorique dans la mesure où nous allons réfléchir aux notions d'évaluation et de vérification appliquées au pré-design. D'autre part, il s'agit d'une approche méthodologique, car nous proposons une nouvelle méthode d'évaluation des alternatives de conception, capable de prendre en compte l'innovation technologique et les risques potentiels que les choix comportent sur l'entier cycle de vie du bâtiment.

La méthode conçue se propose d'accompagner l'assistant à la maîtrise d'ouvrage, ou le concepteur même, dans une démarche d'évaluation et vérification (de commissionnement) et/ou de support au choix. L'analyse est donc supportée par des outils et des indicateurs couramment utilisés permettant une analyse de la performance globale de l'ouvrage en se basant sur des critères propres d'une discipline qui prend le nom de constructibilité.

La constructibilité, comme introduite et traitée par l'Institut de Recherche en Constructibilité (IRC) de l'ESTP, vise à rassurer le processus à travers le partage des connaissances et des retours d'expérience entre les divers acteurs de la construction. Les méthodes afférant à la constructibilité permettent d'assurer la bonne réussite du projet quant à l'atteinte des objectifs fixés. La méthode d'évaluation proposée permettra d'introduire formellement la constructibilité dans le panorama de la construction française.

La thèse est organisée en cinq chapitres. Le chapitre 1 concernera le cycle de vie du bâtiment. Une analyse critique des diverses étapes de la conception nous permettra de définir le contexte d'application de la méthode. L'attention sera portée sur la phase de pré-design, afin de définir les limites qui caractérisent cette étape et de soulever la problématique sur l'anticipation des évaluations et sur les difficultés de l'introduction des approches de conception intégrée. Le même chapitre fixera les objectifs de la thèse.

Afin de bien expliciter le concept de garantie de performance, nous nous concentrerons, dans le deuxième chapitre sur l'état de l'art des méthodes et des outils pour la prise en compte de la constructibilité dans le processus et utilisés pour le support et l'évaluation en phase de pré-design. Ce chapitre nous permettra de tirer des premières conclusions concernant les limites des démarches actuellement mises en place et utilisées pour les évaluations en pré-design. Le dépassement de ces limites constitue le défi de notre proposition, qui sera présentée dans le chapitre 3.

Sur la base des notions de pertinence et de robustesse du processus et du produit, nous définirons les critères utilisés dans la méthode d'évaluation. Ces critères nous permettront d'introduire en pré-design à la fois les principes favorisant la constructibilité et les méthodes d'évaluation existants. L'évaluation du pré-design se fait, donc, à travers sept critères de constructibilité, tenant compte de la performance du produit (bâtiment) et du processus.

Le chapitre 4 représente le cœur de la thèse. Nous exposerons, d'abord, la structure de la méthode et son utilité, pour ensuite traiter les divers critères, leurs rôles, leurs caractéristiques et les modèles permettant leur évaluation.

La méthode est, enfin, mise en situation grâce à trois cas d'études. Nous présenterons, dans le chapitre 5, l'application de la méthode pour deux types d'utilisation :

- un contrôle ou un autocontrôle du pré-design ;
- un support au choix de solutions techniques de façade en amont du projet.

Le premier type d'utilisation sera mis en place pour l'évaluation globale en pré-design du nouveau collège d'Aubervilliers, en Ile de France. Il s'agit d'un nouveau bâtiment actuellement en construction pour lequel nous analyseront l'effet d'un changement, concernant les procédés techniques, sur l'évaluation globale. Une deuxième application concernera la surélévation d'un bâtiment en Italie dont la conception a été réalisée en se basant sur des procédés de préfabrication et sur la prévision des risques en phase chantier. Enfin, l'utilisation de la méthode comme outil permettant un support au choix se réalisera sur un module de bureau d'un bâtiment situé en Ile de France. La comparaison, explicitée à travers la méthode, permettra de faciliter le choix entre une façade traditionnelle, prévoyant des protections solaires, et plusieurs types de façades adaptatives, modélisées en intégrant un vitrage électrochrome suivant diverses logiques de contrôle.

Sur la base des résultats obtenus, la thèse propose, enfin, plusieurs axes de recherche envisageables afin d'enrichir les réponses à la problématique posée.

# Chapitre 1 : La décision en pré-design et la notion de constructibilité

Ce premier chapitre se concentre sur la problématique relative à l'anticipation des efforts en amont de la conception. Le manque d'engagement des divers acteurs, intervenant dans la conception, peut déterminer une série de dysfonctionnements dans le processus de construction. En conséquence, cela peut déterminer une dégradation du niveau de performance.

Dans ce chapitre, nous ne prétendons pas comprendre pourquoi les décisions ne sont pas prises au bon moment. Il s'agit, par contre, d'analyser, à travers des exemples, l'importance de l'anticipation de prise de décision assistée par le retour d'expérience et par l'évaluation de la performance.

La phase sur laquelle nous posons notre regard est, donc, la phase de conception. Elle représente l'interface entre l'expression des besoins et la réalisation matérielle du bien, et donc, la phase pendant laquelle les décisions sont prises. Une analyse critique des divers niveaux de conception, en France et à l'étranger, nous permettra de déterminer le périmètre d'intervention afin d'améliorer le processus, ainsi que les leviers d'actions : le pré-design et les spécifications techniques concernant les composants techniques du bâtiment.

Une fois le contexte d'intervention clair, nous présenterons certaines des approches permettant une anticipation de la prise de décision et un accompagnement de la conception. Plus précisément nous nous concentrerons sur le processus de conception intégré et sur la discipline de la constructibilité. Une analyse critique des deux approches nous permettra de définir leurs potentiels et les limites.

Les conclusions de ce premier chapitre permettront, enfin, de centrer notre problématique et de dégager les axes majeurs de la présente thèse.

## 1.1. Le cycle de vie du bâtiment et le cadre législatif disciplinant la phase de conception en France et à l'étranger

Le cycle de vie du bâtiment représente l'ensemble des étapes du processus de construction. Ce processus est défini par une succession de tâches et de résultats qui peut varier d'un pays à l'autre en fonction du cadre normatif et du contexte culturel.

En France, la loi n°85-704 du 12 juillet 1985 dite aussi « Loi MOP » définit les étapes principales d'organisation d'un projet et discipline les interactions entre les nombreux acteurs de la construction. La loi, conçue pour les marchés publics, représente la référence, quant à la définition des étapes et des obligations relatives aux diverses parties prenantes pour tout type d'opération.

D'après cette loi, la maîtrise d'ouvrage (MOA), représentant le propriétaire de l'ouvrage ou le commanditaire des travaux, peut confier à la maîtrise d'œuvre (MOE) tout ou une partie des éléments de conception et d'assistance concernant : les études, le projet, la réalisation et l'exploitation (Bansac, 2017), (CAUE92, 2018). Cela représente le début du chemin, riche en interactions, qui conduira à la réalisation du bâtiment. La MOA et la MOE représentent, sur un plan macroscopique, les deux figures clés d'un processus qui peut se résumer via les étapes suivantes :

- Etudes préalables/programmation ;
- Conception ;
- Construction ;
- Exploitation ;
- Fin de vie.

La phase de programmation est la phase dans laquelle les études de diagnostic du site et la définition des besoins du client sont principalement réalisés. L'ensemble de ces informations constitue le programme architectural et technique, de l'opération. Il est élaboré par la MOA et il est fourni sous forme d'un cahier des charges à la MOE. Le cahier des charges (c'est-à-dire l'ensemble des spécifications) représente le point de départ pour la conception. Les acteurs concernés par la phase de programmation varient en fonction de l'opération. La MOA peut, par exemple, faire appel, à un assistant à la maîtrise d'ouvrage (AMO), à des spécialistes (sociologues, urbanistes, programmistes, etc.) aux usagers, ou à la MOE même, pour la réalisation du diagnostic et la rédaction du programme.

La phase de conception prévoit la définition du projet, c'est-à-dire la proposition architecturale pour répondre aux exigences du programme. Comme nous le verrons plus tard, les études sont réalisées à plusieurs niveaux de détail. Les acteurs concernés sont principalement la MOA, qui valide chaque niveau de conception ; éventuellement l'AMO, qui supporte la MOA dans les vérifications du respect du programme et qui peut aussi assister la conception ; la MOE (qui peut comprendre les bureaux d'études techniques) et, selon le type d'opération, les entreprises de construction, les usagers ou d'autres organismes.

La phase de réalisation comprend l'ensemble des tâches de travaux, de suivi technique et financier, du contrôle de qualité, jusqu'à la livraison du bâtiment. Les intervenants dans cette étape dépendent

du type de contrat et du type d'opération, la MOE peut être chargée de suivre les opérations des entreprises de construction choisie par la MOA et par la MOE même à la fin de la phase précédente.

L'exploitation comprend l'utilisation du bâtiment de la part des usagers, ainsi que l'ensemble des opérations de gestion de l'ouvrage (maintenance et gestion technique). Selon le type de bâtiment, outre les exploitants, les intervenants peuvent comprendre la MOA, les gestionnaires, les équipes de maintenances etc.

La fin de vie du bâtiment comprend toutes les tâches de décontamination, déconstruction, démolition, traitement des déchets, recyclage et réhabilitation du site. Les acteurs concernés peuvent être la MOA, la MOE et/ou les entreprises de construction.

Dans ce cadre, l'étape sur laquelle nous voulons concentrer notre attention est la conception, car elle représente l'interface entre l'explicitation des besoins et la réalisation de l'ouvrage. C'est la phase dans laquelle, exception faite pour les décisions préalablement établies en phase de programmation, les décisions concernant la matérialisation du projet sont prises. Ces décisions, d'une part, vont devenir des contraintes pour les phases suivantes du processus, et, d'autre part, nécessitent d'être cohérentes avec les spécifications programmatiques.

Afin de rassurer le processus de construction, il faut consolider les choix 1) en anticipant les réflexions concernant l'architecture et les composants techniques du bâtiment (et les effets qu'ils peuvent comporter) ; 2) en évaluant la pertinence de la réponse apportée au programme.

D'abord, nous allons analyser les étapes de conception en France, puis à l'international. Cela nous permettra de faire un parallèle entre l'organisation des niveaux de conception de pays divers et de définir le cadre de la thèse par rapport aux processus de conception de façon générale.

La conception en France comprend généralement trois macro-niveaux (Figure 1-1):

- Une phase d'études de faisabilité
- Une phase de conception détaillée
- La planification de la construction,

Les études de faisabilité du projet, se déclinent à travers la réalisation des études d'esquisse (ESQ), d'avant-projet (AVP) jusqu'au dépôt du permis de construire (PC). Depuis la Loi MOP, pendant l'étape d'ESQ l'architecte réalise une étude de faisabilité et conçoit une première visualisation du projet dans le site. Il réalise ainsi une première estimation des coûts et l'organisation des espaces dans le volume conçu. L'ESQ permet, donc, à l'architecte de fournir graphiquement une réponse à la MOA. Le rendu d'un ESQ comprend généralement : des documents graphiques (le plan masse, le plan de niveau, la coupe, l'organisation des façades, des perspectives, à l'échelle 1/500 ou 1/200) ; des pièces écrites (parti architectural, description générale et fonctionnement, matériaux, description technique, tableau de surface, estimation financière, planning) et une maquette. L'AVP représente, une fois l'ESQ validée, une description précise des différentes options retenues pour le projet du bâtiment. L'AVP comprend deux niveaux, l'Avant-projet Sommaire (APS) et l'Avant-projet Détaillé (APD). La documentation graphique de l'APS correspond à celle prévue par l'ESQ mais avec une échelle de 1/200 et 1/100. L'APD est explicité à travers les documents graphiques à l'échelle 1/100, les plans et les coupes techniques de principe. Les plans et coupes intérieurs du bâtiment doivent être assez précis pour montrer la conformité du bâtiment aux différents

règlements de sécurité. Les pièces écrites comprennent les notices techniques générales, le tableau des surfaces, l'estimation financière, le planning et une estimation du coût et de la durée des travaux avec une tolérance qui varie en fonction de la dimension du projet.

Pendant la phase de conception détaillée les plans sont mieux développés à travers le projet (PRO) et les bureaux d'études techniques conduisent en parallèle la mise au point des choix de conception. L'échelle de représentation des documents graphiques architecturaux est de 1/50, alors que les détails techniques sont représentés à l'échelle 1/20 ou 1/10. Les pièces écrites constitueront le Dossier de Consultation Entreprise (DCE).

La planification de la construction s'explique à travers la réalisation du Dossier de Consultation Entreprise (DCE) et la définition des plans d'exécution (EXE). Le DCE détaille l'ensemble des caractéristiques techniques et administratives et estime les budgets pour chaque composant. Les pièces écrites comprennent le Cahier des Clauses Techniques Particulières<sup>1</sup> (CCTP) établi par lot, le planning, le règlement de consultation, le Cahier des Clauses Administratives Particulières<sup>2</sup> (CCAP), la description générale du bâtiment et du planning, la notice sécurité handicapé et autres rapports suivant les diverses spécificités du projet. Cette étape permet de comprendre le cadre d'intervention de chaque entreprise et leur mise en relation avec la MOE et la MOA. Les études d'EXE peuvent être partiellement ou intégralement réalisées par les entreprises. Dans ce cas la MOE devra s'assurer que les documents précédemment établis dans le PRO soient respectés et leur délivrer le visa.

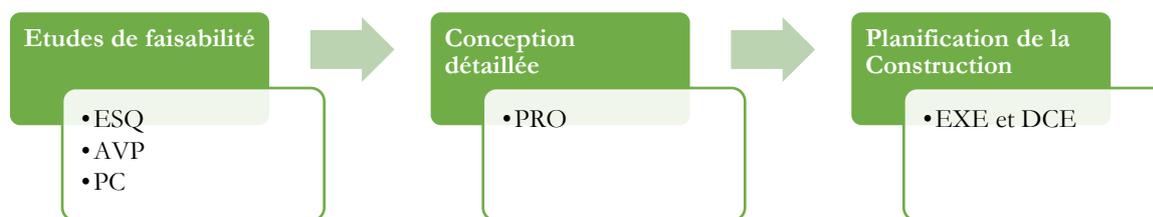


Figure 1-1 – Phases et étapes de conception en France (Bansac, 2017)

En fonction du type d'opération et de contrat, la conception peut être plus ou moins détaillée en phase d'avant-projet. Si, par exemple, en phase de concours il est demandé par le programme d'analyser plusieurs alternatives en justifiant les décisions prises concernant les matériaux ou les systèmes énergétiques, les évaluations, généralement réalisées dans les phases suivantes, devront être anticipées.

Dans le monde anglo-saxon, le RIBA<sup>3</sup> Plan of Work 2013 (RIBA, 2013) représente la référence pour l'organisation des phases du processus. Il définit 8 étapes du projet qui vont de la définition des stratégies (0 -*Strategic Definition*) jusqu'à l'exploitation (7-*In Use*) (Figure 1-2).

<sup>1</sup> Document contractuel qui rassemble les clauses techniques du marché. Il contient toutes les informations concernant les caractéristiques des travaux à effectuer en référence à la documentation graphique

<sup>2</sup> Document précisant les dispositions administratives du marché, comme les conditions d'exécution des prestations, de règlement, de vérification des prestations, de présentation des sous-traitants, etc.

<sup>3</sup> La Royal Institute of British Architects ou RIBA est un organisme professionnel pour les architectes au Royaume-Uni.

La conception se développe à partir des stratégies (*Strategic Definition*) et du programme (*Preparation and Brief*), jusqu'à la construction.



Figure 1-2 - Plan of Work proposé par le RIBA en 2013 (RIBA, 2013).

Les étapes de conception concernent :

- Le *Concept Design* (études d'avant-projet);
- Le *Developed Design* (design développé) ;
- Le *Technical Design* (design technique).

Concernant le premier niveau, il s'agit de la préparation d'une première esquisse, comprenant aussi les premières propositions pour la typologie structurale, les types d'équipements, ainsi qu'une évaluation préliminaire des coûts, et des directions principales du projet répondant au programme. C'est aussi le moment des négociations entre les parties prenantes afin de définir l'orientation stratégique du projet ;

Le *developed design* s'explique à travers la préparation d'un avant-projet plus détaillé, qui comprend la mise à jour des propositions et de l'analyse des coûts, toujours en accord avec le programme. C'est le moment du développement de l'esquisse initiale, avec l'organisation des espaces et des services. Cette phase peut prévoir un nombre plus ou moins important d'itérations et l'utilisation de plusieurs outils ;

Enfin, le dernier niveau représente un développement des spécifications techniques sur le plan architecturale, structurel et des équipements. Le niveau de détail dépend du contrat et des rôles des concepteurs ou des sous-traitants. Pendant cette étape est aussi demandé la réalisation et l'exploitation de la *Design Responsibility Matrix* (matrice des responsabilités). Cet outil permet de connaître et maîtriser les interfaces entre l'ensemble des professionnels qui prennent part à la réalisation de l'ouvrage.

Le Plan of Work du RIBA (RIBA, 2013) fournit des informations et des recommandations clés selon le type de contrat envisagé. Ce phasage est largement suivi et reconnu dans l'industrie de la construction anglaise, car sa définition se base sur les retours d'expérience des professionnels.

En Italie les divers niveaux de conception sont définis par un décret législatif équivalent à la « loi MOP ». Le dlgs 50/2016 (modifié par le dlgs 56/2017 pas encore en vigueur), autrement dit « *Codice Appalti* », définit le cadre législatif des travaux publics et prévoit trois niveaux de conception :

- Le *Progetto di fattibilità tecnica ed economica* (études de faisabilité technique et économique) ;
- Le *Progetto definitivo* (design définitif) ;
- Le *Progetto esecutivo* (design d'exécution).

Le premier niveau (études de faisabilité) permet de représenter les objectifs de la proposition architecturale en analysant toutes les alternatives possibles. Cela peut se faire en une ou deux phases. Le niveau de détail dépend de la taille et du type d'opération. Les contenus de ce document

concernent la localisation ; la description des solutions technologiques retenues, les équipements et le type de gestion ; les évaluations sur l'impact environnementale et sur le site, l'évaluation économique de l'intervention ; les divers types d'intervention ainsi que l'évaluation de la solution « zéro » de non intervention. Dans la deuxième phase les contenus sont développés pour l'alternative de conception choisie. Le projet est accompagné par un rapport général justifiant les choix réalisés par la MOE et un rapport technique dans lequel sont inclus les résultats et les diverses études techniques, comme le niveau de performance des composants et les consommations énergétiques estimées. Le décret établit la documentation graphique nécessaire et les modalités pour la rédaction du cadre économique. La passation du marché se base généralement sur le dernier niveau de conception. En cas de passation basée sur le projet de faisabilité, il est nécessaire de déclarer dans le projet les délais concernant la rédaction des autres deux niveaux de conception.

Sur la base des études de faisabilité, la deuxième étape (design définitif) concerne la détermination de l'ensemble des travaux à effectuer dans le respect des contraintes. Ce niveau contient tous les éléments nécessaires à l'obtention de l'ensemble des autorisations pour procéder à la réalisation de l'ouvrage. Dans cette phase, la documentation graphique et l'ensemble des calculs sont développés de façon détaillée afin d'empêcher des variations de coûts et techniques dans le suivant niveau de conception. Si la passation se base sur ce niveau de conception, le projet devra comprendre un premier brouillon du contrat de marché et du cahier des charges (« *capitolato speciale d'appalto* ») pour les entreprises, dans lequel l'ensemble des travaux et des composants sont listés et associés à un prix ; le plan de maintenance ; le plan d'installation du chantier ; l'ensemble des détails constructifs des interfaces architecturales et, éventuellement, de la conception structurale.

Le dernier niveau de conception (d'exécution) représente le développement de l'ingénierie de l'ensemble des travaux. Ce niveau de conception définit complètement l'ensemble des détails architecturaux, de la structure et des équipements. Les seuls éléments exclus concernent les détails relatifs à la phase de chantier (plan opérationnel de sécurité du chantier, calcul et conception des ouvrages provisoires de chantier).

Tout en considérant les spécificités caractérisant chaque opération, sur le plan de l'organisation générale, les trois modèles opérationnels (français, anglais et italien) se montrent plutôt similaires. Par contre, le contexte socio-culturel de chaque pays détermine une certaine subdivision et une spécification singulière dans les niveaux de conception. Il est possible de remarquer que les modèles anglo-saxon et italien fixent un cadre disciplinaire poussant à anticiper les évaluations, afin de justifier les choix techniques, en amont de la conception. En France, sauf en présence d'une précise spécification dans le programme, ou d'une mise en œuvre de bonnes pratiques de la part du concepteur, les choix techniques (comme par exemple les principes techniques de la structure, des équipements ou des interfaces techniques) sont formellement pris en compte et évalués plutôt en phase d'avant-projet détaillé. De même pour les évaluations des performances. Les divers rendus de la phase des études de faisabilité (ESQ, APS et APD), d'une part permettent de développer l'échange et d'enrichir petit à petit les informations concernant les caractéristiques de l'ouvrage, d'autre part, repoussent les responsabilités toujours à une étape suivante. Les décisions prises en phase d'esquisse seront peut-être vérifiées en phase d'APS ou d'APD et éventuellement modifiées tardivement.

D'autre part, en Italie la conception peut être réalisée à la fois par un architecte et par un ingénieur. En fonction du type de formation, les spécifications techniques s'enrichissent de façon plus ou

moins naturelle. Le niveau de spécification et la connaissance des composants peuvent donc comporter des différences opérationnelles vis-à-vis du cas français.

L'inclusion d'outils de gestion du processus de façon formelle, comme par exemple la matrice des responsabilités du RIBA ou les cahiers des clauses français, permet de discipliner le cadre de la réalisation et de la gestion du processus de construction. Par contre, il s'agit, à notre avis, d'outils mis en place trop tard dans la conception. Pour améliorer le processus cela devait se réaliser aussi en amont de la conception afin d'assurer que les choix effectués ne puissent pas être modifiés ultérieurement.

La réalisation des diverses évaluations pendant les étapes finales du processus de conception, permettant de vérifier les hypothèses établies, se traduit, d'une part en une majeure liberté pour le concepteur, mais d'autre part, cela comporte une vérification tardive des décisions, sur lesquels, en cas de non-respect de la performance, il faudra encore intervenir.

Il s'agit, donc, d'anticiper les choix afin de pouvoir vérifier préalablement les alternatives et améliorer la conception le plus tôt possible.

## 1.2. La problématique du pré-design : prise de décision et évaluation

Dans un processus conventionnel, comme représenté dans la Figure 1-3, avec l'avancement du projet, les décisions se clarifient vis-à-vis des stratégies, des aspects géométriques et d'organisation interne et enfin, des matériaux, des composants techniques et des équipements (Struck & Hensen, 2007). L'incertitude qui caractérise le début de la conception se réduit grâce à la prise de décision.

Pourtant, les décisions prises dans les premières phases du projet de construction établissent les principes de fonctionnement de l'ouvrage et constituent des contraintes pour les étapes suivantes.

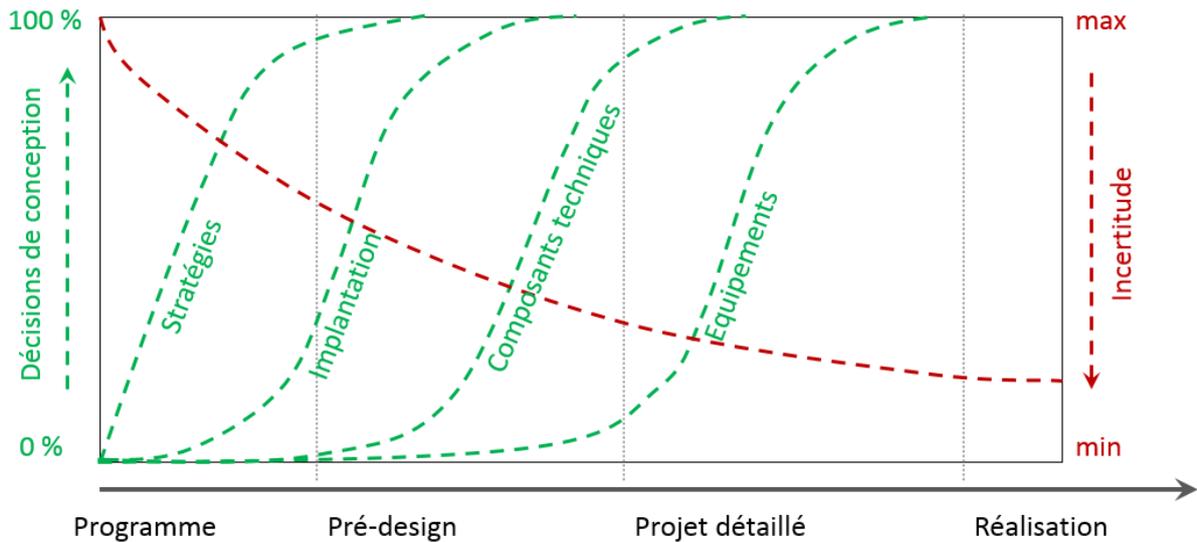


Figure 1-3 - Prise de décision dans un processus de conception traditionnel, adapté depuis (Struck & Hensen, 2007)

Le début de la conception représente une phase caractérisée par l'itération et la négociation entre plusieurs domaines (par exemple énergétique, environnemental, faisabilité technique, économique). Le concepteur se trouve, très souvent, à décrypter les spécifications fournies par le programme, se basant sur le respect des exigences d'usage. Selon le niveau de détail des informations fournies par le programme, à la fin de l'étape d'esquisse ou d'avant-projet sommaire, la MOE propose des alternatives en effectuant un choix sur les solutions techniques, qui, dans leur ensemble, devront respecter les diverses exigences en même temps. Ces choix peuvent se justifier à travers le retour d'expérience et à travers l'analyse de la solution même, vis-à-vis des contraintes de projet.

La prise de décision et les évaluations conséquentes, permettent donc, de réduire l'incertitude due au manque d'information de la conception. Dans ce cadre, nous définissons le pré-design comme la phase initiale de la conception, c'est à dire l'ensemble de la phase d'esquisse (ESQ) et de l'avant-projet sommaire (APS). Nous préférons nous référer au pré-design plutôt qu'à une de ses étapes spécifiques car les informations livrées en ESQ ou en APS peuvent varier d'un cas à l'autre. Il s'agit donc de considérer cette phase initiale de façon générale comme une phase caractérisée par un niveau d'incertitude élevé.

Dans la littérature internationale le terme pré-design est plutôt associé à la phase de programmation. Ce que nous considérons comme le pré-design correspond à l'*early-design stage* international. Le *early-design stage* comprend deux phases (Østergård, et al., 2016) :

- le *conceptual design*, c'est à dire l'Esquisse, et
- le *preliminary design*, Avant-Projet, dans laquelle, même si la conception reste schématique, le concepteur a intégré une première estimation quantitative des composants.

Les choix effectués en pré-design ont un impact sur la performance globale finale du bâtiment.

Dans ce cadre, Van Moeseke (Van Moeseke, et al., 2012), souligne le lien entre les décisions prises tout au long du cycle de vie du bâtiment et les impacts qu'elles ont du point de vue énergétique (Tableau 1-1). Pour l'auteur les phases les plus importantes sont l'esquisse et l'avant-projet, c'est-à-dire le pré-design. Les choix opérés en ESQ, ayant un impact sur l'efficacité énergétique, concernent l'implantation, la volumétrie et la distribution interne. Ces choix ont un impact sur le potentiel concernant les stratégies de conception passive (compacité, ventilation naturelle et éclairage naturel). En phase de AVP les choix concernent généralement les systèmes techniques et les modes constructifs. Les choix opérés en phase de AVP auront un impact sur les performances des composants d'enveloppe et sur la performance des équipements techniques et énergétiques. Dans les deux cas, un manque d'engagement vis-à-vis de la spécification et des évaluations peut impacter négativement le résultat global du projet en termes de potentiel recours à systèmes de production d'énergie renouvelable (ER), ainsi que concernant leur dimensionnement.

Tableau 1-1 - Etapes de conception et impacts énergétiques (Van Moeseke, et al., 2012)

Décision	Impact sur la production ER	Impact sur la consommation globale théorique énergie primaire
<b>ESQ</b>		
Implantation et volumétrie	Potentiel ER	Compacité, ouverture solaire, ventilation naturelle, lumière naturelle
Distribution interne des espaces		
<b>AVP</b>		
Choix des modes constructifs		Performances de l'enveloppe
Choix des systèmes techniques (énergétiques et flux)	Capacité production ER	Complémentarité aux forces naturelles Performance intrinsèque des techniques Type d'énergie utilisée

C'est pendant le pré-design que le concepteur définit les stratégies du projet. Le pré-design représente ainsi le moment dans lequel il est nécessaire de s'interroger sur l'intégration de l'innovation technologique dans le projet.

Des exemples très connus démontrent la nécessité de la prise en compte de l'innovation technologique dès le début de la conception avec toutes les problématiques qu'elle peut comporter.

Le projet de la BNF (1989) de l'architecte Dominique Perrault à Paris (Figure 1-4), prévoyait initialement, lors du concours, l'utilisation des verres photochromiques en façade, capables de changer leur teinte selon la quantité des rayons UV. Un an après avoir gagné le concours, pour un problème de production et surtout de coût, cette solution n'a pas été retenue. Afin de sauvegarder les ouvrages du soleil, elle a été remplacée par une façade vitrée couplée à des panneaux d'occultation en bois. La nouvelle solution répond effectivement à l'exigence de protection des ouvrages, mais elle empêche complètement la vue à l'extérieur et l'accès à la lumière naturelle. Sur le plan architectural, le bâtiment perd la transparence et l'accès visuel aux ouvrages qui avait caractérisé la maquette de la proposition initiale (Stasse, 2002).



Figure 1-4 – L’esplanade de la BNF vue d’une tour (source : © Éric Sempé / BnF)

Dans le projet de l’Institut du Monde Arabe à Paris, proposé par un collectif d’architectes et inauguré en 1987 (Figure 1-5), l’élément caractérisant l’ouvrage était la façade sud intégrant des modules de protection solaires inspirés des motifs orientaux, les moucharabiehs. Ces éléments avaient été conçus de façon à limiter les apports solaires à l’aide d’un mécanisme hydraulique automatisé couplé à une sonde photo-électrique située sur le toit<sup>4</sup>. Par contre, dans les premiers 5 ans d’utilisation du bâtiment les modules sont progressivement tombés en panne un par un, jusqu’au dysfonctionnement global de la façade. En 2015, la société Spectat, spécialiste en ingénierie mécanique a été chargée d’analyser les moucharabiehs concernant leur géométrie, leur pilotage et les causes de dégradation afin d’estimer les actions et le budget de rénovation. A distance de plusieurs années, donc, la façade récupère les fonctions initialement prévues grâce au remplacement de l’ensemble des panneaux.



Figure 1-5 – Vue de la façade sud de l’Institut du Monde Arabe (source : © IMA / Fessy)

Un dernier exemple, plus récent, est fourni par le projet des Al Bahar Towers à Abu Dhabi, achevé en 2012. La double peau en façade est constituée extérieurement par un système occultant qui rappelle les troncs de palmiers ou la peau d’un ananas. Le même système a été conçu de façon à

---

<sup>4</sup> Depuis enregistrement téléphonique comme décrit dans le document disponible au lien : [http://alto-ingenierie.fr/images/Communication/Newsletter/avril\\_2015/2015\\_mai\\_apd\\_ima\\_moucharabieh.pdf](http://alto-ingenierie.fr/images/Communication/Newsletter/avril_2015/2015_mai_apd_ima_moucharabieh.pdf)

pouvoir tourner ou activer certains de ses éléments en fonction de la position du soleil. Comme montré dans la Figure 1-6, les éléments de protections solaires demeurent activés dans la zone ensoleillée, différemment des éléments à l'ombre.



Figure 1-6 – Vue de la façade adaptative des Al Bahar Towers (©Ziad Kteich)

Dans son étude, Attia (Attia, 2017) constate que l'utilisation des moucharabihs n'avait aucune justification du point de vue de la performance environnementale du projet. En effet, le client n'a pas pris en compte la consommation énergétique et la satisfaction des occupants dès le début de la conception. Une demande énergétique plus importante a donc déterminé une perte dans les fonctions des moucharabihs qui ne respectent pas l'atteinte vis-à-vis de la soutenabilité. Dans ce cas, la fonction esthétique a donc pris le relais sur les enjeux énergétiques et environnementaux. Cela représente une occasion manquée pour une utilisation efficace de l'innovation technologique. Dans le même projet, l'équipe de conception s'est trouvée face aux difficultés d'intégration d'une solution non standard. Cela a porté une augmentation des coûts et, pour le respect du budget, à la réalisation d'un commissionnement sous-payé différent de celui établi (Attia, 2017).

Ces exemples nous montrent comment les solutions technologiques innovantes nécessitent la mise en place de nouveaux protocoles et processus d'évaluation afin d'être plus facilement maîtrisées et intégrées dans la conception. D'autre part il est nécessaire d'avoir un regard attentif quant aux choix techniques sur la performance globale du bâtiment et du processus.

L'évaluation de la performance, permet de rassurer le déroulement du processus de conception et de valider les choix effectués. Dans le cadre de la performance énergétique, par exemple, Morbitzer (Morbitzer, 2003) considère les phases de ESQ et d'AVP comme celles dans lesquelles la simulation énergétique peut apporter une contribution positive à la conception. L'auteur détermine les paramètres nécessaires pour l'évaluation de la performance à travers des outils de simulation. Il

distingue les paramètres fixés par le concepteur et les paramètres évalués. Initialement les choix doivent se réaliser par rapport au site, à l'usage et aux conditions climatiques. L'évaluation se fait à travers une première estimation des paramètres qui seront mieux définis dans les phases suivantes. Le Tableau 1-2 met en évidence les divers paramètres (fixés ou évalués) en fonction de l'étape d'avancement de conception. Le non-respect des niveaux de performance permettra un réajustement des paramètres fixés.

Tableau 1-2 – Paramètres qu'il faut déterminer dans les étapes de ESQ et AP nécessaires pour l'utilisation d'outils de simulation (Morbitzner, 2003)

Etape	Paramètres fixés	Paramètres évalués
ESQ		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Orientation (estimation);</li> <li>- Isolation de l'enveloppe et des vitrages ;</li> <li>- Inertie (estimation);</li> <li>- Espaces destinés aux fonctions d'usage ;</li> <li>- Surface vitrée (estimation) ;</li> <li>- Contrôle solaire (estimation) ;</li> <li>- Air change rate (estimation) ;</li> <li>- Épaisseur du bâtiment;</li> <li>- Type d'énergie utilisée.</li> </ul>
AVP	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Forme du bâtiment ;</li> <li>- Orientation du bâtiment ;</li> <li>- Isolation et inertie ;</li> <li>- Attribution des zones du bâtiment selon l'usage ;</li> <li>- Dimension des fenêtres pour chaque orientation ;</li> <li>- Exigence de contrôle solaire ;</li> <li>- Exigence de ventilation en été ;</li> <li>- Type d'énergie utilisée</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Vitrages (analyse détaillée);</li> <li>- Type de vitrage, de protection solaire et de contrôle ;</li> <li>- Orientation (ajustements);</li> <li>- Air change rate (analyse détaillée);</li> <li>- Modifications dans les zones en surchauffe ;</li> <li>- Utilisation de l'éclairage artificiel, naturel et confort visuel</li> <li>- Demande de froid (oui/non ?)</li> </ul>

Les divers paramètres concernent des spécifications relatives à l'ensemble des sous-systèmes techniques (enveloppe, équipements techniques, structure etc.), et c'est à partir de ces éléments qu'il faut accompagner le concepteur à travers une démarche permettant d'intégrer la performance dès le début de la conception.

Accompagner le concepteur signifie lui fournir les connaissances et le retour d'expérience nécessaires à prévenir toute sorte de risque d'incohérence dans le choix des principes techniques. Il s'agit donc d'anticiper les réflexions et les efforts concernant la prise en compte des étapes suivant la phase de conception (réalisation exploitation et fin de vie) et de leur lien avec les solutions techniques envisagées.

### 1.3. Les démarches permettant l'anticipation des efforts : le processus Intégré et la discipline de Constructibilité

Une grande partie des opérations constructives se basent sur des démarches que l'on peut définir comme conventionnelles. Un processus de construction conventionnel est caractérisé par un modèle organisationnel linéaire, dans lequel les acteurs travaillent en synergie mais de façon séquentielle dans les diverses étapes de la construction, comme représenté dans la Figure 1-7.

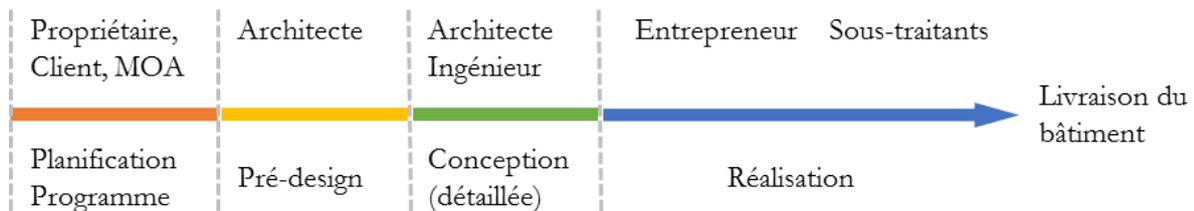


Figure 1-7 – Schéma d'organisation d'un processus de construction conventionnel

Ce type d'approche peut conduire très souvent à l'incompréhension entre les acteurs, à des situations de conflit et à la divergence entre les objectifs personnels de chaque acteur. Cela comporte des changements en cours de route du projet qui, finalement, par manque de temps et/ou de ressources, voit sa performance se dégrader. Il est donc nécessaire d'intervenir en amont en spécifiant et en justifiant les choix réalisés le plus tôt possible. Plusieurs approches et outils sont mis en place pour la résolution des problèmes propres aux démarches conventionnelles, comme par exemple le BIM<sup>5</sup>, qui rentre de plus en plus dans le cadre législatif des divers pays comme une obligation, ou les démarches de travail collaboratif. Dans ce cas, la synergie entre les acteurs s'explique dès le début du processus et continue tout au long du développement du projet (Figure 1-8).

L'échange et la participation des divers acteurs est donc essentielle pour la bonne réussite du projet.

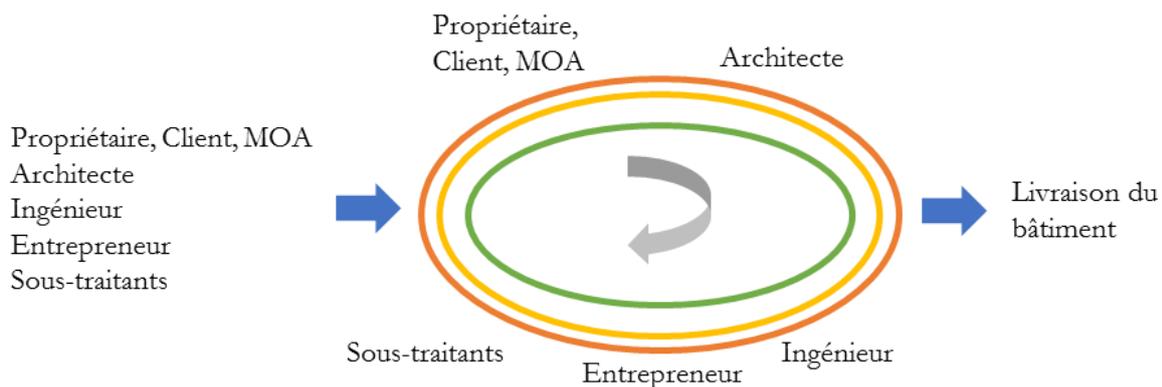


Figure 1-8 - Schéma d'organisation d'un processus de construction collaboratif

L'anticipation des efforts et de la prise de décision dans le processus de construction sont à la base des approches de conception plus collaboratifs comme le processus de conception intégré (PCI) et, plus généralement de la discipline de la constructibilité. La démarche constructibilité peut être

<sup>5</sup> Building Information Modeling, processus de structuration, d'organisation et visualisation de la donnée dans le cadre des projets de construction

mise en place en actant un processus de conception intégré, ou plus simplement à travers l'intégration des connaissances concernant les constructions, des expertises et des retours d'expérience, dès le début de la conception.

Dans ce paragraphe le concept du processus de conception intégré est traité à travers l'explication de l'approche, de ses principes ainsi que sur les obstacles liés à la mise en place. Ensuite le concept et les principes de la *constructability* sont présentés. Il est important de remarquer que la notion de *constructability*, comme nous le verrons dans le paragraphe §1.3.3, se différencie du concept français de constructibilité. Ce dernier peut être traduit en anglais comme *constructibility*<sup>6</sup>. Tout au long du chapitre, nous allons, donc, garder le mot en anglais *constructability* pour décrire les démarches internationales et nous proposons une nouvelle vision et une nouvelle démarche, incluant aussi d'autres défis, pour le développement de ce concept en France.

### 1.3.1. Le Processus de Conception Intégré

Parmi les modèles organisationnels recensés qui permettent d'intervenir sur la linéarité du processus de construction, le plus connu au niveau international est peut-être le Processus de Conception Intégré (PCI). Le PCI, né dans les années 90 en Canada, prévoit un modèle organisationnel synergique dans lequel tous les acteurs participent activement dès le début de la conception. Ce dernier, se base sur une vision partagée et une compréhension holistique du projet (Busby Perkins & Will and Stantec Consulting, 2007).

Contrairement au processus conventionnel, dans le PCI les opérations des diverses parties prenantes s'influencent réciproquement et déterminent les choix ainsi qu'un échange proactif. Il s'agit donc d'un processus itératif dans lequel une équipe pluridisciplinaire collabore afin de mettre en place un processus participatif de façon à tenir compte des niveaux de performance économique, fonctionnelle et esthétique à atteindre.

L'adoption d'un modèle dans lequel les efforts sont anticipés le plus tôt possible à travers le partage des connaissances aurait ses avantages. La Figure 1-9, dite aussi courbe de MacLeamy (MacLeamy, 2004), illustre l'effet d'un changement de pratique. Cette représentation met en relation les étapes du processus de construction et les efforts réalisables par l'ensemble des acteurs. Les effets sur les coûts se réduisent en passant d'une approche traditionnelle (courbe 3 dans la figure), où les décisions sont prises dans les dernières phases du processus, à une approche innovante (courbe 4) où les actions sont réalisées en amont. En réalisant ce passage, l'effort maximal se fait dans une étape où la capacité à impacter sur la maîtrise des coûts (courbe 1) est encore élevée et où les coûts associés aux changements (courbe 2) ne sont pas trop importants.

Les avantages concernant l'utilisation de cette démarche sont documentés par la Roadmap sur le PCI (Busby Perkins & Will and Stantec Consulting, 2007). Parmi les exemples reportés dans ce rapport concernant l'application d'une approche de conception intégrée en phase de pré-design, nous retrouvons la conception de la *City of white rock operations building* (livré en 2003). La mise en place d'un PCI, a permis de déterminer une série de stratégies innovantes pour la réduction de l'utilisation d'eau in situ d'environ 90%, une réduction de la consommation d'eau du bâtiment d'au

---

<sup>6</sup> En anglais ce terme est souvent considéré un synonyme de *constructability* et il est moins utilisé. En considérant deux significations différentes, nous faisons une distinction entre la *constructability* et constructibilité (*constructibility*)

moins 30% et une réduction de la consommation d'énergie de 60% de mieux que celui exigé par le Code National de l'Énergie du Canada.

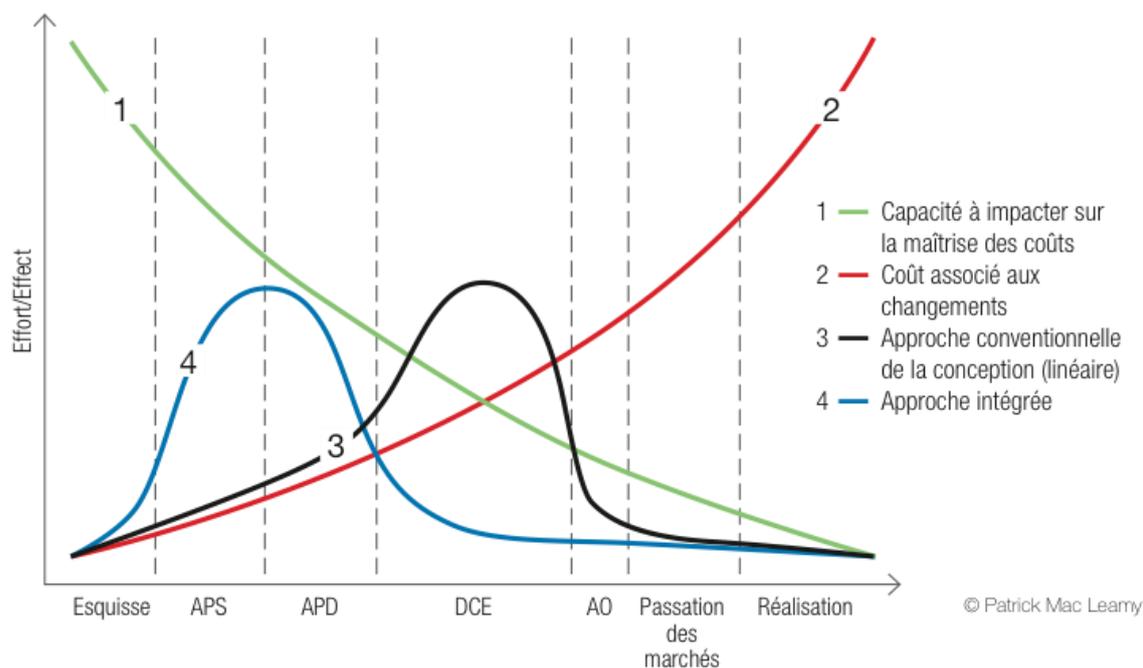


Figure 1-9 - Comparaison entre une approche conventionnelle et une approche intégrée (MacLeamy, 2004).

Un autre exemple est représenté par le centre médical de l'Université de Victoria (terminé en 2006). Cet ouvrage a été réalisé à travers un PCI visant à optimiser l'interface entre l'architecture et les équipements techniques. L'intégration des équipements dans la structure permet une flexibilité des espaces, ce qui donne aux usagers la possibilité d'apporter des changements de configuration à coûts et délais limités (Busby Perkins & Will and Stantec Consulting, 2007).

La mise en place du PCI n'est pas toujours aisée, c'est pourquoi les agences d'architecture qui l'adoptent ne sont pas nombreuses (Busby Perkins & Will and Stantec Consulting, 2007). En général, les agences d'architecture préfèrent une approche conventionnelle qui leur est plus familière et qu'elles maîtrisent mieux.

Les principales barrières d'application d'un PCI concernent :

- La résistance à l'innovation : l'industrie de la construction accepte lentement les changements de pratique pour ne pas risquer de prendre un parcours inconnu ;
- Le timing : très souvent la conception est réalisée dans une petite plage de temps et de façon rapide. Cela comporte de renvoyer toute sorte d'évaluation après le concours, quand par contre, c'est déjà trop tard ;
- Les divergences dans l'équipe de conception : la collaboration entre les diverses parties prenantes peut être mise en danger si les objectifs des participants demeurent contradictoires ;
- La priorité des compétences : chaque acteur considère son domaine prioritaire par rapport aux autres, cela comporte une situation de conflit s'il n'y a pas de médiation et de compréhension pour aboutir à un objectif commun

D'un point de vue pratique, la synergie dans le processus s'est traduite, de façon sans doute trop simpliste, en une interopérabilité des modèles numériques. L'utilisation d'outils BIM comporte la définition d'un modèle virtuel incluant des informations et des données concernant les matériaux et les composants du bâtiment. Le BIM est utilisé pour plusieurs types d'applications, comme par exemple : pour visualiser le projet à travers une maquette virtuelle qui peut être partagée entre divers utilisateurs ; pour réaliser un contrôle de la qualité des documents techniques ; pour la gestion des interfaces entre la conception architecturale et technique ; pour réaliser des modèles 4D ou 5D intégrant la dimension du temps, à travers le planning des opérations de chantier et la dimension économique.

Il faut par contre toujours considérer que le BIM est un outil qui montre son potentiel dans les étapes avancées de la conception, quand les composants sont déjà figés. D'autre part, il peut se montrer limité par rapport au type d'interopérabilité (Negendahl, 2015).

### 1.3.2. « Les définitions » de constructibilité à l'international et les retours d'expérience

Pour maîtriser les risques de changement de la performance et donner une réponse concrète à l'industrie de la construction, la discipline de la *Constructibilité* propose des méthodes et des démarches innovantes.

Ce concept tient ses racines des termes anglais « *Buildability* » et « *Constructability* ».

Parfois, ces deux termes sont confondus en considérant que *buildability* est le terme utilisé par les anglo-saxons et *constructability* le terme plutôt employé par les Américains.

En réalité les deux définitions sont différentes. Kifokeris et Xenidis (Kifokeris & Xenidis, 2017) proposent un état de l'art assez exhaustif des travaux intégrant ces deux concepts et en clarifient le cadre d'application.

La *buildability* représentait, dans sa définition des années '60 fournie par le *Construction Industry Research and Information Association* (CIRIA, 1983), l'effort accompli en phase de conception à travers la prise en compte des étapes de réalisation. Ce concept est lié à la qualité du produit, à la facilité de mise en œuvre et à l'efficacité et à la rentabilité de la construction.

Plus tard, l'exigence de prendre en compte l'ensemble du cycle de vie du bâtiment, a porté à la définition de *constructability*. Comme défini par le *Construction Industry Institut CII*, elle est « l'utilisation optimale des connaissances et des expériences pendant les différentes phases du projet pour atteindre les objectifs fixés » (CII, 1986). Dans les années suivantes, la même notion a été présentée avec des définitions analogues. Le *Construction Industry Institut of Australia, CIIA*, plus tard, la définit comme « l'intégration des connaissances de la construction dans la livraison du projet permettant de balancer les diverses contraintes, afin d'atteindre les objectifs du projet et un niveau de performance optimale du bâtiment. (CIIA, 1993).

Dans les recherches développées dans les années suivantes, les deux termes ont été souvent utilisés de façon interchangeable. Cela a porté à une confusion en termes de recherches et outils développés (Kifokeris & Xenidis, 2017).

Dans les années 2000 certaines études (Nima, et al., 2001) ont établi la différence de domaine d'intervention des deux notions. La *constructability* est un concept de recherche incluant la branche

pratique de la *buildability* pour ce qui concerne une étape du processus (prise en compte de la réalisation en conception) (Figure 1-10).

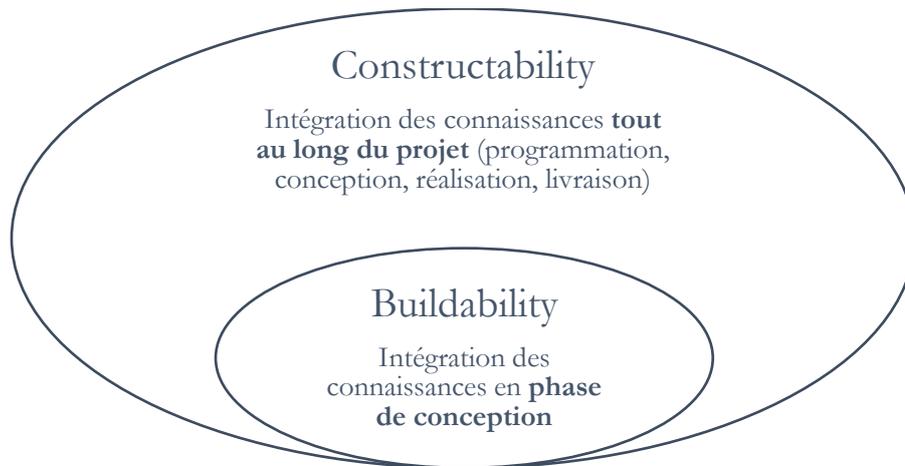


Figure 1-10 – Relation entre *constructability* et *buildability*

Le CII présente la *constructability* comme une des meilleures pratiques à mettre en place en phase de planification et de conception pour la réalisation de projets de qualité. Selon le rapport rédigé par le CII qui rassemble les bonnes pratiques et leurs retours d'expérience (CII, 2012), les bénéfices dans l'utilisation de cette pratique concernent :

- la réduction des coûts des opérations d'environ le 4,3 % en moyenne ;
- la réduction du planning, et donc de la durée des opérations, d'environ 7,5 % ;
- une amélioration de la sécurité et de la sûreté du projet et des impacts environnementaux ;
- une augmentation de la qualité du projet ;
- une amélioration des rapports des équipes de projet ;
- une minimisation des changements en termes de choix ou de planning ;
- une amélioration dans la progression des travaux ;
- des résultats (une base de données) exploitables dans d'autres opérations.

Les avantages dans l'application de la pratique sont ainsi montrés dans l'étude portée par Yitmen et Akyel (Yitmen & Akyel, 2005). Les auteurs s'interrogent sur les défis et les opportunités dans la prise en compte de la *constructability* dans l'industrie de la construction des pays en développement. La mise en place des approches visant à la *constructability* permet une optimisation des coûts, de la sécurité et de la qualité de l'ouvrage et une minimisation des interférences dans les opérations de chantier. Ils constatent, ainsi, que l'intégration des concepts relatifs à cette pratique (qui seront mieux développés dans le chapitre 2), en amont de la conception, a une importance très élevée pour le bon déroulement du processus.

### 1.3.3. La constructibilité en France

Bien qu'au niveau international la *constructability* est, comme nous l'avons vu, considérée comme un des aspects dont il faut tenir compte en phase de conception, le terme constructibilité en France n'est pas vraiment connu pour être une discipline. Les définitions données par le dictionnaire Larousse sont :

- *État d'un terrain constructible.*
- *Possibilité, formulée à l'aide d'hypothèses, d'énoncer un système logique recevable.*

Créé en 2009, l'Institut de Recherche en Constructibilité (IRC) de l'Ecole Spéciale des Travaux Publics (ESTP) de Paris, développe l'ensemble de ses thématiques de recherche autour de la constructibilité. La constructibilité a été définie par l'IRC comme (Gobin, 2010) :

*« Une démarche qui vise à fournir, dès le lancement du projet, une assurance raisonnée quant à l'atteinte des objectifs de tout projet de construction sur son cycle de vie ».*

La constructibilité comme discipline n'est pas une notion que le secteur de la construction française a intégrée de façon structurée. Ce terme rencontre une résistance à l'adoption de la part des professionnels parce que, substantiellement il n'est pas officiellement utilisé. Les démarches visant à améliorer le processus sont effectivement mises en place, mais elles ne sont pas englobées formellement. Par exemple, la conception réalisée sur la base de la démarche HQE (qui sera présentée dans le prochain chapitre) permet déjà de prendre en compte et de maîtriser certaines des problématiques relatives à la performance du produit dans son cycle de vie. A notre avis, ce qui manque est, par contre, un cadre plus structuré permettant de prendre en compte à la fois les performances du produit et le processus dans lequel plusieurs acteurs vont se confronter.

La constructibilité, comme définie par l'IRC se rapproche plutôt à la *constructability* définie par le Construction Industry Institut of Australia (CIIA) (CIIA, 1993). Si en terme de définition les deux approches peuvent se rassembler, les différences s'observent sur le plan méthodologique. L'attention du CIIA est plutôt focalisée sur le processus et le bon enchaînement des diverses étapes, alors que la constructibilité, comme traitée par l'IRC, insiste à la fois sur le processus et sur la performance du produit, car l'un ne peut pas faire abstraction de l'autre. Son objectif est d'assurer les performances d'usage attendues par les utilisateurs finaux (performance du produit), et de garantir la performance du processus tout au long du cycle de vie.

La constructibilité s'alimente, comme la *constructability*, de méthodes et approches qui concernent à la fois la performance, la gestion des risques et la garantie du processus et du résultat. Le regard est tourné à la fois sur l'ouvrage à réaliser et sur le processus de sa réalisation. L'anticipation des efforts et le partage de la connaissance en amont de la conception demeurent à la base de la démarche pour « mieux faire » et aboutir à un bon résultat en termes de délais, de coût et de qualité.

Les méthodologies intégrant la constructibilité représentent un lien entre les intérêts de l'industrie de la construction et la recherche multidisciplinaire et appliquée. C'est pourquoi elle se rapproche aux disciplines plutôt utilisées dans l'industrie comme l'analyse fonctionnelle et les approches systémiques (qui seront mieux développées dans le chapitre 2), pour les intégrer dans le secteur de la construction. Ces types d'approches permettent de modéliser les systèmes comme ensemble de sous-systèmes, composants, éléments, entre lesquels existent des interrelations. L'IRC propose

d'exploiter l'approche à la fois pour la modélisation du produit, c'est-à-dire de l'ouvrage, et pour le processus de construction. Dans ce cadre on retrouve une distinction entre :

- 1) le système « pour faire », qui est l'ensemble des moyens techniques et humains nécessaire pour le déroulement du projet et
- 2) le système « à faire », représentant le système à réaliser, c'est-à-dire l'ouvrage.

La constructibilité consiste donc à prévenir les impacts potentiels du système « pour faire » sur le système « à faire ». La définition des critères de constructibilité, à différents niveaux systémiques, doit permettre de prendre en compte les effets non désirables du projet sur le produit (bâtiment ou infrastructure). Il s'agit, donc, de modéliser les impacts entre les deux systèmes pour pouvoir efficacement élaborer des stratégies d'intervention.

Dans ce contexte Gobin (Gobin, 2017a) clarifie ce qu'est le concept de constructibilité en France en soulignant les traits de son caractère et le lien avec les démarches et les recommandations actuellement utilisées comme moyens pour une bonne réussite du processus de construction.

## Conclusions du chapitre 1 et définition de la problématique et des objectifs de thèse

Le cycle de vie du bâtiment est caractérisé par l'interaction de plusieurs interlocuteurs et par l'enchaînement de diverses étapes et livrables. La clarification du cycle de vie du bâtiment nous a permis d'introduire la notion de pré-design. Le pré-design est donc défini comme le début de la conception, incluant les phases d'esquisse et d'avant-projet. Son importance est justifiée par l'ensemble des choix de conception qui représentent la définition stratégique du projet et qui limitent la liberté d'action des étapes suivantes. De même, des exemples très connus nous prouvent que les choix relatifs à l'innovation technologique doivent se réaliser le plus tôt possible à travers des évaluations multicritères. Cela permet de pouvoir préalablement définir les compétences requises et les éventuels risques que l'innovation comporte dans les étapes suivantes du pré-design.

Les choix, si pris de façon responsable en amont de la conception, peuvent déterminer la bonne réussite de ce processus complexe. L'évolution de la démarche se fait en anticipant les choix et en les justifiant à travers les méthodes d'évaluation et en mettant en place des outils de gestion.

Dans ce contexte, deux des approches qui nous paraissent pouvoir répondre à ces défis sont le processus de conception intégré et la constructibilité. Plus précisément, la constructibilité, en posant les problématiques relatives à la fois à l'efficacité du processus et à l'efficacité du résultat du produit, permet une réflexion qui ne se fonde pas seulement sur la simple productivité en phase de production de l'ouvrage. Elle interroge aussi le domaine de la performance globale, vue comme respect des diverses exigences d'usage. L'anticipation des choix et des évaluations demeure donc, à la base d'un processus amélioré. Cependant, l'introduction de la constructibilité dans la phase de conception demande encore un effort de compréhension (du concept) et une réflexion quant aux outils à mettre en place.

Si le processus de conception intégré se montre encore difficilement praticable à cause d'une résistance culturelle, il faut, donc, fournir au concepteur les outils nécessaires lui permettant un

accès à l'information, à la connaissance et un accompagnement méthodologique pour la prise en compte des technologies traditionnelles et innovantes.

De plus, l'intervention doit se réaliser en pré-design, car ce moment détermine les stratégies de réponse au cahier des charges et, en même temps, il constituera un cadre de contraintes pour les étapes futures.

Ce travail de thèse a l'objectif principal de proposer une méthode capable d'accompagner le choix du concepteur et d'évaluer la performance globale d'un projet en phase de pré-design.

La méthode devra permettre une analyse de la solution proposée, selon les divers aspects caractérisant le projet. Dans ce cadre, afin d'avancer sereinement dans la conception, le projet en phase de pré-design nécessite d'être analysé du point de vue des moyens disponibles, de la mise en œuvre des composants techniques (et donc des procédés constructifs), ainsi que du comportement global du bâtiment en phase d'exploitation.

Sur la base des constats précédemment exposés, il a, donc, été possible de formuler la question définissant la problématique de cette thèse :

*Comment permettre l'évaluation et accompagner les choix réalisés en pré-design, afin d'obtenir une solution pertinente et robuste vis-à-vis de sa réalisation et des exigences du programme ?*

Le cadre d'analyse porte, donc, sur la pertinence et la robustesse vis-à-vis des exigences exprimées du projet en phase de pré-design. Pour répondre à la question posée nous nous baserons sur la discipline de la constructibilité. En suivant la définition donnée par l'IRC, la méthode d'évaluation constituera aussi un cadre applicatif de cette discipline.

L'analyse de principes caractérisant la *constructability*, qui pour nous représente une constructibilité « technique », et qui vise à optimiser la productivité en phase de chantier, nous permettra d'alimenter le cadre d'évaluation du point de vue de la faisabilité pratique. D'autre part, la vérification des performances en phase d'exploitation, nécessitent une réflexion et une analyse des méthodes et des outils permettant l'évaluation de la performance et l'accompagnement en pré-design.

C'est pourquoi dans le chapitre suivant, constituant le corpus de l'état de l'art, nous analyserons les diverses méthodes d'évaluation et d'accompagnement liées à la constructibilité et à la performance globale du bâtiment. Cette analyse nous permettra de comprendre les limites et le potentiel de chaque méthode et outil, et de proposer, par conséquence notre méthode d'évaluation.

## Chapitre 2 : Les bases pour la proposition d'une nouvelle méthode d'évaluation

Le présent chapitre expose une analyse des méthodes et des outils existants se basant sur la constructibilité et facilitant une conception se basant sur la performance. L'objectif étant d'analyser les limites et le potentiel des méthodes actuelles afin de proposer une nouvelle méthode. Les méthodes concernent à la fois la performance du système « à faire » (ou système technique) et les bonnes pratiques à mettre en place pour maîtriser le système « pour faire » (conception).

Le premier paragraphe se concentre sur l'approche performancielle de façon générale, comme démarche théorique permettant d'introduire la performance dans la conception. La mise en place de cette approche permet d'établir, à tout moment, si les solutions techniques proposées en pré-design sont pertinentes et robustes vis-à-vis des exigences du programme.

La prise en compte de la constructibilité en phase de pré-design demande l'analyse des principes sur lesquels elle repose. Ces principes et les concepts qui les caractérisent sont, donc, exposés dans le paragraphe suivant. Les méthodes, les plus utilisées, pour mettre en place les bonnes pratiques sont également présentées.

Dans ce cas nous distinguons :

- 1) Les outils basés sur la connaissance ;
- 2) Les évaluations quantitatives de la conception ;
- 3) La révision de constructibilité.

Le troisième paragraphe présente une classification et une liste des outils les plus utilisés pour supporter la phase de pré-design.

Dans ce cadre nous distinguons trois familles :

- 1) Les outils fournissant des recommandations ;
- 2) Les outils d'évaluation (outils de simulation) ;
- 3) Les outils de classification à travers un score global (labels HQE, LEED et BREEAM).

Comme déjà précédemment dit, la nouvelle méthode demeure multicritère et elle sera utilisée d'une part pour le contrôle de la pertinence du pré-design et, d'autre part comme un support aux choix entre plusieurs solutions technologiques. C'est pourquoi le paragraphe §2.4 présente une revue des méthodes de prise de décision les plus utilisées dans le cadre de la conception des ouvrages. Notre analyse se concentrera ensuite plus précisément sur les méthodes mises en place pour le choix relatif à un des sous-systèmes techniques composant le bâtiment, plus précisément, les solutions d'enveloppe du bâtiment.

Dans le dernier paragraphe du chapitre 2 nous exposons une synthèse des connaissances acquises à travers l'état de l'art et les bases de la formulation de notre méthode d'évaluation.

## 2.1. L'approche performancielle et sa mise en place

Garantir la performance signifie l'intégrer dans la conception le plus tôt possible et assurer son maintien tout au long de l'avancement du processus. L'approche performancielle permet de réaliser une démarche « basée sur ce qu'un bâtiment (ou un composant) est tenu à faire et non sur la prescription du comment il doit être réalisé » (Gibson, 1982).

Entre le 2001 et le 2005, le projet européen PeBBu (*Performance Based Building*) a été mis en place pour l'exploration du concept de performance et pour comprendre comment il est intégré dans le secteur de la construction. Le rapport final du projet présente le cadre général de l'approche performancielle. La différence avec une approche traditionnelle demeure dans l'absence de prescription ; toutes les décisions, les choix, les négociations du processus commencent avec la performance d'exploitation demandée. L'acteur concerné répond alors avec une offre et une estimation de la performance de son offre. Un bâtiment est réalisé pour des futurs occupants et, donc, sa conception devrait être basée sur la fonctionnalité des espaces et sur le bien-être des occupants.

L'approche performancielle, réalisée en explicitant les exigences du client, est congruent à un système de qualité, management et assurance défini par la série de ISO 9000 (Szigeti & Davis, 2005).

Pour la conception, à la base de cette approche il y a le lien entre la génération de la valeur (Domaine de la valeur) et la matérialité (Domaine du design) via les fonctions, comme décrit par Rutten en 1998 (Struck, 2012) et représenté en Figure 2-1. Les valeurs sont converties en besoins. Les besoins sont exprimés à travers les fonctions. Pour répondre à ces fonctions la conception agit sur les propriétés décrivant le comportement des composants ou d'un artéfact.

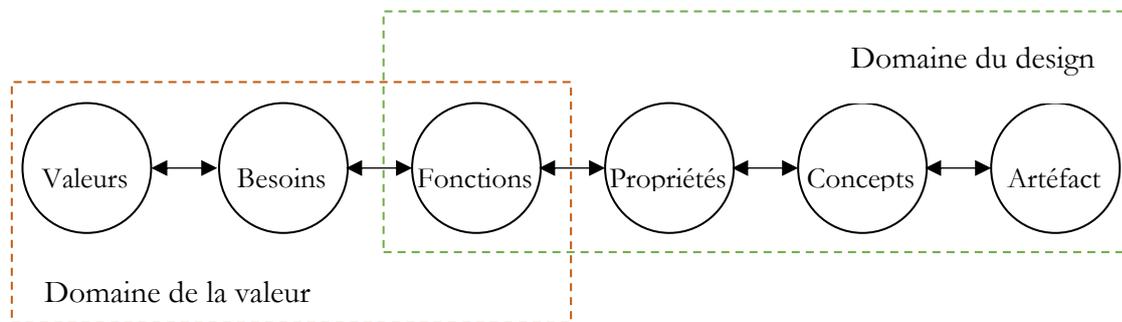


Figure 2-1 - Processus de conception lié à la valeur (Struck, 2012)

Baser la conception sur la performance demande l'utilisation de deux langages. D'un part l'explicitation de la demande à travers les fonctions et d'autre part la capacité d'apporter une réponse à la performance demandée. Pour décrire ce dialogue, Ang en 2005 propose le modèle dit « *hamburger bun* » (Ang, et al., 2007). Dans ce modèle on retrouve la contraposition entre le « concept fonctionnel » (FC), représentant une série d'objectifs à satisfaire liés à la performance, et le « concept de solution » (SC), représentant la matérialisation technique des décisions de la conception. Ce modèle est pris en compte à toute échelle pour le bâtiment (Figure 2-2).

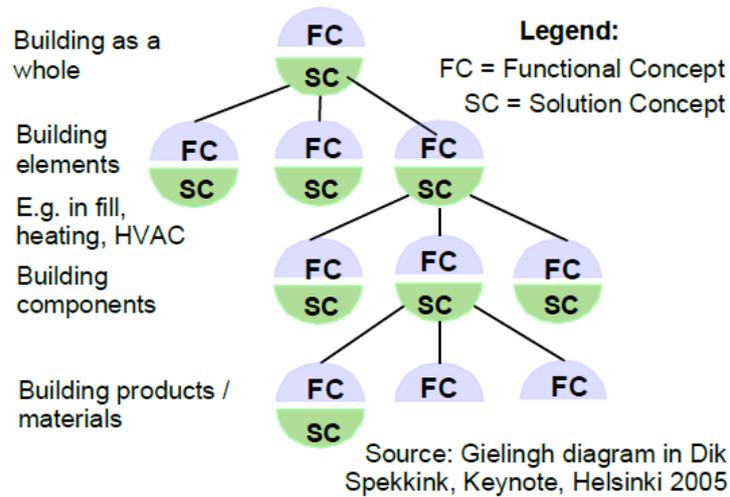


Figure 2-2 – Application du modèle à toute échelle PeBBu (Szigeti & Davis, 2005)

La réponse donnée à travers la matérialité, peut en effet s'exprimer à travers un composant, un élément, une agrégation d'éléments etc. Le bâtiment demeure un objet complexe et sa résolution peut se faire à travers une approche systémique. La prise en compte du bâtiment comme un système a été traité plutôt de façon théorique. Une méthode de travail est fournie par Godfried Augenbroe (Hensen & Lamberts, 2011). Elle comporte, comme pour le « modèle hamburger », d'une part, l'analyse du système bâtiment (et dans ce cas aussi des interrelations entre les composants) et, d'autre part, l'analyse fonctionnelle pour arriver à définir les indicateurs de performance (Figure 2-3). La méthode introduit la notion de *Functional* (« Aspect ») *Systems*: éléments du bâtiment remplissant une fonction. Ils peuvent être aussi constitués par l'assemblage de plusieurs sous-systèmes (enveloppe et équipement CVC, structure). Enfin l'auteur propose des exemples d'application pour ce type de schématisation de mode-opératoire (Hensen & Lamberts, 2011).

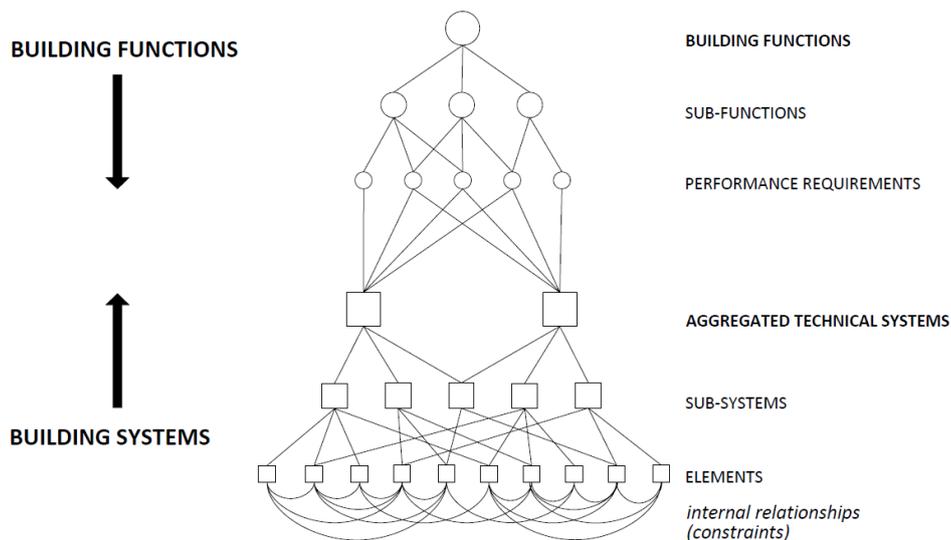


Figure 2-3 – Explicitation des fonctions et assemblage du système bâtiment (Hensen & Lamberts, 2011)

Le modèle de l'approche performancielle nécessite l'explicitation de la demande (fonctions), la formulation de l'offre (système technique), une méthode d'évaluation et de validation (Figure 2-4).

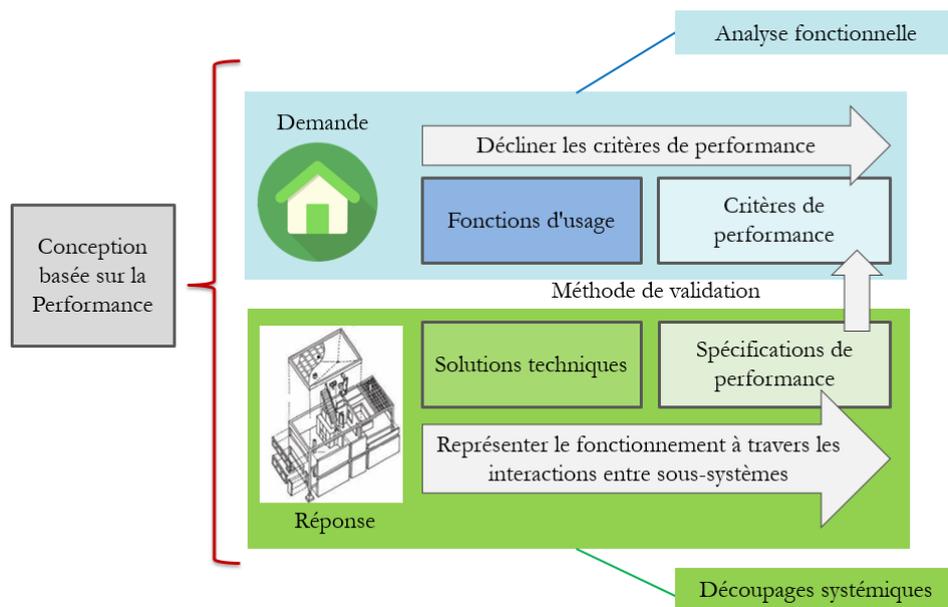


Figure 2-4 – Modèle d'une conception basée sur la performance et développements

Dans les sous-paragraphes qui suivent, nous traitons deux approches permettant de mieux définir la demande et l'offre : l'analyse fonctionnelle et l'approche systémique. L'objectif de la thèse est la formulation d'une méthode d'évaluation du pré-design, cependant il demeure nécessaire de bien définir le cadre méthodologique (demande-offre). C'est pourquoi les deux approches (analyse fonctionnelle et approche systémique) sont traitées dans le sous-paragraphes suivant de façon non exhaustive. Notre attention est ensuite portée sur la prise en compte de la constructibilité dans le processus de conception et sur les méthodes d'évaluation du pré-design (§2.2 et §2.3).

### 2.1.1. Approche fonctionnelle

Pour faciliter le co-développement de l'objet à réaliser il est envisageable de se référer à des méthodologies solides qui formalisent l'expression du besoin. Dans ce cadre, l'analyse fonctionnelle représente une des méthodologies recommandées. L'utilisation de cette méthodologie permet aussi de compléter la liste des activités ultérieures par leurs dépendances avec les fonctions d'usage.

Analyse fonctionnelle : « Démarche qui décrit complètement les fonctions et leurs relations, qui sont systématiquement caractérisées, classées et évaluées » (AFNOR, 2014)

L'initiateur de cette approche est Miles (Miles, 1961) qui crée l'analyse de la valeur chez General Electric. Il définit l'utilité d'un objet comme le service rendu face à une attente. A la même époque Juran (Juran & Godfrey, 1951) caractérise la qualité comme la *fitness for use*. Tout l'intérêt de ces définitions est de sortir de la simple description des moyens pour privilégier le résultat engagé. La prescription cède le pas à la spécification.

Dans les années 60 Barbey (De la Bretesche, 2000), qui contribue à la création du cabinet APTE, précise cette démarche en utilisant le « diagramme pieuvre » : l'objet à définir se trouve au centre d'une série d'entités dits « milieux extérieurs » qui vont interagir par son biais. Il caractérise en outre les fonctions principales qui relient deux milieux et les fonctions contraintes qui s'imposent à l'objet.

C'est dans les années 2000 que Gobin (Gobin, 2003) propose le rapprochement de cette démarche au Développement Durable, puisqu'un objet ne contribue à celui-ci que s'il apporte une réponse aux différentes parties prenantes de son écosystème. Dans ces conditions l'analyse fonctionnelle (AF) apparaît comme moteur de l'analyse du cycle de vie (ACV) en autorisant une meilleure définition de l'unité fonctionnelle.

L'analyse fonctionnelle se décompose traditionnellement en trois étapes (Azarian & Pollet, 2016) :

- L'analyse du besoin : cette étape consiste à établir le besoin auquel va répondre le produit. C'est pendant cette étape que le besoin sera caractérisé et évalué dans le temps. L'outil associé dans la méthode APTE est la « bête à corne<sup>®</sup> ».
- L'analyse fonctionnelle : nous allons déterminer dans cette étape ce que va *faire* le produit pour répondre au besoin. Ces fonctions sont aussi caractérisées notamment par des critères de performance. L'outil associé dans la méthode APTE est le « digramme pieuvre<sup>®</sup> ».
- L'analyse fonctionnelle technique ou analyse fonctionnelle interne : c'est une description des fonctions qui ne sont pas directement liées à la réponse au besoin mais au fonctionnement interne du produit.

L'AF, compte tenu de son ancienneté, fait l'objet d'un corpus normatif assez développé. Celui-ci distingue l'AF Externe, qui spécifie le système étudié dans son contexte, de l'AF Interne qui spécifie la réponse envisagée en termes de spécifications techniques (Tableau 2-1).

Tableau 2-1 - Etapes, buts et résultats de l'analyse fonctionnelle (Azarian & Pollet, 2016)

Etapes :	But	Résultat
Analyse du Besoin (AB)	Exprimer le besoin	Cahier des charges du besoin
Analyse Fonctionnelle du Besoin (AFB)	Identifier les relations du produit avec son contexte d'utilisation, afin de dégager des Fonctions de Service, aptes à satisfaire le besoin	Cahier des charges fonctionnel
Analyse Fonctionnelle Technique (AFT)	Déterminer les Fonctions Techniques nécessaires aux fonctions de service. Ces fonctions techniques guident les concepteurs dans la recherche des solutions technologiques.	Cahier des charges technique (spécification technique)

La première est relative aux fonctions de service<sup>7</sup> alors que la seconde se réfère aux fonctions techniques<sup>8</sup>. La distance entre le cahier des charges et la solution technique est surmontable en introduisant le concept de « principe technique ». En effet, le choix de ce dernier doit se faire en contribuant à répondre aux fonctions principales externes. Dès lors un composant du système doit, sur la base d'un choix de principe de solution, contribuer à chacune des fonctions attendues de l'utilisateur final avant même de répondre aux fonctions techniques.

La base de l'approche fonctionnelle, appliquée au secteur de la construction, est la prise en compte du bâtiment comme un objet au service de l'utilisateur final. Le terme « fonction » revêt ici une signification industrielle, c'est-à-dire « à quoi sert un objet ». L'approche fonctionnelle consiste à

<sup>7</sup> La fonction de service s'exprime comme une action effectuée par un produit (ou réalisée par lui) afin de permettre la satisfaction du besoin d'un utilisateur donné.

<sup>8</sup> Les fonctions techniques représentent l'ensemble des techniques et des procédés permettant d'assurer les fonctions d'usage et d'estime d'un objet technique

définir l'objet d'étude non pas par ses composants mais par l'utilité qu'en retirent les différentes parties prenantes. Dans ce contexte, une des étapes est de désigner les services attendus des différents lieux (Gobin, 2015).

Un utilisateur situé dans un espace quel que soit son activité a besoin de :

- 1) un volume dimensionné pour cet usage ;
- 2) un confort d'ambiance physiologique ;
- 3) une protection contre les agents extérieurs ;
- 4) une capacité à utiliser un certain nombre d'outils ;
- 5) une possibilité de s'isoler ou de rejoindre la collectivité ;
- 6) un accès aux services présents sur le site ;
- 7) une certaine valorisation sémiologique du bâtiment.

A partir de ces principes il est alors possible de déterminer le niveau des performances à atteindre. Ce niveau concerne en premier lieu le ressenti de l'utilisateur final pendant l'exploitation. La performance affichée est alors définie comme « la performance nominale », c'est cette performance qui doit être vérifiée tout au long du fonctionnement du bâtiment. En étant une grandeur quantifiée elle doit s'accompagner des conditions dans lesquelles elle sera mesurée. En même temps cette mesure doit s'accompagner d'une tolérance admissible. C'est-à-dire de pouvoir considérer des plages de variation de la performance de façon à suivre l'utilisateur.

Parallèlement il est nécessaire de prendre en compte le changement du niveau de performance dû au vieillissement de la construction. Pour ce faire, la méthode considère une spécification complémentaire à la « performance nominale » : la « performance d'exploitation ».

Cette nouvelle spécification est relative aux opérations de réparation ou d'entretien et permet de garantir le niveau de performance nominale. Dans ce cadre on distingue un volet relatif au fonctionnement des systèmes techniques nécessaires pour maintenir stables les performances nominales et un deuxième volet, concernant une vision plus macroscopique des systèmes ; c'est-à-dire, considérer le fait que les principes techniques mis en place pour assurer la performance nominale ont, dans leur complexe, un impact sur l'environnement, sur la société et sur l'économie.

L'utilisation de l'analyse fonctionnelle permettrait donc de mieux définir les besoins et de formaliser les fonctions de chaque composant du produit, accompagnés par le niveau de performance (nominale et d'exploitation) à atteindre.

### 2.1.2. Le bâtiment comme un système

Le bâtiment, vu comme un produit, demeure un système complexe. Un des principes utilisés pour résoudre des problèmes de large échelle est le principe du *divide-and-conquer*, en français Diviser-et-Conquérir (Figure 2-5). Cette pratique permet de décomposer un problème de départ à priori complexe à résoudre, en plusieurs sous-problèmes, plus petits, mais plus simples à résoudre. La hiérarchisation des sous-problèmes permet ensuite, grâce un processus d'intégration, de proposer une solution au problème initial.

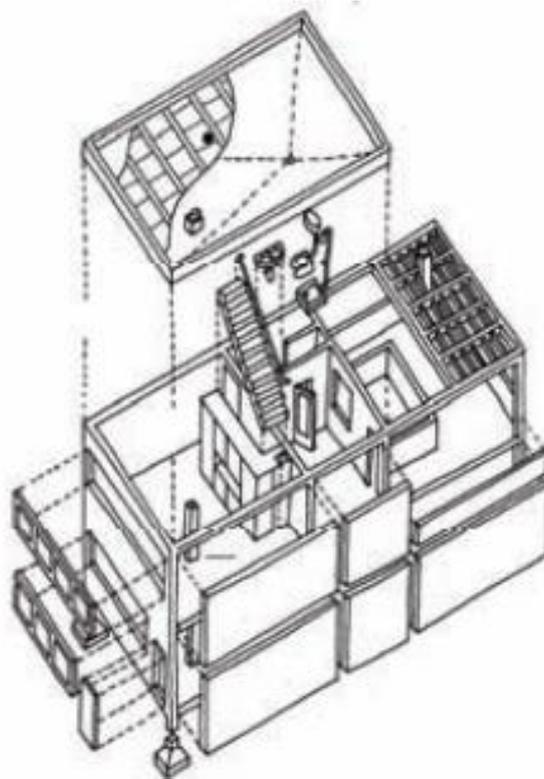


Figure 2-5 - Approche systémique pour le bâtiment (Capasso, 2006)

Le Tableau 2-2 résume les différents types de découpages proposés pour le bâtiment et recensés dans la littérature, et elle permet de faire une analogie entre les différents composants déterminés par les auteurs. Des spécifications concernant les divers découpages sont explicitées sous forme de fiches de synthèse en ANNEXE A.

Le découpage permet d'étudier les composants singulièrement et de remonter, après, à l'échelle du système par intégration. Il s'agit d'un réarrangement des informations ou de l'adoption d'un nouveau point de vue, plutôt qu'une simplification du problème. En effet les différents types de découpages montrent la complexité du sujet et la variété des motivations exprimées. Chaque découpage est justifié par la mise en évidence d'un aspect distinctif en rapport avec les objectifs de performance à atteindre. Les enjeux principaux des auteurs sont : la flexibilité, l'adaptabilité, la réversibilité du système, mais aussi une industrialisation du processus de la construction et une aide à la conception.

De plus, le choix d'un découpage soulève implicitement un certain nombre de contraintes d'intégration :

- La définition des relations entre sous-systèmes ;
- La maîtrise des connexions/interfaces physiques entre composants (industrialisation des jonctions) ;
- L'impact de chaque sous-système sur les critères de performance.

Tableau 2-2 - Résumé des différents types de découpage recensés assemblées en fonction de la thématique abordée

Sistema tecnologico	Intégration	Sharing Layers			Open Building Open house			Slaughter	Fonctionnel
(UNI, 1981)	(Rush, 1986)	(Duffy, 1990)	(Brand, 1994)	(Schmidt III & Austin, 2016)	(Habraken, 2002)	(Leupen, 2006)	(Setién, 2014)	(Slaughter, 2001)	(Gobin, 2003)
Partizioni esterne				Surroundings					
Attrezzatura esterna		Site							Adaptation
Struttura portante	Structure	Shell	Structure		Skeleton/ base building	Structure	Skeleton	Structure	Structure
Chiusure	Envelope		Skin			Skin	Envelope		
Impianto di fornitura servizi	Mechanical	Services	Services		Infill /fit-out	Services	Services	Services	Equipements
Partizioni interne	Interior	Scenery	Space plan			Scenery	Infills	Interior finish systems	Partitions
Attrezzatura interna		Set	Stuff						
Impianto di sicurezza				Social		Access			
							Open spaces		

De manière générale, il faut mettre en relation le système technique découpé avec les modélisations spatiales et humaines. Une tentative d'intégration de ces concepts est présentée par Mallory-Hill (Mallory-hill, 2004) qui propose un modèle tridimensionnel du problème pour l'évaluation de la performance globale d'un bâtiment (Figure 2-6).

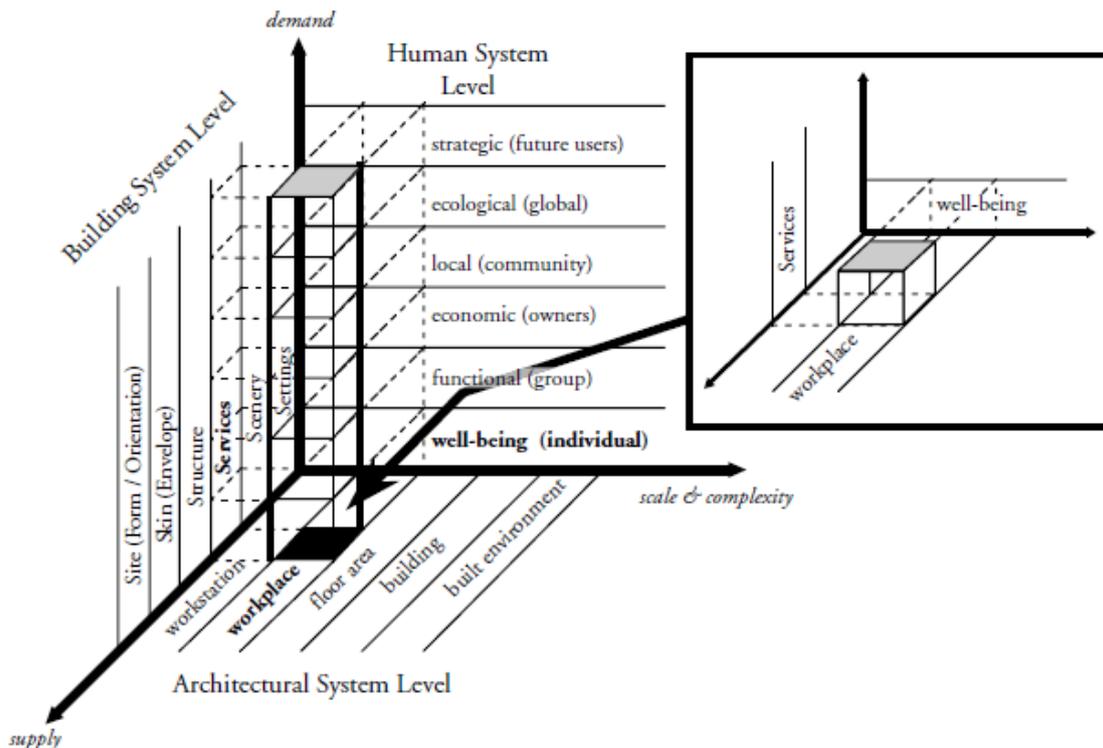


Figure 2-6 – Evaluation de l'environnement intérieur du niveau Lieu de Travail (Mallory-hill, 2004)

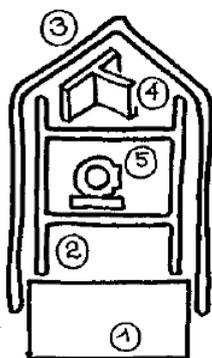
Le modèle est inspiré par la contribution de David Lantrip qui montre les différentes échelles spatiales et l'interaction entre les aspects humains et l'environnement pour différents niveaux de

performance. Mallory ajoute à ce modèle la technique du système à travers les sous-systèmes de Brand (Brand, 1994).

La projection du modèle tridimensionnel génère 180 cubes représentant un sous-domaine d'enquête, développé par rapport aux performances à atteindre.

En considérant les divers types de découpages analysés, nous proposons la hiérarchie suivante : le système, c'est à dire l'ouvrage, est composé d'un nombre de sous-systèmes qui seront pris en compte dans la conception. Ce type de découpage en sous-systèmes reprend la structure des sous-ensembles fonctionnels proposés par Gobin (Gobin, 2003). Ce type de découpage concerne 6 sous-systèmes fonctionnels, définis dans le Tableau 2-3 : l'Adaptation au Site (ASi) ; la Structure (Str) ; l'Enveloppe (Env) ; les Partitions internes (Part) ; les Equipements (Equ) ; les Parachèvements (Par).

Tableau 2-3 – Les sous-systèmes fonctionnels proposés par Gobin (Gobin, 2003)



1. Adaptation (ASi)	Ensemble de composants permettant l'insertion dans le site et les divers branchements aux réseaux
2. Structure (Str)	Composants permettant de supporter les surfaces d'activité
3. Enveloppe (Env)	Composants permettant de mener des activités en dehors des intempéries
4. Partitions (Part)	Ensemble des composants délimitant les zones d'activités et de ceux en permettant l'accès
5. Equipements (Equ)	Ensemble des composants permettant l'usage des outils et assurant le maintien de l'ambiance
6. Parachèvements (Par)	Ensemble des composants qui assurent la finition de chaque précédent sous-ensemble.

Même en ayant un point de vue différent, ce type de découpage demeure très proche de celui exposé par Brand (Brand, 1994) dans sa théorie des *Sharing Layers*, qui demeure à la base de diverses applications. En effet, le point de vue de Gobin se concentre sur la fonctionnalité des sous-systèmes, alors que Brand découpe le système technique en fonction de la durée de vie des sous-systèmes. En se basant sur ce dernier, Schmidt (Schmidt III, et al., 2011) propose une méthodologie pour la maîtrise et l'intégration des divers sous-systèmes avec l'objectif d'étudier l'adaptabilité du système global. Les mêmes auteurs, proposent ensuite leur propre découpage dans lequel ils ajoutent, à la base proposée par Brand, deux autres niveaux. Les deux niveaux supplémentaires concernent un sous-système « social » (*social*) permettant de modéliser l'occupant comme faisant partie du système, et un sous-système « environnement » (*surroundings*) dans lequel considérer l'ensemble des éléments caractérisant le contexte physique extérieur (Figure 2-7) (Schmidt III & Austin, 2016).

Dans le cadre de la thèse nous avons décidé de réaliser le même exercice et de proposer un découpage qui pourra être utile en terme d'expression des fonctions et de vérification des spécifications techniques pour l'ensemble du système.

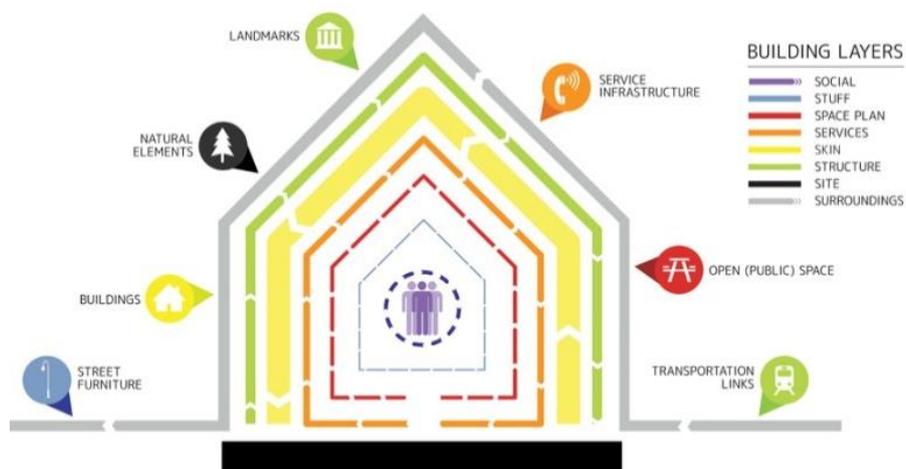


Figure 2-7 – Représentation du découpage de Schmidt (Schmidt III, et al., 2011)

En référence à l'état de l'art présenté, nous avons décidé de faire référence aussi au découpage proposé par Schmidt III (Schmidt III, et al., 2011) et d'inclure dans le découpage fonctionnel deux autres milieux qui demeurent, dans notre cas, plutôt comme des systèmes influençant le bâtiment du point de vue de la performance énergétique et la qualité d'ambiance : l'occupant (Occ) et le contexte extérieur (CEX). Cela nous permet d'inclure dans le système les alentours du bâtiment et les occupants afin de mieux définir les variables à prendre en compte pour les évaluations.

En continuant dans la spécification des niveaux, les sous-systèmes sont composés par des composants. A titre d'exemple nous reportons le découpage relatif à l'enveloppe du bâtiment. Concernant l'enveloppe on retrouve : la toiture, le plancher bas et les parois opaques et transparentes. Cette distinction est nécessaire car les fonctions, les charges, les risques concernant la mise en œuvre et les caractéristiques des divers composants ne sont pas les mêmes. En descendant de niveau, les composants sont réalisés à travers l'assemblage d'éléments. Ces éléments peuvent être plus ou moins intégrés selon la typologie du composant (Hauglustaine, et al., 2006).

Ce découpage permet de spécifier les caractéristiques afférant à chaque élément (par exemple, pour l'isolation il serait possible de définir les typologies en panneaux rigides, semi rigides ou souples et en vrac) tout en connaissant les problématiques relatives à mise en œuvre, mais aussi de résoudre les connexions entre les éléments et les composants afin de maîtriser les risques de variation de la performance. Une paroi en béton de chanvre et ossature bois peut être décrite comme une paroi multicouche avec une couche d'isolation thermique intégrée à la structure, sans équipements et avec finitions internes et externes.

Le dernier niveau de détail est représenté par le matériau. Cette catégorie fournit une information à la fois sur les caractéristiques techniques (conductivité thermique, chaleur spécifique, masse volumique, etc.) et, d'autre part, sur la disponibilité locale et sur l'impact environnemental que l'on peut avoir. La Figure 2-8 représente la hiérarchie et développe un exemple concernant l'isolation de l'enveloppe.

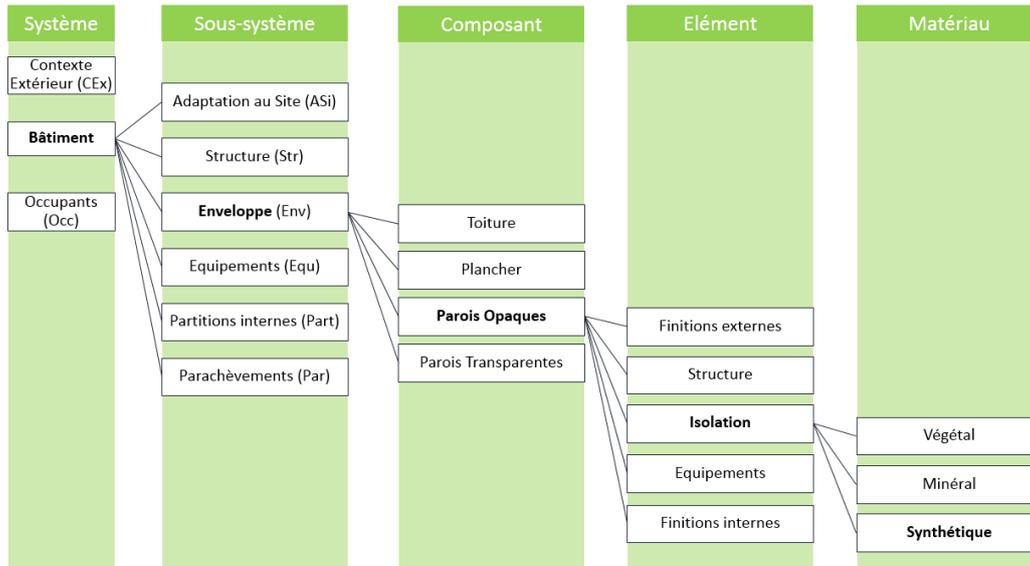


Figure 2-8 - Hiérarchie et exemple de développement du découpage

Pour développer les systèmes complexes et multidisciplinaires, l'ingénierie système utilise notamment la méthode du « cycle en V » (Figure 2-9).

Dans le « cycle en V » on retrouve plusieurs étapes:

- Identification des exigences qui seront traduites en performance à atteindre par le système ;
- Identification du système et découpage hiérarchique en sous-systèmes et éventuellement en composants ;
- Définition des comportements et des relations entre sous-systèmes et définition des interfaces ;
- Les sous-systèmes sont intégrés ; ils sont aussi validés et vérifiés par rapport au référentiel initial ;

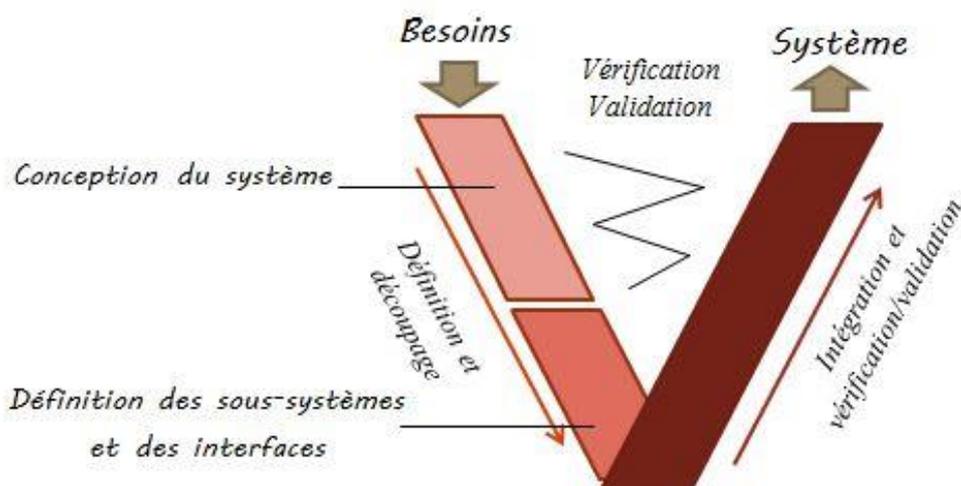


Figure 2-9 - Cycle en V pour le développement d'un produit (Roozenburg & Eekels, 1995)

Il s'agit d'une modélisation déjà largement utilisée dans le secteur industriel, dans lequel, par contre le système est composé par des composants standards et un assemblage séquentiel établi dans une usine qui ne change pas ses conditions limites.

Dans le bâtiment ce cycle demeure difficilement adaptable à cause de l'unicité du contexte, des décisions et du produit.

L'organisation humaine et technique constituant le projet de construction est aussi un système, c'est ce que nous avons appelé le système « pour faire ». Le système « pour faire » influence très largement le produit de la construction (système « à faire ») en termes de qualité, de coût et de délais de réalisation.

Garantir les performances du produit et du projet, ce qui est l'objet de la constructibilité, consiste à analyser et maîtriser ces interactions. Ce principe peut être modélisé par un « double cycle en V » (Figure 2-10). Le premier V correspond au système à faire (produit) et le deuxième V au système pour faire (projet). La constructibilité consiste alors à étudier et à mieux maîtriser les interactions entre ces deux « V ».

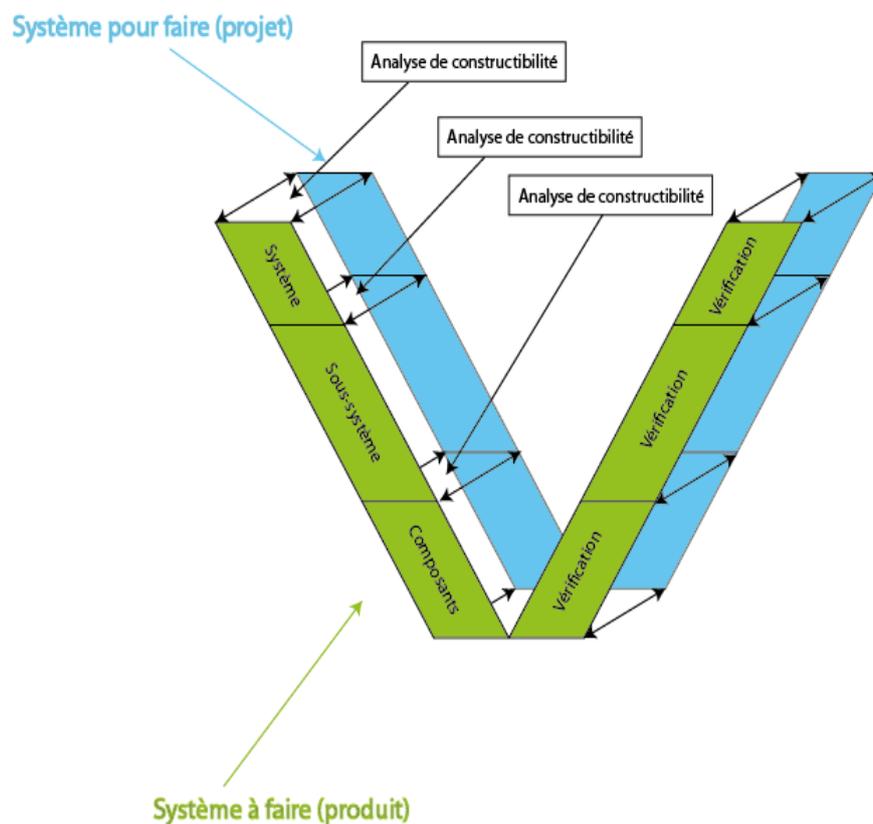


Figure 2-10 – Nouvelle vision du cycle en V (double cycle en V), proposé par l'IRC, adapté à la construction, qui modélise à la fois le système à faire et le système pour faire. Le lien entre le deux se fait à l'aide de la constructibilité.

## 2.2. Etat de l'art des outils et des méthodes afférant à la constructibilité

Dans ce paragraphe nous présentons les principes et les concepts liés à la constructibilité afin de comprendre la nature de cette discipline. Cette analyse nous permettra de créer une base de connaissance pour le développement des critères d'évaluation de la méthode.

Une deuxième partie du paragraphe concerne les méthodes et les outils actuellement mis en place pour effectuer une démarche visant à la constructibilité.

### 2.2.1. Principes et concepts de la constructibilité

La prise en compte de la constructibilité dans le processus nécessite la définition de certains principes et critères sur lesquels la conception peut se baser. Comme la définition de la discipline de la constructibilité en France demeure nouvelle, nous nous appuyons initialement sur l'analyse des principes et des concepts proposés pour la *constructability*.

En 1986, le *Construction Industry Institute* (CII, 1986) liste les principes de *constructability* (CPs) sur lesquels il faut baser la conception afin d'améliorer la productivité du processus :

1. Modularité : considérer, comme approche de conception de base, modes constructifs basés sur la modularité et le préassemblage ;
2. Préfabrication : Les éléments modulaires/préassemblés, sont pensées de façon à faciliter la production, le transport, l'installation ;
3. Standardisation : Les éléments de conception sont standardisés et ils sont réalisés faisant appel au maximum des standards de fabrication et des composants standardisés ;
4. Simplicité, flexibilité et installation : La conception vise à réaliser une construction efficiente du point de vue de la simplicité, de la flexibilité, de la séquence d'installation et des expertises et de la disponibilité de matériaux et compétences;
5. Révision : L'efficacité de la construction est considérée dans le développement des précisions, cela concerne aussi une révision ex ante des spécifications de la part du constructeur ;
6. Accessibilité : Les concepteurs favorisent l'accessibilité de la construction au personnel, aux matériaux et aux équipements ;
7. Prise en compte des conditions météorologiques : La conception facilite la phase de réalisation sous mauvaises conditions météorologiques ;
8. Facilitation de la mise en service : La séquence de conception et réalisation facilitent le passage entre la livraison et l'exploitation en termes de contrats de maintenance et commerciaux.

Ces principes se basent sur la prise en compte des étapes suivantes à la conception et fournissent des recommandations de nature pratique facilitant plutôt la gestion du chantier. Ils se réfèrent à une définition de *constructability* plutôt proche de la *buildability*, à laquelle ils ajoutent des

recommandations sur les approches, comme la révision de la part du constructeur, ou le passage entre la fin de la construction et l'exploitation.

Les principes (CPs) fournis par le Construction Industry Institut of Australia (CIIA, 1993), demeurent plus théoriques et visent à résoudre les problèmes venant de la gestion du processus, et de la performance de la technologie.

Dans ce cas, le CIIA propose 12 principes :

1. Intégration : la *constructability* doit constituer une part intégrante de planification ;
2. Connaissance de la construction : il est nécessaire d'intégrer dans le processus de planification, de façon plus active, la connaissance et l'expérience ;
3. Compétences de l'équipe : l'expérience, les compétences et les profils formants l'équipe de projet doit être adéquate ;
4. Objectifs généraux : la *constructability* est améliorée quand l'équipe de projet comprend les exigences du client et les objectifs du projet ;
5. Disponibilité des ressources : la technologie des solutions de conception doit être compatible avec les compétences et les ressources disponibles ;
6. Facteurs externes : il est envisageable de prendre en compte les facteurs externes (environnementaux ou politiques, par exemple) pouvant affecter le coût et le programme du projet ;
7. Programme : le programme global pour le projet doit être réaliste, attentif aux enjeux de la réalisation et partagé par l'équipe de conception ;
8. Méthodes de construction : la conception doit prendre en compte les méthodes de mise en œuvre. Ce principe concerne tous les aspects de standardisation des éléments, simplicité de conception et modularité, de façon à faciliter la mise en œuvre.
9. Accessibilité : la constructibilité est améliorée si l'accessibilité est considérée dans les étapes de conception et de réalisation ;
10. Spécifications : la constructibilité du projet est améliorée quand l'efficacité de la construction est considérée dans l'élaboration des spécifications du développement.
11. Innovation : l'utilisation de techniques innovantes pendant la construction améliore la constructibilité ;
12. Feedback : la *constructability* peut s'améliorer avec le retour d'expérience de projets similaires, à l'aide d'analyses post-réalisation mises en place par l'équipe de projet.

Le CIIA fournit aussi une indication concernant l'importance de la prise en compte des divers principes par rapport aux étapes du projet (CIIA, 1993). Pour la phase de conception conceptuelle ou du pré-design, les principes avec une importance très élevée sont le 1, 2, 3, 4, 7, 8, 9, alors que les 5 et 6 ont une importance moyenne.

En 1993 le CII rétablit les principes sur la base des 12 du CIIA en regroupant certains entre eux.

De plus en plus, nous constatons que l'attention passe de la conception d'un produit à la gestion du processus. Les principes de standardisation, régularité et modularité, accentués par le CII en

1986, s'englobent dans un seul principe concernant les méthodes de construction du CIIA (Tableau 2-4).

La bonne pratique, donc, ne concerne pas l'adaptation du design à la phase de réalisation, mais la prise en compte des problématiques d'installation, la gestion du processus et le contrôle.

Les principes ont un caractère très général et ils ne s'adressent pas à un programme d'implémentation spécifique de la *constructability*. Ils fournissent une indication sur les bonnes pratiques à mettre en place. En effet, McGeorge (McGeorge, et al., 2013) affirment que le rôle et la responsabilité des divers participants aux processus varie en fonctions des 12 (ou des 10) principes et des diverses étapes du cycle de vie du bâtiment.

Tableau 2-4 – Liste des principes de constructibilité (CII, 1986) (CIIA, 1993) (CII, 1993)

Principes de constructibilité		
CII (1986) (CII, 1986)	CIIA (1993) (CIIA, 1993)	CII (1993) (CII, 1993)
1 - Modularité	1 - Intégration	1 - Intégration
2 - Préfabrication	2 - Connaissance de la construction	2 - Connaissance de la construction
3 - Standardisation	3 - Compétence de l'équipe	3 - Compétence de l'équipe
4 - Simplicité, flexibilité et installation	4 - Objectifs généraux	4 - Objectifs généraux
5 - Révision	5 - Disponibilité des ressources	5 - Disponibilité des ressources
6 - Accessibilité	6 - Facteurs externes	6 - Facteurs externes et accessibilité
7 - Prise en compte des conditions météorologiques	7 - Programme	7 - Programme et méthodes de construction réalistes
8 - Facilitation de la mise en service	8 - Méthodes de construction	8 - Spécifications transparentes
	9 - Accessibilité	9 - Innovation
	10 - Spécifications	10 - Feedback
	11 - Innovation	
	12 - Feedback	

Cela porte à l'identification de trois étapes principales du cycle de vie, dans lesquelles il faudra tenir compte des divers principes :

1. Initiation : qui concerne les études de faisabilité, la formulation des appels d'offre et la planification ;
2. Exécution : c'est-à-dire définition de sous-traitants, suite et/ou finalisation de la conception et, en parallèle, le début des opérations de chantier ;
3. Livraison : qui concerne la finalisation de la conception (si elle n'est pas encore totalement terminée) la finalisation de la phase de chantier et la livraison de l'ouvrage.

A partir de principes, des constats, relatifs aux diverses étapes du cycle de vie, ont été fournis sous forme de concepts de *constructability* (CCs). Nima (Nima, et al., 2001) propose une synthèse des divers CCs et en liste les plus cités dans la littérature, c'est-à-dire, 23 concepts à prendre en compte dans les diverses étapes du projet (Tableau 2-5). Il s'agit, donc, de mettre en place des démarches structurées afin de prendre en compte les divers concepts afférant à la constructibilité. La planification et la gestion se fait à travers ce qui est nommé *constructability program*, ou programme de constructibilité, dans notre cas. Le programme de *constructability* est défini comme « l'application d'une optimisation disciplinée et systématique, des aspects liés à la construction pendant les étapes de conception, concours, construction, test et livraison, à l'aide de connaissances et compétences qui enrichissent l'équipe de conception » (Construction Management Committee of the ASCE, 1991).

Tableau 2-5 – Les concepts de constructibilité (Nima, et al., 2001)

<b>Concepts de <i>constructability</i></b>	
CC <sub>1</sub>	Le programme de <i>constructability</i> est une partie intégrante du plan d'exécution du projet et il constitue le document de référence mis à jour avec les contributions des développeurs du projet dans toutes les phases
CC <sub>2</sub>	L'équipe de projet doit comprendre toutes les parties prenantes afin d'assurer une mise en place continue des principes de constructibilité tout au long du cycle de vie
CC <sub>3</sub>	L'intégration effective entre la phase de conception et de réalisation doit se réaliser à travers l'exploitation préventive des connaissances et des expériences partagées par les participants en amont de la conception
CC <sub>4</sub>	Le cadre contractuel qui dirige le projet devrait s'aligner sur des méthodes de construction connues
CC <sub>5</sub>	Le planning des opérations devrait être axé sur la construction et il devrait être établi le plus tôt possible
CC <sub>6</sub>	L'analyse et le choix des méthodes de construction principales devraient encadrer la conception afin de faciliter les opérations de chantier
CC <sub>7</sub>	Une étude appropriée du plan de chantier devrait assurer un flux de travail efficace et ininterrompu et la disponibilité des ressources tout au long du cycle de vie du projet
CC <sub>8</sub>	La planification de la séquence des opérations de construction devrait précéder le reste des plans car il dicte la conception et l'obtention d'équipements et de matériaux
CC <sub>9</sub>	La coopération entre les divers professionnels devrait être facilitée à travers l'utilisation de technologies d'information avancées surmontant la fragmentation de rôles spécialisés pendant le cycle de vie de projet
CC <sub>10</sub>	Le plus grand nombre de simplifications possibles et des rationalisations devraient être mises en œuvre dans les dessins et dans les révisions faites par le personnel de construction qualifié, afin que les dessins puissent être configurés pour permettre la construction efficace
CC <sub>11</sub>	La standardisation des éléments du projet devrait être privilégiée autant que possible, mais pas au point d'empirer qualitativement le résultat du projet
CC <sub>12</sub>	Les spécifications techniques devraient être simplifiées et configurées pour permettre une réalisation efficace, mais pas au point d'empirer qualitativement la performance du projet
CC <sub>13</sub>	La modularisation et le préassemblage des éléments structurels devraient être considérés, étudiés de façon attentive et utilisés s'ils peuvent faciliter la fabrication, le transport et l'installation
CC <sub>14</sub>	Les ressources (ouvriers, matériaux et d'équipement) doivent être localisés de façon appropriée dans le site pendant la phase de conception
CC <sub>15</sub>	La réalisation devrait être planifiée de façon à pouvoir être conduite sous des bonnes conditions météorologiques. Quand cela n'est pas possible, des alternatives devraient être disponibles (par exemple, une plus vaste préfabrication)
CC <sub>16</sub>	Les activités de construction devraient être planifiées de manière efficace afin de prévenir des conflits dans l'utilisation des ressources et la réduction de la productivité
CC <sub>17</sub>	Les questions la mise en place du processus de construction non couvertes par la conception concernant devraient être traitées avec une approche novatrice et immédiate
CC <sub>18</sub>	L'innovation capable de diminuer l'intensité de travail et d'augmenter, la mobilité, la sécurité et l'accessibilité au site du personnel devrait être adoptée
CC <sub>19</sub>	L'innovation dans l'introduction, l'utilisation et la modification des équipements disponible (qui puisse augmenter la productivité du chantier) devrait être considérée
CC <sub>20</sub>	Le préassemblage optionnel devrait être encouragé afin d'augmenter la productivité, la sécurité et la mobilité
CC <sub>21</sub>	L'innovation dans l'utilisation, la réutilisation et l'usage en post-construction des installations provisoires devrait être considérée
CC <sub>22</sub>	Des procédures d'évaluation des entrepreneurs devraient être établies afin de constituer un critère supplémentaire et décisif de sélection pour des collaborations futures.
CC <sub>23</sub>	L'évaluation du programme constructibilité devrait être établie et documentée dans chaque cas pour renforcer la gestion de construction à travers le retour d'expérience

Les concepts demeurent comme des recommandations pour la mise en place des bonnes pratiques et les principes de constructibilité. Les divers concepts se réfèrent distinctement aux trois étapes de la construction (initiation, exécution et livraison). Kifokeris et Xenidis (Kifokeris & Xenidis, 2017) proposent la distinction explicitée dans le Tableau 2-6.

Tableau 2-6 – Relation entre les divers concepts et les étapes du projet, explicitation des bonnes pratiques pour chaque étape (Kifokeris & Xenidis, 2017).

Phase	Concepts d'intérêt	Synthèse des bonnes pratiques
Initiation	$CC_i$ avec $i = \{1, 2, \dots, 7\}$	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Promouvoir le programme de <i>constructability</i> comme l'approche managériale clé initiale du plan d'exécution du projet ;</li> <li>2) Assurer que la communication et le partage d'expérience s'effectuent sans obstacles entre les acteurs et qu'ils puissent partager les bases pour des méthodes, des plans et des ressources réalistes et qui tiennent compte de la phase de réalisation</li> <li>3) Générer et évaluer des options alternatives le plus tôt possible dans les études de faisabilité de façon à réaliser l'appel d'offre sur des bases claires</li> </ol>
Exécution	$CC_i$ avec $i = \{8, 9, \dots, 15\}$	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Prendre en compte tous les aspects des séquences incrémentales et concourantes des phases de conception et réalisation ;</li> <li>2) Prévoir des recommandations pour la mise en œuvre de techniques innovantes (analytiques, d'information ou de chantier) ;</li> <li>3) Promouvoir les principes de standardisation, de répétition des éléments, de modularité, de préassemblage, de soutenabilité et la Lean construction (sans endommager le concept architecturale et l'esthétique du projet)</li> <li>4) Aborder les questions comme l'efficacité et l'accessibilité du plan d'installation de chantier, la disponibilité des ressources, le potentiel de la fabrication hors site, les conditions météorologiques et la gestion logistique et des déchets.</li> </ol>
Livraison	$CC_i$ avec $i = \{16, 17, \dots, 23\}$	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Traiter les opérations pour la continuation et l'achèvement du chantier et la livraison de l'ouvrage.</li> <li>2) Faciliter une évaluation de post-construction pour améliorer la gestion des projets futurs grâce à la documentation des retours d'expérience dans des bases de données. Cela devrait permettre de : promouvoir l'innovation (d'outils et de pratiques) ; établir les procédures d'évaluation du constructeur ; évaluer le niveau de réalisation des objectifs du projet ; documenter les bonnes pratiques.</li> </ol>

La liste des concepts est ainsi synthétisée par Yitmen et Akyel (Yitmen & Akyel, 2005). A l'aide de questionnaires ils visent à définir et à explorer les défis et les possibilités de l'intégration de la *constructability* dans l'industrie de la construction de Chypre. Dans le cadre de leur étude, ils considèrent comme concepts les plus significatifs :

- L'utilisation dans le projet de techniques d'information avancées ;
- La prise en compte dans la planification du projet des connaissances et des expériences concernant la réalisation ;
- Les responsables de la *constructability* dans l'équipe projet doivent être déterminés en amont.

D'autre part, ils soulignent que, du point de vue des étapes du cycle de vie du bâtiment, les plus impactées par ces trois concepts sont les diverses étapes d'esquisse et d'avant-projet.

Les concepts de constructibilité (avec sa signification internationale) listés jusqu'ici, prennent en compte le management du projet, mais ils négligent complètement la fonction du bâtiment. Dans ces principes et critères nous retrouvons les produits et leurs performances intrinsèques, nous

retrouvons le processus et son efficacité. Ce que nous ne retrouvons pas est l'utilisateur et, donc, le fait que le bâtiment est réalisé pour être occupé et utilisé. La constructibilité « à la française » considère les performances à travers l'interaction entre les divers sous-systèmes et fonction de l'utilisateur final.

Les concepts et les principes exposés permettent de créer un lien entre les pratiques mises en place actuellement et la constructibilité. En conclusion, suivre une démarche visant à la constructibilité peut vouloir dire par exemple :

- Travailler à l'aide d'une plateforme BIM ;
- Mettre en place un processus de conception intégré ;
- Etablir des critères des performances en fonction de l'utilisateur ;
- Anticiper les évaluations afin d'itérer le processus.

Une fois comprise la nature de cette discipline, il faut donc analyser les outils et les méthodes permettant de la mettre en place.

### 2.2.2. Les approches intégrant la constructibilité dans le domaine de la construction

Comme nous l'avons vu dans le chapitre 1, la constructibilité concerne la mise en place d'outils et de méthodes assurant la bonne qualité du processus et du produit final. S'agissant d'une démarche visant à l'intégration de bonnes pratiques dans le processus, elle ne demeure pas univoque et standardisée. Les outils et les méthodes prenant en compte la constructibilité ou, pour l'instant la *constructability*, sont plusieurs.

Au début des années 2000 Arditì (Arditì, et al., 2002) analyse l'effort mis en place par plusieurs firmes de l'architecture qui considèrent la constructibilité dans leurs démarches. Les participants (137 au totale) aux questionnaires proposés font partie de la liste des top 500 agences d'architecture des Etats Unis.

Le résultat de cette enquête montre comment une grande partie des agences d'architecture ont déjà établi un programme de constructibilité dans leurs approches et cela se fait généralement en pré-design. Sur 137 interviewés, seulement 5 ne connaissaient pas la notion de constructibilité. Cela montre l'attention portée sur les problématiques relatives au sujet et l'intégration de ce concept dans les démarches de conception.

L'enquête montre que les outils les plus utilisés pour la mise en place des programmes de constructibilité concernent la révision (des plans conçus et des documents produits) réalisée par des tiers (peer-review), et la documentation des retours d'expérience. Le *brain storming* demeure une méthode utilisée par plus de la moitié des interviewés. L'utilisation de modèles physiques et numériques demeure, par contre, moins utilisée (Figure 2-11).

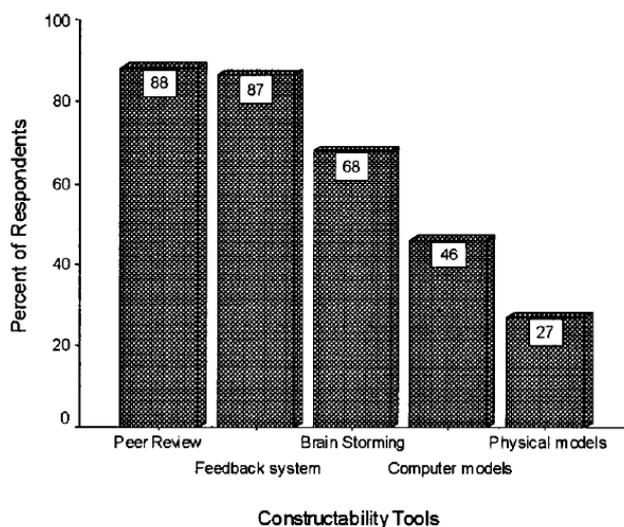


Figure 2-11 – Les outils de constructibilité mis en place par des agences d’architecture

La même étude s’interroge ainsi sur les facteurs prépondérants qui ont un impact négatif sur la bonne réussite du programme de constructibilité. Les facteurs les plus impactant se trouvent dans les erreurs, les ambiguïtés ou les détails présents dans les dessins ; dans les spécifications incomplètes et dans les relations conflictuelles entre les parties prenantes.

Selon Kifikeris et Xendis (Kifokeris & Xenidis, 2017), les méthodes et les outils à support de la *constructability* et/ou de la mise en place d’un programme de constructibilité, comme présenté dans la Figure 2-12, sont :

- TBP : *total building performance evaluation*<sup>9</sup> – Evaluation de la performance globale du bâtiment ;
- POP : *planning and operations performance evaluation*<sup>10</sup> – Evaluation de la performance du processus ;
- VE : *value engineering* – Analyse de la valeur en conception ;
- HVE : *hybrid value engineering*<sup>11</sup> – Analyse de la valeur en conception hybride ;
- KM : *knowledge management*<sup>12</sup> – Gestion des connaissances ;

<sup>9</sup> Concept développé dans les années ’80. On retrouve six missions concernant la performance : spatiale, acoustique, visuelle, thermique, qualité de l’air intérieur, intégrité du bâtiment. Ces critères sont liés aux aspects humains comme les facteurs psychologiques, physiologiques, sociétales, économiques. L’obtention de la satisfaction de l’occupant est un des objectifs principaux de ce concept.

<sup>10</sup> Ce sujet concerne le management du processus en termes de coût-délais-qualité.

<sup>11</sup> Une mesure temporaire, l’utilisation de sous-outils pour évaluer si les décisions prises améliorent ou pas la performance potentielle du projet.

<sup>12</sup> Ensemble des techniques permettant d’identifier, d’analyser, d’interpréter, de regrouper, de capitaliser et de partager les connaissances au sein d’une organisation.

- TQM : *total quality management*<sup>13</sup> – Management de la qualité totale ;
- C/B : *cost/benefit analysis*<sup>14</sup> – Analyse coût-avantage ;
- O/O : *object oriented analysis*<sup>15</sup> – Méthode d'analyse et de conception d'applications orientées objet ;
- P/O : *productivity-oriented analysis* – Méthodes axée sur la productivité.

Les auteurs soulignent la nécessité de développer des investigations concernant la prise en compte des concepts de constructibilité, pour arriver à définir un cadre solide permettant une approche holistique et définitive pour la gestion de la construction.

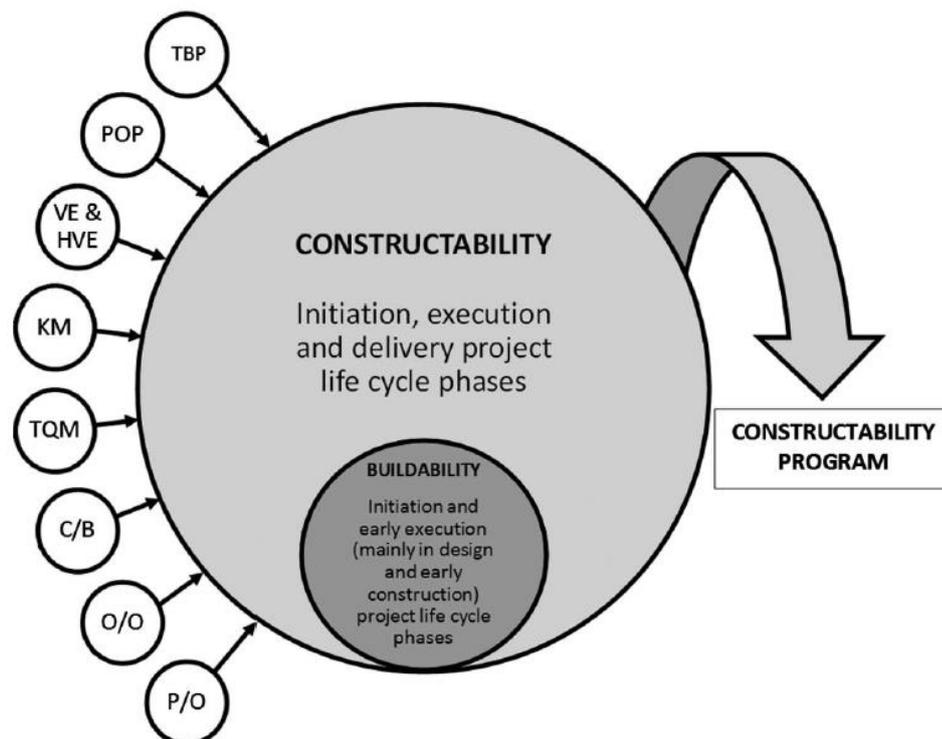


Figure 2-12 – Relations et interconnexion entre *constructability*, *buildability* *constructability program* et méthodes scientifiques concernées (Kifokeris & Xenidis, 2017)

Kifokeris et Xenidis (Kifokeris & Xenidis, 2017) proposent une revue des divers outils utilisés dans les recherches et dans la pratique afin d'implémenter la constructibilité.

<sup>13</sup> Démarche de gestion de la qualité dont l'objectif est l'obtention d'une qualité parfaite en réduisant au minimum les gaspillages et en améliorant en permanence les éléments de sortie (outputs) à travers une mobilisation des ressources internes. Cette démarche repose sur la série de ISO 9000, la ISO 9004 concerne l'amélioration de la qualité.

<sup>14</sup> L'analyse concerne l'évaluation du poids total des coûts par rapport aux bénéfices que l'on peut obtenir à travers les moyens mises en place. L'objectif est de déterminer quelle action est la meilleure ou la plus rentable.

<sup>15</sup> Cette approche concerne deux aspects examinés séparément. Le premier concerne la représentation de l'objet et de sa structure, la deuxième concerne la représentation du comportement de l'objet.

Dans ce cadre, les outils sont distingués :

- 1) par rapport à l'étape du processus dans lequel ils sont utilisés (initiation, exécution, livraison) ;
- 2) par typologie (cognitive, mathématique, méthodologique, programmation ou logiciel) ;
- 3) par nature (s'il s'agit d'outils d'évaluations quantitatives, d'évaluations qualitatives, d'outil décisionnels, de feedback d'information et connaissance, d'outils de révision, outil de post-évaluation et dissémination).

Jiang (Jiang, 2016) propose une revue des divers outils de constructibilité et il distingue :

- Outils basés sur la connaissance (graphiques ou non graphiques) ;
- Analyses quantitatives de la conception ;

L'auteur classe, ainsi, les outils en fonction du niveau d'application à l'échelle du système (bâtiment/site ; système, sous-systèmes ; composants ; éléments) ; de l'étape de conception dans laquelle ils sont utilisés et il identifie la méthode mise en place pour la collecte d'information.

Sur la base des états de l'art réalisés par Jiang (Jiang, 2016) et par Kifokeris (Kifokeris & Xenidis, 2017), nous distinguons les outils pour l'intégration de la constructibilité (avec ou sans la mise en place d'un programme de constructibilité), en pré-design de la façon suivante :

- Les outils basés sur la connaissance (apportant une aide à la décision en amont de la conception) ;
- Les évaluations quantitatives de la conception (basées sur un score global ou intégrant des modèles numériques) ;
- La révision de constructibilité (*ex ante*, ou basée sur la documentation venant des retours d'expérience).

Ci-après nous présentons les divers outils respectivement avec des exemples d'application.

#### ▪ *Les outils basés sur la connaissance*

Les outils basés sur la connaissance sont constitués par un système de recommandations relatives à un domaine expert. Ils peuvent s'alimenter de bases de données et de règles préconstituées permettant de supporter les choix relatifs aux systèmes techniques à réaliser. Selon leur application, ces outils peuvent prévoir l'utilisation d'interface graphique ou pas.

Parmi les outils recensés par Jiang (Jiang, 2016), en phase de pré-design, ceux qui ne prévoient pas le recours à une base graphique sont privilégiés.

Un exemple est fourni par Salazar et Brown (Salazar & Brown, 1988) les auteurs proposent une méthodologie capable d'automatiser un processus de conception intégré, associée à une base de données des connaissances de conception et de constructibilité. La portée de la méthode est limitée aux facteurs de constructibilité de haut niveau, comme les méthodes constructives prédominantes dans une localité spécifique. Elle guide la sélection des éléments de structure, des fondations et un dimensionnement des structures dans un projet.

▪ *Les évaluations quantitatives de la conception*

Les évaluations relatives en phase de conception portant sur l'analyse des systèmes constructifs permettent de réaliser une estimation objective des attributs caractérisant la constructibilité.

Dans ce cas il est possible de distinguer les évaluations exprimées sous forme de score global ou les méthodes intégrant des modèles numériques.

Concernant les évaluations portant sur un score global, la ville de Singapour se montre comme un pionnier, en établissant son propre système d'évaluation. Le système d'évaluation est aujourd'hui formellement intégré dans la législation de la ville (BCA, 2017). L'évaluation proposée se base sur les méthodes du « *Buildability score* » (B-score) et du « *Constructability score* » (C-score). Les deux méthodes consistent à évaluer une note globale du projet à l'aide de systèmes d'évaluation dédiés.

Le système d'évaluation pour le B-score est nommé *Buildable Design Appraisal System* (BDAS). L'objectif principal du B-score est de mesurer l'impact potentiel de la conception sur la mise en œuvre. Les principes sur lesquelles l'évaluation du B-score se base sont : la standardisation, la simplicité, la prise en compte des contraintes du site. Ces trois aspects doivent être pris en compte dans la phase de conception pour améliorer la productivité des ouvriers pendant le chantier (Concept 3S – *Standardization, Simplification and Single Integrated Element*). Cela comporte une préférence dans l'utilisation d'éléments préfabriqués, de composants modulaires, et de détails plus facilement maîtrisables en conception. Le B-score est évalué à l'aide d'une formule, qui combine les évaluations faites (à l'aide de tableaux de référence) pour la structure, les parois et les assemblages :

$$\begin{aligned} B - \text{Score} = & \textit{Buildable Design Score of Structural System (including Roof System)} \\ & + \textit{Buildable Design Score of Wall System} \\ & + \textit{Buildable Design Score of DfMA}^{16} \textit{ Technologies} \end{aligned}$$

Les diverses contributions s'évaluent en fonction de la géométrie (par exemple en fonction des surfaces de plancher et des longueurs des parois) et de facteurs et indices se référant à la simplicité du design et à l'efficacité de la mise en œuvre de la part des ouvriers. Ce système d'évaluation tient donc compte des modalités constructives et de la préfabrication des éléments.

Le système d'évaluation pour le C-score est nommé *Constructability Appraisal System* (CAS). Il permet d'évaluer l'impact potentiel des procédés de construction et des technologies sur la productivité des ouvriers. Le C-score vise à encourager les méthodes de construction innovantes (des structures, des équipements) et à récompenser l'utilisation de techniques BIM ou de suivi dans le processus. Le C-score se calcule à travers une formule dans laquelle les diverses contributions sont estimées à l'aide de tableaux et de notations plutôt qualitatives.

$$\begin{aligned} C - \text{Score} = & \textit{Constructability Score of Structural System} \\ & + \textit{Constructability Score of AMEP}^{17} \textit{ System} \\ & + \textit{Constructability Score of Good Industry Practices} \end{aligned}$$

Les inconvénients de ces pratiques sont : 1) l'évaluation est réalisée à conception avancée, quand les parties constructives ont été déjà définies ; 2) la difficulté de prendre en compte l'ensemble des

---

<sup>16</sup> Design for Manufacturing and Assembly

<sup>17</sup> Architectural, Mechanical, Electrical & Plumbing System

facteurs affectant la constructibilité dans un système d'évaluation. Il faut ainsi remarquer que, dans ce cas, il s'agit d'évaluer une constructibilité purement technique du projet.

Un exemple d'utilisation de modèles numériques est fourni par Zhang (Zhang, et al., 2016) qui associe une maquette BIM à la simulation 4D afin de réaliser une plateforme d'évaluation de la constructibilité. Les maquettes BIM permettent de lier les divers composants à un système d'information, alors que le modèle 4D (trois dimensions dans l'espace et le temps) permet de simuler diverses configurations architecturales et la séquence d'exécution du chantier.

#### ▪ *La révision de constructibilité*

La révision de constructibilité, permet de mettre en place un contrôle de qualité. Dans le domaine routier du Kentucky, cela permet d'évaluer les alternatives de conception et de déterminer les configurations pour lesquelles se matérialisent les avantages. Autrement dit, il s'agit de réaliser une révision du projet en intégrant les connaissances et les expertises dans la conception (Stamatiadis, et al., 2017).

Les outils de révision concernent :

- Les programmes d'analyse de la valeur, réalisés dans les premières étapes de conception, à travers une analyse fonctionnelle pour déterminer les alternatives capables de réduire les coûts et augmenter la valeur ;
- Le *Lessons Learned Database*, c'est-à-dire, une base de données des retours d'expérience pour éviter de reproduire dans les futurs projets les erreurs commises.
- Le *Post-Construction Review Process*, réalisé à la fin de la réalisation pour consolider les informations venant du projet, fournir des informations utiles pour éviter des erreurs dans des projets futurs ;

Dans ce cadre Jiang (Jiang, 2016) propose une nouvelle approche permettant d'automatiser la révision de constructibilité. L'auteur se base les règles associées à un procédé BIM pour automatiser la révision et développer une ontologie<sup>18</sup>. Elle constitue un modèle de données décrivant un ensemble de concepts dans un domaine, ainsi que des relations entre ces concepts. L'ontologie permet d'allouer des attributs à chaque composant et de révéler les diverses interdépendances entre la conception et la construction. D'autre part, cette méthodologie permet d'intégrer les retours d'expérience afin d'améliorer le processus de prise de décision.

L'analyse des méthodes actuellement utilisées pour introduire la constructibilité dans le processus de conception nous permet de constater comme l'attention est généralement portée sur les aspects techniques de mise en œuvre ou d'interaction entre les acteurs. Nous constatons un manque d'attention relatif à la performance globale du bâtiment et à la bonne explicitation de ses fonctions vis-à-vis de l'utilisateur. Ces aspects sont plutôt traités par autres types de méthodes et outils. Une analyse des méthodes et des outils d'accompagnement et d'évaluation de la performance, est réalisée dans le paragraphe suivant.

---

<sup>18</sup> Un système ontologique, ou ontologie en science de l'information, représente une forme de structuration de la donnée, généralement sous forme de graphe. Cela permet d'associer à chaque élément des caractéristiques et des relations.

## 2.3. Etat de l'art des méthodes d'accompagnement et d'évaluation de la performance du bâtiment en pré-design

La phase de pré-design est caractérisée par la production créative à travers un nombre élevé d'alternatives. Les alternatives sont caractérisées par l'abstraction due au manque d'information sur les interactions entre les variables de conception et les sous-systèmes (Matthews, 2008). Cette étape et sa résolution sont influencées par l'expérience de la maîtrise d'œuvre. La prise en compte de méthodes et méthodologies d'aide à la décision peut apporter une contribution positive en termes de timing et de qualité du projet. Un passage clé peut se faire en travaillant, déjà à partir du pré-design, sur la performance et sur sa garantie.

Les outils basés sur la performance, pouvant conforter la conception, sont très nombreux. Dans ce cadre, Gowri (Gowri, 2005), propose une distinction en trois types d'outils :

- a) Les outils donnant des directives (*Knowledge-based tools*) ;
- b) Les outils permettant une évaluation de la performance (*Performance evaluation tools*) ;
- c) Les outils de classification (*Rating-based tools*).

La distinction faite par Gowri concernait la conception de bâtiments durables. En reprenant les mêmes catégories nous présentons, dans les prochains sous paragraphes, une série d'outils utiles en phase de pré-design apportant un support à la décision.

### 2.3.1. Outils donnant des directives

Ces outils donnent des directives typiquement sous-forme de manuels utilisés comme référence pendant les premiers moments de la phase de conception. Gowri nous présente une liste d'outils, les plus connus de cette famille (Gowri, 2005). Il s'agit de recommandations et de prescriptions sur le choix des matériaux ou des composants et l'indication des stratégies à suivre en fonction de certains critères.

Par exemple, l'outil en ligne *Whole Building Design Guide* fournit une orientation qui peut se baser sur :

- L'objectif du projet : la stratégie principale que le concepteur veut suivre (accessibilité, flexibilité, fonctionnalité, coût-objectif, etc.) ;
- Le type d'usage : pour chaque usage, l'outil propose une vue d'ensemble du retour d'expérience, des possibles stratégies à suivre, et des informations sur les dimensions des espaces ;
- Les types d'espaces à concevoir : il se concentre, plus précisément, sur l'allocation spatiale des fonctions, donnant, comme pour le cas précédent, une information sur les dimensions minimales ;
- Les disciplines dans la conception : pour chaque professionnel, l'outil fournit des indications concernant son rôle dans la démarche pour la réussite d'une conception intégrée ;
- Guides et spécifications : guidelines concernant la conception de l'enveloppe ou des équipements et des spécifications liées au processus de conception ;

- Ressources documentaires pour approfondir les cas précédents.

Il s'agit de lignes directrices à caractère plutôt général, utilisables pour une première approche au projet.

Un autre type d'outil est le *Green Building Advisor* (Figure 2-13). Il s'agit d'une checklist des stratégies envisageables dans le projet d'un bâtiment durable. En fonction du type de projet (nouvelle construction, réhabilitation, agrandissement), du climat et de l'étape dans laquelle le projet se trouve (conception, réalisation des fondations, etc.), l'outil en ligne trie et liste les stratégies envisageables, comme l'utilisation de puits de lumière pour améliorer l'éclairage, mais en même temps de prévoir des espaces garde-manger pour un climat humide en phase de conception. L'outil fonctionne comme une to-do-liste pour qui manque d'expérience, et comme une confirmation des choix faits par les professionnels experts. Il est plutôt conçu pour des projets de maisons individuelles.

Figure 2-13 – Interface de l'outil *Green Building Advisor* (<http://www.greenbuildingadvisor.com>).

En France, ces types d'outils peuvent être représentés par le travail de l'Agence Qualité Construction (AQC). L'Agence a comme objectif de développer la qualité de la construction en réduisant les problèmes que l'on peut rencontrer pendant le processus. Les actions s'inscrivent dans un cadre pédagogique et la communication en termes de publication, d'outils numériques et de vidéos. Les « fiches techniques », par exemple, fournissent une série de recommandations concernant des procédés techniques comme l'isolation d'un mur, le traitement acoustique, et les équipements. L'AQC collabore avec plusieurs organisations professionnelles, centres techniques, organismes de certifications et avec l'Etat.

Dans le même contexte, les Règles de l'art Grenelle environnement 2012 fournissent une série de recommandations.

En général, le cas français fournit des règles expertes relatives à une phase plutôt avancée de la conception.

L'utilisation des *knowledge-based tools* peut réduire les temps et faciliter la prise de décisions concernant le projet. Par contre, l'expérience du concepteur joue un rôle important car ces outils ne permettent pas une évaluation progressive et itérative de la performance (Russell-Smith, et al., 2015) (Russell-Smith, Lepech, Fruchter, & Littman, 2015)

### 2.3.2. Les outils d'évaluation de la performance

Ces types d'outils permettent d'évaluer la performance (même de façon très fine) de plusieurs solutions de conception à travers un processus itératif.

Gowri (Gowri, 2005) divise les outils basés sur l'évaluation de la performance en trois catégories :

- 1) Outils d'ACV (Analyse Cycle de Vie - qui comprennent des bases de données sur les méthodes et les matériaux pour estimer l'impact environnemental pendant le cycle de vie) ;
- 2) Outils d'évaluation technologique durable (qui comprennent l'analyse des coûts et la prise en compte des technologies d'économie d'énergie et de gaspillage des ressources) ;
- 3) Outils de simulation énergétique et d'environnement intérieur.

Les limites de ces outils sont représentées par la présence nécessaire de bases de données (qui devront être alimentées et mises à jour) ; par la définition des frontières du système ; par la capacité de maîtriser une performance spécifique (énergie, économie, environnement) et par les compétences en jeu. Les utilisateurs non spécialisés peuvent rencontrer des difficultés d'intégration des outils de simulation dans le processus de conception ; Attia définit les barrières possibles à cette intégration (Attia, et al., 2012). Negendahl souligne le problème d'interopérabilité (conflits, compromis, objectifs) entre différents corps de métiers (architectes et ingénieurs) et par rapport à l'intégration des deux modes opératoires et de modèles de types différents (géométrique et physique) pendant les premiers pas de la conception (Negendahl, 2015)

En général, la finesse des résultats de ces outils, impose la claire définition des composants du projet (aussi en termes de matériau) et une bonne maîtrise des données d'entrées extérieures (comme par exemple l'utilisation des données climatiques horaires élaborées par les stations météo). L'utilisation de ces procédés est plutôt prévue dans une phase avancée de la conception comme outils de validation ou de correction du projet en fonction de la performance (Harputlugil & Hensen, 2006).

L'état de l'art suivant se focalise principalement sur les outils de simulation de la performance énergétique. En effet, ces outils permettent de plus en plus de considérer l'ensemble des enjeux relatifs au confort des usagers. Si l'exploitation du bâtiment passe par l'usage des divers systèmes techniques (équipements, enveloppe) et par les échanges avec l'environnement extérieur, la simulation énergétique représente le seul moyen d'évaluation de la performance globale capable de prendre en compte le caractère systémique du bâtiment.

En France, Arantes (Arantes, 2013) parle d'outils « simplifiés », ces types d'outils sont élaborés généralement via des tableurs Excel réalisés à partir de la réduction des modèles physiques et mathématiques. C'est le cas des approches déterminées dans la cadre de la Règlementation

Thermique, ou du Passive house Planning Package (pour la maison individuelle). Ces approches sont ainsi intégrées dans les logiciels tels que ClimaWin ou Pleiades, qui permettent de réaliser des simulations horaires avec une méthode de calcul basée sur la Règlementation thermique.

La recherche faite par Østergård (Østergård, et al., 2016) liste l'ensemble des approches académiques et commerciales capables d'apporter une solution aux problèmes du pré-design. Les auteurs distinguent six principaux domaines de recherche : les méthodes statistiques, l'optimisation, les méthodes de simulation en amont, l'interopérabilité (géométrique et physique), les bases de connaissance ; les approches holistiques (évaluation multi performance). En prenant en compte les caractéristiques les plus prometteuses des approches analysées, ils proposent un processus de travail adapté au pré-design (Figure 2-14) et ils réalisent une comparaison entre plusieurs outils.

Le processus doit prévoir : 0) une base de données des connaissances venant, par exemple, des retours d'expérience ; 1) la réalisation d'un modèle de base qui soit de simple utilisation et interopérable ; 2) un échantillonnage des données d'entrée ; 3) la réalisation des simulations ; 4) analyse statistique des résultats ; 5) la visualisation des résultats afin d'en permettre l'exploitation. Les critères de comparaison, utilisés dans cette étude, concernent l'utilisateur, l'étape de la conception, le type d'interopérabilité, les types d'évaluation et la possibilité de recourir à des analyses paramétriques.

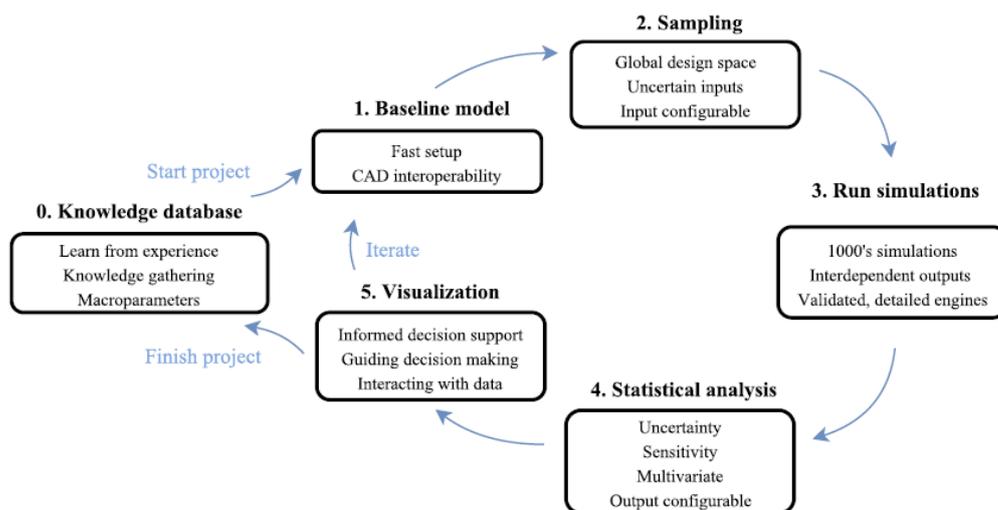


Figure 2-14 - Processus de travail adapté au pré-design par (Østergård, et al., 2016)

En absence de données d'entrée, plusieurs recherches se concentrent sur les méthodes statistiques pour l'aide à la décision. Les travaux proposent la mise en place d'un lien entre les outils de simulation et l'analyse d'incertitude, la distribution de probabilité et l'analyse de sensibilité des paramètres que l'on peut considérer en pré-design (Boxer, et al., 2017) (Corrado & Mechri, 2009) (Struck & Hensen, 2007) (Hopfe, et al., 2013) (Hopfe & Hensen, 2011).

Pour développer l'utilisation des outils de simulation énergétique en pré-design, Hopfe (Hopfe, et al., 2005) analyse six de ces outils et réalise des interviews des professionnels.

Attia (Attia, et al, 2012) propose une comparaison multicritère d'une série d'outils de simulation des nZEB en phase de pré-design en les évaluant par rapport à : la facilité d'utilisation ; la précision et la possibilité d'intégrer des éléments complexes ; l'interopérabilité ; la possibilité d'adaptation aux diverses étapes de la conception ; l'intelligence et l'intégration d'une connaissance de base.

Struck liste des outils de simulation utilisables en phase de pré-design (Conceptual Design Analysis - CDA) (Struck, 2012). Ces outils peuvent suivre deux stratégies pour contourner le problème du manque d'informations et réduire les entrées détaillées. La première est de travailler sur une interface *user-friendly*, en réduisant le nombre de paramètres demandés pour définir le bâtiment et les équipements. La stratégie est par exemple utilisée par le projet de van Dijk et Luscuere (Van Dijk & Luscuere, 2002) qui lie l'interface ORCA à un outil de simulation préconçu. Les données d'entrée demandées par l'interface, développée par des étudiants, concernent, par exemple le contexte, la pièce et une simplification des éléments du bâtiment (enveloppe et équipements). L'outil permet de faciliter la communication entre les architectes et les ingénieurs, d'avoir un retour rapide sur les choix effectués et de baser la conception sur la performance.

Un autre exemple est donné par les projets du NREL comme Openstudio. L'outil représente une interface pour le logiciel de simulation EnergyPlus. Il s'agit d'une interface de modélisation, pas vraiment dédiée au pré-design, mais plus parlant aux utilisateurs que le logiciel de simulation même.

L'outil ZEBO (Attia, et al., 2012) présente un fonctionnement similaire à OpenStudio mais il demeure plus adapté à la phase de pré-design. Il a été développé principalement pour le marché Egyptien pour permettre plusieurs combinaisons de paramètres caractérisant les nZEB pendant le pré-design. L'outil est basé sur une interface dans laquelle rentrer un nombre limité de données d'entrée. L'interface communique avec EnergyPlus en créant un modèle et en lançant la simulation. Suite à la simulation, l'outil permet d'extraire les résultats et de les représenter graphiquement (Figure 2-15).

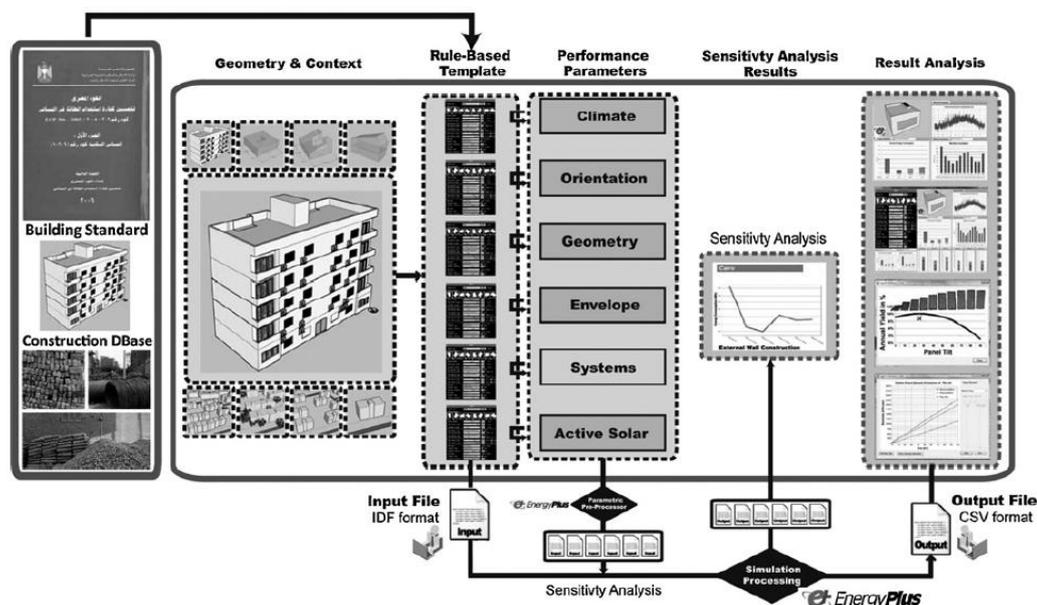


Figure 2-15 – Fonctionnement de l'outil ZEBO (Attia, et al., 2012)

Les dernières années ont vu le développement d'outils d'analyse liés à un environnement paramétrique. Cela permet à l'architecte d'agir en pré-design (mais même ensuite) sur la variation de paramètres et de visualiser rapidement les résultats des analyses (Figure 2-16). Il s'agit de langages de programmation visuel tel que Grasshopper3D, un outil paramétrique rattaché à Rhinocéros (Rhino). Il a été développé par David Rutten et publié en 2007. Ces outils sont utilisés pour mieux prendre en compte la géométrie, et ses possibles changements, en les visualisant à travers le logiciel de modélisation Rhinoceros.

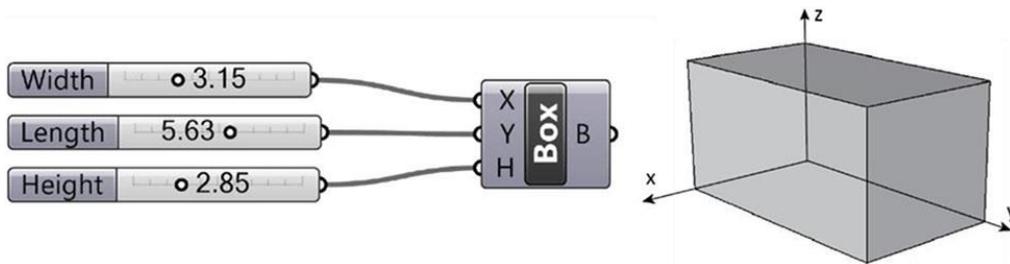


Figure 2-16 – Réalisation et visualisation d'un volume à travers l'outil paramétrique Grasshopper (Hollberg, et al., 2018)

Un grand nombre de plugin a été développé créant le lien entre la géométrie paramétrique de Grasshopper et plusieurs outils de simulation (Hollberg, et al., 2018). Notamment, le plugin *Ladybug* permet les analyses environnementales par rapport aux données climatiques (le fichier EWP de EnergyPlus), l'environnement géométrique et il intègre les modèles mathématiques du confort thermique. Le plugin *Honeybee* (Figure 2-17) se met en relation avec les logiciels de simulation (EnergyPlus et Radiance, par exemple) et permet une évaluation des performances (par exemple énergétique et de confort) des éléments paramétrés auparavant.

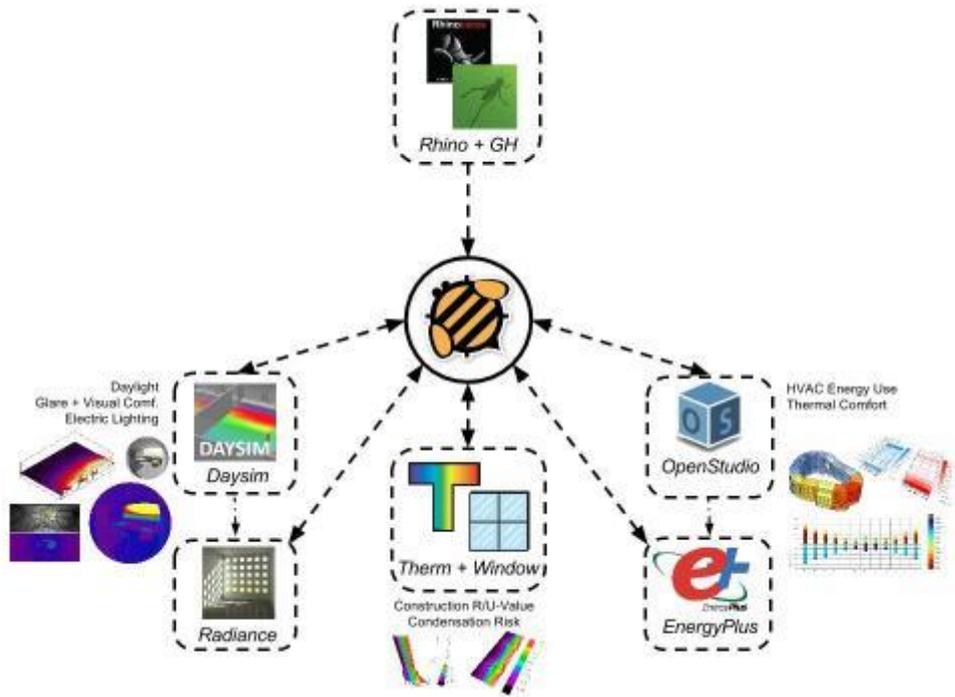


Figure 2-17 - Lien des différents plugins GH- Rhinoceros (Source : <http://www.food4rhino.com>)

Ces outils commencent à être utilisés aussi pour la conception de composants d'enveloppe adaptatifs comme présenté par (Favoino, et al., 2017a). Cela comporte plusieurs avantages : la possibilité d'agir sur les paramètres pour réaliser une étude de sensibilité sur un modèle donné ; une interopérabilité directe entre divers logiciels d'évaluation ; la possibilité de modifier les composants en agissant directement sur les lignes de code (écrites en python) dans lesquelles sont définies les fonctions mathématiques ; la possibilité de réaliser des études d'optimisation des paramètres variables.

L'utilisation des plugins de Grasshopper donne lieu à la réalisation d'outils en ligne comme Design Explorer V2.1. L'outil, développé par CORE Studio, permet de réaliser des analyses énergétiques

et de confort visuel, à partir des données de conception comme le ratio vitré/opaque, l'orientation, la profondeur et la largeur du bâtiment et la présence de protections solaires. L'outil est disponible en ligne et les données peuvent être introduites aussi sous forme de tableau CVS.

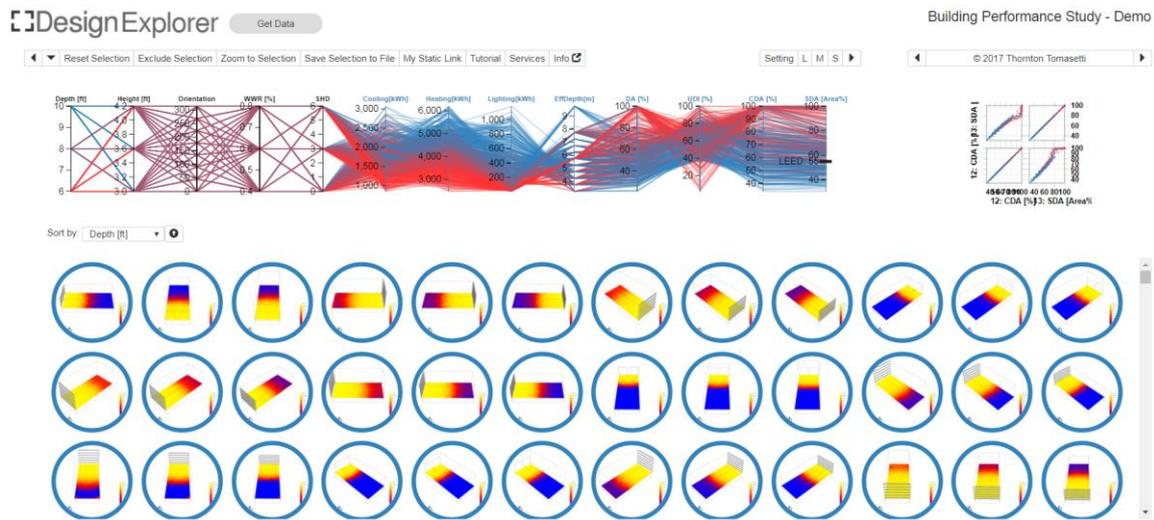


Figure 2-18 – Interface de l'outil Design Explorer (<http://mebd.azurewebsites.net/DesignExplorer>)

La deuxième stratégie exposée par Struck (Struck, 2012), concerne l'utilisation de modèles physiques simplifiés. C'est le cas, par exemple, d'outils comme le MIT Design Advisor (Urban & Glicksman, 2006) qui fonctionne comme une interface associée à un moteur de simulation dans lequel divers modèles physiques sont intégrés (Figure 2-19).

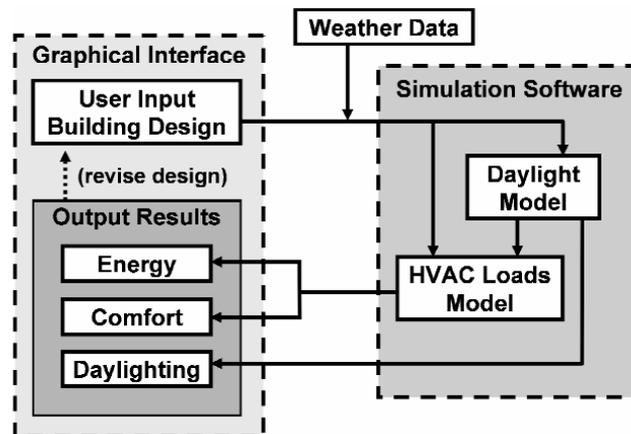


Figure 2-19 – Fonctionnement de l'outil MIT Design Advisor (Urban & Glicksman, 2006)

L'interface en ligne est structurée sous forme d'onglets dans lesquels insérer les informations concernant le cas d'étude, comme reporté dans la Figure 2-20

**Setup: Describe the Building You Wish to Simulate**

Getting Started

**Building Properties**

1. Climate  Region: Europe  City: Belgium - Brussels

2. Occupancy and Equipment  Classrooms  [Lighting control...](#)

Occupancy Schedule: 7:00 AM  begins 5:00 PM  ends

Person density: 0.25  people per m<sup>2</sup>

Lighting: 300 - rough work  lux

Equipment: 1.0  W/m<sup>2</sup> [More ventilation options...](#)

3. Ventilation System  Mechanical Cooling & Heating  [More ventilation options...](#)

Indoor Air Temperature: Max: 26 °C  Min: 20 °C

Max Relative Humidity: 60 %

Ventilation Rate: Fresh Air Rate: 15  liters / sec per person

Air Change Rate: 1.8  roomfuls per hour

4. Thermal Mass   High Mass: exposed concrete slab floor  Low Mass: lightweight or obstructed floor  Zero Mass

5. Building Geometry  Entire Floor (4 facades + core) well-mixed air between zones

Building Orientation:  N-S / E-W  NE-SW / SE-NW

Building Dimensions: Side a: 12 m  Side b: 12 m

6. Roof Description  Green Roof

Roof Insulation: Commercial (Medium Insulation)  R-Value: 2  (m<sup>2</sup>·°C)/W

Roof Insulation Location: Insulation on top of roof slab  Floors: 1

**Typical Room Properties**

7. Room Dimensions

Width: 5 m  Depth: 5 m  Height: 3 m

Window / Primary Facade Orientation: north

8. Window Description  Window Area: 50 % of exterior wall area [Window blind settings...](#) [Ventilated window settings...](#)

Select a Window Type:

single glazed no blinds double glazed triple glazed single glazed double glazed triple glazed inside vent. outside vent.

save edit delete undefined

low-e green roof 1 floor

Belgium - Brussels

Classrooms 0.25 pp/m<sup>2</sup> - 300 lux - 1.00 W/m<sup>2</sup>

Room (WxDxH): 5m x 5m x 3m

Scenario Two Scenario Three Scenario Four

Figure 2-20 - Interface du MIT Design Advisor (Urban & Glicksman, 2006)

L'outil permet de conforter les choix de l'architecte en pré-design à travers une estimation de l'énergie primaire, du confort thermique et visuel (pour une pièce représentative) et le coût énergétique et l'émission de CO<sub>2</sub>. L'avantage de l'utilisation de cet outil demeure dans la possibilité de comparer plusieurs variantes de conception du point de vue de diverses performances. Il se présente sous-forme de page internet dans laquelle on peut décrire le contexte, l'usage, le bâtiment (géométrie, équipements et enveloppe) de façon très intuitive à l'aide de neuf sections.

Le bilan thermique est réalisé pour chaque heure de l'année en prenant en compte les apports internes et externes, la ventilation, les équipements et l'inertie. Les hypothèses prises en comptes pour le modèle énergétique, sont basées sur les standards et sont mises à disposition dans la section FAQ du site. Les limites principales de l'outil sont représentées par le grand nombre d'hypothèses,

par l'absence d'interopérabilité, par la rigidité concernant les données d'entrée. Cependant il représente un outil valide d'aide à la décision en phase de pré-design.

Picco (Picco, et al., 2014) propose une méthodologie permettant de prendre en compte les effets des simplifications sur les modèles physiques définis dans les logiciels (dans le spécifique, EnergyPlus). La méthodologie (Figure 2-21) se base sur la comparaison entre un modèle « détaillé » (avec une définition très fine des divers composants) et un modèle « simplifié », afin de déterminer les écarts entre les résultats dus à l'intervention sur la simplification des paramètres. Le processus proposé se compose de huit pas de simplifications progressives, et d'une évaluation, à chaque pas, de la comparaison entre les résultats.

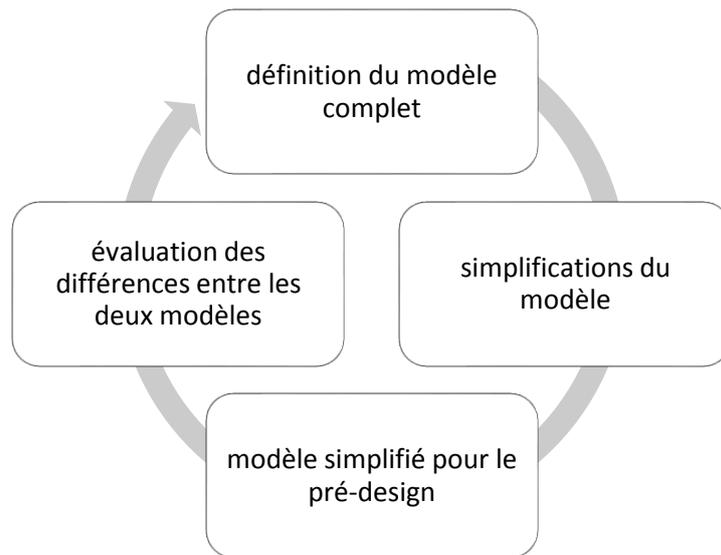


Figure 2-21 – Méthodologie mise en place par Picco (Picco, et al., 2014)

Les pas de simplification sont les suivants :

1. Constructions ;
2. Masques d'ombre ;
3. Zonage thermique ;
4. Surfaces transparentes pour chaque étage ;
5. Caractéristiques des planchers ;
6. Forme du bâtiment ;
7. Surfaces transparentes du bâtiment entier ;
8. Nombre de planchers modélisés.

Dans le premier pas, la description de l'enveloppe (opaque et transparente) est faite à travers un coefficient de transmission thermique moyenné sur les surfaces, et la prise en compte de l'inertie des partitions internes est faite à travers l'inertie de la structure. Dans les autres pas, il s'agit plutôt de simplifications de la géométrie. Les résultats de l'analyse faite par Picco permettent de savoir l'écart entre les valeurs de la performance énergétique des divers modèles à cause des hypothèses de simplification propres du pré-design

### 2.3.3. Les outils de classification

La dernière famille d'outils déclinés par Gowri (Gowri, 2005) comprend plusieurs méthodes de *Rating* reconnues à l'international. Il s'agit de matrices ou de feuilles de calcul utiles pour identifier les critères de conception. Ils sont basés sur des points de bonus gagnables à chaque critère, un score total associé à une quantification de la durabilité du projet. Un bon nombre de ces outils a aussi une valeur de certification en ayant un impact sur le marché de la construction et une signification économique. Dans ce cas, un des problèmes est de comprendre si les avantages économiques apportés par la valeur ajoutée de la certification, permettent une compensation des coûts d'investissement et de certification (Giama & Papadopoulos, 2012).

Ci-dessous nous nous concentrons sur les démarches de certification les plus connues et basées sur une approche holistique : le BREEAM, le LEED et le HQE.

#### ▪ *Le BREEAM*

Le BREEAM (*Building Research Establishment's Environmental Assessment Method*), conçu en 1990 au Royaume-Uni par BRE Global Limited, une partie du groupe BRE, *Building Research Establishment* (BREEAM, 2016). La mission du BRE Global Limited est de « *Protect People, Property and the Planet* » protéger les personnes, les biens et la planète. Pour ce faire, l'organisation développe des méthodes d'évaluation et propose des standards, des opérations de conseil et des événements afin de promouvoir l'application des approches globales proposées.

BREEAM est le premier type de méthode d'évaluation basé sur des scores gagnables, sur la base de la prise en compte du cycle de vie de la construction (conception, construction et utilisation). Cette méthode permet d'apporter une aide à la décision en se basant sur la réduction des impacts environnementaux, sur la valeur de l'ouvrage et la maîtrise des risques.

Comme reporté en Figure 2-22, il existe plusieurs types de standards à consulter, par rapport au type de projet (nouvelle construction, réhabilitation ou autre).

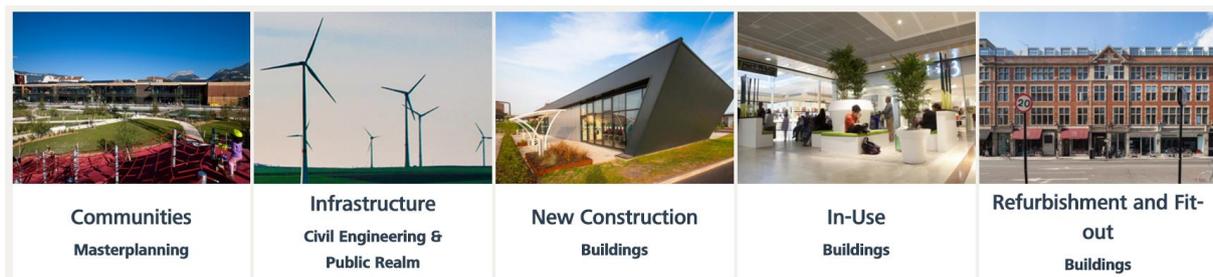


Figure 2-22 - Les standards techniques du BREEAM (<http://www.breeam.com>)

Nous nous concentrons, dans ce cadre, sur le BREEAM *New Construction*. La méthode est utilisée aussi pour la certification et l'évaluation du bâtiment.

Les objectifs principaux de la méthode sont divers :

- Réduire les impacts environnementaux du bâtiment tout au long du cycle de vie ;
- Permettre de reconnaître les avantages environnementaux des bâtiments ;
- Fournir une étiquette compréhensible et exhaustive ;
- Stimuler la demande et créer de la valeur pour les constructions en s'appuyant sur l'utilisation de produits et démarches durables.

La méthode de classification se fonde sur une échelle qualitative basée sur le poids des différents critères. L'analyse réalisée dans le cadre de la thèse a concerné la méthode BREEAM International New Construction 2016.

Ce type de classification permet au maître d'ouvrage et aux autres parties prenantes de comparer leur bâtiment avec d'autres bâtiments réalisés en suivant la démarche BREEAM.

- *Le LEED*

Le *Leadership in Energy and Environmental Design* (LEED) est un système de standardisation et de certification des bâtiments, créé en Amérique du Nord par le *US Green Building Council* en 1998 (LEED, 2018). La méthode a ensuite été adaptée aux marchés canadiens par le Conseil du bâtiment durable du Canada. Après le BREEAM, le LEED représente la méthode la plus utilisée pour l'évaluation et la certification des bâtiments. Le LEED a été développé pour tout type de bâtiment en se basant sur leur cycle de vie.

La dernière version de la méthode, le LEED v4 a été officiellement lancée en 2014. Pour chaque typologie d'ouvrage (hôpital, data center, bâtiment historique, etc.) il est possible de retrouver la démarche LEED dédiée, en fonction du type d'opération envisagée : conception et réalisation de nouveaux bâtiment (BD+C), aménagement intérieur (ID+C), opérations de maintenance (O+M), aménagement des quartiers (ND) et habitations (HOMES) (Figure 2-23).



Figure 2-23 - Les différentes méthodes de certification en fonction du type de projet pour le LEED v4 (<http://www.usgbc.org/guide/bdc>)

- *Le HQE*

Le concept HQE, Haute Qualité Environnementale, a été conçu en France dans les années 90 et ensuite il a donné lieu à une certification « NF Ouvrage Démarche HQE® ». Ce label se base sur le préexistant Haute Performance Énergétique auquel il ajoute les dimensions de santé et

environnementale. L'association HQE, qui a réalisé la démarche pour la certification, a été reconnue d'utilité publique en 2004.

La démarche HQE est née pour améliorer la conception et la rénovation des bâtiments et des villes en visant à limiter l'impact environnemental négatif des ouvrages. Ces démarches qualitatives tentaient de se substituer aux labels publics HPE – Haute Performance Energétique mais, contrairement à ces derniers ou au label BBC (Bâtiment Basse Consommation) et BBCA (Bâtiment Bas Carbone), la locution haute qualité environnementale (HQE) a fait l'objet d'un dépôt de marque commerciale par l'association HQE. En 2015, Certivéa<sup>19</sup> a lancé les Millésimes 2015 des référentiels de certifications NF HQE Bâtiments Tertiaires construction et rénovation (Certivea, 2015). En effet la démarche était plutôt compliquée et les organismes de certification ont réalisé des documents plus simples, plus clairs et plus compréhensibles. Ces nouveaux Millésimes intègrent l'ensemble des normes et des réglementations françaises applicables depuis 2011, mais également l'ensemble des retours d'expérience, les bonnes pratiques, les réponses aux questions posées et les innovations techniques et technologiques du secteur.

Cette méthode de certification repose sur deux volets principaux la SMO et le QEB. Le **SMO**, ou Système de Management de l'Opération : outil qui permet de mettre en place les procédures adéquates, d'assigner les parties prenantes au projet et de définir les cibles prioritaires à atteindre, pendant tout le processus (de la programmation à la réalisation). Le **QEB**, ou Qualité Environnementale du Bâtiment : langage commun pour identifier les différentes catégories d'impact en fonction des enjeux environnementaux et de les maîtriser. Ces enjeux sont regroupés dans 4 grandes familles et définis à travers les 14 cibles de la démarche HQE (Tableau 2-7).

Tableau 2-7 - Les 4 thèmes et les 14 cibles des Millésimes 2015 Certivéa la Certification NF Bâtiments Tertiaires Démarche HQE (Certivea, 2015)

Energie	Confort
Cible 4 : Gestion de l'énergie	Cible 8 : Confort hygrothermique Cible 9 : Confort acoustique Cible 10 : Confort visuel Cible 11 : Confort olfactif
Environnement	Santé
Cible 1 : Relation du bâtiment avec son environnement immédiat Cible 2 : Choix intégré des produits, systèmes et procédés de construction Cible 3 : Chantier à faible impact environnemental Cible 5 : Gestion de l'eau Cible 6 : Gestion des déchets d'activités Cible 7 : Maintenance – Pérennité des performances environnementales	Cible 12 : Qualité sanitaire des espaces Cible 13 : Qualité sanitaire de l'air Cible 14 : Qualité sanitaire de l'eau

En 2016, l'Association HQE et France GBC<sup>20</sup> (membre français du World GBC) ont fusionné pour former une nouvelle entité baptisée « Association HQE-France GBC ». Toujours en 2016 la structure de la démarche a changé, pour souligner les aspects de développement durable du

<sup>19</sup> Filiale du groupe CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment), Certivéa est partenaire de l'association HQE France GBC, et l'opérateur global de l'offre HQE™ pour les bâtiments non résidentiels, les infrastructures et les territoires durables.

<sup>20</sup> Association dont l'objet est d'animer au plan national, une dynamique fédérant le Public et le Privé, au service du développement de la construction et de l'aménagement durables, mais également de porter la position française à l'international, et de contribuer au renforcement de l'offre des entreprises françaises.

bâtiment, et l'organisme de certification Certivéa, qui collabore avec l'association HQE, a enfin proposé une certification « HQE Bâtiment Durable – certifié par Certivéa » (Certivea, 2016).

La démarche a gardé la subdivision entre la QEB et le management du processus, qui a changé de nom en « Système de Management Responsable » (SMR). Concernant ce dernier engagement, le référentiel propose une évaluation particulière, en 5 niveaux de maturité. Par rapport à chaque niveau de maturité, le référentiel spécifie quelles sont les actions à réaliser pour chaque objectif de l'engagement.

Cadre de référence du bâtiment durable (asso. HQE)		Thèmes des référentiels Certivéa HQE Bâtiment Durable 2016			
Engagements	Objectifs				
QUALITE DE VIE	Des lieux de vie plus sûrs et qui favorisent la santé	Sécurité et sûreté	Qualité de l'air intérieur		
		Qualité de l'eau	Ondes électromagnétiques	Résilience	
	Des espaces agréables à vivre, pratiques et confortables	Facilité d'accès	Facilité d'usage	Adaptabilité	
		Confort hygrothermique	Confort acoustique	Confort visuel	
Des services qui facilitent le bien-vivre ensemble	Transports	Services			
RESPECT DE L'ENVIRONNEMENT	Une utilisation raisonnée des énergies et des ressources naturelles	Energie	Eau	Ressources matières (hors énergie)	Sols
	Une limitation des pollutions et la lutte contre le changement climatique	Déchets	Changement climatique	Impacts environnementaux sur le cycle de vie	Pollutions (air, eau, sols)
	Une prise en compte de la nature et de la biodiversité	Biodiversité			
PERFORMANCE ECONOMIQUE	Une optimisation des charges et des coûts	Charges et coûts			
	Une amélioration de la valeur patrimoniale, financière et d'usage	(à définir)			
	Une contribution au dynamisme et au développement des territoires	Contribution au dynamisme et au dévt des territoires			
MANAGEMENT RESPONSABLE	Une organisation adaptée aux objectifs de qualité, de performance et de	Contexte	Engagement	Planification	Ressources et moyens
	Un pilotage pour un projet maîtrisé	Réalisation des activités opérationnelles : Chantier	Réalisation des activités opé.: Commissionnement		
	Une évaluation garante de l'amélioration continue	Evaluation	Amélioration		

Figure 2-24 - Thématiques Bâtiment Durable par Certivéa (Certivea, 2016)

### ▪ *Comparatif entre le BREEAM, le LEED et le HQE*

Les certifications se basent sur des approches holistiques et sur la performance. A travers leurs démarches, ils poussent à mieux faire pour atteindre une valeur économique du construit. Les principales différences entre l'approche LEED, BREEAM et HQE ont été soulignées par plusieurs auteurs (Giama & Papadopoulos, 2012) (Harputlugil & Hensen, 2006) (Rezaallah, et al., 2012). Dans ce paragraphe nous proposons une synthèse du comparatif réalisé par les auteurs et alimenté par nos analyses.

Les différences entre les diverses démarches concernent plusieurs aspects :

- a) la prise en compte séparément des aspects « transport » et « pollution » par le BREEAM ;
- b) la référence normative pour les critères énergétiques, ASHRAE 90.1 et 189.1 pour le LEED et la Directive Européenne (2010/31/EC) sur la performance énergétique des bâtiments pour le BREEAM, les normes françaises et les ISO pour le HQE ;
- c) la prise en compte de la conception de la construction, séparément de sa construction par le BREEAM ;
- d) différents méthodes de rating (ex *Very Good* pour BREEAM, *Silver* pour LEED, n° étoiles pour le HQE) ;
- e) les approches prévoient des conditions, pour la certification du produit enregistré, différents (ex : pour le bien-être le BREEAM considère la condition de la lumière naturelle, le LEED la qualité de l'air) ;
- f) l'adoption de la part du BREEAM des coefficients de poids pour chaque critère, non présent dans le LEED et dans le HQE
- g) pour le HQE, la méthodologie de calcul pour l'obtention du niveau, est faite de façon différente en fonction du pas (une moyenne pour les thèmes et agrégation pour les engagements) ;
- h) à différence des deux autres, les démarches de l'HQE Bâtiment Durable ne sont pas explicitement déclarées ; elles restent donc entre les mains des organismes de certification ;
- i) les méthodes fournies par le BREEAM et le LEED demeurent adaptables à divers pays à travers des coefficients venant de benchmarks. Cet aspect rend possible leur exportation et utilisation au niveau international.

L'analyse effectuée nous permet de remarquer que l'approche constructibilité s'intègre parfaitement dans le contexte actuel des méthodes d'aide à la décision et de gestion du projet. Au niveau international de plus en plus les méthodes de certification prennent en compte la gestion des processus comme des critères sur lesquels agir pour pouvoir obtenir une certification.

Les approches LEED and BREEAM prévoient désormais des crédits concernant le processus et la collaboration entre les différents acteurs. Pour le LEED la coordination entre les systèmes du bâtiment et le site devrait être abordée tôt, de préférence avant la conception schématique. Le crédit de l'*Integrative Process* introduit formellement cette démarche dans le LEED (LEED, 2018). De cette façon les expertises de la construction et des systèmes du site peuvent s'interroger concernant la

performance, l'efficacité et l'efficacités de chaque élément. De la même façon, le BREEAM prévoit des crédits concernant la consultation des parties prenantes (BREEAM, 2016).

L'aspect du « management » demeure toujours séparé des autres aspects (le cas le plus évident est celui de l'HQE qui présente même deux types d'évaluations) et concerne plutôt la communication entre les acteurs. En réalité, la dégradation de la performance n'est pas due uniquement à cause des problèmes de communication, mais aussi à cause d'une mauvaise prise en compte des divers aspects de la performance ; d'un manque d'approche systémique et, plus en général, d'une négligence concernant les causes de dégradations même.

Même en fournissant une aide à la décision et un cadre structuré pour la prise en compte de la performance multicritère, les approches et les méthodes de certification ne demeurent pas vraiment holistiques. En effet, les labels font l'effort de prendre en compte la globalité des aspects et des performances du système, mais ils oublient la relation qui existe entre les différentes performances.

D'ailleurs on risque, parfois, des répétitions ou une structuration de la donnée plus ou moins incohérente. C'est par exemple le cas de l'HQE qui a vu un changement de l'organisation des cibles par les organismes de certification et, en 2016, une complète révision du cadre référentiel.

Puisque chaque méthode suit et intègre les références normatives, il est possible de remarquer une tendance de chaque pays à utiliser sa propre démarche de certification et un manque d'homogénéité au niveau international des paramètres d'entrée et des approches (Wei, et al., 2015).

Sauf pour la dernière version de l'HQE BD, la vision des labels se concentre sur un produit vu de « l'extérieur », c'est-à-dire sur une vision basée sur les intérêts des parties prenantes du processus. Concernant les aspects de bien-être et santé des usagers, le BREEAM et le LEED ont intégré dernièrement la démarche développée par le WELLS, un nouveau référentiel conçu pour les bureaux et qui formalise ses cibles autour du bien-être des occupants (International WELL Building Institute, 2018).

L'évaluation des labels se fait sur un score total ; ce score est calculé sur la base de points gagnés dans différentes sections et sur lesquels on peut toujours jouer et intervenir. Pour avoir le niveau souhaité on peut par exemple intervenir sur des cibles les plus atteignables au détriment d'autres demandant un engagement plus important.

Sur le plan des critères et du système d'évaluation, le Tableau 2-8 représente une synthèse des caractéristiques des divers labels. La première partie du tableau se concentre sur les diverses cibles identifiées par les méthodes de certification avec l'objectif de les mettre en relation par rapport au type d'engagement. La deuxième partie expose la lecture des divers systèmes d'évaluation afin de mettre en évidence les relations possibles entre les divers niveaux et les différentes appellations.

Tableau 2-8 – Synthèse des caractéristiques des labels

<b>BREEAM 2016</b>	<b>LEED v4</b>	<b>NF HQE</b>	<b>HQE BD Certivéa</b>
<i>Management</i> (Gestion du projet)	<i>Integrative process</i> (Processus intégré)	SMO Système de Management de l'Opération	Système de Management Responsable
<i>Health and wellbeing</i> (Santé et bien-être)	<i>Indoor Environmental Quality EQ</i> (Qualité de l'environnement intérieur)	Santé - Cible 12, Cible 13, Cible 14 Confort – Cible 8, Cible 9, Cible 10, Cible 11	Qualité de vie
<i>Hazards</i> (Aléas)		Environnement - Cible 7	Respect de l'environnement
<i>Materials</i> (Matériaux)	<i>Materials and Resources MR</i> (Matériaux et ressources)	Environnement - Cible 3	Respect de l'environnement
<i>Waste</i> (Déchets)		Environnement - Cible 6	Respect de l'environnement
<i>Energy</i> (Energie)	<i>Energy and Atmosphere EA</i> (Energie et atmosphere)	Energie - Cible 4	Respect de l'environnement
<i>Water</i> (Eau)	<i>Water Efficiency WE</i> (sur la demande en eau)	Environnement - Cible 5	Respect de l'environnement
<i>Transport</i> (Transports)	<i>Location and Transportation LT</i> (Localisation et Transports)	Environnement - Cible 1	Qualité de vie
<i>Land use and ecology</i> (Ecologie et utilisation des sols)	<i>Sustainable Site SS</i> (Site Durable)	Environnement	Respect de l'environnement
	<i>Regional Priority RP</i> (Priorité régionale)		Performance économique
<i>Pollution</i> (Pollution)			Respect de l'environnement
<i>Innovation</i> (additional)	<i>Innovation IN</i> (Innovation)		Performance économique
<b>Niveaux</b>	<b>Niveaux</b>	<b>Niveaux</b>	<b>Niveaux</b> <sup>21</sup>
OUTSTANDING ≥ 85%	PLATINUM ≥ 80 points	EXCEPTIONNEL ≥ 12 étoiles <sup>22</sup>	EXCEPTIONNEL 10 – 12 étoiles
EXCELLENT ≥ 70%	GOLD ≥ 60 points	EXCELLENT 9 – 11 étoiles	EXCELLENT 7 – 9 étoiles
VERY GOOD ≥ 55%	SILVER ≥ 50 points	TRES BON 5 – 8 étoiles	TRES PERFORMANT 4 – 6 étoiles
GOOD ≥ 45%	CERTIFIED ≥ 40 points	BON 1 – 4 étoiles	PERFORMANT 1 – 3 étoiles
PASS ≥ 30%	- -	- -	- -
UNCLASSIFIED < 30%	- -	- -	- -

<sup>21</sup> Sur trois engagements (Qualité de vie, Respect de l'environnement, Performance économique)

<sup>22</sup> Avec un minimum de 3 étoiles pour le thème Energie

## 2.4. L'évaluation et l'aide au choix multicritère

Les bâtiments se trouvent toujours plus à faire face à un nombre d'exigences croissant. Cela comporte une augmentation de la complexité des évaluations et des choix. En effet, il est nécessaire de combiner plusieurs domaines disciplinaires tout au long du cycle de vie du bâtiment pour obtenir une solution globalement satisfaisante. La résolution des problèmes complexes multi-objectifs était réalisée à travers le jugement d'un seul individu ou d'un groupe bien défini. Aujourd'hui, la prise de décision dans un système complexe est traitée à l'aide d'analyses multicritères associées à des critères de décision. Les méthodes de décision multicritère (*multi criteria decision-making* – MCDM or *multi criteria decision-analysis* MCDA) permettent de comparer et/ou sélectionner explicitement diverses alternatives (produits, technologies, politiques) par rapport à plusieurs critères. Les premières MCDM concernaient l'agrégation de critères, pouvant être en conflit entre eux, dans un seul indicateur. Grâce à la contribution de la recherche opérationnelle, les méthodes multicritères sont de plus en plus utilisées dans plusieurs domaines et alimentent d'autres disciplines mathématiques comme l'optimisation mathématique, la modélisation mathématique et l'analyse statistique.

Il est possible de distinguer plusieurs étapes :

- La définition des critères d'évaluation en fonction des exigences ;
- La formulation d'alternatives, de façon externe au processus de prise de décision ;
- L'évaluation des alternatives réalisée sur la base d'un ou plusieurs des critères éventuellement quantifiables à travers des indicateurs ;
- Le choix, c'est-à-dire la sélection d'une des alternatives sur la base de l'évaluation précédente et d'objectifs spécifiés.

Dans le présent paragraphe, nous présentons certaines des méthodes multicritères, les plus utilisées dans le domaine de la conception des ouvrages de construction. Ensuite nous traitons certaines des applications concernant l'évaluation et les choix relatifs au bâtiment.

### 2.4.1. Les méthodes multicritères utilisées pour les évaluations du bâtiment

Les méthodes de MCDM sont généralement distinguées en fonction de la technique de résolution du problème (surclassement, juste valeur, méthodes de choix basées sur les avantages des alternatives) ou en fonction de leur nature mathématique (multi-objectif, multi-attribut, ou la combinaison des deux) (Moghtadernejad, et al., 2018)

Une classification des diverses méthodes est proposée par (Slowiński, et al., 2002) (Greco, et al., 2004) qui les divisent en trois groupes en fonction de la théorie sur laquelle ils se basent :

- Fonction d'utilité ;
- Relation de surclassement ;
- Ensemble de règles de décision.

Pour chacun de ces groupes, Cinelli (Cinelli, et al., 2014) liste et analyse certaines méthodes d'aide à la décision multicritère, les plus utilisées pour l'évaluation de la durabilité et ils proposent une analyse critique de cinq méthodes principales.

Concernant la première famille, la théorie de la fonction d'utilité a été introduite dans les années 70, elle comprend des méthodes permettant de synthétiser les informations dans un seul paramètre, pour cela elles sont aussi appelées méthodes d'agrégation de la performance ; dans ce cas les méthodes le plus recensées dans la littérature sont le *Multi Attribute Utility Theory* (MAUT) et l'*Analytic Hierarchy Process* (AHP). Le premier demande l'individuation de fonctions d'utilité et de poids pour chaque attribut, lesquels peuvent être assemblés sous un unique et synthétique critère, à travers agrégation additive ou multiplicative.

L'utilité totale  $U_A(x_1, x_2, \dots, x_n)$  associée à l'action à évaluer sur les critères  $1, 2, \dots, n$  peut être obtenue selon une formule additive (Eq. 2-1) :

$$U_A(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum_{i=1}^n p_i u_i(x_i(a)) \quad \text{Eq. 2-1}$$

ou multiplicative (Eq. 2-2) :

$$U_A(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum_{i=1}^n \alpha_i + \beta_i u_i(x_i(a)) \quad \text{Eq. 2-2}$$

$u_i(x_i(a))$ : utilité générée par rapport au critère  $i$  si l'action a considérée  $a$  la performance  $x_i$   
 $p_i$ ,  $\alpha_i$  et  $\beta_i$  : poids du critère  $i$

Le AHP est peut-être l'approche la plus utilisée. Introduite par (Saaty, 1980) elle permet une évaluation à travers des critères quantifiables et qualitatives par rapport à une échelle absolue. Suite à la détermination d'une série d'alternatives et d'une hiérarchie d'importance des critères, l'évaluation se fait par comparaison des performances des alternatives (comparés deux par deux par rapport à l'échelle absolue) sur la base des critères (notation) et la comparaison des critères mêmes entre eux (pesage). Le décideur devra définir la hiérarchie de préférence du critère/alternatives à travers leur comparaison par rapport à une échelle de 1 à 9, où 1 représente une préférence nulle entre les deux et 9 une préférence absolue d'un sur l'autre (Saaty, 1980). Le résultat est une matrice (une pour les alternatives et une pour les critères) de comparaison, qu'il faut réduire à un système de notation représentatif de l'importance de chaque poids donné aux critères et de chaque performance des alternatives (multiplication par le vecteur de priorité). Une fois les poids et la notation établies, il est possible de calculer la performance globale à travers la somme des produits de chaque poids (priorité des critères) par la notation des alternatives. La formulation générale est du type suivant (Eq. 2-3) :

$$A_{AHP-score} = \sum_{j=1}^n a_{ij} w_j \quad \text{Eq. 2-3}$$

$a_{ij}$  : éléments de la matrice A des alternatives et

$w_j$  : le poids assigné au critère  $j$  en utilisant la comparaison par paire et en effectuant une normalisation sur le totale

La théorie de relation de surclassement est à la base de méthodes permettant le choix à travers une comparaison directe de deux options. Cela permet d'établir qu'une solution « est au moins bonne

que » l'autre alternative. Les méthodes de ce type ont été initiées par Bernard Roy (Roy, 1996) à la fin des années 60, elles sont aussi appelées approches d'agrégation de la préférence. Dans ce cas, les méthodes recensées par Cinelli (Cinelli, et al., 2014) sont : la méthode d'Élimination et choix traduisant la réalité (ELECTRE) et le *preference ranking organization method for enrichment of evaluations* (PROMETHEE). La méthode ELECTRE se base sur une structure de préférence de 4 niveaux de relations binaires entre les alternatives : indifférence, préférence, préférence faible et incomparabilité. Elle permet l'évaluation quand l'agrégation de plusieurs critères hétérogènes sur une échelle commune demeure compliquée. La méthode PROMETHEE a été introduite dans les années 80, elle est basée sur une série de prérequis comme : la représentation de la différence entre la performance de deux alternatives ; les échelles des critères n'ont pas d'importance car la comparaison est faite par paires ; on a trois cas possibles entre deux alternatives : préférence, égalité, incomparabilité ; la méthode doit être formulée de façon compréhensible pour le décideur ; les poids sont attribués de façon flexible (Cinelli, et al., 2014) ; la décision se fait sur la base d'un indicateur calculé en fonction de la relation de préférence entre deux solutions et des poids préalablement établis (Brans & Mareschal, 2005). La formulation générale est du type suivant (Eq. 2-4) :

$$IP(a, b) = \sum_{j=1}^n w_j P_j(a, b) \quad \text{Eq. 2-4}$$

$IP(a, b)$  : indice de préférence entre une alternative  $a$  et une autre  $b$

$w_j$  : le poids assigné au critère  $j$

La dernière famille trouve ses origines dans le domaine de l'intelligence artificielle, ces méthodes permettent d'arriver à un modèle de préférence à travers des classifications ou la comparaison d'exemples de décision. Parmi ces approches on retrouve le *dominance based rough set approach* (DRSA). Ces méthodes sont relativement nouvelles et se basent sur un tableau informatif d'alternatives et attributs décisionnels. La méthode fonctionne comme un jugement de la part d'un expert. Le décideur est appelé à sélectionner l'alternative la plus avantageuse sans la définition de poids ou la présence de compromis. Les attributs décisionnels se basent sur une série de règles « *If...Then* », et à travers cette syntaxe il est possible d'établir quelle solution est meilleure par rapport à une autre.

Plusieurs états de l'art des divers approches d'aide à la décision multicritère sont présents en littérature concernant la durabilité (Cinelli, et al., 2014). Certaines de ces approches sont ainsi analysées par Moghtadernajad (Moghtadernejad, et al., 2018) vis-à-vis de la conception de l'enveloppe du bâtiment. Les auteurs listent les diverses méthodes associées aux applications principales dans le domaine du génie civil.

## 2.4.2. L'application des méthodes pour l'aide au choix de l'enveloppe du bâtiment

Les recherches des dernières années se sont développées sur l'utilisation des méthodes multicritères afin de supporter le concepteur à travers les évaluations et les comparaisons, mais aussi pour résoudre des situations de conflits. Dans ce cadre, nous proposons une revue des exemples d'application de méthodes décisionnelles multicritères relatives à la conception du bâtiment et, plus précisément sur les composants d'enveloppe.

Moghtadernajad (Moghtadernejad, et al., 2018) propose une méthodologie permettant le choix des solutions de façade dans les étapes préliminaires de la conception. Suite à une analyse des divers MCDM, trois méthodes ont été retenues les plus efficaces : le AHP, le *Choquet integrals*, et le TOPSIS. Les auteurs évaluent quatre alternatives de panneaux de façade à travers huit critères décisionnels : l'esthétique, le poids, la résistance au feu, l'acoustique, l'empreinte environnementale, la facilité de construction, la durabilité et le coût initial. Le travail est, par contre, réalisé que pour un des composants de la façade sans prendre en compte la maîtrise des interfaces, ainsi que pour des critères comme le confort thermique et la performance énergétique.

Une proposition d'analyse multicritère de plusieurs solutions de façades adaptatives est faite par Mols (Mols, et al., 2017). Dans ce cas, les critères de choix sont : le coût global ; la complexité de la construction ; la résistance thermique ; la complexité de gestion ; la rapidité d'adaptation ; l'influence de l'occupant ; la valeur esthétique. Le poids de critères a été établi à priori à l'aide de professionnels de physique du bâtiment. La méthode implémentée est le *Simple Additive Weighting* (SAW). Même si la méthodologie permet d'évaluer quelle solution est la plus performante dans un certain climat, l'évaluation demeure assez qualitative et subjective. De plus, l'établissement des poids des critères détermine une négligence par rapport à des situations de compromis et ne prend pas en compte les autres aspects de la conception.

Iwaro et Mwashu (Iwaro & Mwashu, 2013), proposent une méthodologie pour estimer l'impact de la conception de l'enveloppe, visant à maximiser la durabilité, sur la conception globale. Cela se fait à travers un indicateur global venant d'une analyse multicritère. La définition des poids dans cette méthodologie se fait de façon subjective ou, dans le cas de méconnaissance de la hiérarchie des critères, à travers l'utilisation de CRITORT, une technique permettant d'établir des poids objectifs. Les critères sur lesquels les auteurs basent leur méthodologie sont : Efficacité économique ; Efficacité énergétique ; Efficacité du matériel ; Efficacité de régulation ; Impact environnemental ; Avantages externes. Les six critères sont aussi encore développés en 57 sous-critères. D'autre part, les trois alternatives d'enveloppe étudiées, concernent la variation des caractéristiques et des composants de la toiture, des murs, des fenêtres des portes externes, des planchers et la surface brute de l'enveloppe par rapport au plancher. La méthodologie fournie demeure assez exhaustive concernant les critères pris en compte. Par contre, la méthodologie demeure difficilement intégrable dans les étapes préliminaires de la conception, aussi à cause de la nécessité d'utilisation d'une série d'outils d'évaluation de la performance.

Deniz et Ekinçi (Deniz & Ekinçi, 2016) utilisent la méthode AHP, pour réaliser une évaluation de plusieurs alternatives de composants d'enveloppe (toiture, murs, fenêtres et plancher à l'extérieur) par rapport au risque de condensation, le coefficient de déperdition thermique, l'acoustique, le coût et l'efficacité de nettoyage. Ils évaluent aussi la distance entre les résultats des alternatives et une

solution idéale de composant. Dans ce cas on remarque une carence de critères d'évaluation et le manque de prise en compte de la phase de réalisation et exploitation.

Donnarumma et Fiore (Donnarumma & Fiore, 2016) proposent une analyse pour l'évaluation de plusieurs stratégies de réhabilitation énergétique, basées sur quatre alternatives d'isolation thermique. Le poids des critères est défini sur l'avis des professionnels et les critères d'évaluation sont :

- la performance énergétique, dont les sous-critères sont l'indicateur de performance énergétique globale venant de la législation actuelle, le comportement hygroscopique du composant, le coefficient de transmission périodique et la surface équivalente en été par rapport à la surface du plancher ;
- la soutenabilité, à travers un indicateur unique incluant l'analyse de cycle de vie, la maintenance et la réversibilité de la technologie ;
- le coût, évalué à l'aide de deux indicateurs de convenance économique (la période de retour d'investissement et l'indicateur de profitabilité). Aussi dans ce cas, les aspects liés à la mise en œuvre et à la gestion des interfaces ne sont pas prises en compte.

## Conclusions du chapitre 2

Ce chapitre nous a permis de passer en revue les définitions et les méthodes concernant les deux domaines principaux relatifs à la gestion de la performance. En s'appuyant sur la définition et la démarche de l'approche performancielle, nous avons analysé, d'une part la constructibilité (entendue comme *constructability*) permettant une gestion technique du bâtiment et du processus de construction, plus proprement, donc, de la faisabilité technique ; d'autre part, les méthodes permettant un accompagnement à la conception se basant sur la performance.

Nous avons vu que les concepts de constructibilité ne sont pas formellement appliqués à la conception. Les principes de constructibilité concernent des bonnes pratiques constituant un vadémécum dont il faudrait tenir compte tout au long du cycle de vie. Ces concepts demeurent généraux, parfois répétitifs, et difficilement intégrables en pré-design.

Les outils permettant une évaluation de la constructibilité, de plus, se basent sur la définition « anglo-saxonne » de cette discipline. A notre avis il est nécessaire d'intervenir sur deux plans, afin de faciliter l'introduction de la constructibilité « française » en pré-design :

- La réalisation d'une méthode simple permettant d'introduire les concepts de constructibilité en conception et de les quantifier ;
- Prendre en compte, parmi les concepts de constructibilité, le respect des indicateurs de performance spécifiant les diverses fonctions d'usage du bâtiment.

Dans le cadre des méthodes d'accompagnement axées sur la performance, nous avons listé trois types d'outils. Chacun de ces outils demeure, de quelque façon, limité. Les outils fournissant des directives de conception peuvent être utilisés pendant la définition initiale des grandes lignes de conception, mais ils ne permettent pas une évaluation. Les outils de simulation permettent d'accompagner le choix mais, sauf leur utilisation dans une approche BIM, ils se montrent encore trop disjoints sur le plan des modèles et des expertises demandées. Les démarches se basant sur

l'obtention des certifications, tout en prévoyant une série d'évaluations qui tiennent compte de l'ensemble du cycle de vie, se basent sur un résultat global peu indicatif et négligent les aspects relatifs à la constructibilité.

Nous nous appuyons sur ces constats pour développer une nouvelle méthode qui puisse à la fois accompagner le concepteur dans une démarche d'amélioration de la constructibilité du pré-design et permettre une évaluation de la pertinence du pré-design même. Les concepts de pertinence et les bases de la nouvelle méthode seront traités dans le chapitre suivant.



## Chapitre 3 : Définition d'une nouvelle méthode

Dans ce présent chapitre nous présentons les principes de la nouvelle méthode et la détermination du cadre général d'évaluation.

Parmi les approches permettant d'apporter une contribution à l'amélioration du processus de construction, la constructibilité représente la discipline sur laquelle nous basons notre réflexion. A travers sa vision duale du système « à faire » et du système « pour faire » elle permet d'intervenir globalement sur la problématique de la garantie de performance.

Une analyse des problèmes souvent rencontrés lors de la conception nous permettra de mieux comprendre les aspects sur lesquels il faut se concentrer pour vérifier que le pré-design soit cohérent avec les exigences du programme et les moyens mis en place. La définition des critères est faite en s'appuyant sur les concepts de pertinence et de robustesse. Ces deux concepts demeurent à la base de la réflexion portée pour la réalisation de la méthode d'accompagnement et d'évaluation du projet en phase de pré-design.

L'évaluation de la pertinence d'un projet est abordée à l'aide de la méthode dite « 4A ». Une fois la méthode 4A analysée, nous proposons une réinterprétation de son architecture, car, pour l'instant, son formalisme demeure relatif à la phase de lancement de l'opération. Nous proposons donc un nouveau cadre d'évaluation représentant la suite naturelle du diagnostic de pertinence en pré-design et adapté à la problématique duale produit/processus.

Sur la base de cette adaptation, nous définirons les critères de constructibilité pour l'évaluation et d'accompagnement en phase de pré-design.

Les divers critères seront ainsi détaillés en sous-critères dont la caractérisation tiendra compte des bonnes pratiques telles que les concepts de constructibilité, comme elle est définie au niveau international, et les outils de prévision et d'évaluation de la performance actuellement utilisés.

### 3.1. Principes généraux de la méthode

Le cadre des nouvelles constructions se montre encore défaillant vis-à-vis des objectifs ambitieux de garantie de performance et, en conséquence, de la gestion du processus. La méthode que nous proposons devrait donc permettre de mieux structurer le processus et de vérifier, dès le pré-design la pertinence de l'objet conçu.

Parmi les méthodes recensées et les approches analysées, la discipline de la constructibilité, avec sa définition française, se montre la plus exhaustive, car elle formalise un cadre d'intervention qui intéresse à la fois le produit (ouvrage) à travers le concept de performance d'usage, et le processus.

La définition de notre méthode d'évaluation, par conséquent, se base sur la constructibilité et sur sa vision qui concerne en parallèle le système « pour faire » et le système « à faire ». La constructibilité, en effet, permet d'explicitier des principes concernant le système « pour faire » à travers : 1) la prise en compte et la facilitation des étapes suivantes et 2) la gestion des ressources et des compétences. D'autre part, le système « à faire » est considéré comme l'ensemble des sous-systèmes interconnectés au service de l'utilisateur.

Si la constructibilité représente la base sur laquelle fonder notre méthode d'évaluation, il est nécessaire de formaliser les critères permettant l'évaluation même. La grille d'évaluation est définie en se basant sur l'analyse des problèmes rencontrés tout au long du processus et sur le concept de pertinence. Le concept de pertinence, en effet, permet de bien expliciter la mission de la constructibilité, car il crée le lien entre l'objet et l'objectif à travers la vérification réalisée à tout moment.

La pertinence d'un projet, comme présenté par Garrabé (Garrabé, 1992) peut être définie comme

*« Sa capacité à réaliser les objectifs qui lui sont assignés ».*

La mesure de la pertinence permet de maîtriser les risques de changement de la performance, autrement dit, de prévenir la défaillance du système. Un projet pertinent réduit l'incertitude quant à l'obtention des résultats. L'évaluation de la pertinence, demande l'identification des risques majeurs de défaillance et de leurs causes. Ensuite la pertinence peut être évaluée à l'aide d'une méthode incluant ainsi la simulation d'une scénarisation donnée (Garrabé, 1992).

La pertinence nécessite donc d'être traitée pour les deux systèmes mis en évidence par la constructibilité.

La prise en compte de l'échelle temporelle et de la probabilité de changement de la pertinence du projet demeure à la base du concept de robustesse. Selon la définition fournie par Struck (Struck, 2012) :

*« Un projet est robuste s'il arrive à garantir les performances demandées, tout en considérant des variations dues à la phase de conception, à la réalisation ou à l'usage ».*

Dans ce cas, il est nécessaire de vérifier la pertinence du pré-design tout en tenant compte des incertitudes du processus. L'incertitude des étapes suivantes la conception peut être considérée à travers des approches probabilistes ou non probabilistes. Dans le premier cas, il est possible de faire recours à une distribution probabiliste de la variation des paramètres choisis. Dans le deuxième cas, il est possible de recourir à la formulation de scénarios. L'analyse des divers scénarios permet

ensuite d'évaluer la robustesse d'un certain scénario par rapport à une solution dite optimale. Dans ce cadre, Kotireddy (Kotireddy, et al., 2018) propose une série de scénarios qu'il est possible de considérer dans une analyse de robustesse.

Les scénarios sont différenciés en :

- Scénarios d'usage : changements de consignes des systèmes CVC, du nombre d'équipements, du temps d'occupation, scénarios d'usages du système d'éclairage, etc. ;
- Scénarios climatiques : changements par rapport au climat de référence ;
- Scénario d'occupation : changement du nombre d'occupants (combien de personnes) ;
- Scénarios politiques : avantages économiques prévus pour la mise en place de certains dispositifs, politique énergétique, tarif énergétique, etc.

D'autre part, nous soulignons la nécessité d'introduire des scénarios de variation concernant le plan technologique. Cela permet de tenir compte du vieillissement des produits de construction et de la qualité de la mise en œuvre. Dans le cadre de la thèse nous nous intéressons principalement à la pertinence d'un pré-design, en considérant dans les perspectives futures l'analyse de la robustesse.

Comme nous allons le voir, sur la base d'une méthode permettant le diagnostic de pertinence d'un projet, nous allons donc déterminer l'ensemble des critères d'évaluation d'une solution en phase de pré-design. Les divers critères sont ensuite déclinés à travers des sous-critères et des indicateurs, dont la définition tient sur les concepts de constructibilité déjà présentés dans la littérature (faisabilité technique) et les outils et les méthodes d'évaluation de la performance.

La Figure 3-1 représente la synthèse de l'ensemble des concepts exposés pour la définition du cadre d'évaluation de la méthode.

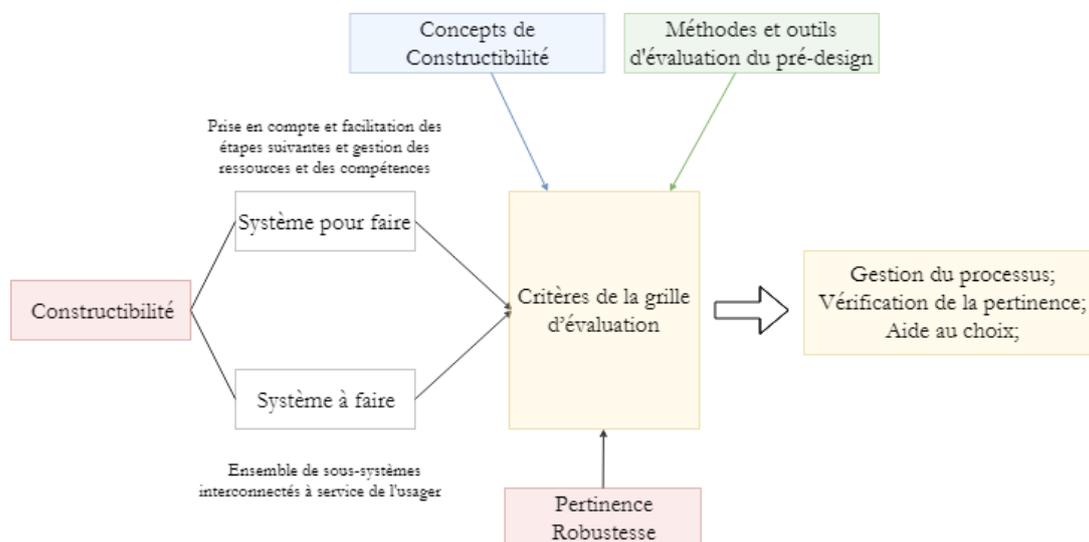


Figure 3-1 – Principes de détermination du cadre d'évaluation de la méthode proposée.

Afin d'apporter une réponse concrète à l'industrie de la construction à travers notre méthode, la définition des critères, des sous-critères et des indicateurs les représentant, ne peut pas faire abstraction des causes de dégradation de la performance. C'est à partir de l'analyse des problèmes les plus récurrents en phase de conception (au paragraphe suivant) que nous allons donc établir le cadre d'évaluation relatif à la pertinence du pré-design et de la solution.

## 3.2. Détermination des critères pour la méthode d'évaluation

Comme déjà anticipé dans le paragraphe §3.1, il est nécessaire de définir le cadre d'évaluation de la méthode. Les méthodes d'évaluation actuellement utilisées se montrent non exhaustives car très focalisées sur la seule performance du système « à faire ». La prise en compte de critères relatifs à l'évaluation du processus nécessite une analyse des causes de dégradation de la performance qu'il est possible de rencontrer pendant la phase de conception.

Une fois les causes de dégradation de la performance déterminées, nous allons nous appuyer sur les méthodes de diagnostic de pertinence pour la détermination des critères de la méthode que nous proposons.

### 3.2.1. Les causes de la dégradation de la performance du bâtiment

Koles (Koles, et al., 1996) explique que la performance du bâtiment n'est pas une quantité statique. Alors que, en phase de conception, les critères de performance peuvent être considérés comme des cibles statiques, la performance réelle est toujours en évolution comme l'état des éléments composant le bâtiment. La performance se dégrade et, pour certains aspects, il s'agit d'un phénomène naturel.

Plusieurs auteurs proposent une lecture des risques de dégradation.

Koles (Koles, et al., 1996) souligne deux causes principales et trois symptômes de la dégradation de la performance (Tableau 3-1). Les symptômes sont : la perte de flexibilité, la perte d'efficacité, une réduction de la capacité à fournir un service. Ces symptômes sont principalement dus au vieillissement des composants, et/ou par une mauvaise gestion du processus.

Tableau 3-1 – Causes, conséquences et solutions possibles pour les dysfonctionnements du bâtiment

Causes	Conséquences	Solutions possibles
<ul style="list-style-type: none"><li>- Vieillesse des composants (dysfonctionnements ou perte d'efficacité ou de capacité fonctionnelle)</li><li>- Les services désirés se sont développés au-delà de l'intention de la conception originale (phases opérationnelles)</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Perte de flexibilité et de moyens (aptitude à répondre au niveau de performance demandé)</li><li>- Perte d'efficacité et augmentation des coûts de maintenance</li><li>- Leur capacité à fournir des services du bâtiment baissera au-dessous du seuil d'acceptabilité</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Maintenance préventive (prévoir le timing et réaliser la maintenance à intervalles réguliers)</li><li>- Réajustement préventif du niveau de performance (prévoir la possibilité de régler le système)</li><li>- Mise à niveau d'un sous-système</li></ul>

Dans un rapport de demande/offre, il est possible d'identifier les facteurs qui, tout au long du processus, conduisent à ce que Gobin (Gobin, 2008) appelle la défaillance du produit. Dans ce cas, l'attention est basée sur le processus et sur les parties prenantes qui devraient prendre en compte la capacité fonctionnelle des composants et garantir leurs choix et responsabilité.

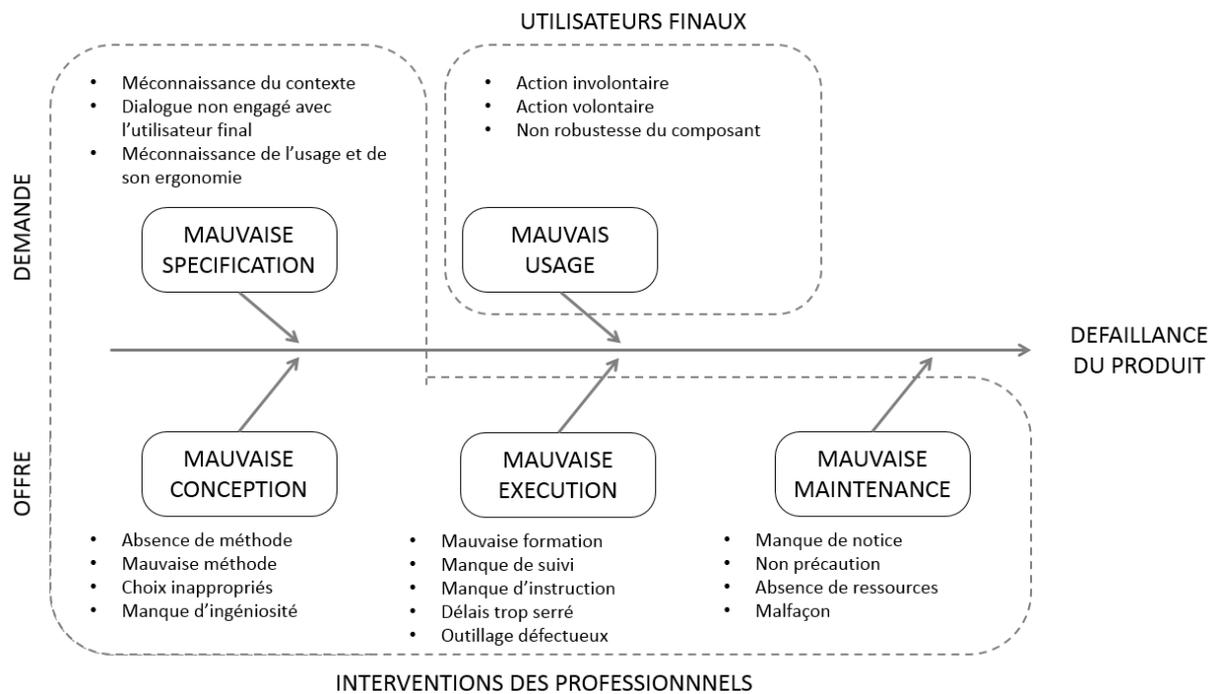


Figure 3-2 – Facteurs conduisant à la défaillance d'un produit (Gobin, 2008)

Marmot (Preiser, et al., 2005) analyse les problèmes les plus communs relatifs à la phase de programmation. Le retour d'expérience en UK et en Amérique du Nord montre que cette phase est loin d'être généralisée systématiquement. En effet il n'y a pas une seule directive pour la bonne exécution de cette étape. L'analyse permet de lister les problèmes rencontrés par rapport aux retours d'expérience.

Tableau 3-2 – Problèmes les plus communs en amont de la conception (Preiser, et al., 2005)

Problème	Cause	Conséquence directe
Programmation inadéquate ou inexistante	Inexpérience de la MOA	Accepter une conception non-fonctionnelle
Informations incomplètes	Manque de temps	Développement des informations plus tard par la MOE et pas de temps à dédier pour les choix technique et la maîtrise des espaces
Réalisation d'un programme sans ambitions	Manque d'ambition	Le programme demeure qu'une liste d'espaces fonctionnels ; une occasion perdue pour réaliser des nouveaux bâtiments, développer et changer les pratiques.
Non prise en compte du programme	Manque de temps, pressions commerciales, tendance à développer les solutions finales avant l'appréciation des critères de performances définis dans le programme	Préjudice du processus et manque d'approche intégrée

Concernant les phases suivantes (conception, réalisation, livraison), Gobin (Gobin, 2009) propose un exemple d'inventaire de Coûts de non qualité. Dans le Tableau 3-3 nous reportons la spécification relative à la phase du processus, mais aussi aux aspects techniques de la matérialité de l'ouvrage. Cette analyse est réalisée avec la méthode des 5 « m » de Ishikawa qui classe les différentes causes d'un problème en 5 grandes familles : les matériaux, la méthode, la main-d'œuvre, le matériel et le milieu.

Tableau 3-3 – Spécification des coût de non qualité pour la phase de conception (Gobin, 2009)

Etape	Matériaux	Méthode	Main-d'œuvre	Matériel	Milieu
Conception	Erreur de choix Mauvais dimensionnement	Retard de décision	Erreur de dessin Non cohérence	-	Arrêt du permis de construire par les riverains

L'exercice d'explicitation des risques est réalisé aussi par Van Moeseke dans son travail de thèse (Van Moeseke, 2013). Dans ce cas, le domaine d'étude est la performance énergétique. Concernant la conception, les problèmes sont plutôt relatifs à l'évaluation de la performance. L'auteur développe son analyse se concentrant notamment sur l'incertitude des résultats pour une évaluation *a priori* des performances énergétiques et sur l'imprécision des outils d'évaluation. Concernant le premier aspect, la probabilité peut être prise en compte comme incertitude sur les hypothèses faites pour l'évaluation de la performance énergétique ou d'autre part pour la prise en compte de scénarios probables.

Tableau 3-4 - Risques liés à l'objectif de haute performance énergétique (Van Moeseke, 2013)

Etape	Risque	Conséquence
Conception	Imprécisions des outils d'évaluation	Degré d'incertitude sur les résultats
	Mauvaise traduction des objectifs dans les évaluations	Utilisation des outils d'une façon non pertinente pour répondre à la question posée
	Mauvaise interprétation des résultats d'évaluation	Décisions non conformes aux conclusions
	Intégration partielle ou inadéquate des conclusions d'évaluation dans le projet	Mise en péril du fonctionnement des dispositifs mis en œuvre
	Effets combinés inattendus avec autres dimensions du projet	Interférence entre dispositifs modifiant le comportement de ceux-ci

Van Moeseke expose les difficultés et la complexité pour la prise en compte des incertitudes sur les hypothèses dans l'évaluation de la performance.

Dans le cadre de la thèse, l'échange avec les professionnels, formalisé aussi sous forme d'enquête réalisée auprès d'agences d'architecture, de bureaux d'études techniques et de sociétés de conseil (en total 17 participants à l'enquête), nous a permis de remarquer que les problèmes les plus récurrents aujourd'hui concernant l'enveloppe et la performance énergétique sont :

- La complexité des solutions qui demeurent difficile à construire et difficile à appréhender/à simuler énergétiquement. Cela comporte : 1) la modification des solutions techniques, de la part de l'entreprise pour une meilleure mise en œuvre ; 2) changement de la performance qui n'est pas forcément prise en compte dans une nouvelle simulation ;
- La gestion des interfaces et des zones de pont thermique ;
- Mauvaise prise en compte du comportement des usagers ;
- Mauvais choix des composants en termes de performances ou d'incohérence avec les produits disponibles sur le marché ;

Pour les équipements techniques les problèmes soulevés par les professionnels concernent :

- La qualité des systèmes de gestion technique du bâtiment ;
- Complexité des systèmes au niveau de la mise au point et de la maintenance ;
- Manque de contrôle tout au long du processus et d'une démarche BIM ;
- Manque de suivi et de formation des usagers.

### 3.2.2. Le diagnostic de pertinence et la méthode « 4A »

Les retours d'expériences permettent de constater que les projets récents sont souvent caractérisés par une dérive des coûts et le dépassement du délai établis en amont du processus. Afin de réduire ces problèmes il est nécessaire de mieux maîtriser le processus en vérifiant que le projet demeure pertinent pendant les diverses phases de son cycle de vie.

Il s'agit donc d'introduire des étapes d'analyse et de vérification ultérieures dans le démarches de conception dans lesquelles mettre en place un diagnostic de pertinence.

Le diagnostic de pertinence demande la définition d'un cadre d'évaluation et d'un cadre de lecture du projet. D'autre part, ce cadre varie en fonction de l'objectif attendu par le résultat de chaque étape. Gobin (Gobin, 2017b) pose la problématique relative à la réalisation du diagnostic de pertinence au préalable de tout lancement de projet. Il s'agit de bien structurer le lancement d'une opération sur la base des finalités du projet, des moyens mis en place et de son insertion dans un territoire existant. Le cadre de lecture fourni par le diagnostic de pertinence permet de mieux expliciter les objectifs du programme, en s'assurant qu'ils puissent être cohérents avec le contexte de l'opération.

Selon Gobin la lecture du projet, en vue de son insertion dans un environnement géographique, ainsi que socio-culturel, peut s'organiser selon quatre types de contributions : contributions à la compétitivité, au cadre de vie, à la variabilité et à la cohésion (Gobin, 2017b). L'ensemble de ces contributions établit la structure d'évaluation pour la réalisation d'un diagnostic de pertinence. La méthode proposée par l'auteur, prend le nom de méthode « 4A ». Comme représenté dans le Tableau 3-5, à chaque contribution, correspond un aspect du projet dont il faudra tenir compte lors du lancement de l'opération.

Tableau 3-5 – Architecture du diagnostic 4A relatif à la pertinence d'un projet en vue de son intégration dans un territoire (Gobin, 2017b)

Objectif	Cadre d'analyse du projet
Contribution à la compétitivité	Avantages
Contribution au cadre de vie	Aménités
Contribution à la variabilité	Adaptation
Contribution à la cohésion	Acceptabilité

Chacun de ces aspects concerne une série d'engagements qui permettent de mieux établir l'apport du projet au contexte de sa réalisation. La prise en compte de ces apports permet, donc, une meilleure gestion du produit et du processus. En suivant le cadre établi par Gobin (Gobin, 2017b), nous allons donc détailler les diverses contributions et leur traduction en termes d'engagement.

Contribution à la compétitivité : compte tenu de l'insertion dans un territoire, chaque projet doit être considéré comme une contribution active à la compétitivité du territoire même. L'avantage se caractérise, d'une part, par la valeur ajoutée que le projet apporte au site et, d'autre part, par l'achèvement et l'enrichissement d'un cadre préexistant.

Contribution au cadre de vie : pour « aménités suscitées » la méthode considère l'impact que la construction future aura sur le territoire en terme d'environnement urbain (infrastructures et équipements pour la société) et d'écosystème (soutenabilité du projet).

Contribution à la variabilité : l'adaptation du projet à un changement prend en compte la perspective temporelle du projet. Cela concerne, d'une part l'assurance quant à l'obtention des niveaux de performance établis et, d'autre part les actions de remise à niveau des éléments formalisant le projet. Il s'agit donc d'évaluer la performance et de concevoir et prévoir les actions de vérification.

Contribution à la cohésion : l'acceptabilité d'un projet concerne la capacité à financer l'opération et l'encouragement au « codéveloppement ». Le sujet économique, dans ce cadre, est traité sous-forme de sensibilisation aux tâches ultérieures qui demeurent nécessaires à l'exploitation du service attendu. En parallèle l'acceptabilité représente une mesure de l'implication des acteurs.

Les divers aspects de la méthode « 4A » fournissent une lecture globale du projet qui sera réalisé. La réalisation d'un diagnostic de pertinence à travers la méthode « 4A » permet de réaliser des choix responsables et cohérents dans la définition et la validation du programme. D'autre part, tout en considérant la bonne réalisation du programme, la problématique relative aux autres étapes du processus de construction demande la spécification d'un cadre d'évaluation différent, ainsi que plus parlant.

C'est-à-dire que à chaque étape il est nécessaire d'introduire et de supporter un diagnostic de pertinence par rapport à l'étape précédente (Figure 3-3) l'ensemble de ces diagnostics devrait donc constituer le programme de constructibilité établi en amont du processus.



Figure 3-3 – Introduction de l'évaluation de la pertinence tout au long du cycle de vie du bâtiment

Sur la base de la méthode « 4A », dans le paragraphe suivant nous traitons les divers aspects de la pertinence en les déclinant en fonction du système « à faire » et du système « pour faire » avec l'objectif d'établir nos critères de constructibilité constituant le cadre d'évaluation.

### 3.2.3. L'adaptation de la méthode « 4A » au pré-design et la définition des critères d'évaluation

Les quatre aspects caractérisant le diagnostic de pertinence d'un projet définis à l'aide de la méthode 4A, fournissent un cadre d'évaluation se référant principalement à la phase de lancement de l'opération. Cependant, la phase de pré-design introduit la matérialité de la solution dans le processus et concerne une série d'acteurs chargés des diverses études. Il est donc nécessaire une transposition de ces aspects liés à la pertinence pour les étapes suivant la phase de programmation. Les aspects de la méthode peuvent être déclinés et adaptés à l'approche systémique de la constructibilité. Nous avons, donc, traduit les « 4A » en termes de produit (système à faire) et de processus (système pour faire), de la façon suivante :

L'avantage s'explique, pour le « système pour faire », à travers une mise en pratique d'une approche concourante et des principes de constructibilité technique, pour avantager la réalisation et l'exploitation du bâtiment ; concernant le « système à faire », cet aspect représente la valeur économique, compte tenu des investissements et de l'exploitation de l'ouvrage.

L'adaptation concerne le « système pour faire » à travers la prévision et la réalisation des actions de vérification tout au long du cycle de vie du bâtiment. L'adaptation du « système à faire » s'explique grâce à l'évaluation de la pertinence/robustesse de la performance du bâtiment vis-à-vis des exigences fixées dans le programme.

L'aspect de l'aménité explicite les concepts de soutenabilité environnementale liés à la fois aux procédés de production (système pour faire) et aux matériaux et à l'utilisation des ressources engendrées par le produit final (système à faire).

L'acceptabilité se traduit pour le « système pour faire » dans l'évaluation des compétences disponibles tout au long du cycle de vie et, pour le « système à faire », dans la gestion et les tâches complémentaires pouvant garantir le niveau de performance.

Le Tableau 3-6 représente la synthèse de cette traduction et constitue le point de départ pour la détermination des critères de constructibilité.

Tableau 3-6 – Adaptation de la méthode « 4A » à l'évaluation du pré-design

Méthode « 4A »	Système concerné	Description
Avantage	système pour faire	mise en pratique d'une approche concourante et des principes de constructibilité pour avantager la réalisation et l'exploitation du bâtiment
	système à faire	valeur économique, compte tenu des investissements et de l'exploitation du bien
Adaptation	système pour faire	réalisation et prévision des actions de vérification dans le cycle de vie du bâtiment
	système à faire	évaluation de la pertinence/robustesse de la performance du bâtiment vis-à-vis des exigences fixées dans le programme
Aménité	système pour faire	soutenabilité des procédés mis en place pour la fabrication des produits et la réalisation du système.
	système à faire	soutenabilité des matériaux mis en place et utilisation de ressource en termes de sol, eau et énergie en phase d'exploitation
Acceptabilité	système pour faire	disponibilité des compétences dans les diverses phases du cycle de vie pour la bonne réussite du processus.
	système à faire	concerne la prise en compte de la gestion du système en termes de tâches ultérieures pour le maintien de la performance globale

D'autre part, les caractéristiques d'un système d'évaluation liée à la constructibilité ont été définies par Fadoul (Fadoul, et al., 2017). Ce système doit, donc, être :

- Générique : applicable à tout moment dans le processus de conception et indépendant du contexte dans lequel l'évaluation se fait ;
- Flexible : les utilisateurs peuvent adapter le modèle pour répondre aux conditions de conception et satisfaire les exigences qui caractérisent cette étape ;
- Compréhensif : capable de couvrir tous les aspects de constructibilité dans le processus d'évaluation en laissant à l'utilisateur la possibilité de déterminer les éléments sur lesquelles il s'applique ;
- Simple : facilement applicable et intégrable dans une conception prévoyant des technologies innovantes
- Précis : les résultats de l'évaluation représenteront précisément la constructibilité de la conception ;
- Efficace : permettant au concepteur de comprendre les aspects améliorables en termes de constructibilité, ce qui est le but du processus d'évaluation.

Sur la base de ces définitions nous avons, donc, établi sept critères d'évaluation qui concernent à la fois le « système à faire » et le « système pour faire ». Les divers critères sont ultérieurement développés en sous-critères. La définition des sous-critères est nécessaire pour la quantification des sept critères. Dans ce cadre, ils seront basés sur les concepts de constructibilité et sur les méthodes d'évaluation du pré-design, traités lors de l'état de l'art.

Comme nous l'avons déjà vu la constructibilité pose l'attention sur le système à faire et donc sur le projet, dans notre cas le projet en pré-design, et le système pour faire, moyens techniques et humains.

Dans ce cadre nous distinguons des critères d'évaluation propres du « système pour faire » et d'autres critères pour le système « à faire ».

Les critères propres du système « pour faire » permettent d'évaluer :

- la prise en compte et l'effort de facilitation des étapes de réalisation, exploitation et fin de vie ;
- la gestion du processus tout au long du cycle de vie ;
- l'impact sur l'environnement dû aux processus de fabrication et d'exploitation ;

Leur détermination vient de l'analyse des bonnes pratiques en termes de faisabilité technique (ou constructability) et des démarches durables.

Pour faciliter l'application de la méthode d'évaluation du pré-design et la prise en compte de la constructibilité dès le début de la conception, nous avons volontairement limité le nombre de critères. Nous avons, donc, décidé de regrouper plusieurs concepts de constructibilité en fonction du type de management nécessaire pour une bonne réussite du projet.

Sur la base de la définition de la pertinence et des aspects qui la caractérisent, nous allons alors évaluer la solution définie en pré-design à travers sept (7) critères (dont la caractérisation est plus largement exposée au chapitre 4) comme représenté dans la Figure 3-4.

La même figure explicite le lien entre les aspects de la méthode « 4A » adaptée et les critères de constructibilité suivants :

- CC1 : La simplicité de la solution ;
- CC2 : Les possibilités de vérification ;
- CC3 : La disponibilité des compétences ;
- CC4 : La simplicité de la gestion (sur le cycle de vie) ;
- CC5 : Pertinence/Robustesse vis-à-vis des fonctions d'usage ;
- CC6 : La soutenabilité environnementale ;
- CC7 : L'économie du pré-design

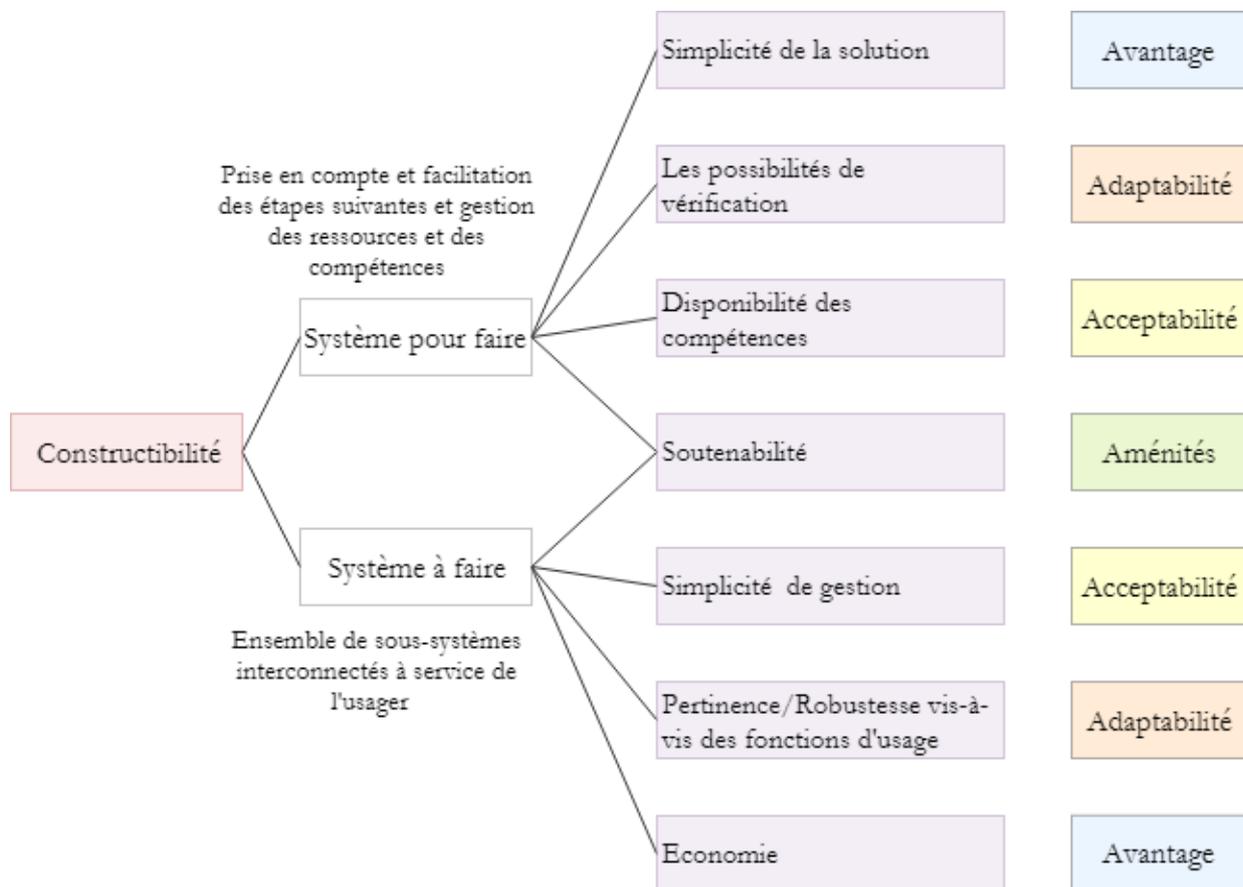


Figure 3-4 – Explication des critères d'évaluation et lien avec les divers aspects de la méthode « 4A » adaptée au pré-design

Les divers critères demeurent très généraux et nécessitent d'être mieux détaillés à l'aide de sous-critères. Ces derniers doivent être structurés de façon à inclure les diverses causes de dégradation de la performance, que nous avons déterminé dans le paragraphe 3.2.1, afin de les prévenir. L'explicitation des divers critères doit ainsi tenir compte des bonnes pratiques, c'est-à-dire des concepts de constructibilité et des outils d'évaluation traités dans le chapitre 2.

Les concepts de constructibilité (en termes de *constructability* ou faisabilité technique), que nous avons vu au Tableau 2-5, concernent les aspects caractérisant la simplicité de la solution, sa gestion, les compétences demandées, la vérification (tout au long du cycle de vie) et les aspects de soutenabilité environnementale en termes de procédés mis en place pour la production et la fin de vie. Ils ne touchent pas directement aux sujets concernant l'économie et le respect des fonctions d'usages (Figure 3-5).

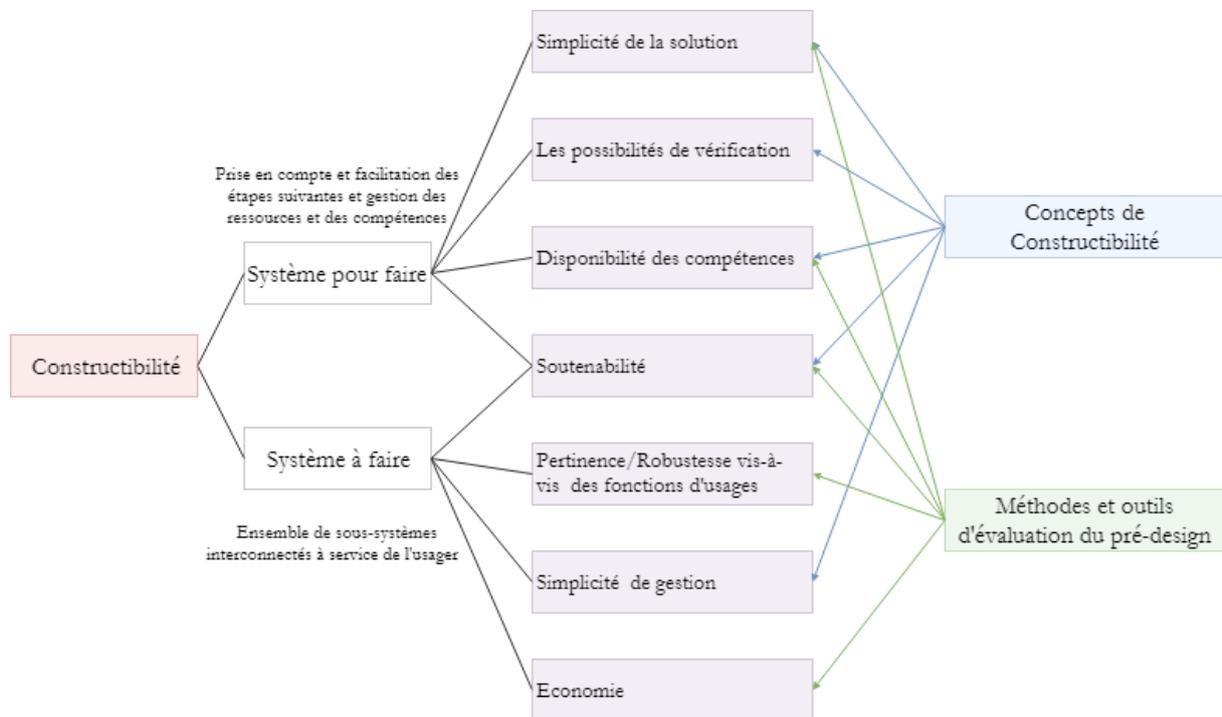


Figure 3-5 – Détermination des critères de constructibilité pour l'évaluation du pré-design

Dans le système d'évaluation que nous proposons, nous avons aussi considéré, afin d'alimenter les critères, toutes les méthodes d'évaluation et d'accompagnement du pré-design. Les outils d'évaluation, en s'appuyant sur des modèles de simulation, ont été considérés comme moyen pour l'obtention des résultats en termes de performance environnementale des espaces (pertinence et robustesse vis-à-vis des exigences), de la soutenabilité et de l'économie. De même, les cibles des divers labels vus dans le chapitre 2 demeurent à la base de la formulation des sous-critères, surtout concernant les aspects de développement durable et de gestion.

Les outils fournissant des directives ont été considérés plutôt dans la forme, pour le développement de la méthode d'évaluation. En effet, pour les critères plutôt relatifs au système « pour faire » et à la gestion de la solution, nous avons prévu un système de notation : plus des bonnes pratiques sont mises en place, plus la note est élevée. Cette démarche, plutôt pédagogique, permet de fournir des indications au concepteur quant aux actions à effectuer pour améliorer son pré-design.

La réflexion réalisée concernant les divers concepts de constructibilité nous a porté à considérer plusieurs sous-critères capables de :

- Prendre en compte les concepts de constructibilité sans être redondants ou répétitifs ;
- Prendre en compte les divers sous-systèmes techniques ;
- Prendre en compte les diverses étapes et acteurs du cycle de vie ;

Les divers sous-critères ont le but de mieux spécifier les critères définis, de façon simple et directe tout en prenant en compte les divers aspects de la constructibilité et de la performance intrinsèque du produit.

L'ensemble des sous-critères des indicateurs et des modalités d'évaluation sera plus largement traité dans le chapitre 4. Pour l'instant nous nous limitons à fournir une liste des sous-critères dans le Tableau 3-7. Ce tableau permet de mettre en relation les divers critères (spécifiées à travers les sous-critères) et les bonnes pratiques en termes de concepts de constructibilité (listés dans le Tableau 2-5) et de méthodes d'évaluation (présentées dans le chapitre 2). Les méthodes d'accompagnement et évaluation du pré-design sont reportées comme A, B et C pour distinguer les diverses familles de méthodes traitées dans le chapitre 2. (A = Outils fournissant des directives ; B = outils d'évaluation de la performance ; C= outils de classification). Pour la troisième famille nous avons reporté dans le tableau les seules cibles du label HQE BD.

Tableau 3-7 – Prise en compte des 23 concepts de constructibilité (CC<sub>i</sub>) (selon la définition internationale) et des méthodes d'évaluation de la performance pour la détermination de l'ensemble des sous-critères (A = Outils fournissant des directives ; B = outils d'évaluation de la performance ; C= outils de classification)

Critère	Sous-critères	Constructability	Méthodes d'évaluation de la performance		
		Concepts de constructibilité	A	B	C (HQE BD)
CC1 Simplicité de la solution	Niveau de standardisation	CC <sub>11</sub> CC <sub>12</sub> CC <sub>13</sub> CC <sub>15</sub> CC <sub>16</sub> CC <sub>20</sub>	X		
	Organisation des équipements techniques	CC <sub>6</sub> CC <sub>12</sub>	X		
	Types de production des technologies	CC <sub>3</sub> CC <sub>8</sub> CC <sub>9</sub> CC <sub>13</sub> CC <sub>15</sub> CC <sub>16</sub> CC <sub>18</sub> CC <sub>19</sub> CC <sub>20</sub>	X	X	
	Modes constructifs	CC <sub>6</sub> CC <sub>11</sub> CC <sub>12</sub> CC <sub>13</sub> CC <sub>16</sub> CC <sub>20</sub>	X		
	Types d'Interfaces techniques	CC <sub>3</sub> CC <sub>6</sub> CC <sub>11</sub> CC <sub>12</sub> CC <sub>18</sub> CC <sub>20</sub> CC <sub>21</sub>	X		
CC2 Possibilité de vérification	Outils à support de la conception	CC <sub>1</sub> CC <sub>2</sub> CC <sub>3</sub> CC <sub>9</sub> CC <sub>10</sub> CC <sub>15</sub> CC <sub>17</sub> CC <sub>18</sub> CC <sub>19</sub> CC <sub>20</sub>	X	X	Système de Management Responsable
	Risques et registre des problèmes	CC <sub>1</sub> CC <sub>2</sub> CC <sub>22</sub> CC <sub>23</sub>	X		Système de Management Responsable
	Essais prévus	CC <sub>4</sub> CC <sub>6</sub>	X		
	Facilité d'accès à la vérification	CC <sub>6</sub> CC <sub>21</sub>	X		
CC3 Disponibilité des compétences	Développement détails techniques	CC <sub>6</sub> CC <sub>10</sub> CC <sub>12</sub>	X		
	Modélisation	CC <sub>2</sub> CC <sub>4</sub> CC <sub>6</sub>	X	X	
	Main d'œuvre ou équipements spéciaux	CC <sub>7</sub> CC <sub>6</sub> CC <sub>11</sub> CC <sub>14</sub>	X		
	Formation des usagers	CC <sub>9</sub> CC <sub>19</sub>	X		
CC4 Simplicité de la gestion	Durabilité des systèmes	CC <sub>21</sub>	X		
	Transport	CC <sub>7</sub>	X		
	Séquence montage	CC <sub>5</sub> CC <sub>7</sub> CC <sub>8</sub> CC <sub>14</sub> CC <sub>16</sub> CC <sub>21</sub>	X		
	Régulations gestion technique	CC <sub>9</sub> CC <sub>19</sub>	X		
	Interaction avec l'utilisateur	CC <sub>2</sub> CC <sub>19</sub>	X		
	Maintenance	CC <sub>9</sub> CC <sub>19</sub>	X	X	
	Fin de vie	CC <sub>21</sub>	X		
CC5 Pertinence/robustesse vis-à-vis des fonctions d'usage	Espace				Qualité de vie
	Ambiance			X	Qualité de vie
CC6 Soutenabilité environnementale	Utilisation des ressources	CC <sub>21</sub> CC <sub>16</sub> CC <sub>11</sub>		X	Respect de l'environnement
	Emissions			X	Respect de l'environnement
CC7 Economie du pré-design	Coût global			X	Performance économique

## Conclusions du Chapitre 3

La nécessité d'agir en amont de la conception pour la compréhension des étapes suivantes et l'introduction de l'innovation technologique représente la problématique principale de la thèse.

Les enjeux relatifs à une intervention en pré-design concernent alors :

- L'introduction de la constructibilité à travers l'accès à l'information, des outils scientifiques et le retour d'expérience ;
- L'introduction des principes techniques et leurs problématiques ;
- L'anticipation des évaluations permettant d'établir l'effet que le principe technique peut avoir sur le système dans son ensemble ;
- L'accompagnement de l'innovation technologique dans une démarche d'intégration, visant à remplir les lacunes de connaissance et méthodologiques.

L'objectif est alors de vérifier la pertinence de la solution proposée tout au long de la conception et d'accompagner le concepteur à travers une méthode lui permettant de comprendre les avantages et les risques liés au choix des solutions technologiques et de lui fournir une aide à la décision basée sur des critères liés à la constructibilité de la solution technologique.

Afin de développer la méthode, plusieurs outils et méthodologies d'analyse et évaluation du pré-design ont fait l'objet de notre recherche bibliographique.

Les approches disponibles nécessitent d'être adaptées au contexte français et à l'étape de pré-design. Il est ainsi nécessaire de mettre en pratique les divers concepts de constructibilité de façon claire et structurée. En effet, ce qui est nécessaire est d'abord une vulgarisation de la constructibilité pour rendre aisé et efficace le processus d'évaluation pendant le début de la conception.

C'est pourquoi, à partir des principes et des concepts clarifiant la notion de constructibilité internationale, nous avons porté notre attention sur la définition de critères d'évaluation directement liés et plus adaptés à la définition de la constructibilité en France. La nouvelle méthode se base sur l'architecture fournie en termes de diagnostic de pertinence (méthode « 4A ») et s'alimente, à travers des sous-critères, des concepts de constructibilité et des méthodes d'évaluation de la performance du pré-design.

La structure de la méthode comprend sept critères d'évaluation, détaillés à travers plusieurs sous-critères :

- CC1 : La simplicité de la solution ;
- CC2 : Les possibilités de vérification ;
- CC3 : La disponibilité des compétences ;
- CC4 : La simplicité de la gestion (sur le cycle de vie) ;
- CC5 : Pertinence/Robustesse vis-à-vis des fonctions d'usage ;
- CC6 : La soutenabilité environnementale ;
- CC7 : L'économie du pré-design

Dans ce cadre, par exemple, la simplicité de la solution prend en compte les aspects de standardisation des divers composants du bâtiment, les modes constructifs et les interfaces techniques ; la possibilité de vérification implique l'utilisation d'outils et de méthodes de vérification en conception, ainsi que la prévision des actions de vérification en phase de réalisation et d'exploitation ; la disponibilité des compétences tient compte des éventuels risques en prévoyant les compétences demandées ; le critère de simplicité de gestion permet d'inclure les aspects liés au maintien de la performance sur le long terme (durabilité, maintenance, fin de vie).

L'évaluation (qui sera traitée dans le chapitre 4) relative à ces quatre critères se fait sur la base d'une note attribuée au pré-design. Cela pousse le concepteur à considérer des éventuelles modifications préventives si la note demeure trop faible. Le système de notation permet de cette façon, un accompagnement au pré-design afin d'intégrer des démarches innovantes et des bonnes pratiques propres de la constructibilité.

D'autre part les autres trois critères (CC5, CC6 et CC7) se réfèrent à l'évaluation du bâtiment considéré comme ensemble de sous-systèmes durables, interconnectés et au service de l'utilisateur et de son activité. L'évaluation, dans ce cas, se fait sur la base des exigences du programme et de la stratégie de conception.

L'application de la méthode oblige le concepteur à réaliser des analyses préventives, à l'aide de modèles numériques et formulations mathématiques. Cela permet de vérifier la pertinence et, à travers la mise en place d'une série de scénarios, la robustesse du pré-design vis-à-vis de la demande (programme).

Dans le chapitre suivant nous allons mieux détailler les sept critères. Une deuxième partie du chapitre sera ainsi dédiée à la gestion des indicateurs associés aux critères et à la modalité d'évaluation.

## Chapitre 4 : Méthode d'évaluation et support au choix pour le pré-design

Ce chapitre présente la nouvelle méthode que nous proposons pour l'évaluation de la constructibilité d'un bâtiment en phase de pré-design. Une fois les bases de la méthode définies dans le chapitre 3, il s'agit maintenant de la détailler à travers ses critères, sous-critères et indicateurs.

Le premier paragraphe introductif expose un rappel de la problématique, la structure générale de la méthode et les applications possibles.

Le cœur du chapitre 4 est constitué par la spécification des divers critères et les modalités d'évaluation des divers sous-critères.

Les critères concernant la pertinence vis-à-vis de la constructibilité « technique », demeurent difficilement caractérisables par un indicateur numérique en phase de pré-design, ils seront donc évalués à l'aide d'un système de notation qualitatif (sur la base des caractéristiques du pré-design) ou quantitatif (sur la base d'un indicateur numérique). Cela permettra de mieux développer et d'introduire formellement les concepts de constructibilité dans une méthode d'évaluation. D'autre part, tout en considérant les spécificités techniques examinées, des sous-critères seront évalués à l'aide d'indicateurs de performance proposées par les cadres normatifs et couramment utilisés permettant d'établir la pertinence vis-à-vis des fonctions d'usage, des enjeux environnementaux et économiques.

En s'agissant d'une analyse multicritère, nous avons décidé d'utiliser la méthode AHP (Analytical Hierarchy Process), déjà citée dans le chapitre 2, pour l'agrégation des sous-critères. La méthode AHP est ici traitée du point de vue théorique et présentée à l'aide d'un exemple. Afin d'appliquer la méthode AHP, il sera nécessaire de réaliser une comparaison par paire des divers sous-critères ce qui permettra d'établir la hiérarchie de référence pour l'évaluation. Le résultat de cette opération nous fournit les matrices d'intensité (d'un sous-critère sur l'autre) que, dans le cadre de la thèse nous avons établi à l'aide des retours d'expérience et d'une recherche bibliographique.

Le problème de la représentation de l'évaluation est traité à la fin de ce chapitre. A travers l'analyse de plusieurs types de représentations nous arriverons à établir que l'indication concernant chaque critère est d'abord normalisée, sur une échelle de 0 à 1, et ensuite organisée de façon à fournir à la fois une représentation globale de la pertinence du pré-design et, une représentation plus détaillée, spécifique à chaque critère.

## 4.1. Introduction : rappel de la problématique et justification de la méthodologie

Dans les chapitres précédents nous avons présenté certains outils d'accompagnement pour que la conception architecturale soit basée sur l'évaluation de la performance. L'utilisation de la performance comme levier d'action pour la conception représente une innovation du processus : les choix se font sur la base de la performance fournie par plusieurs alternatives, contrairement à un processus conventionnel, dans lequel les évaluations fournissent un moyen de vérification tardif d'un prototype.

Le développement toujours croissant de démarches, de méthodes et d'outils d'accompagnement dès le pré-design, dénote la grande importance qu'aujourd'hui est donnée à l'intégration de l'évaluation de la performance en phase de conception. Cependant, ces outils demeurent encore très peu utilisés à cause surtout du manque de temps de l'équipe de conception. Le processus avance par itération en se basant plutôt sur les retours d'expérience des participants au processus, ce qui peut se traduire par des problèmes liés à l'accessibilité à la connaissance (manque d'expertise) et à l'information (manque de données).

À l'état actuel, les « nouveaux » processus de conception sont confrontés à divers enjeux concernant principalement :

- Les problématiques relatives aux solutions techniques et, donc, la prise en compte des systèmes techniques et de leur cycle de vie, dès le début de la conception ;
- La prise en compte des acteurs et des étapes suivant la conception (réalisation et exploitation) dans l'évaluation de la performance ;
- La mise en place d'une approche holistique permettant l'évaluation de la performance globale ;
- Et, par conséquence, l'introduction d'évaluations fiables le plus tôt possible.

Sur la base des constats précédemment exposés, il a donc été possible de formuler la question définissant la problématique de la thèse :

*Comment permettre l'introduction de solutions technologiques et accompagner les choix à réaliser en pré-design, afin d'obtenir une solution pertinente et robuste ?*

Pour répondre à cette question il est nécessaire d'analyser le problème dans son intégralité d'un point de vue macroscopique : le résultat du processus de conception représente une « offre » formulée afin de répondre à une « demande » de la maîtrise d'ouvrage. La demande se formule sous-forme de critères de performances et fonctions auxquels la solution finale devra être conforme et qui seront, donc, à la base de la vérification de la solution finale de conception. D'autre part, la solution finale est organisée et conçue à travers la prise en compte de solutions technologiques, qui seront décrites à l'aide de paramètres et spécifications techniques.

Afin de mieux prendre en compte les solutions technologiques et l'innovation, nous proposons de réaliser une évaluation à travers une série de critères de constructibilité capables de prendre en compte à la fois la performance du « système à faire » (bâtiment) et le « système pour faire » (moyens techniques et humains).

Compte tenu des contraintes du programme, cela permet une évaluation holistique de la solution « finale ». La Figure 4-1 représente la démarche théorique à adopter afin d'anticiper les choix de façon responsable pendant l'étape très sensible du pré-design. Cela permet d'améliorer le processus de conception afin de garantir la réponse matérielle au programme donné.

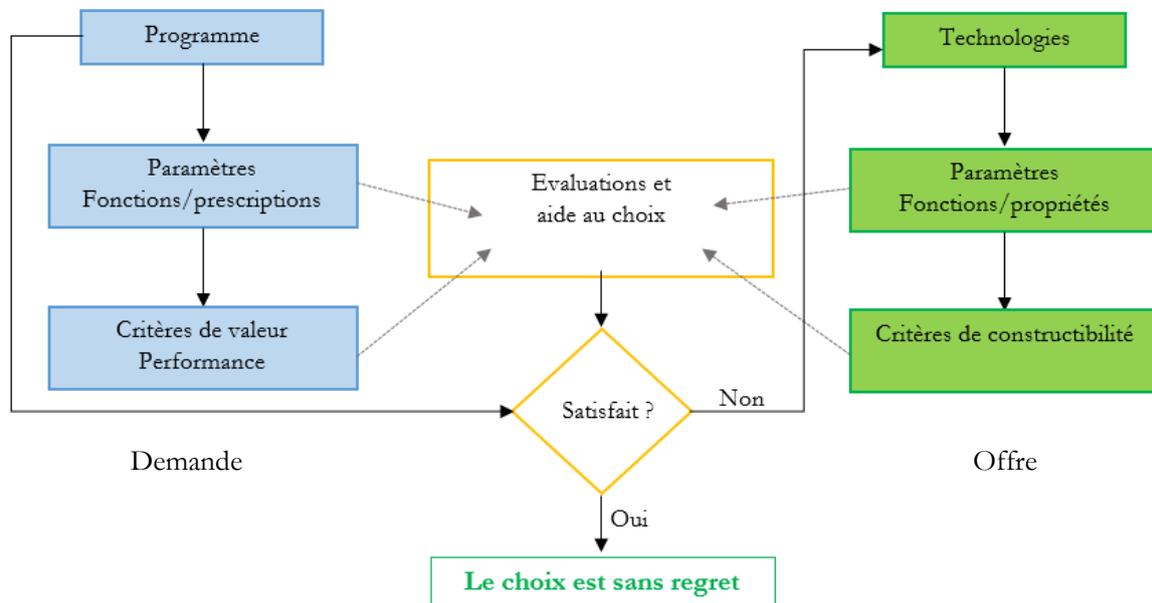


Figure 4-1 - Démarche théorique de support à la phase de pré-design

La méthode d'évaluation permet plusieurs types d'applications Figure 4-2 :

- Sur la base de l'ESQ ou APS fourni par l'architecte, l'évaluation est faite de la part de l'AMO ou d'un agent de commissionnement en phase pré-design, afin de vérifier que la proposition faite par le concepteur représente une solution valable en terme de constructibilité ;
- Auto évaluation de la part du concepteur avant de soumettre sa proposition, afin de corriger certains aspects du projet en pré-design ;
- Une dernière application concerne la comparaison de diverses solutions de pré-design afin d'appréhender les avantages et les inconvénients des variantes vis-à-vis des divers critères de constructibilité.

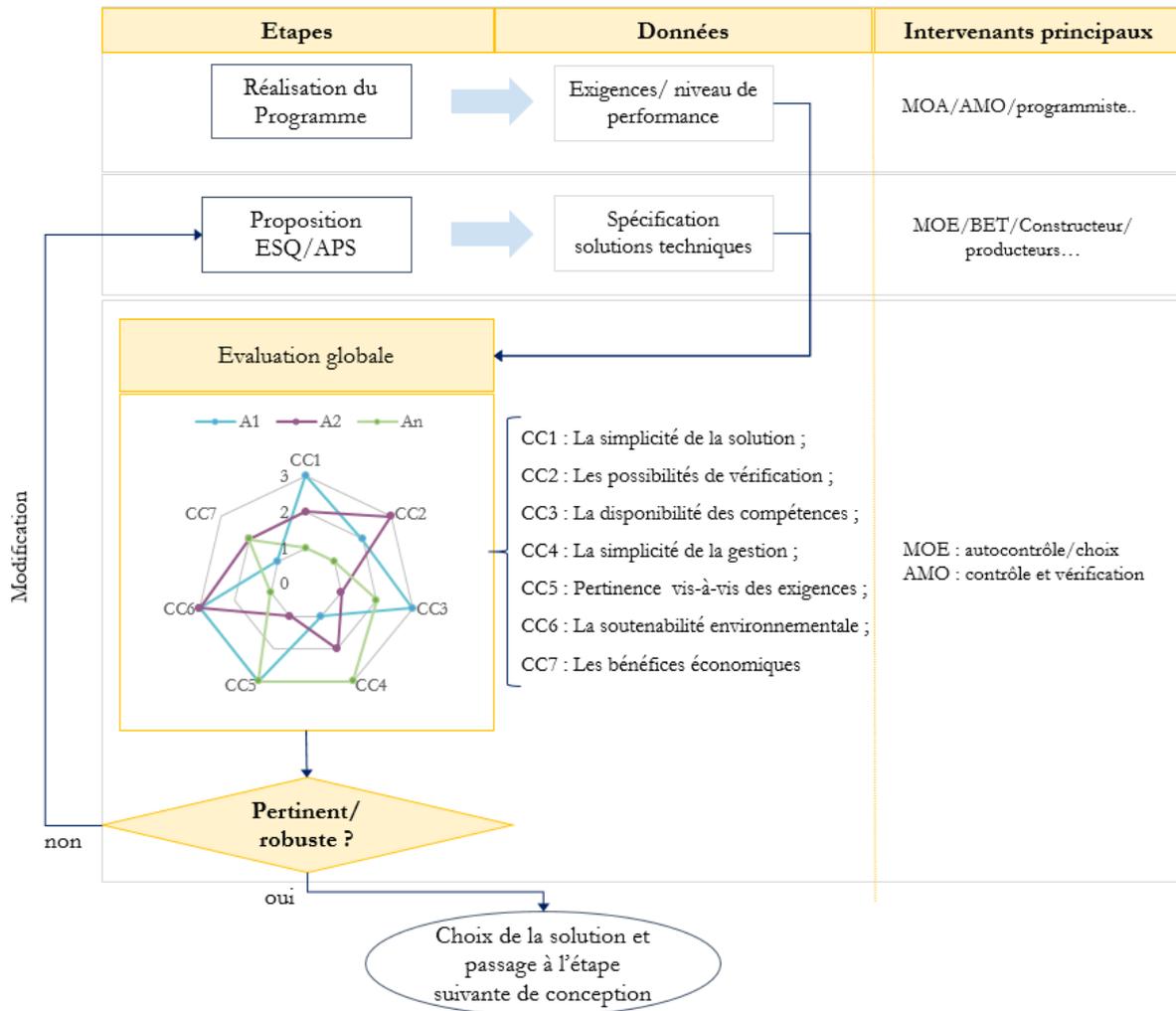


Figure 4-2 – Fonctionnement de la méthode proposée

La méthode représente, donc, un outil de contrôle et de commissionnement de la conception en pré-design.

## 4.2. Présentation du système d'évaluation

Sur la base de la définition et du cadre d'évaluation de la pertinence d'un projet, nous avons défini sept critères de constructibilité permettant l'évaluation globale du projet en phase de pré-design. En effet, le concept de constructibilité en France, comme déjà vu dans les chapitres précédents, se différencie par rapport à la vision internationale de *constructability* et concerne à la fois les aspects de constructibilité techniques et le processus d'intégration et exploitation de la technologie.

Les sept critères considérés permettant une évaluation du pré-design sont :

- CC1 : La simplicité de la solution ;
- CC2 : Les possibilités de vérification ;
- CC3 : La disponibilité des compétences ;
- CC4 : La simplicité de la gestion ;

- CC5 : Pertinence/Robustesse vis-à-vis des fonctions d'usage ;
- CC6 : La soutenabilité environnementale ;
- CC7 : L'économie du pré-design

Chaque critère est détaillé à travers des sous-critères relatifs aux diverses phases du cycle de vie. Pour chaque sous-critère il est donc établi un indicateur d'évaluation quantitatif ou un système de notation qualitatif.

Les aspects considérés par les divers critères sont reportés ci-après.

#### 4.2.1. La simplicité de la solution (CC1)

Le critère CC1 concerne la simplicité de la solution. Le concept de simplicité concerne la maîtrise aisée d'une solution technique.

Il s'agit d'un des concepts de base de la constructibilité. La notion de simplicité est prise en compte par le *Building Design Appraisal System* (BDSA) (§2.2.2) pour la quantification du *Buildability Score* (B-Score) et du *Constructability score* (C-Score) proposé par le cadre législatif de Singapour (BCA, 2017). La simplicité représente un des critères caractérisant les solutions de façades adaptatives, et donc l'innovation technologique, prise en compte dans l'analyse réalisée par Kotireddy (Kotireddy, et al., 2018). L'auteur propose une évaluation globale et qualitative des solutions de façade adaptatives, et, parmi les critères d'évaluation, il suggère de noter la « simplicité » comme indicateur influençant la rentabilité de la façade. Les aspects qu'il propose d'analyser concernent le besoin ou pas d'associer à la façade des équipements afin d'assurer les niveaux de performance demandés, l'avancée technologique liée à la solution sur le plan de la production, de la standardisation et de la facilité d'assemblage avec les autres composants du bâtiment. D'autre part, Mols (Mols, et al., 2017) propose de considérer, parmi les critères d'évaluation des façades adaptatives, la complexité de la solution. Dans ce cas, plus le nombre d'éléments interconnectés est élevé, plus la solution demeure complexe. Dans cette évaluation le poids attribué à ce critère est le deuxième plus élevé après celui relatif au critère de coût.

La simplicité concerne donc des aspects relatifs aux composants considérés (standardisation, régularité, préfabrication), aux interfaces, et aux interrelations entre les divers sous-systèmes qui garantiront la performance. L'objectif est de réduire la complexité de la solution architecturale car plus une solution est complexe, plus les risques de dégradation de la performance sont importants.

Cet aspect, par contre, ne doit pas privilégier des solutions standards au détriment de la prise en compte de l'innovation technologique. Cette dernière peut demeurer naturellement plus complexe, car moins maîtrisée, mais elle peut aussi montrer ses avantages en répondant de façon plus efficace aux exigences d'usage.

Notre proposition prévoit de considérer la simplicité de la solution du point de vue des composants choisis et des procédés techniques mis en œuvre pour la production. L'évaluation de la simplicité, liée à la phase de conception, se réalise en considérant à la fois le niveau de standardisation géométrique des éléments du bâtiment (structure, enveloppe, ouvertures), et la possibilité de minimiser le recours aux équipements techniques à support du fonctionnement de la façade.

La simplicité doit être évaluée aussi au niveau de la production des composants et de la réalisation du bâtiment. Cela se fait à travers des sous-critères dédiés qui tiennent compte de la production des composants (industrialisation ou pas) et leur assemblage avec autres composants, le niveau de préfabrication des éléments de gros œuvre (structure et façade) et les types d’interfaces techniques (détachables ou pas) comme synthétisé en Tableau 4-1.

Tableau 4-1– Spécification des sous-critères pour l’évaluation de la Simplicité de la solution (CC1)

<b>CC1 - Simplicité de la solution</b>				
Conception (Juaristi, et al., 2018) (Zhang, et al., 2016)		Prise en compte de la production et de la mise en œuvre (Durmisevic, 2006) (Juaristi, et al., 2018)		
Niveau de standardisation (structure, façade, ouvertures)	Organisation des équipements techniques	Types de production des technologies	Modes constructifs	Types d’Interfaces techniques

L’analyse technique de la solution permet de mettre en évidence les types d’interfaces techniques présentes entre les composants et les éléments (Durmisevic, 2006).

L’évaluation de la simplicité de la solution se fait de façon qualitative en attribuant une note plus ou moins élevée selon les attributs du pré-design. Une note plus élevée est attribuée à solutions techniques plus standardisées. Dans ce cadre le niveau de standardisation s’évalue comme un ratio entre les éléments ayant certaines caractéristiques et la totalité des éléments. De même une note plus élevée sera attribuée si la conception s’engage à la résolution de problèmes de production et assemblages ou désassemblages. Le Tableau 4-2 liste les sous-critères considérés pour l’évaluation de la simplicité de la solution.

Tableau 4-2 – Synthèse des sous-critères permettant l’évaluation de la Simplicité de la solution et type d’évaluation considéré

<b>Critères</b>	<b>Sous-critères</b>	<b>Type d’évaluation</b>
<b>CC1 - Simplicité de la solution</b>	CC1.1 Niveau de standardisation de la structure verticale (Str_V)	Système de notation
	CC1.2 Niveau de standardisation de la structure horizontale (Str_H)	
	CC1.3 Niveau de standardisation des façades (Env_V)	
	CC1.4 Niveau de standardisation des ouvertures (Env_Ouv)	
	CC1.5 Organisation des équipements techniques (Equ)	
	CC1.6 Type de production des technologies	
	CC1.7 Modes constructifs	
	CC1.8 Types d’interfaces techniques	

Pour l’évaluation et la représentation de chaque note spécifique nous renvoyons au §4.3 et, plus précisément, au Tableau 4-15 dans lequel chaque note relative à la simplicité de la solution est spécifiée en fonction des attributs du pré-design.

L’objectif de la cible est de promouvoir les solutions techniques simples dans la géométrie, dans la composition et au niveau des interfaces techniques. Récompenser l’effort sur la conception du fonctionnement de la façade et la flexibilité de la construction en termes d’interfaces détachables.

Le critère demande un effort de la part du concepteur, qui doit être en mesure de décrire de façon la plus détaillée possible (dans les limites qui concernent l’étape de pré-design) les composants du bâtiment en termes de spécificités et types d’interfaces considérées, ainsi qu’une réflexion sur l’organisation des équipements, les procédés de production, les modes constructifs et les types de connections.

#### 4.2.2. La possibilité de vérification (CC2)

Le CC2, concerne la possibilité de vérification pendant toutes les étapes du processus : conception, réalisation, exploitation. Un des aspects principaux de la garantie de performance est le contrôle, qui doit se réaliser à toute étape. Par contre, cet aspect n'est presque jamais considéré comme critère d'évaluation d'une solution. Dans ce cadre, les pratiques relatives au commissionnement peuvent représenter des méthodes d'amélioration du processus. Le commissionnement est défini comme « *l'ensemble des tâches pour mener à terme une installation neuve afin qu'elle atteigne le niveau des performances contractuelles et créer les conditions pour les maintenir* » (COSTIC, 2008).

Ce processus permet de :

- mettre en œuvre une démarche qualité à travers la coordination des intervenants, afin de garantir une cohérence du projet vis-à-vis des exigences du programme ;
- définir les moyens de contrôle des actions de toutes les étapes du processus de construction ;
- faciliter le transfert d'information et la mise à jour des documents techniques.

La possibilité de vérification en phase de conception se réalise, d'une part, à travers une révision des documents techniques et descriptifs et/ou la mise en place d'outils de suivi, et, d'autre part, à travers l'utilisation d'outils permettant des évaluations et analyses préventives (maquettes numériques, BIM et simulations). Il s'agit de prendre en compte et intégrer dans la démarche les bonnes pratiques présentées aussi par les divers labels (HQE, LEED, BREEAM) (§2.3.3). La mise en place préventive d'un registre des problèmes (un des outils de commissionnement) (Sebesta Blomberg and Associates, Inc., 2013) permet de lister les éventuels problèmes relatifs aux composants techniques et de réaliser un suivi pendant les étapes suivantes. Cela constitue aussi une base de données pour les projets futurs, et donc, un outil de révision de la constructibilité (§1.3.2)

En phase de réalisation et avant la livraison, les vérifications se font sur les composants techniques tel que les façades et les équipements. Afin d'améliorer le processus il est nécessaire de comprendre les types d'essais (en laboratoire ou en chantier) à prévoir en fonction de la solution technique. En fonction du niveau de connaissance et selon la catégorie de texte technique dans laquelle les systèmes techniques tombent, le concepteur devra être en mesure d'estimer les types d'essais à mettre en place.

Dans ce cas, le système de notation permettant le jugement de la possibilité de vérification est conçu de façon à promouvoir l'innovation technologique adaptée au projet et à anticiper la prise en compte des essais et de la vérification du montage.

En fonction du type de système il existe, en effet, une série de textes techniques à considérer surtout concernant la possibilité de recourir à une assurance. Les textes techniques sont classifiés en obligatoires (règlements, DTU pour marchés publics, marquage CE), contractuels (DTU pour marchés privés, AT, ATEx) et informatifs (règles professionnelles, guides, articles, études de recherche) (AQC, 2017) :

- Les normes homologuées et DTU (obligatoires dans les marchés publics) traitent de la conception et de l'exécution des ouvrages de bâtiment. Ils ne concernent que les techniques traditionnelles ;

- Les Avis Techniques (AT) fournissent une opinion autorisée sur l'aptitude à l'emploi de produits ou procédés nouveaux ne bénéficiant pas d'une expérience suffisante pour être normalisée. Il s'agit d'un document d'information de référence pour le MOA et pour les assureurs afin d'estimer le risque décennal. Le Document Technique d'Application (DTA) est un avis technique sur les ouvrages réalisés à l'aide de produits marqués CE, lorsque leur mise en œuvre n'est pas couverte par les NF DTU ;
- L'Appréciation Technique d'Expérimentation (ATEX). Il s'agit d'une procédure rapide d'évaluation technique valable pour une seule opération. Elle s'applique à tout produit ou procédés ne faisant pas encore l'objet d'une norme DTU ou d'un Avis Technique. L'ATEX est un document d'information qui sert de référence aux maîtres d'ouvrage et aux assureurs pour estimer le risque décennal.

Afin de permettre la vérification et la maintenance des systèmes en phase d'exploitation, il est aussi nécessaire de prévoir, dès la conception, l'accessibilité et les éventuels moyens à mettre en place pour la maintenance. Par exemple, en considérant en conception l'utilisation d'une façade rideaux complètement vitrée, pour un grand bâtiment, il sera nécessaire de prévoir un système de nettoyage ou de maintenance adapté (Building and Construction Authority, 2017b). C'est pourquoi, parmi les sous-critères définissant la possibilité de vérification, il y a aussi la facilité d'accès. Cela permet de prévoir l'espace ou les moyens nécessaires à la maintenance et éventuellement de modifier la conception.

Les sous-critères pris en compte dans la méthode pour la possibilité de vérification sont résumés dans le Tableau 4-3.

Tableau 4-3– Spécification des sous-critères pour l'évaluation de la Possibilité de vérification (CC2)

<b>CC2 - Possibilité vérification</b>			
Conception (BREEAM, 2016) (LEED, 2018) (Certivea, 2016)		Prise en compte de la réalisation (AQC, 2017) (Sebesta Blomberg and Associates, Inc., 2013)	Exploitation (Building and Construction Authority, 2017b)
Outils à support de la conception	Prise en compte des risques et registre des problèmes	Nécessité essais	Facilité d'accès à la vérification

L'évaluation de la possibilité de vérification se fait de façon qualitative en attribuant une note plus ou moins élevée selon les attributs du pré-design. Une note plus élevée est attribuée à pré-design prévoyant : dispositifs permettant une vérification en phase de conception, comme la révision par *peer-review* ou l'utilisation d'outils BIM ; dispositifs de commissionnement de la conception (programme de commissionnement ou registre des problèmes) ; la spécification des essais à réaliser sur les composants (en laboratoire, in situ, ou la réalisation de maquette à échelle réelle) ; les mesures adéquates facilitant l'accès à la vérification en phase d'exploitation. Le Tableau 4-4 liste les sous-critères considérés pour l'évaluation de la possibilité de vérification.

Tableau 4-4 – Synthèse des sous-critères permettant l'évaluation de la Possibilité de vérification et type d'évaluation considéré

<b>Critères</b>	<b>Sous-critères</b>	<b>Type d'évaluation</b>
<b>CC2 - Possibilité de vérification</b>	CC2.1 Outils et mesures à support de la conception	Système de notation
	CC2.2 Prise en compte des risques et mise en place d'un registre des problèmes	
	CC2.3 Nécessité d'essais	
	CC2.4 Facilité d'accès à la vérification (en phase d'exploitation).	

Pour l'évaluation et la représentation de chaque note spécifique nous renvoyons au §4.3 et, plus précisément, au Tableau 4-17 dans lequel chaque note relative à la simplicité de la solution est spécifiée en fonction des attributs du pré-design.

L'objectif de la cible est de promouvoir l'utilisation d'outils et de méthodes de révision et prévoir les essais sur les composants du bâtiment et l'ergonomie pour les futures actions de maintenance.

Ce critère demande un effort de la part du concepteur, qui doit être en mesure d'utiliser les bonnes pratiques pendant la conception et de prévoir, d'une part, les essais à réaliser et, d'autre part, l'accès aux équipements techniques et à tous les éléments de la façade en phase d'exploitation.

#### 4.2.3. La disponibilité des compétences (CC3)

Le CC3 concerne la disponibilité des compétences. A la base de la définition du critère il y a l'estimation des compétences disponibles dans les étapes de conception, de la réalisation et en exploitation.

En phase de conception, afin d'assurer une prise en compte des solutions techniques et de la cohérence de l'information transmise aux étapes suivantes, nous proposons de juger le pré-design par rapport aux moyens nécessaires au développement de la conception, à la réalisation et à l'exploitation de l'ouvrage.

Comme représenté dans le Tableau 4-5, l'évaluation pose donc sur le niveau de développement des détails techniques, sur les capacités et les possibilités de modélisation des composants pris en compte, sur les compétences requises en phase de réalisation (en termes d'équipements et de main d'œuvre) et sur les dispositifs de formation prévus pour les usagers en phase d'exploitation.

Tableau 4-5 - Spécification des sous-critères pour l'évaluation de la Disponibilité des compétences (CC3)

CC3 Disponibilité des compétences			
Conception		Prise en compte de la réalisation (Zhang, et al., 2016)	Exploitation
Développement détails techniques	Modélisation	Main d'œuvre spécialisée Equipements spéciaux	Formation usagers

Comme pour les autres critères listés jusqu'à maintenant, l'évaluation du CC3 se fait de façon qualitative en attribuant une note plus ou moins élevée selon les attributs du pré-design qui seront mieux développés au §4.3 et, plus précisément, au Tableau 4-18.

En phase de conception, le niveau de spécification et de la qualité des détails techniques est prise en compte à travers une note plus ou moins élevée. Une note plus élevée est attribuée si l'ensemble des détails techniques est traité de façon exhaustive et claire en pré-design.

Pour ce qui concerne la modélisation, le recours à des modèles non « commerciaux », pour la représentation des comportements des éléments techniques innovants, est ainsi prise en compte dans le système d'évaluation. Les compétences demandées sont évaluées aussi pour la mise en œuvre. Dans ce cas il sera possible de donner une note faible aux procédés demandant des équipes et des équipements spéciaux car cela comporte des risques majeurs dans le processus. La réalisation d'un bâtiment à haute performance, demande une responsabilisation des usagers. En phase d'exploitation, il sera donc envisageable de fournir des outils capables de former les occupants afin de respecter les niveaux de performance prévus.

Le Tableau 4-6 liste les sous-critères considérés pour l'évaluation de la simplicité de la solution.

Tableau 4-6 – Synthèse des sous-critères permettant l'évaluation de la disponibilité des compétences et type d'évaluation considéré

Critères	Sous-critères	Type d'évaluation
<b>CC3 - Disponibilité des compétences</b>	CC3.1 Développement des détails techniques	Système de notation
	CC3.2 Modélisation des éléments	
	CC3.3 Recours à une main d'œuvre spécialisée et équipement spéciaux (chantier)	
	CC3.4 Formations prévues pour les usagers	

L'objectif de cette cible est de récompenser l'effort fait sur la communication et l'évaluation en amont, et de prévoir la disponibilité des compétences en chantier et les dispositifs de formation pour les usagers.

L'effort demandé à l'équipe de conception concerne, donc, la réalisation de détails relatifs aux interfaces techniques du bâtiment, la prise en compte des problèmes relatifs à l'évaluation des solutions innovantes, une réflexion sur le recours en phase de réalisation d'équipes et d'équipements spéciaux à cause des solutions choisies et la prévision du type de formation à assurer à l'occupant final.

#### 4.2.4. La simplicité de gestion (CC4)

L'évaluation du critère CC4, concernant la simplicité de la gestion, a comme objectif de maîtriser les problématiques concernant les risques de dégradation de la performance sur le cycle de vie. La constructibilité vise à assurer un maintien de la performance tout au long du processus et, pour cela, nous jugeons nécessaire d'évaluer le pré-design vis-à-vis des systèmes de gestion mis en place.

Le pré-design doit donc tenir compte de la durabilité des éléments vis-à-vis de l'environnement dans lesquels ils seront placés ; des limites pratiques des solutions techniques choisies (dimensions et poids) afin de privilégier des solutions facilement déplaçables et maîtrisables par un nombre limité d'ouvriers ; des problématiques relatives à l'exploitation, comme le type de régulation de la gestion technique, le niveau d'interaction avec l'utilisateur, les types de maintenance et la fin de vie du bâtiment.

La gestion en phase de production et de mise en œuvre concerne les problématiques relatives au transport et à la séquence de montage. Il est nécessaire d'établir, en amont de la conception, les limites pratiques des solutions techniques choisies vis-à-vis du transport et à la maniabilité des éléments techniques de la part des ouvriers. L'étude de Zhang (Zhang, et al., 2016) concernant la prise en compte des principes de constructibilité, considère la séquence de construction à travers les attributs définis par Echeverry (Echeverry, et al., 1991). L'auteur caractérise la séquence par rapport à : 1) la relation physique entre composants (les composants occupent un espace défini, sont protégés des intempéries et sont supportés mécaniquement par d'autres composants) ; 2) l'interaction commerciale, pouvant affecter la phase de chantier ; 3) la circulation des matières, la séquence doit assurer une circulation sans interférences pendant la mise en place de tous les composants. 4) la sécurité des ouvriers. En s'adressant à l'étape de pré-design, avec le but de comprendre et évaluer la technologie, la méthodologie propose une évaluation de la séquence du montage de la technologie analysée. L'utilisation du découpage technique de la solution permettrait

au concepteur de comprendre les enjeux concernant la mise en œuvre de la solution technique retenue.

En phase d'exploitation le critère tient compte de la maintenance et de l'interaction avec l'utilisateur final. L'introduction de systèmes adaptatifs et de la gestion intelligente du bâtiment nécessite une réflexion en amont pour : 1) définir la structure de la logique de contrôle choisie et 2) comprendre la marge de manœuvre de l'utilisateur vis-à-vis des solutions innovantes.

Sur la base de ces constats, les indicateurs relatifs au critère « Simplicité de gestion » sont résumés dans le Tableau 4-7.

Tableau 4-7 - Spécification des sous-critères pour l'évaluation de la Simplicité de la gestion (CC4)

<b>CC4 - Simplicité de la gestion</b>						
Conception (Juaristi, et al., 2018)	Prise en compte de la production et de la mise en œuvre (Zhang, et al., 2016) (Juaristi, et al., 2018)		Exploitation (Juaristi, et al., 2018)			
Durabilité des systèmes	Transport	Séquence montage	Régulations gestion technique	Interaction avec l'utilisateur	Maintenance	Fin de vie

L'évaluation de simplicité de la gestion se fait de façon qualitative en attribuant une note plus ou moins élevée selon des attributs du pré-design qui seront traités dans le §4.3 et, plus précisément, au Tableau 4-19.

En phase de conception, à travers le système de notation, il est donc possible de prendre en compte, en fonction, des matériaux choisis par le concepteur, le niveau de durabilité des systèmes cela permet éventuellement de prévoir des actions de maintenance ; d'autre part, le critère permet de prendre en compte la gestion de la réalisation à travers le type de transport (exceptionnel ou pas) et la maniabilité de la part des ouvriers, l'analyse de la séquence de montage et la prise en compte de dispositifs d'optimisation du chantier. Pour ce qui concerne la phase d'exploitation, nous avons établi l'attribution d'une note élevée pour les pré-designs prévoyant des systèmes de gestion technique réglable localement, ou permettant une interaction avec l'utilisateur, ce qui laisse la liberté à l'occupant d'interagir avec les composants du bâtiment. Notre proposition tient aussi compte de la fin de vie à travers la spécification du degré de réutilisation des éléments : une note élevée est en effet attribuée en présence d'éléments facilement séparables (et donc réutilisables) ou complètement recyclables et biodégradables.

Le Tableau 4-8 liste les sous-critères considérés pour l'évaluation de la simplicité de la solution.

Tableau 4-8 – Synthèse des sous-critères permettant l'évaluation de la Simplicité de gestion et type d'évaluation considéré

<b>Critères</b>	<b>Sous-critères</b>	<b>Type d'évaluation</b>
<b>CC4 - Simplicité de gestion</b>	CC4.1 Durabilité des systèmes	Système de notation
	CC4.2 Transport	
	CC4.3 Séquence de montage	
	CC4.4 Régulation et gestion technique	
	CC4.5 Interaction avec l'utilisateur	
	CC4.6 Maintenance	
	CC4.7 Fin de vie	

L'objectif de cette cible est donc : faciliter le processus de mise en œuvre et récompenser les solutions facilement maintenables, la prise en compte de l'action de l'utilisateur final et la recyclabilité des composants.

L'effort demandé au concepteur est d'établir la durabilité des solutions techniques considérées, de prendre en compte les limites pratiques concernant le transport et la maniabilité des éléments de construction (en termes de dimensions et poids) et, enfin, de prévoir les aspects de gestion en phase d'exploitation et fin de vie.

Les trois derniers critères (CC5, CC6 et CC7) se basent, contrairement aux premiers, principalement sur la phase d'exploitation et sur des évaluations nécessaires en phase de conception. Les indicateurs fournis sont du type quantitatif et demandent l'utilisation de modèles physiques et/ou formulations mathématiques pour la détermination des indicateurs pris en compte.

#### 4.2.5. La pertinence/robustesse vis-à-vis des fonctions d'usage (CC5)

Comme nous l'avons déjà vu dans le §2.1.1 sur l'approche fonctionnelle, le bâtiment doit répondre à une série d'exigences. Les exigences définies dans le programme doivent donc être respectées dans la proposition faite par l'équipe de conception. Les trois derniers critères de la méthode proposée permettent d'évaluer la pertinence/robustesse de la solution proposée vis-à-vis des exigences performancielles et des stratégies (économique et environnementale) de l'opération.

Bien que la pertinence concerne la vérification de toutes les fonctions d'usages, nous nous sommes concentrés, pour le développement de la méthode et des indicateurs, sur la fonction relative à l'ambiance. Dans le cadre de la thèse nous négligeons donc la spécification du critère CC6 relative aux autres fonctions d'usage déterminées pour le bâtiment et listées dans le §2.1.1.

Les exigences prises en compte dans l'application de la méthode, concernent :

- L'espace et la vérification des surfaces conçues pour la réalisation des activités des usagers ;
- Les conditions d'ambiances et le respect des niveaux de confort des divers espaces.

Si pour la vérification des surfaces il s'agit d'estimer et vérifier le nombre de mètres carré, l'évaluation de la qualité environnementale intérieure demande la spécification d'indicateurs de performance qui ne sont pas forcément considérés en phase de pré-design.

La qualité environnementale intérieure (QEI), devient de plus en plus importante pour les évaluations de la performance du bâtiment. La QEI permet d'apporter une réponse à la fonction du bâtiment de fournir une ambiance confortable, dans laquelle l'utilisateur puisse accomplir ses activités. Cet indicateur est relié au confort et au bien-être des occupants et concerne plusieurs aspects (Santamouris, 2003) :

- Confort Thermique
- Confort visuel
- Qualité de l'air
- Confort acoustique

Chacun de ces aspects dépend d'un grand nombre de variables et chacun peut être décrit à l'aide de modèles et indicateurs plus ou moins complexes. Les normes, les réglementations et les labels fournissent des indications par rapport aux indicateurs à considérer, les modèles qu'il est possible

d'utiliser pour l'évaluation et les limites dans lesquelles il faut rester pour assurer une bonne ambiance (ASHRAE, 2013a) et (CEN, 2007).

Pour la détermination des indicateurs que nous allons considérer dans la méthode proposée, nous faisons donc référence au cadre normatif ainsi qu'aux standards internationaux. Plus de détails concernant les indicateurs disponibles proposés par les standards sont reportés en ANNEXE B.

Dans le cadre de l'application de la méthode, nous négligeons la prise en compte des aspects acoustiques ainsi que les exigences en termes de qualité de l'air en considérant que la performance des composants techniques vis-à-vis des exigences réglementaires soit respectée. Cette hypothèse ne sera pas valable dans le cadre d'un projet demandant une acoustique architecturale adéquate (salle de concert, par exemple). Pour ces types de projet il sera donc nécessaire de prévoir un ultérieur indicateur de qualité environnementale interne.

L'évaluation que nous proposons pour le CC5 tient, donc, compte de la vérification du respect des surfaces dédiées aux activités et des conditions d'ambiance interne. Les indicateurs choisis pour ce deuxième volet concernent le confort visuel et thermique. Il est nécessaire de recourir à des simulations énergétiques afin d'établir la valeur des indicateurs pris en compte : sDA% ou le DA pour le confort visuel et le n° d'heures de confort pour l'ambiance thermique.

Tableau 4-9 - Spécification des sous-critères et des indicateurs pour l'évaluation de la pertinence/robustesse vis-à-vis des exigences d'usage (CC5)

<b>CC6 Pertinence/Robustesse vis-à-vis des exigences d'usage</b>		
Espace	Ambiance visuelle	Ambiance Thermique
Vérification m <sup>2</sup> demandés	FLJ sDA % ou DA	N° h confort

La normalisation de ce critère est faite à travers le rapport entre une valeur limite et les résultats des évaluations. Le Tableau 4-10 propose un synthèse des sous-critères que nous avons pris en compte pour caractériser l'exigence d'ambiance.

Tableau 4-10 - Synthèse des sous-critères permettant l'évaluation de de la pertinence/robustesse vis-à-vis des exigences d'usage et type d'évaluation considéré

<b>Critères</b>	<b>Sous-critères</b>	<b>Type d'évaluation</b>
<b>CC5 - Exigences d'ambiance</b>	CC5.1 Réponse aux exigences d'espaces	Indicateurs numériques
	CC5.2 Ambiance visuelle	
	CC5.3 Ambiance thermique en été	
	CC5.4 Ambiance thermique en hiver	

#### 4.2.6. La soutenabilité environnementale (CC6)

Le critère CC6 concerne la soutenabilité environnementale. Il s'agit d'évaluer (Tableau 4-11) :

- L'économie concernant l'exploitation des ressources (eau, sol, énergie)
- L'émission de gaz à effet de serre (CO<sub>2</sub>)

Tableau 4-11 - Spécification des sous-critères et des indicateurs pour l'évaluation de la Soutenabilité environnementale (CC6)

<b>CC6 Soutenabilité environnementale</b>			
Economie de ressources			Emissions
Eau	Sol	Energie	Emissions de CO <sub>2</sub>
Consommation en eau [m <sup>3</sup> ]	m <sup>2</sup> utilisés	Consommation d'énergie primaire [kWh <sub>ep</sub> /m <sup>2</sup> .an]	kgCO <sub>2</sub> eq

Les sous-critères concernant l'économie des ressources se basent sur les calculs des consommations prévues par le pré-design en termes : d'eau (volumes d'eau consommés), de sol (empreinte des nouvelles constructions), d'énergie (consommation d'énergie primaire).

En fonction des limites établies par la stratégie du projet il est donc possible de définir les valeurs limites que les divers critères doivent avoir et réaliser l'évaluation pour le critère CC6.

Tableau 4-12 – Synthèse des sous-critères permettant l'évaluation de la soutenabilité environnementale et type d'évaluation considéré

Critères	Sous-critères	Type d'évaluation
<b>CC6 - Soutenabilité</b>	CC6.1 Economie des ressources en eau	Indicateurs numériques
	CC6.2 Economie des ressources en sol	
	CC6.3 Economie des ressources énergétiques	
	CC6.4 Réduction des émissions de CO <sub>2</sub>	

L'énergie primaire est définie comme l'énergie disponible dans la nature, donc, directement exploitable sans transformation. Afin de considérer les divers types de vecteurs énergétiques et homogénéiser les évaluations, l'énergie primaire est à la base des calculs de consommations conventionnelles d'énergie. A partir de la valeur d'énergie finale il est ainsi possible de se reporter à l'énergie primaire à travers des coefficients de conversion. Les coefficients de conversion prennent en compte les pertes dues aux transformations de l'énergie et ils changent en fonction du Pays.

L'énergie primaire est évaluée à partir de la consommation d'énergie finale pour les 5 usages de la réglementation thermique RT2012 (le chauffage, l'ECS, l'éclairage, la climatisation et les auxiliaires) de la façon suivante (Eq. 4-1) :

$$C_{ep} = \sum_{i=1}^5 C_{ef,i} * f_{p,i} \quad \text{Eq. 4-1}$$

Avec :

$C_{ep}$  = consommation d'énergie primaire non renouvelable [kWh<sub>ep</sub>/m<sup>2</sup>.an]

$f_{p,i}$  = coefficient de conversion du i-ième poste de consommation

$C_{ef,i}$  = consommation d'énergie finale pour le i-ième poste de consommation [kWh<sub>ef</sub>/m<sup>2</sup>.an]

Les évaluations environnementales antérieures aux années 1990 ne s'appuyaient pas sur un cadre normatif. Elle était réalisée plutôt dans le cadre de production de petit produits (la première concerne les bouteilles de coca Cola, en 1969) et son évolution permet aujourd'hui de l'utiliser pour réaliser des bilans environnementaux même à l'échelle des infrastructures (Figure 4-3). En 1991, la SETAC<sup>23</sup> a pris l'initiative de proposer un premier cadre méthodologique. Cela a porté à la mise en place des normes internationales ISO 14040, ISO 14044 en 1998 (ISO/TC 207, 2006). Ces normes établissent un cadre structuré pour ce qui est, aujourd'hui, l'approche la plus largement utilisée pour les évaluations environnementales : l'Analyse de Cycle de Vie (ACV) ou *Life Cycle Assessment* (LCA) en anglais. La norme reste générale et applicable à tout produit/service, néanmoins, nombreux aspects de la pratique de l'ACV sont laissés libres, comme par exemple le choix des indicateurs.

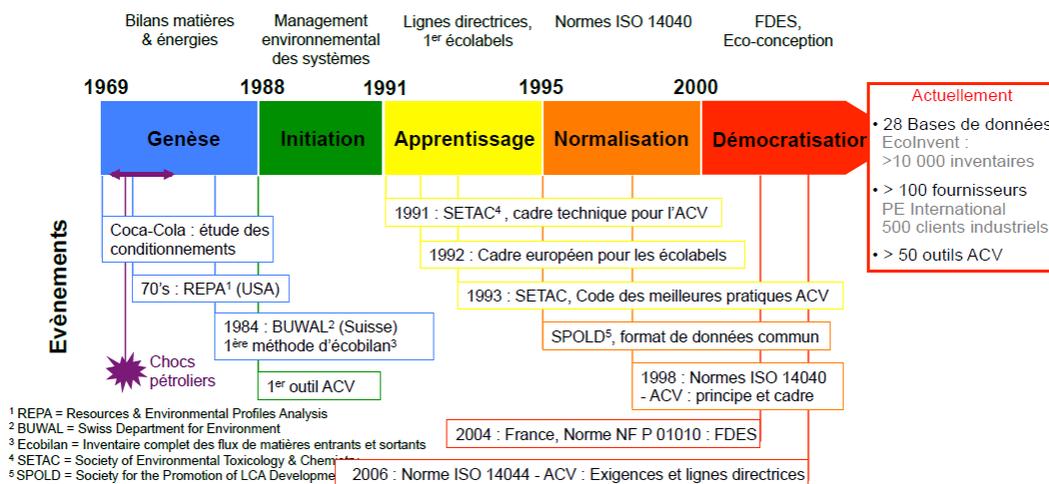


Figure 4-3 – Evolutions et dates clé de l'évaluation environnementale (source : l'analyse de cycle de vie d'un produit ou d'un service Académie des Technologies – ACV)

D'autres normes sont apparues par la suite dédiées à certains secteurs d'activité qui sont plus directives, comme par exemple la norme NF P01-010 (CEN/TC 350, 2004) portant sur les matériaux de construction. En parallèle, de nombreuses bases de données (par exemple, INIES, Ecolinvent, GaBi database) et outils d'ACV ont été développés (dont les plus connus sont par exemple SimaPro, GaBi, ELODIE, Pleiades ACV).

Les deux fonctions principales de l'ACV sont :

- Évaluer l'impact qu'un produit a sur l'environnement, en prenant en compte son cycle de vie en entier, de l'extraction des matières qui le composent, jusqu'au traitement qu'il subira à la fin de son cycle de vie.
- Permettre une évaluation multicritère à l'aide de divers indicateurs capables de prendre en compte plusieurs types d'impacts environnementaux.

Si le choix des indicateurs permettant l'évaluation est libre, cela dépend forcément de la disponibilité de données d'entrée pour l'évaluation. Dans le cas des ouvrages de construction, ces données représentent les profils environnementaux des composants du bâtiment et des sources d'énergie. Concernant les émissions dues à l'ensemble du cycle de vie, la disponibilité et la qualité

<sup>23</sup> Society of Environmental Toxicology and Chemistry, ONG internationale

de la donnée représentent un des points critiques de l'ACV. La réalisation, l'alimentation et la mise à jour des bibliothèques demeure encore compliqué et coûteuse. En France la base de données INIES donne libre accès aux Fiches de Déclaration Environnementale et Sanitaire (FDES) fournissant les profils environnementaux des produits de construction et de certains services. Elles sont fournies par le fabricants sur la base de la NF P01-010, qui depuis 2014 elle est encadrée par la norme NF EN 15804+A1, néanmoins elles sont alimentées par la réflexion entre les principaux acteurs du bâtiment ainsi que l'Etat. La base INIES compte aujourd'hui (en 2018) environ 2520 fiches réparties en 1) produits de construction ; 2) équipements électriques, électroniques et de génie climatique (plutôt prise en compte à travers des PEP ecopassport®, c'est-à-dire la carte d'identité environnementale de l'équipement, basée sur le résultat d'une ACV dans la perspective du calcul de la performance environnementale du bâtiment) et 3) ensemble des sévices, basés sur les flux entrants ou sortants nécessaires au bon fonctionnement du bâtiment (fourniture d'énergie, adduction d'eau potable, traitement des eaux usées, enlèvements de déchets, etc.) (<http://www.inies.fr>). Dans la fiche les informations sont organisées en quatre volets :

- Informations générales : informations concernant les spécifications du produit (le nom, l'organisme de déclaration, la famille de produit, la mise à jour, etc.)
- Unité fonctionnelle : explicitation de la/les fonction/s réalisée/s par le produit couvert par la FDES/PEP et les caractéristiques de performances pertinentes du produit ;
- Indicateurs : données environnementales fournies par rapport à l'étape du cycle de vie et en total sur la durée de vie ;
- Documents : documentation relative à la rédaction de la fiche

Concernant les produits de construction, des informations supplémentaires concernent le confort et la santé (QAI et Sol et Eau) en termes d'essais et de vérifications faites sur le composant même.

L'évaluation de la performance environnementale à l'échelle du bâtiment se base, de manière générale, sur le fait que chaque type de produit de construction ou chaque type de consommation d'énergie est associé à un profil environnemental, qui décrit ses impacts environnementaux par unité fonctionnelle. L'évaluation de l'impact environnemental global à l'échelle du bâtiment est alors calculée par la somme du nombre d'unités fonctionnelles de chaque type de produit ou consommation énergétique mis en œuvre pendant la période d'analyse du cycle de vie du bâtiment multipliés par leurs profils environnementaux associés. Le référentiel de l'expérimentation E+C- (Ministère de l'Environnement, de l'Energie et de la Mer; Ministère du Logement et de l'Habitat Durable, 2016) propose le calcul exposé dans l'Eq. 4-2 :

$$EGES_{Bat} = EGES_{PCE} + EGES_{Ch} + EGES_{CE} \quad \text{Eq. 4-2}$$

$EGES_{PCE}$  = Emissions de kgCO<sub>2</sub>eq due à la production des éléments de construction et des équipements [kgCO<sub>2</sub>eq]

$EGES_{Ch}$  = émission de CO<sub>2</sub> dues au chantier [kgCO<sub>2</sub>eq]

$EGES_{CE}$  = émission de CO<sub>2</sub> due à la consommation énergétique [kgCO<sub>2</sub>eq]

Le processus peut tenir compte des bénéfiques dus à l'utilisation d'éléments de construction de source renouvelable ou pour l'export d'énergie (mise en place d'équipements de production locale). La prise en compte de ces systèmes, doit se faire tout en considérant l'impact environnemental

déterminé par la production des composants mêmes. Concernant, par exemple, le calcul de l'émission due à la consommation énergétique, la prise en compte des bénéfices comporte, l'estimation de l'impact dû à la production des dispositifs de production d'énergie (Eq. 4-3).

$$EGES_{CE} = Emissions_{GES,CE} - \text{bénéfice}_{GES,CE} \quad \text{si } \text{bénéfice}_{GES,CE} > 0$$

Eq. 4-3

$$\text{sinon } EGES_{CE} = Emissions_{GES,CE}$$

Les bénéfices sont calculés toujours à travers la base de données conventionnelle pour le service de production d'énergie, en soustrayant l'impact des produits permettant la production d'énergie.

#### 4.2.7. L'économie en exploitation (CC7)

La performance économique de l'opération représente un des points clé du processus.

Le critère que nous considérons dans l'évaluation du pré-design concerne l'économie réalisée en phase d'exploitation par rapport au coût global calculé.

Tableau 4-13 Spécification des sous-critères et des indicateurs pour l'évaluation de l'Economie du pré-design (CC7)

<b>CC7 – Economie du pré-design</b>
Analyse en coût global

Dans la pratique courante l'évaluation économique est limitée, pendant la phase de conception, au chiffrage de l'investissement initial pour valider la compatibilité du projet avec l'enveloppe financière des travaux. Généralement ce chiffrage ne prend pas en compte les étapes post conception en ne se concentrant que sur le montant d'investissement. Les aspects économiques doivent, par contre prendre en compte la possibilité d'un investissement plus important afin d'introduire des stratégies d'économie d'énergie, qui auront un effet sur le long terme, pendant l'exploitation du bâtiment.

Des nouvelles approches visent, donc, à intégrer dans la pratique une vision de l'économie plus globale et étalée sur tout le cycle de vie du bâtiment. En parallèle à l'ACV, l'Analyse du Coût du Cycle de Vie (ACCV), ou *Life Cycle Costing Assessment* (LCC) en anglais, représente une approche permettant la prise en compte des flux économiques entrants et sortants dans un processus, un produit ou le contour d'un système afin de quantifier la performance à l'aide d'indicateurs économiques. Le ACCV d'un produit ou d'un bâtiment représente sa valeur actuelle nette à partir de la phase de conception jusqu'à la fin de vie. Elle peut être utilisée pour comparer différentes solutions et supporter les décisions dans le but de minimiser le coût (Russell-Smith, et al., 2015).

Un des modèles les plus utilisés est celui proposé par la norme NF EN 15459-2017, qui fournit une méthode d'évaluation du coût global actualisé.

Le Coût Global Actualisé est défini par la norme comme « somme de la valeur actuelle des coûts d'investissement initiaux, des coûts de fonctionnement annuels et des coûts de remplacement (en référence à la première année), ainsi que des coûts d'élimination, le cas échéant » (NF EN 15459-1, 2017). La méthode du coût global actualisé se base sur une série de scénarios limites et de données qu'il faudra fournir lors du calcul. Elle est utilisée pour comparer des solutions différentes. Dans son cadre général, la méthode considère diverses contributions rentrant dans le calcul par rapport à la période de référence  $t_{TC}$  généralement assumée à 30 ou 50 ans :

- Coût d'investissement  $CO_{inv}$  : coût engagé jusqu'à la livraison du bâtiment ou de l'élément du bâtiment ; ce coût intervient une seule fois tout au début de la période de référence. Il comprend la conception, l'achat des éléments, les raccordements, la réalisation, le commissionnement ;
- Coûts annuels  $CO_a$  : définis comme la somme des coûts de fonctionnement et des coûts de remplacement engagés dans une année donnée :
  - o Coût de fonctionnement  $CO_{run}$  : ce coût comprend les coûts annuels des actions de maintenance pour le maintien de la qualité du bâtiment ( $CO_{ma}$ ), le coût d'exploitation ( $CO_{op}$ ) concernant les coûts annuels d'assurance, les frais de fournisseur d'énergie et autres taxes fixes permanentes ; le coût de l'énergie ( $CO_{en}$ ) en considérant aussi les frais fixes et les taxes applicables ;
  - o Coût de remplacement  $CO_{repl}$  : les coûts périodiques pour une certaine année  $i$   $CO_{per(i)}$  correspondant au remplacement ponctuel dans l'année  $i$  spécifique de tous les systèmes à cause du vieillissement ; coûts de remplacement du composant ou du système  $CO_{Rpl(j);LS(n)}$ , ils incluent les coûts périodiques du composant  $j$  à l'instant  $LS_n, 2LS_n$ , etc. correspondant au cycle de vie économique du composant (y compris l'élimination du composant  $j$ )
- Coût des émissions de gaz à effet de serre  $CO_{CO2}$  : valeur monétaire des dommages environnementaux dus aux émissions de  $CO_2$  liées à la consommation d'énergie dans les bâtiments.
- Coût d'élimination  $CO_{disp}$  : dans le cas de prise en compte de la déconstruction du bâtiment en fin de vie, la méthode envisage l'évaluation de cette contribution qui tient compte de la déconstruction, du retrait des éléments de bâtiment qui n'ont pas encore atteint leur fin de vie, du transport et du recyclage.
- Taux d'évolution des prix  $RAT_{dev}$  : évolution dans le temps des prix de l'énergie, des produits, des systèmes des bâtiments, des services, de la main-d'œuvre, de la maintenance et les autres coûts; ce taux peut être différent du taux d'inflation.

La formule du calcul du coût global est exposée avec l'Eq. 4-4.

$$CG = CO_{inv} + \sum_j \left[ \sum_i^{t_{TC}} (CO_{a(i)}(j) * (1 + RAT_{xx(i)}(j)) + CO_{CO2(i)}(j)) * D_f(i) + CO_{disp(TLS)}(j) - VAL_{ft_{TC}}(j) \right] \quad \text{Eq. 4-4}$$

$CG$  = coût global actualisé ;

$CO_{inv}$  = coût d'investissement initial ;

$CO_{a(i)}(j)$  = coût annuel pour l'année  $i$  du composant ou du service  $j$  ;

$RAT_{xx(i)}(j)$  = évolution des prix pour l'année  $i$  du composant ou du service  $j$

$CO_{CO2(i)}(j)$  = coût des émissions de  $CO_2$  pour la mesure  $j$  durant l'année  $i$

$D_f(i)$  = facteur d'escompte de l'année  $i$  ;

$CO_{disp(TLS)}(j)$  = coût (d'élimination) final pour le décommissionnement, la déconstruction et l'élimination dans la dernière année du cycle de vie TLS du composant  $j$  ou du bâtiment rapporté à la première année  $T_0$  ;

$VAL_{ft_{TC}}(j)$  = valeur résiduelle du composant  $j$  dans l'année TC à la fin de la période de calcul (et rapportée à la première année  $T_0$ )

Ce modèle ne considère pas les contributions dues à l'exploitation tels que les assurances et les services qui ne concernent pas l'énergie.

Dans le paragraphe suivant nous présentons les modèles d'évaluation des divers critères et indicateurs, leur prise en compte et les méthodes d'agrégation.

### 4.3. Evaluation des sept critères de constructibilité

La constructibilité, comme nous l'avons dit, permet la prise en compte à la fois des procédés techniques et des évaluations de performances intrinsèques du produit.

Si pour les procédés techniques, ou bien la constructibilité technique (mise en œuvre et gestion du processus et du produit), il est compliqué de faire référence à des indicateurs numériques pour l'évaluation globale, il est nécessaire d'établir un système de jugement qualitatif capable d'évaluer l'intention du concepteur et sa maîtrise du processus.

Les critères relatifs à la constructibilité technique (CC1, CC2, CC3 et CC4) sont évalués à travers un système de notation. D'autre part la méthode permet le recours aux indicateurs numériques pour l'évaluation des critères concernant le respect des exigences, les stratégies environnementales et l'aspect économique (CC5, CC6 et CC7). Le Tableau 4-14 expose l'ensemble des critères, des sous-critères et des modalités d'évaluation proposés.

Le système de notation des divers critères CC1, CC2, CC3 et CC4 concerne une échelle de 1 à 6. Le 1 représente la note la plus basse et le 6 la plus élevée. Il s'agit d'un système de notation réalisé sur la base des concepts de constructibilité et des bonnes pratiques mises en place en amont de la conception. Le système d'attribution des notes est fourni dans le Tableau 4-15, Tableau 4-17, Tableau 4-18 et Tableau 4-19. A travers ces tableaux, l'utilisateur de la méthode peut estimer, sous-critère par sous-critère, la note attribuée à sa démarche et à son projet. Ces tableaux représentent donc l'outil de jugement pour les quatre premiers critères.

Pour la prise en compte des niveaux de standardisation des sous-systèmes « Structure » et « Enveloppe » nous avons établi des plages relatives au ratio entre les surfaces ayant certaines caractéristiques et la totalité des surfaces. Pour la structure il s'agit, donc, d'évaluer le ratio entre la surface en plan des structures préfabriquées et l'ensemble des surfaces relatives aux structures ; pour les façades, nous avons établi des coefficients liés à la typologie de façade en conception des opérations de mise en œuvre. Nous avons pris comme référence la méthode utilisée pour le calcul de la buildability dans le cadre du B-Score fourni par (BCA, 2017).

Pour les critères CC5, CC6 et CC7, le pré-design est évalué à l'aide de modèles numériques ou fonctions mathématiques. La normalisation dans l'agrégation des sous-critères est faite à travers le rapport entre la valeur calculée à l'aide des modèles et la valeur de référence.

Tableau 4-14 – Ensemble des critères, déclinaison des sous-critères et type d'évaluation proposée dans la méthode

Critères	Sous-critères	Type d'évaluation
<b>CC1 - Simplicité de la solution</b>	CC1.1 Niveau de standardisation de la structure verticale (Str_V)	Système de notation
	CC1.2 Niveau de standardisation de la structure horizontale (Str_H)	
	CC1.3 Niveau de standardisation des façades (Env_V)	
	CC1.4 Niveau de standardisation des ouvertures (Env_Ouv)	
	CC1.5 Organisation des équipements techniques (Equ)	
	CC1.6 Type de production des technologies	
	CC1.7 Modes constructifs	
	CC1.8 Types d'interfaces techniques	
<b>CC2 - Possibilité de vérification</b>	CC2.1 Outils et mesures à support de la conception	Système de notation
	CC2.2 Prise en compte des risques et mise en place d'un registre des problèmes	
	CC2.3 Nécessité d'essais	
	CC2.4 Facilité d'accès à la vérification (en phase d'exploitation).	
<b>CC3 - Disponibilité des compétences</b>	CC3.1 Développement des détails techniques	Système de notation
	CC3.2 Modélisation des éléments	
	CC3.3 Recours à une main d'œuvre spécialisée et équipement spéciaux (chantier)	
	CC3.4 Formations prévues pour les usagers	
<b>CC4 - Simplicité de gestion</b>	CC4.1 Durabilité des systèmes	Système de notation
	CC4.2 Transport	
	CC4.3 Séquence de montage	
	CC4.4 Régulation et gestion technique	
	CC4.5 Interaction avec l'utilisateur	
	CC4.6 Maintenance	
	CC4.7 Fin de vie	
<b>CC5 - Exigences d'ambiance</b>	CC5.1 Réponse aux exigences d'espaces	Indicateurs numériques
	CC5.2 Ambiance visuelle	
	CC5.3 Ambiance thermique en été	
	CC5.4 Ambiance thermique en hiver	
<b>CC6 - Soutenabilité</b>	CC6.1 Economie des ressources en eau	Indicateurs numériques
	CC6.2 Economie des ressources en sol	
	CC6.3 Economie des ressources énergétiques	
	CC6.4 Réduction des émissions de CO <sub>2</sub>	
<b>CC7 - Economie en exploitation</b>		Indicateur numérique

Tableau 4-15 – Système de notation pour le critère CC1 « simplicité de la solution »

CC1 – Simplicité de la solution								
<b>Objectif</b> : promouvoir solutions techniques simples dans la géométrie, dans la composition et au niveau des interfaces techniques. Récompenser l'effort sur la conception du fonctionnement de la façade et la flexibilité de la construction en termes d'interfaces détachables								
<b>Effort</b> : le concepteur devra fournir, avec les plans, la spécification des solutions techniques et leurs procédés de production								
Note	Conception (Juaristi, et al., 2018) (Zhang, et al., 2016)				Prise en compte de la production et de la mise en œuvre (Durmisevic, 2006) (Juaristi et al., 2018)			
	Sous-système structure		Sous-système Enveloppe		Sous-système Equipment	CC1.6 Types de production des technologies	CC1.7 Typologie	CC1.8 Types d'Interfaces techniques
	CC1.1 Niveau de standardisation Structure verticale	CC1.2 Niveau de standardisation Structure horizontale	CC1.3 Niveau de standardisation façades	CC1.4 Niveau de standardisation ouvertures (forme et matériaux)	CC1.5 Organisation des équipements			
6	$\frac{\Sigma S_{sv,pref}}{S_{sv,tot}} = 100\%$ et grille structure verticale régulière	$\frac{\Sigma S_{sh,pref}}{S_{sh,tot}} = 100\%$ et grille structure horizontale régulière	$\frac{\Sigma S_{f,i} * c_i}{S_{f,tot}} * 100 = 100\%$	$\frac{\Sigma Nb_s}{Nb_{tot}} = 100\%$	Equipements techniques minimisés à travers l'optimisation des façades et des structures, la continuité verticale (colonne montante) des gaines est assurée	La production prévoit l'utilisation de systèmes d'industrialisation du chantier (Lean, impression 3D etc.)	Structure verticale et horizontale pour la plus part) préfabriquées continues et façade reportée	Construction complètement détachable. Les éléments sont entre eux auto connectés par emboîtement à sec
5	$\frac{\Sigma S_{sv,pref}}{S_{sv,tot}} = 100\%$ et grille structure verticale non régulière	$\frac{\Sigma S_{sh,pref}}{S_{sh,tot}} = 100\%$ et grille structure horizontale non régulière	$80\% \leq \frac{\Sigma S_{f,i} * c_i}{S_{f,tot}} * 100 < 100\%$	$80\% \leq \frac{\Sigma Nb_s}{Nb_{tot}} < 100\%$	Equipements classiques sont minimisés mais le recours à l'innovation technologie demande autres exigences, la continuité verticale (colonne montante) des gaines est assurée	La production prévoit l'utilisation de procédés de préfabrication en série en usine	Structure poteaux poutre préfabriquée façade en modules préfabriqués	Construction en partie préfabriquée limitant les assemblages. Les connections par éléments tiers sont limitées
4	$60\% \leq \frac{\Sigma S_{sv,pref}}{S_{sv,tot}} < 100\%$ et grille structure verticale régulière	$60\% \leq \frac{\Sigma S_{sh,pref}}{S_{sh,tot}} < 100\%$ et grille structure horizontale régulière	$60\% \leq \frac{\Sigma S_{f,i} * c_i}{S_{f,tot}} * 100 < 80\%$	$60\% \leq \frac{\Sigma Nb_s}{Nb_{tot}} < 80\%$	Equipements nécessaires et ils ne sont intégrés dans les éléments de construction, la continuité verticale des gaines est assurée	La production prévoit l'utilisation de procédés de préfabrication en unité en usine	Structure réalisée in situ par procédés automatisés, façade en modules préfabriqués	Plusieurs choix d'assemblage par adhésion, soudures non détachables, connections métalliques, vis ou attaches
3	$60\% \leq \frac{\Sigma S_{sv,pref}}{S_{sv,tot}} < 100\%$ et grille structure verticale non régulière	$60\% \leq \frac{\Sigma S_{sh,pref}}{S_{sh,tot}} < 100\%$ et grille structure horizontale non régulière	$40\% \leq \frac{\Sigma S_{f,i} * c_i}{S_{f,tot}} * 100 < 60\%$	$40\% \leq \frac{\Sigma Nb_s}{Nb_{tot}} < 60\%$	Equipements nécessaires mais ils sont intégrés dans les éléments de construction et la continuité verticale des gaines est assurée	La production prévoit l'utilisation de procédés de préfabrication foraine <sup>24</sup> en série	Structure poteaux poutre préfabriquée, façade réalisée in situ	Les connections sont principalement métalliques à travers des vis ou attaches
2	$30\% \leq \frac{\Sigma S_{sv,pref}}{S_{sv,tot}} < 60\%$	$30\% \leq \frac{\Sigma S_{sh,pref}}{S_{sh,tot}} < 60\%$	$20\% \leq \frac{\Sigma S_{f,i} * c_i}{S_{f,tot}} * 100 < 40\%$	$20 \leq \frac{\Sigma Nb_s}{Nb_{tot}} < 40\%$	Equipements nécessaires et ils ne sont intégrés dans les éléments de construction, la continuité verticale des gaines n'est pas assurée	La production prévoit l'utilisation de procédés de préfabrication foraine en unité	Structure complètement réalisée in situ façade intégrant éléments standardisés	Construction complètement réalisée en chantier, certains éléments sont détachables
1	$\frac{\Sigma S_{sv,pref}}{S_{sv,tot}} < 30\%$	$\frac{\Sigma S_{sh,pref}}{S_{sh,tot}} < 30\%$	$\frac{\Sigma S_{f,i} * c_i}{S_{f,tot}} * 100 < 20\%$	$\frac{\Sigma Nb_s}{Nb_{tot}} < 20\%$	Equipements nécessaires mais ils sont intégrés dans les éléments de construction et la continuité verticale des gaines n'est pas assurée	Les procédés de préfabrication sont minimisés	Structure et façade complètement réalisées in situ	Construction complètement réalisée en chantier, éléments non détachables

Structure verticale :  $\Sigma S_{sv,pref}$  = Somme des surfaces en plan des éléments préfabriqués de la structure verticale ;  $S_{sv,tot}$  = Surface totale en plan des éléments de la structure verticale

Structure horizontale :  $\Sigma S_{sh,pref}$  = Somme des surfaces des planchers constitués par des éléments préfabriqués ;  $S_{sh,tot}$  = Surface totale des planchers

Façades :  $\Sigma S_{f,i}$  = Somme des surfaces des façades de la même typologie ;  $S_{f,tot}$  = surface totale des façades ;  $c_i$  = coefficient lié à la typologie de façade (Tableau 4-16)

Ouvertures :  $\Sigma Nb_s$  = somme des ouvertures standards ;  $Nb_{tot}$  = nombre totale des ouvertures

Tableau 4-16 - Valeurs des coefficients de typologie de façade  $c_i$

Valeur des coefficient de typologie de façade $c_i$						
Voile	Façade légère type cadre	Façade légère type grille	Eléments légers rapportés aux voiles (type façades ventilée)	Eléments lourds rapportés aux voiles (Type LWS)	Façade non porteuse par remplissage (Type béton de chanvre projeté)	Façade en maçonnerie
1	1	0,99	0,9	0,8	0,6	0,5

<sup>24</sup> Réalisé in situ

Tableau 4-17 – Système de notation pour le critère CC2 « possibilité de vérification »

CC2 - Possibilité vérification				
<b>Objectif</b> : promouvoir l'utilisation d'outils et de méthodes de révision, prévoir les essais sur les composants d'enveloppe du bâtiment et l'ergonomie pour les futures actions de maintenance <b>Effort</b> : démontrer la mise en place des bonnes pratiques concernant le contrôle, réfléchir aux typologies de façade, prévoir les actions de maintenance				
	Conception		Prise en compte de la réalisation	Exploitation
Note	CC2.1 Outils à support de la conception	Prise en compte des risques et registre des problèmes	Nécessité essais (AQC, 2017).	Facilité d'accès à la vérification (Building and Construction Authority, 2017b)
6	La conception - <b>Fait l'objet</b> d'une révision par un tiers (peer-review) ou d'un PCI ; - est développée à l'aide d'outils <b>BIM</b> associés à outils de <b>simulation</b> énergétique, environnementale ; - prévoit un <b>planning 4D</b> , permettant une optimisation du processus	Les <b>risques</b> , concernant les sous-systèmes <b>ont été pris en compte</b> et il a été établie un <b>plan de commissionnement et un registre des problèmes</b> qui sera à la base des vérifications à faire et qui devra être mis à jour	- Les systèmes de façade <b>sont connus</b> . - La réalisation de maquettes physiques à l'échelle réelle <b>est prévue</b> afin de déterminer la séquence de montage et l'effet esthétique. - Les <b>essais en laboratoire et in situ</b> sont prévus.	<b>Tous</b> les équipements techniques et tous les éléments de la façade (inclus tous les accessoires, comme les revêtements, protections solaires éléments d'éclairage, etc.) sont facilement accessibles, les exigences relatives à dispositifs de vérification, nettoyage et de maintenance ont été prises en compte
5	La conception - <b>Ne fait pas l'objet</b> d'une révision par un tiers (peer-review) ou d'un PCI ; - est développée à l'aide d'outils <b>BIM</b> associés à outils de <b>simulation</b> énergétique, environnementale ; - prévoit un <b>planning 4D</b> , permettant une optimisation du processus	Les <b>risques</b> concernant les sous-systèmes <b>ont été pris en compte</b> et il a été établie un <b>registre des problèmes</b> qui sera à la base des vérifications à faire et qui devra être mis à jour	- Les systèmes de façade <b>ne sont pas tous connus</b> . - La réalisation de maquettes physiques à l'échelle réelle <b>est prévue</b> afin de déterminer la séquence de montage et l'effet esthétique. - Les <b>essais en laboratoire et in situ</b> sont prévus.	<b>Tous</b> les équipements techniques et <b>tous</b> les éléments de la façade (inclus tous les accessoires, comme les revêtements, protections solaires éléments d'éclairage, etc.) sont facilement accessibles, les exigences relatives à dispositifs de vérification, nettoyage et maintenance n'ont pas été prises en compte
4	La conception - <b>Fait l'objet</b> d'une révision par un tiers (peer-review) ou d'un PCI ; - elle est développée à l'aide d'outils <b>BIM</b> associable à outils de <b>simulation</b> énergétique et environnementale permettant une <b>optimisation</b> du processus	Les <b>risques</b> concernant les sous-systèmes <b>ont été pris en compte</b> et il a été établie un <b>plan de commissionnement</b>	- Les systèmes de façade sont <b>connus</b> . - La réalisation de maquettes physiques à l'échelle réelle <b>n'est pas prévue</b> - <b>Les essais en laboratoire et in situ</b> sont prévus.	<b>Tous</b> les équipements techniques et <b>certains</b> éléments de la façade (inclus tous les accessoires, comme les revêtements, protections solaires éléments d'éclairage, etc.) sont <b>facilement</b> accessibles
3	La conception - <b>Ne fait pas l'objet</b> d'une révision par un tiers (peer-review) ou d'un PCI, - est développée à l'aide d'outils <b>BIM</b> associable à outils de <b>simulation</b> énergétique, environnementale afin de <b>vérifier</b> le niveau de performance	Les <b>risques</b> concernant les sous-systèmes <b>ont été pris en compte</b> et <b>aucun plan de commissionnement et registre des problèmes</b> a été établi	- Les systèmes de façade <b>ne sont pas tous connus</b> . - La réalisation de maquettes physiques à l'échelle réelle <b>n'est pas prévue</b> - Les essais en laboratoire ET in situ sont <b>prévus</b> .	<b>Tous</b> les éléments de façade (inclus tous les accessoires, comme les revêtements, protections solaires éléments d'éclairage, etc.) et <b>certains</b> équipements techniques sont <b>facilement</b> accessibles
2	La conception - <b>Ne fait pas l'objet</b> d'une révision par un tiers (peer-review) ou d'un PCI, - est développée à l'aide de <b>maquettes numériques</b> associés à outils de <b>simulation</b> énergétique environnementale afin de vérifier le niveau de performance	Les <b>risques</b> concernant les sous-systèmes <b>ont été en partie pris en compte</b> et <b>aucun plan de commissionnement et registre des problèmes</b> a été établi	- La réalisation de maquettes physiques à l'échelle réelle <b>n'est pas prévue</b> - Les essais en laboratoire OU in situ sont <b>prévus</b> .	<b>Certains</b> éléments de façade (inclus tous les accessoires, comme les revêtements, protections solaires éléments d'éclairage, etc.) et <b>certains</b> équipements techniques sont <b>facilement</b> accessibles
1	La conception - <b>Ne fait pas l'objet</b> d'une révision par un tiers (peer-review) ou d'un PCI, - est développée à l'aide de <b>maquettes numériques non</b> associés à outils de <b>simulation</b>	Les <b>risques</b> concernant les sous-systèmes <b>n'ont pas été pris en compte</b> et aucun plan de commissionnement ou registre des problèmes a été établi	Pas de prévision d'essais	L'accès à aux équipement techniques et aux éléments de façade demeure compliqué

Tableau 4-18 – Système de notation pour le critère CC3 « disponibilité des compétences »

CC3 - Disponibilité compétence				
<b>Objectif</b> : récompenser l'effort fait sur la communication et l'évaluation en amont, prévoir la disponibilité des compétences en chantier et les outils de formation pour les usagers				
<b>Effort</b> : développer les détails techniques et comprendre la faisabilité des modèles				
Note	Conception		Prise en compte de la réalisation	Exploitation
	Développement détails techniques	Modélisation	Main d'œuvre spécialisée Equipements spéciaux	Formation usagers
6	<b>Tous</b> les détails techniques concernant les interfaces techniques ont été développés ils sont <b>clairs et exhaustifs</b>	Les sous-systèmes peuvent facilement être implémentés dans les divers modèles de simulation, le produit, les caractéristiques et le fonctionnement sont connus et les bibliothèques des outils les intègrent, aucune exigence d'expertise développée	Aucune équipe spécialisée est nécessaire pour la mise en œuvre, l'utilisation d'équipements spéciaux n'est pas demandée	La formation des usagers passe par la mise à disposition d'un livret utilisateur, par des séances d'informations ou des plaquettes ou/et affiches pédagogiques ou/et la mise en place de référents cherché de sensibiliser les usagers sur les bonnes pratiques et des dispositifs de gamification capables de responsabiliser l'utilisateur
5	<b>Certains</b> détails techniques concernant les interfaces techniques ont été développés ils <b>sont clairs et exhaustifs</b>	Les sous-systèmes peuvent facilement être implémentés dans les divers modèles de simulation, le produit, les caractéristiques et le fonctionnement sont connus et les bibliothèques des outils les intègrent, mais pour certains aspect il est demandé une expertise développée	Il est demandé une formation spéciale pour les équipe internes pour la mise en œuvre, l'utilisation d'équipements spéciaux n'est pas nécessaire	La formation des usagers passe par la mise à disposition d'un livret utilisateur, par des séances d'informations ou des plaquettes ou/et affiches pédagogiques ou/et la mise en place de référents cherché de sensibiliser les usagers sur les bonnes pratiques
4	Les détails techniques concernant les interfaces techniques ont été développés ils sont <b>clairs</b> mais <b>ils ne sont pas exhaustifs</b>	Les sous-systèmes peuvent être implémentés dans les divers modèles de simulation à travers des simplifications, le produit, les caractéristiques et le fonctionnement sont connus et les bibliothèques des outils les intègrent, mais pour certains aspect il est demandé une expertise développée	Il est demandé une formation spéciale pour les équipe internes pour la mise en œuvre, l'utilisation d'équipements spéciaux est nécessaire et prise en compte	La formation des usagers passe par la mise à disposition d'un livret utilisateur, par des séances d'informations ou des plaquettes ou affiches pédagogiques
3	Les détails techniques concernant les interfaces techniques ont été développés ils ne sont <b>pas clairs</b> mais ils sont <b>exhaustifs</b>	Certains sous-systèmes demandent la réalisation d'un modèle concernant le fonctionnement et les caractéristiques, et certains données sont disponibles auprès des producteurs ou de la littérature expertise non demandée	<b>Aucune équipe</b> spécialisée est nécessaire pour la mise en œuvre, l'utilisation d'équipements spéciaux est demandée et prise en compte	La formation des usagers passe par la mise à disposition d'un livret utilisateur et par des séances d'informations
2	Les détails techniques concernant les interfaces techniques ont été développés ils ne sont <b>ni claires ni exhaustifs</b>	Certains sous-systèmes demandent la réalisation d'un modèle concernant le fonctionnement et les caractéristiques, une expertise développée est demande, mais certains données sont disponibles auprès des producteurs ou de la littérature	Il est demandé <b>l'intervention d'une ou plus équipes spécialisées</b> pour la mise en œuvre, l'utilisation d'équipements spéciaux n'est pas nécessaire	La formation des usagers passe par la mise à disposition d'un livret utilisateur
1	Les détails techniques concernant les interfaces techniques <b>n'ont pas été développés</b>	Certains sous-systèmes demandent la réalisation d'un modèle concernant le fonctionnement et les caractéristiques, une expertise développée est demande, aucune donnée concernant les sous-systèmes est mise à disposition	Il est demandé <b>l'intervention d'une ou plus équipes spécialisées</b> pour la mise en œuvre, l'utilisation d'équipements spéciaux est nécessaire	Aucun type de formation est prévu pour les usagers

Tableau 4-19 – Système de notation pour le critère CC4 « simplicité de gestion »

CC4 - Simplicité de la gestion							
<b>Objectif</b> : faciliter le processus de mise en œuvre et récompenser les solutions facilement maintenables, la prise en compte de l'action de l'utilisateur final et la recyclabilité des composants							
<b>Effort</b> : prendre en compte les enjeux venant des étapes suivantes la conception et la formation des usagers							
Note	Conception	Production et de la mise en œuvre			Exploitation		
	Durabilité des systèmes (Juaristi, et al., 2018)	Transport (Juaristi, et al., 2018)	Séquence montage (Zhang, et al., 2016)	Régulations gestion technique (Juaristi, et al., 2018)	Interaction avec l'utilisateur (Juaristi, et al., 2018)	Maintenance (Juaristi, et al., 2018)	Fin de vie (Juaristi, et al., 2018)
6	Les matériaux choisis ne sont pas dégradables par l'environnement agressif ou par les conditions climatiques <sup>25</sup> , ils ne sont pas incompatibles entre eux	La construction est réalisée avec des éléments <b>légers</b> , de dimensions qui ne nécessitent <b>pas de transport exceptionnel</b> <sup>26</sup> et, pour la plus part, <b>transportables</b> par un ou deux ouvriers	Une première analyse de la séquence de montage du système entier a été effectuée et elle prévoit des dispositifs d'optimisation du chantier <sup>27</sup>	Gestion et contrôle centralisé pour tous les sous-systèmes (GTB) le contrôle est conçu pour variations locales et impacts locaux	L'utilisateur peut intervenir sur les automatismes et les réactions des sous-systèmes adaptatifs sont immédiates	Pour assurer la performance la construction demande maintenance <b>non fréquente</b> (année) <b>et légère</b> (nettoyage) faite par les utilisateurs ou un tiers <b>non spécialisé</b>	Les éléments de la construction sont facilement séparables et complètement recyclable et biodégradables
5	Les matériaux choisis sont dégradables par un environnement agressif mais ils ne sont pas dégradables par les conditions climatiques et ils ne sont pas incompatibles entre eux	La construction est réalisée avec des éléments <b>légers</b> , de dimensions qui ne nécessitent <b>pas de transport exceptionnel en partie transportables</b> par un ou deux ouvriers	Une première analyse de la séquence de montage du système bâtiment entier a été effectuée sans prévoir des dispositifs d'optimisation	Gestion et contrôle centralisé pour tous les sous-systèmes (GTB) le contrôle est conçu pour variations concernant portions de bâtiment	L'utilisateur peut intervenir sur les automatismes et les réactions des sous-systèmes adaptatifs ne sont immédiates	Pour assurer la performance la construction demande maintenance <b>non fréquente</b> (année) <b>et légère</b> (nettoyage) faite par les utilisateurs ou un tiers <b>spécialisé</b>	Les éléments sont facilement séparables et recyclables et/ou réutilisables mais non biodégradables
4	Les matériaux choisis ne sont pas dégradables par l'environnement agressif mais ils sont dégradables par les conditions climatiques, par contre, ils ne sont pas incompatibles entre eux	La construction est réalisée avec des éléments <b>légers</b> , de dimensions qui ne nécessitent <b>pas de transport exceptionnel</b> non transportables par un ou deux ouvriers	Une première analyse de la séquence de montage d a été effectuée sur un ou plusieurs sous-systèmes <sup>28</sup> en prévoyant des dispositifs d'optimisation	Gestion et contrôle centralisé pour tous les sous-systèmes (GTB) le contrôle est conçu pour variations concernant le bâtiment entier	L'utilisateur peut intervenir sur les automatismes mais pas directement	Pour assurer la performance la construction demande maintenance <b>plus ou moins fréquente</b> (année/mois) <b>et lourde</b> (réparation ou remplacement) faite par les utilisateurs ou un tiers <b>non spécialisé</b>	Les éléments sont en partie recyclables et/ou réutilisables et facilement séparables
3	Les matériaux choisis ne sont pas dégradables par l'environnement agressif ou par les conditions climatiques, mais ils sont incompatibles entre eux	La construction est réalisée avec des éléments <b>lourds</b> , de dimensions qui ne nécessitent <b>pas de transport exceptionnel</b> et en partie transportables par un ou deux ouvriers	Une première analyse de la séquence de montage d a été effectuée sur un ou plusieurs sous-systèmes sans prévoir des dispositifs d'optimisation	Gestion et contrôle centralisé pour quelques sous-systèmes à réponse locale	L'utilisateur ne peut pas intervenir sur les systèmes adaptatifs car l'adaptativité des sous-systèmes est établie en phase de production des composants	Pour assurer la performance la construction demande maintenance <b>fréquente et légère</b> (mois) (nettoyage) faite par les utilisateurs ou un tiers <b>spécialisés ou pas</b>	Les éléments sont en partie recyclables et/ou réutilisables mais difficilement séparables
2	Les matériaux choisis sont dégradables par l'environnement agressif et par les conditions climatiques, par contre, ils ne sont pas incompatibles entre eux	La construction est réalisée avec des éléments <b>lourds, pas de transport exceptionnel non transportables</b> par un ou deux ouvriers	Une première analyse de la séquence de montage d a été effectuée sur un seul sous-système	Gestion et contrôle centralisé pour quelques sous-systèmes à réponse globale	Les solution intégrées sont auto-réactives et ne permettent pas une intervention externe	Pour assurer la performance la construction demande maintenance <b>fréquente</b> (mois) <b>et lourde</b> (réparation ou remplacement) faite par les utilisateurs ou un tiers <b>non spécialisé</b>	Les élément ne sont pas recyclables même s'ils sont facilement séparables
1	Les matériaux choisis sont dégradables par l'environnement agressif et par les conditions climatiques et ils sont incompatibles entre eux	La construction est réalisée avec des éléments <b>lourds</b> , de dimensions qui nécessitent de <b>transport exceptionnel non transportables</b> par un ou deux ouvriers	Aucune analyse de la séquence de montage	Aucun gestion et contrôle centralisé	Les solutions intégrées ne s'adaptent pas	Pour assurer la performance la construction demande maintenance <b>fréquente</b> (mois) <b>et lourde</b> (réparation ou remplacement) faite par des <b>professionnels</b>	Non recyclables et difficilement séparables

<sup>25</sup> radiation UV, humidité, chaleur, etc.

<sup>26</sup> > 12 m

<sup>27</sup> les composants du bâtiment occupent un espace délimité, ils sont accessibles et protégés des intempéries, la mise en œuvre de l'enveloppe permet de protéger certains éléments, la réalisation préventive du système d'éclairage permet de supporter les travaux de chantier, etc.

<sup>28</sup> structure/ façade/ équipements etc.

Il est ainsi nécessaire de remarquer que, dans notre cas, nous parlons de pertinence quand la prévision de la performance se limite à vérifier la cohérence du pré-design aux exigences du programme ; d'autre part, la prise en compte de scénarios de variation en termes d'usage, d'occupation, de climat ou de durabilité des composants techniques, permet d'estimer la robustesse du pré-design. Dans le cas d'évaluation de robustesse il sera possible de comparer l'impact que chaque variation a sur la pertinence.

Le critère CC5, de pertinence (ou robustesse) vis-à-vis des exigences d'espace et d'ambiance, concerne trois indicateurs :

- Le respect des surfaces prévues ;
- Le sDA% (autonomie lumineuse spatiale) ou le FLJ et ;
- Le nombre d'heures de confort pour l'ambiance.

L'échelle d'étude du pré-design implique une faible connaissance de l'intérieur du bâtiment (disposition des espaces, systèmes, matériaux), cependant le concepteur, par ses choix, peut avoir une influence directe sur cette ambiance.

La vérification des surfaces consiste à évaluer le pourcentage quant au respect des surfaces demandées dans l'opération. Cette évaluation peut se faire sur la surface globale ou sur les surfaces relatives aux divers usages, selon la spécification du programme. Une fois les surfaces du projet évaluées il s'agit de déterminer l'écart entre ces dernières et les surfaces indiquées dans le programme.

Afin d'obtenir une valeur entre 0 et 1, nous proposons d'évaluer cet écart à travers le rapport entre l'ensemble des surfaces de la façon suivante :

Vérification m <sup>2</sup> demandés
$\text{Si } \sum S_{conc} < \sum S_{prog}, \text{ alors } CC5.1 = CC5_{m^2} = \frac{\sum S_{conc}}{\sum S_{prog}}$ $\text{Si } \sum S_{conc} \geq \sum S_{prog}, \text{ alors } CC5.1 = CC5_{m^2} = 1$
<p>Avec :</p> <p><math>\sum S_{prog}</math> = ensemble des surfaces prévues dans le programme [m<sup>2</sup>]</p> <p><math>\sum S_{conc}</math> = ensemble des surfaces prévues dans la conception [m<sup>2</sup>]</p>

L'évaluation de la pertinence/robustesse concernant le confort visuel se base sur un des indicateurs présentés dans les paragraphe 4.2.5. L'objectif est de réaliser une évaluation des apports en lumière naturelle. Si l'exigence n'est pas spécifiée dans le programme, il sera préférable de faire référence à l'indicateur sDA% afin d'évaluer l'assurance d'une bonne distribution de la lumière naturelle dans l'espace. Les nouveaux indicateurs tels que le DA ou le sDA, comme nous l'avons vu, demandent le recours à des outils de simulation. Une fois les indicateurs évalués ils sont mis en relation avec leur valeur minimale demandée dans le programme ou par les recommandations, de la façon suivante :

Ambiance visuelle
$CC5.2 = CC5_{vis} = \frac{I_{vis,calc}}{I_{vis,lim}}$
<p>Avec :</p> <p><math>I_{vis,lim}</math> = valeur limite pour l'indicateur d'ambiance visuelle prévu dans le programme (FLJ, DA ou sDA%) [%]</p> <p><math>I_{vis,calc}</math> = valeur de l'indicateur d'ambiance visuelle calculé (FLJ, DA ou sDA%) [%]</p>

L'évaluation concernant le confort thermique se base sur le nombre d'heures d'occupation dans lesquelles les consignes en termes de température opérative sont respectées. L'évaluation peut se faire sur l'année (nombre d'heures dans lesquelles les valeurs de la température opérative sont comprises dans les limites établies) ou en divisant les périodes d'hiver (nombre d'heures dans lesquelles les valeurs de température opérative sont supérieures à la limite inférieure) et d'été (nombre d'heures dans lesquelles les valeurs de température opérative sont inférieures à la limite supérieure). Dans ce deuxième cas, l'évaluation tient compte des apports gratuits respectivement en chaud et froid que l'on peut avoir dans les deux saisons. L'évaluation peut concerner le bâtiment entier ou les zones les plus représentatives. Afin d'obtenir un résultat en pourcentage, le nombre d'heures dans lesquelles les consignes sont respectées est mis en rapport avec le nombre d'heures d'occupation de la période prise en considération.

L'évaluation de ce critère se fait, donc, de la façon suivante :

Ambiance thermique
$CC5.3 \text{ et } CC5.4 = CC5_{ther} = \frac{n^{\circ} h_{conf}}{n^{\circ} h_{occupation}}$
<p>Avec :</p> <p><math>n^{\circ} h_{conf}</math> = nombre d'heures d'occupation dans lesquelles est respectée la consigne pour la température opérative</p> <p><math>n^{\circ} h_{occupation}</math> = total des heures d'occupation de la période prise en compte</p>

Le critère CC6 de soutenabilité environnementale, concerne quatre indicateurs :

- L'économie des ressources (eau, sol, énergie)
- Les émissions de CO<sub>2</sub>

L'indicateur de référence concernant les économies dans l'utilisation des ressources en eau permet de mesurer la quantité d'eau économisée par rapport à la consommation prévue pour le bâtiment.

La valeur limite de la consommation en eau ( $C_{eau,lim}$ ) est établie en fonction de la consommation référence ou standard ( $C_{eau,ref}$ ) comme indiqué par la cible 5 du label HQE (Certivea, 2015). Afin d'atteindre la cible de la démarche HQE, concernant la gestion de l'eau, il est en effet demandé que la consommation des sanitaires du bâtiment soit inférieure à la consommation de référence d'au moins 60% :

$$C_{sanitaire} < 0,6 C_{eau,ref}$$

La consommation de référence ( $C_{eau,ref}$ ) est calculée sur la base de la consommation d'équipements standards (indiqué dans le label), de la fréquence d'utilisation de chaque équipement et par le nombre d'occupants (permanents et visiteurs).

Les économies en eau peuvent se réaliser avec l'utilisation d'équipements plus performants ou en considérant une réutilisation des eaux de pluie. Il est donc possible de soustraire à la consommation la quantité d'eau récupérable à travers des systèmes de récupération sur les toitures et sur les espaces verts. Afin d'évaluer les économies en eau nous proposons l'indicateur ayant la formule suivante :

Economie des ressources en eau	
$CC6.1 = CC6_{eau} = 1 - \frac{(C_{eau} - S_{recup} * precipitations)}{C_{eau,lim}}$	
Avec :	
$C_{eau,lim} = 0,6 C_{eau,ref}$	
$C_{eau,lim}$ = valeur limite de la consommation en eau par an [m <sup>3</sup> /an]	
$C_{eau,ref}$ = valeur de référence de la consommation en eau par an calculée en utilisant des équipements standards [m <sup>3</sup> /an]	
$C_{eau}$ = consommation en eau calculée pour le bâtiment [m <sup>3</sup> ]	
$S_{recup}$ = surfaces de récupération (toitures, etc.) [m <sup>2</sup> ]	
$precipitations$ = valeur de la pluviométrie locale [m/an]	

L'indicateur de référence pour l'évaluation de l'économie des ressources en sol est établi à partir du rapport entre les surfaces construites (du pré-design) et la surface disponible du site. Pour les surfaces utilisées nous considérons toutes les surfaces recouvertes principalement par des bâtiments, parkings ou routes. L'indicateur est, donc calculé de la façon suivante :

Economie des ressources en sol	
$CC6_{sol} = 1 - \frac{S_{utilisée}}{S_{disponible}}$	
Avec :	
$S_{utilisée}$ = surface occupée par l'empreinte du/des nouveaux volumes à réaliser [m <sup>2</sup> ]	
$S_{disponible}$ = surface disponible sur le site [m <sup>2</sup> ]	

L'indicateur concernant les ressources en énergie, est basé sur le calcul des consommations du bâtiment. Cet indicateur nécessite l'évaluation des consommations sur l'année, comme pour les performances d'ambiance, et la prise en compte des coefficients de conversion pour se référer à l'énergie primaire. La consommation d'énergie primaire limite est établie en fonction des réglementations, ou par l'obtention d'un label. Dans ce cadre, la production d'énergie locale de source renouvelable n'est pas prise en compte. D'une part parce que l'objectif est de faire réaliser l'effort de conception de bâtiments (d'abord) peu énergivores ; et d'autre part parce que cet aspect est considéré par le calcul des émissions de CO<sub>2</sub> comme, éventuellement, un bénéfice. Si l'indicateur calculé a une valeur négative, nous allons considérer une valeur nulle. Autrement dit, le pré-design n'arrive pas à atteindre le niveau de performance établi.

Economie des ressources en énergie	
$CC6_{eng} = 1 - \frac{CEP_{calc}}{CEP_{lim}}$	
Avec :	
$CEP_{lim}$ = Consommation d'énergie primaire de source non renouvelable pour les 5 usages comme établi par le programme ou par le label à atteindre [kWh <sub>ep</sub> /m <sup>2</sup> .an]	
$CEP_{calc}$ = Consommation d'énergie primaire de source non renouvelable pour les 5 usages calculée [kWh <sub>ep</sub> /m <sup>2</sup> .an]	

Pour le calcul des émissions de CO<sub>2</sub> nous faisons référence à l'indicateur comme défini dans le §4.2.6. Si l'indicateur calculé a une valeur négative, nous allons considérer une valeur nulle. La pertinence quant à la limite d'émission de CO<sub>2</sub> établie est calculée de la façon suivante :

Emissions de CO <sub>2</sub>
$CC6_{CO2} = 1 - \frac{EGES_{Bat}}{EGES_{lim}}$
<p>Avec :</p> <p><math>EGES_{lim}</math> = émission de gaz à effet de serre, comme défini par le programme ou le label à atteindre [kgeqCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>.an]</p> <p><math>EGES_{Bat}</math> = émission de gaz à effet de serre [kgeqCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>.an]</p>

Le critère CC7 sur les aspects économiques est évalué sur la base du modèle du coût global. Une fois réalisée le calcul du coût global, il s'agit de quantifier le pourcentage relatif au seul coût d'exploitation. Nous allons nous concentrer sur la seule contribution énergétique. Afin d'estimer l'économie nous ferons, donc référence à l'indicateur suivant :

Analyse en coût global
$CC7 = \frac{CO_{inv}}{CG}$
<p>Avec :</p> <p><math>CO_{inv}</math> = coûts de fonctionnement, comme définie dans le calcul du coût global (§4.2.7)</p> <p><math>CG</math> = coût global comme défini au (§4.2.7)</p>

Dans le paragraphe suivant nous exposons la méthode d'agrégation et l'évaluation des critères en fournissant ainsi un exemple d'évaluation.

#### 4.4. Analyse et agrégation des sous-critères et des indicateurs

L'agrégation des sous-critères demande la prise en compte d'une méthode d'agrégation. Cela pourrait se baser sur une moyenne mathématique des notes reçues par les divers sous-critères. La simplicité de cette démarche, cache, par contre, le risque de perte d'informations importantes sur le critère d'évaluation. C'est pourquoi nous avons choisi, parmi les méthodes préalablement exposées dans le §2.4.1, la méthode de l'*Analytical Hierarchy Process*.

La méthode se compose de 4 étapes :

- Hiérarchisation des sous-critères par importance du plus important au moins important ;
- Construction d'une matrice à partir de la comparaison deux à deux des sous-critères ;
- Détermination des poids associés à chaque critère grâce à une méthode approchée de calcul des vecteurs propres et enfin ;
- Vérification de la consistance du résultat

Nous analysons de suite la structure de la méthode et les diverses étapes la caractérisant.

- Hiérarchisation des critères par importance

Soit  $C_1 \dots C_i \dots C_n$  l'ensemble des critères dont on recherche le coefficient de pondération. La hiérarchisation doit aboutir à un classement dans lequel  $C_1$  est plus important que  $C_{i-1}$  qui est plus important que  $C_i$  et ainsi de suite jusqu'à  $C_n$  qui sera le critère de moindre importance. La relation d'importance définie ici n'est pas stricte, cela signifie que  $C_{i-1}$  est aussi important ou plus important que  $C_i$ .

➤ Comparaison deux à deux des critères

Soit  $w_i$  le poids du critère  $C_i$ . La comparaison par paire des critères conduit à définir le degré d'importance d'un critère par rapport à l'autre comme indiqué dans le Tableau 4-20 :

Intensité de l'importance	Définition	Explication
1	Importance égale	Les deux indicateurs contribuent identiquement à l'objectif
3	Faible importance de l'un sur l'autre	L'expérience et le jugement favorisent légèrement un indicateur sur l'autre
5	Importance essentielle ou forte	L'expérience et le jugement favorisent fortement un indicateur sur l'autre
7	Importance démontrée	Un indicateur est fortement favorisé et sa prépondérance est démontrée
9	Importance absolue	Il est évident qu'un indicateur doit être favorisé au maximum
2, 4, 6, 8	Valeurs intermédiaires entre deux jugements adjacents quand un compromis est nécessaire	

Tableau 4-20 – Echelle d'importance entre indicateurs (Saaty, The Analytic Hierarchy Process, 1980)

Par exemple si le critère  $C_i$  a une importance essentielle par rapport au critère  $C_j$ , alors le rapport  $w_i/w_j$  sera égal à 5., en comparant entre eux chacun des critères, nous obtenons la matrice  $A$  de dimensions  $n \times n$  avec  $n$  le nombre des critères à comparer :

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & \dots & a_{1n} \\ \vdots & a_{ii} & \vdots \\ a_{n1} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} \text{ avec } a_{ii} = 1 \text{ et } a_{1n} = \frac{w_1}{w_n}$$

$a_{ij}$  est l'intensité de l'importance de  $C_i$  sur  $C_j$  et  $w_i$  le coefficient de pondération associé à  $C_i$

➤ Détermination des poids associés à chaque critère

Le vecteur des coefficients de pondération  $W = \{w_1 \dots w_i \dots w_n\}$  se détermine, d'abord, en divisant chaque élément de la matrice  $a_{ij}$  par la somme des valeurs de la colonne correspondante, et ensuite en effectuant une moyenne par ligne, soit l'opération mathématique suivante :

$$W = \begin{bmatrix} \frac{a_{11}}{\sum_{k=1}^n a_{k1}} + \dots + \frac{a_{1n}}{\sum_{k=1}^n a_{kn}} \\ \frac{a_{i1}}{\sum_{k=1}^n a_{k1}} + \dots + \frac{a_{in}}{\sum_{k=1}^n a_{kn}} \\ \frac{a_{n1}}{\sum_{k=1}^n a_{k1}} + \dots + \frac{a_{nn}}{\sum_{k=1}^n a_{kn}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\sum_{l=1}^n \left[ \frac{a_{1l}}{\sum_{k=1}^n a_{kl}} \right]}{n} \\ \vdots \\ \frac{\sum_{l=1}^n \left[ \frac{a_{nl}}{\sum_{k=1}^n a_{kl}} \right]}{n} \end{bmatrix}$$

Chaque coefficient est donc obtenu comme :

$$w_i = \frac{\sum_{l=1}^n \left[ \frac{a_{il}}{\sum_{k=1}^n a_{kl}} \right]}{n} \quad \text{Eq. 4-5}$$

Et la somme des  $w_i$  doit être égale à 1.

► Vérification

La vérification de l'attribution des poids se fait à travers le ratio de consistance CR, pour son évaluation il est nécessaire de réaliser les passages suivants.

On définit les vecteurs  $[\lambda'_1 \cdots \lambda'_i \cdots \lambda'_n]$  et  $[\lambda_1 \cdots \lambda_i \cdots \lambda_n]$  tel que :

$$\begin{bmatrix} \lambda'_1 \\ \vdots \\ \lambda'_n \end{bmatrix} = \sum_{k=1}^n \left[ w_k * \begin{bmatrix} a_{1k} \\ \vdots \\ a_{nk} \end{bmatrix} \right] = \left[ w_1 * \begin{bmatrix} a_{11} \\ \vdots \\ a_{1n} \end{bmatrix} + \cdots + w_i * \begin{bmatrix} a_{1i} \\ \vdots \\ a_{ni} \end{bmatrix} + \cdots + w_n * \begin{bmatrix} a_{1n} \\ \vdots \\ a_{nn} \end{bmatrix} \right]$$

Et

$$\lambda_i = \frac{\lambda'_i}{w_i} \quad \text{Eq. 4-6}$$

Puis

$$\lambda_{max} = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i}{n} \quad \text{Eq. 4-7}$$

Alors l'indice de consistance CI est :

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad \text{Eq. 4-8}$$

Le ratio de consistance CR est évalué en divisant le CI par le coefficient RI variable en fonction de la taille de la matrice des critères.

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad \text{Eq. 4-9}$$

Avec RI venant du Tableau 4-21

Tableau 4-21 – Valeurs du coefficient RI (Saaty, 1990)

Taille de la matrice	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

Si  $CR < 0,1$  l'attribution des poids est jugée acceptable, autrement, la procédure doit se répéter. La valeur propre  $\lambda_{max}$  permet de déterminer la ligne dans laquelle il y a un problème avec un certain coefficient  $a_{ij}$ . Si plusieurs coefficients sont en cause, l'erreur devient plus difficile à localiser.

Nous avons décidé d'utiliser cette méthode car :

- Elle peut s'adapter aux diverses exigences de programmes à travers l'attribution des intensités d'importance adaptées à chaque cas ;
- Elle permet de vérifier, à travers le ratio de consistance, l'acceptabilité des pondérations ;
- Elle permet de comparer des critères de natures différentes.

#### 4.4.1. Exemple d'agrégation et d'évaluation des critères

Comme nous l'avons vu, les premiers critères d'évaluation concernent des sous-critères qui sont qualitatifs et auxquels il faudra attribuer une note en fonction des démarches mises en place. La démarche à suivre est donc la suivante :

1. Attribution d'une note à chaque sous-critère en fonction des données du pré-design ;
2. Pour chaque sous-critère il est défini une intensité d'importance à travers la méthode AHP;
3. Normalisation et agrégation

Pour donner un exemple de la démarche, nous faisons référence au critère CC1.

Le critère CC1 est défini en fonction de huit sous-critères :

La relation établie, en suivant la méthode AHP, entre les divers sous-critères fournit la matrice des intensités d'importance suivante :

	CC1.1	CC1.2	CC1.3	CC1.4	CC1.5	CC1.6	CC1.7	CC1.8
CC1.1	1	5	1	3	3	3	3	1
CC1.2	1/5	1	1/3	1/3	1/3	1/3	1/5	1/3
CC1.3	1	3	1	5	3	3	3	1
CC1.4	1/3	3	1/5	1	1/3	1/3	1/3	1
CC1.5	1/3	3	1/3	3	1	1	3	1/3
CC1.6	1/3	3	1/3	3	1	1	3	1
CC1.7	1/3	5	1/3	3	1/3	1/3	1	1
CC1.8	1	3	1	1	3	1	1	1

Le vecteur des coefficients de pondération  $W = \{w_1, \dots, w_8\}$ , évalués en divisant chaque intensité d'importance par la somme des valeurs en colonne et en faisant la moyenne sur le nombre totale de sous-critères :

$w_1$	0,21
$w_2$	0,04
$w_3$	0,22
$w_4$	0,06
$w_5$	0,11
$w_6$	0,12
$w_7$	0,10
$w_8$	0,15

Si les notes attribuées au pré-design vis-à-vis des divers sous-critères sont :

$N_1$	$N_2$	$N_3$	$N_4$	$N_5$	$N_6$	$N_7$	$N_8$
6	5	4	6	4	5	6	6

Le critère CC1 est évalué et normalisé avec la formule :

$$CC1 = \sum_{i=1}^8 w_i \left[ \frac{N_i}{N} \right] = 0,86 \quad \text{Eq. 4-10}$$

Avec N la note optimale que l'on peut obtenir (dans le cas de la méthode,  $N=6$ ) pour la normalisation du résultat. Sur une échelle de 0 à 1, donc, le pré-design évalué obtient une valeur de 0,8 pour la simplicité de la solution proposée.

Pour le critère CCk (avec k de 5 à 7), l'agrégation et la normalisation des sous-critères se fait de la façon suivante :

$$CCk = \sum_{i=1}^n w_i \cdot CCk_i \quad \text{Eq. 4-11}$$

Avec :

$n$  = nombre des sous-critères,

$w_i$  = le coefficient de pondération du sous-critère  $i$ , évalué à travers la méthode AHP

$CCk_i$  = valeur calculée à l'aide des modèles.

Nous avons, donc, présenté les critères, les indicateurs associés ainsi que la méthode d'agrégation et d'évaluation. Cependant, il faut définir les intensités d'importance constituant la matrice à la base de la méthode AHP.

Dans ce cadre, nous avons décidé de ne pas laisser la liberté de choisir le niveau d'importance d'un critère sur l'autre pour ne pas permettre un réarrangement convenable des critères. L'attribution des intensités d'importance, exprimés à travers la comparaison par paires de critères, est donc réalisée dans le paragraphe suivant. Pour réaliser cette proposition nous nous sommes basés sur l'analyse des problématiques que l'on peut rencontrer, le plus souvent dans le processus de construction et sur les retours d'expériences.

## 4.5. Attribution des intensités d'importance pour les divers sous-critères

Tout au long du processus il est possible de rencontrer des facteurs qui contribuent à la défaillance ou au dysfonctionnement du fonctionnement du produit conçu. L'intensité d'importance des divers critères tient compte de l'impact que certains choix et démarches peuvent avoir sur la dégradation de la performance.

L'attribution des intensités d'importance des divers critères est réalisée 1) sur la base de la recherche bibliographique concernant les dysfonctionnements du processus, 2) sur les résultats d'une enquête qui a vu la participation d'une série de professionnels.

L'analyse des causes de dégradation de la performance (réalisée dans le §3.1) nous a permis de souligner les leviers d'action pour l'amélioration du processus. Cela représente un point de départ qui, à l'aide de l'échange réalisé avec les professionnels, nous a permis de rédiger des matrices des intensités conséquentes. Les diverses intensités ont aussi été modulées en fonction du ratio de consistance, (présenté dans le paragraphe précédent avec l'Eq. 4-11) qui nous a permis de vérifier la fiabilité des coefficients de pondération conséquentes.

Les matrices des intensités pour les divers sous-critères ont été établies dans la méthode afin de permettre une évaluation objective de la constructibilité et, plus en générale, de la pertinence du pré-design. La comparaison par paires concerne les divers sous-critères et permet une notation des 7 critères d'évaluation.

Concernant le CC1 « Simplicité de la solution », la comparaison est faite sur les huit sous-critères :

- CC1.1 : Niveau de standardisation de la structure verticale (Str\_V)
- CC1.2 : Niveau de standardisation de la structure horizontale (Str\_H)
- CC1.3 : Niveau de standardisation des façades (Env\_V) ;
- CC1.4 : Niveau de standardisation des ouvertures (Env\_Ouv) ;
- CC1.5 : Organisation des équipements techniques (Equ) ;
- CC1.6 : Type de production des technologies ;
- CC1.7 : Modes constructifs ;
- CC1.8 : Types d'interfaces techniques ;

Dans ce cadre nous avons donné une importance élevée au niveau de standardisation de la structure verticale et des façades. Cela permet d'optimiser la mise en œuvre des composants techniques et du chantier. L'organisation des équipements, en termes disposition des gains techniques étage par étage, demeure aussi important par rapport aux types de production des technologies et aux modes constructifs. Cela permet d'opérer une optimisation des gains, des espaces et une réduction des interférences possibles avec les autres sous-systèmes techniques. Le CC1.8 demeure de la même importance ou plus important que les autres sous-critères. En effet, l'objectif est ainsi de récompenser les pré-designs prévoyant un remplacement aisé et une réutilisation des composants (Figure 4-4).

	CC1.1	CC1.2	CC1.3	CC1.4	CC1.5	CC1.6	CC1.7	CC1.8
CC1.1	1	5	1	3	3	3	3	1
CC1.2	1/5	1	1/3	1/3	1/3	1/3	1/5	1/3
CC1.3	1	3	1	5	3	3	3	1
CC1.4	1/3	3	1/5	1	1/3	1/3	1/3	1
CC1.5	1/3	3	1/3	3	1	1	3	1/3
CC1.6	1/3	3	1/3	3	1	1	3	1
CC1.7	1/3	5	1/3	3	1/3	1/3	1	1
CC1.8	1	3	1	1	3	1	1	1

Figure 4-4 – Matrice des intensités pour le critère CC1 « simplicité de la solution »

Pour le critère CC2 « Possibilité de vérification » les sous-critères déterminés sont quatre :

- CC2.1 : Outils et mesures à support de la conception ;
- CC2.2 : Prise en compte des risques et mise en place d'un registre des problèmes ;
- CC2.3 : Nécessité d'essais ;
- CC2.4 : Facilité d'accès à la vérification (en phase d'exploitation).

Pour récompenser la mise en place d'outils d'accompagnement et suivi de la conception, nous avons donné une importance élevée aux sous-critères CC2.1. Cela permet un contrôle préventif et un réajustement de la conception qui demeure enfin optimisée vis-à-vis des problématiques de mise en œuvre et des niveaux de performance. D'autre part, la prise en compte des risques et la mise en place d'un registre des problèmes, permettant un contrôle en continu des divers composants (CC2.2) demeure plus important vis-à-vis des essais à prévoir (CC2.3) (

	CC2.1	CC2.2	CC2.3	CC2.4
CC2.1	1	5	5	3
CC2.2	1/5	1	3	1
CC2.3	1/5	1/3	1	1
CC2.4	1/3	1	1	1

Figure 4-5).

	CC2.1	CC2.2	CC2.3	CC2.4
CC2.1	1	5	5	3
CC2.2	1/5	1	3	1
CC2.3	1/5	1/3	1	1
CC2.4	1/3	1	1	1

Figure 4-5 – Matrice des intensités pour le critère CC2 « possibilité de vérification »

Le CC3 concerne la « disponibilité des compétences ». Dans ce cadre nous avons établi quatre sous-critères :

- CC3.1 : Développement des détails techniques ;
- CC3.2 : Modélisation des éléments ;

- CC3.3 : Recours à une main d'œuvre spécialisée et équipement spéciaux (dans la phase de chantier) ;
- CC3.4 : Formations prévues pour les usagers.

Parmi les quatre sous-critères, le plus important est le développement des détails techniques. En effet, comme nous l'avons vu dans le paragraphe précédent, le manque de spécification quant aux détails représente un des problèmes principaux dans la réussite du processus.

La compétence en modélisation (CC3.2) est demandée pour des sous-systèmes innovants. La méconnaissance des éléments techniques peut porter à une mauvaise estimation du comportement des sous-systèmes, et, donc, à une dégradation de la performance. C'est pourquoi ce sous-critère est aussi important que le sous-critère CC3.3 et demeure plus important que la mise en place de dispositifs de formation pour les usagers (Figure 4-6).

	CC3.1	CC3.2	CC3.3	CC3.4
CC3.1	1	5	5	5
CC3.2	1/5	1	1	3
CC3.3	1/5	1	1	1
CC3.4	1/5	1/3	1	1

Figure 4-6 - Matrice des intensités pour le critère CC3 « disponibilité des compétences »

La simplicité de gestion pendant tout le cycle de vie est évaluée à travers le critère CC4. Ce critère regroupe sept sous-critères :

- CC4.1 : Durabilité des systèmes ;
- CC4.2 : Transport ;
- CC4.3 : Séquence de montage ;
- CC4.4 : Régulation et gestion technique ;
- CC4.5 : Interaction avec l'utilisateur ;
- CC4.6 : Maintenance ;
- CC4.7 : Fin de vie ;

La mise en place d'éléments résistants à un environnement agressif et durables vis-à-vis des conditions météorologiques (CC4.1), l'analyse des conditions de transport (CC4.2) et de la séquence de montage (CC4.3) demeurent plus importants que les aspects plutôt liés à la phase d'interface avec l'utilisateur (CC4.4 et CC4.5). La durabilité des éléments permet le maintien de performance et une réduction des actions de maintenance. La prise en compte du transport et de la séquence de montage permettent d'optimiser la conception vis-à-vis des phases de chantier. Nous avons décidé de récompenser les actions pouvant se réaliser en phase de conception (Figure 4-7).

	CC4.1	CC4.2	CC4.3	CC4.4	CC4.5	CC4.6	CC4.7
CC4.1	1	1	1	3	3	1	3
CC4.2	1	1	1	3	3	1	1
CC4.3	1	1	1	3	3	1	1
CC4.4	1/3	1/3	1/3	1	1	1	1
CC4.5	1/3	1/3	1/3	1	1	1	1
CC4.6	1	1	1	1	1	1	1
CC4.7	1/3	1	1	1	1	1	1

Figure 4-7 - Matrice des intensités pour le critère CC4 « simplicité de gestion »

Concernant le critère CC5 « pertinence/robustesse des exigences d'ambiance », nous avons concentré notre attention sur quatre aspects principaux :

- CC5.1 : Réponse aux exigences d'espaces ;
- CC5.2 : Ambiance visuelle ;
- CC5.3 : Ambiance thermique en été ;
- CC5.4 : Ambiance thermique en hiver ;

Le CC5.1, concernant le respect des surfaces prévues, demeure assez ou absolument moins important par rapport aux autres trois sous-critères. Une importance absolue est donnée à l'ambiance thermique car, à travers le respect des indicateurs concernant l'accès à la lumière naturelle (CC5.3), l'aspect le plus complexe à maîtriser devient, enfin, l'ambiance thermique.

Dans l'éventualité que le nombre d'heures de confort soit évalué que pour la saison estivale, en faisant l'hypothèse qu'elle soit la saison la plus problématique pour le risque de surchauffe, le nombre de sous-critères se réduit à trois. Cela comporte un changement dans l'évaluation du critère CC5 mais aucun changement quant à la matrice des intensités (Figure 4-8).

	CC5.1	CC5.2	CC5.3	CC5.4
CC5.1	1	1/5	1/9	1/9
CC5.2	5	1	1/3	1/3
CC5.3	9	3	1	1
CC5.4	9	3	1	1

Figure 4-8 - Matrice des intensités pour le critère CC5 « pertinence aux exigences d'ambiance »

Le critère concernant la « soutenabilité » en exploitation, CC6, comme nous l'avons déjà vu, compte 4 sous-critères :

- CC6.1 : Economie des ressources en eau ;
- CC6.2 : Economie des ressources en sol ;
- CC6.3 : Economie des ressources énergétiques ;
- CC6.4 : Réduction des émissions de CO<sub>2</sub>.

Dans ce cadre, les économies en eau demeurent plus importantes que les économies en sol, mais ont la même importance que les économies en énergie. Il s'agit de prévoir des systèmes qui empêchent le gaspillage d'eau tout au long du cycle de vie. Les sous-critères ayant une dominance relative sur les autres sont la performance énergétique et la réduction d'émissions de CO<sub>2</sub> (Figure 4-9).

	CC6.1	CC6.2	CC6.3	CC6.4
CC6.1	1	3	1	1/3
CC6.2	1/3	1	1/3	1/3
CC6.3	1	3	1	1
CC6.4	3	1	1	1

Figure 4-9 - Matrice des intensités pour le critère CC6 « soutenabilité »

## 4.6. Représentation de l'évaluation

Une fois les critères, les méthodes d'agrégation et les matrices d'intensités définis, il s'agit de représenter graphiquement l'évaluation globale. Nous avons décidé d'utiliser un diagramme radar pour la représentation de l'évaluation. En effet, ce type de représentation permet de confronter plusieurs alternatives et de visualiser plusieurs critères d'évaluation en même temps.

Nous allons démontrer l'utilité de représenter à la fois l'évaluation globale à travers les sept critères ainsi que les évaluations relatives des sous-critères. Pour cela nous prenons un exemple d'évaluation pour lequel l'ensemble des valeurs des sous-critères est attribué. Dans le Tableau 4-22, les valeurs des divers sous-critères pris individuellement et la valeur de leur agrégation (en termes de critère), sont reportées pour deux alternatives de pré-design. Le but étant de trouver la ou les bons types de représentations, nous nous sommes relativement intéressés aux valeurs spécifiques.

Tableau 4-22 - Ensemble des valeurs des critères et des sous-critères attribué

	Alternative 1	Alternative 2
<b>CC1 - Simplicité de la solution</b>	<b>0,87</b>	<b>0,80</b>
CC1.1 Niveau de standardisation de la structure verticale (Str_V)	1,00	0,83
CC1.2 Niveau de standardisation de la structure horizontale (Str_H)	0,83	0,83
CC1.3 Niveau de standardisation des façades (Env_V)	0,67	1,00
CC1.4 Niveau de standardisation des ouvertures (Env_Ouv)	1,00	1,00
CC1.5 Organisation des équipements techniques (Equ)	0,67	0,67
CC1.6 Type de production des technologies	0,83	1,00
CC1.7 Modes constructifs	1,00	0,50
CC1.8 Types d'interfaces techniques	1,00	0,50
<b>CC2 - Possibilité de vérification</b>	<b>0,78</b>	<b>0,70</b>
CC2.1 Outils et mesures à support de la conception	0,83	0,67
CC2.2 Prise en compte des risques et mise en place d'un registre des problèmes	0,50	0,83
CC2.3 Nécessité d'essais	0,67	0,67
CC2.4 Facilité d'accès à la vérification (en phase d'exploitation).	1,00	0,67
<b>CC3 - Disponibilité des compétences</b>	<b>0,53</b>	<b>0,65</b>
CC3.1 Développement des détails techniques	0,33	0,50
CC3.2 Modélisation des éléments	1,00	1,00
CC3.3 Recours à une main d'œuvre spécialisée et équipement spéciaux (chantier)	1,00	1,00
CC3.4 Formations prévues pour les usagers	0,33	0,50
<b>CC4 - Simplicité de gestion</b>	<b>0,91</b>	<b>0,87</b>
CC4.1 Durabilité des systèmes	0,83	0,67
CC4.2 Transport	1,00	1,00
CC4.3 Séquence de montage	1,00	1,00
CC4.4 Régulation et gestion technique	0,50	0,67
CC4.5 Interaction avec l'utilisateur	0,83	0,67
CC4.6 Maintenance	1,00	1,00
CC4.7 Fin de vie	1,00	1,00
<b>CC5 - Exigences d'ambiance</b>	<b>0,65</b>	<b>0,96</b>
CC5.1 Réponse aux exigences d'espaces	1,00	1,00
CC5.2 Ambiance visuelle	0,77	0,77
CC5.3 Ambiance thermique en été	0,22	1,00
CC5.4 Ambiance thermique en hiver	0,99	0,99
<b>CC6 - Soutenabilité</b>	<b>0,52</b>	<b>0,59</b>
CC6.1 Economie des ressources en eau	0,55	0,60
CC6.2 Economie des ressources en sol	1,00	1,00
CC6.3 Economie des ressources énergétiques	0,65	0,70
CC6.4 Réduction des émissions de CO <sub>2</sub>	0,27	0,40
<b>CC7 - Economie en exploitation</b>	<b>1,00</b>	<b>0,87</b>

Trois types de représentations sont possibles :

- Evaluation globale à travers l'ensemble des critères ;
- Evaluation globale à travers l'ensemble des sous-critères et ;
- Evaluation des sous-critères pour chacun des critères pris singulièrement.

Dans le premier cas, il s'agit de représenter l'évaluation à travers les sept critères, calculés à travers l'agrégation des sous-critères (Figure 4-10).

A notre avis, cette représentation synthétique est nécessaire afin de permettre une évaluation globale. Par contre, ce type de représentation présente deux problèmes. D'abord, elle comporte une perte d'information, car à valeur de critère comparable entre deux alternatives, nous ne savons pas quelle est, au niveau des sous critères, la meilleure des solutions. En référence à la Figure 4-10, par exemple, les deux alternatives ont presque la même évaluation du CC4, et il est possible de dire que l'alternative 1 est un peu plus performante que l'alternative 2. L'analyse des sous-critères permet de comprendre par rapport à quels aspects l'alternative 1 est meilleure que l'alternative 2 et vice-versa. Le deuxième problème est représenté par le fait que, bien que l'échelle soit normalisée, la même note n'aura pas forcément la même signification pour tous les critères.

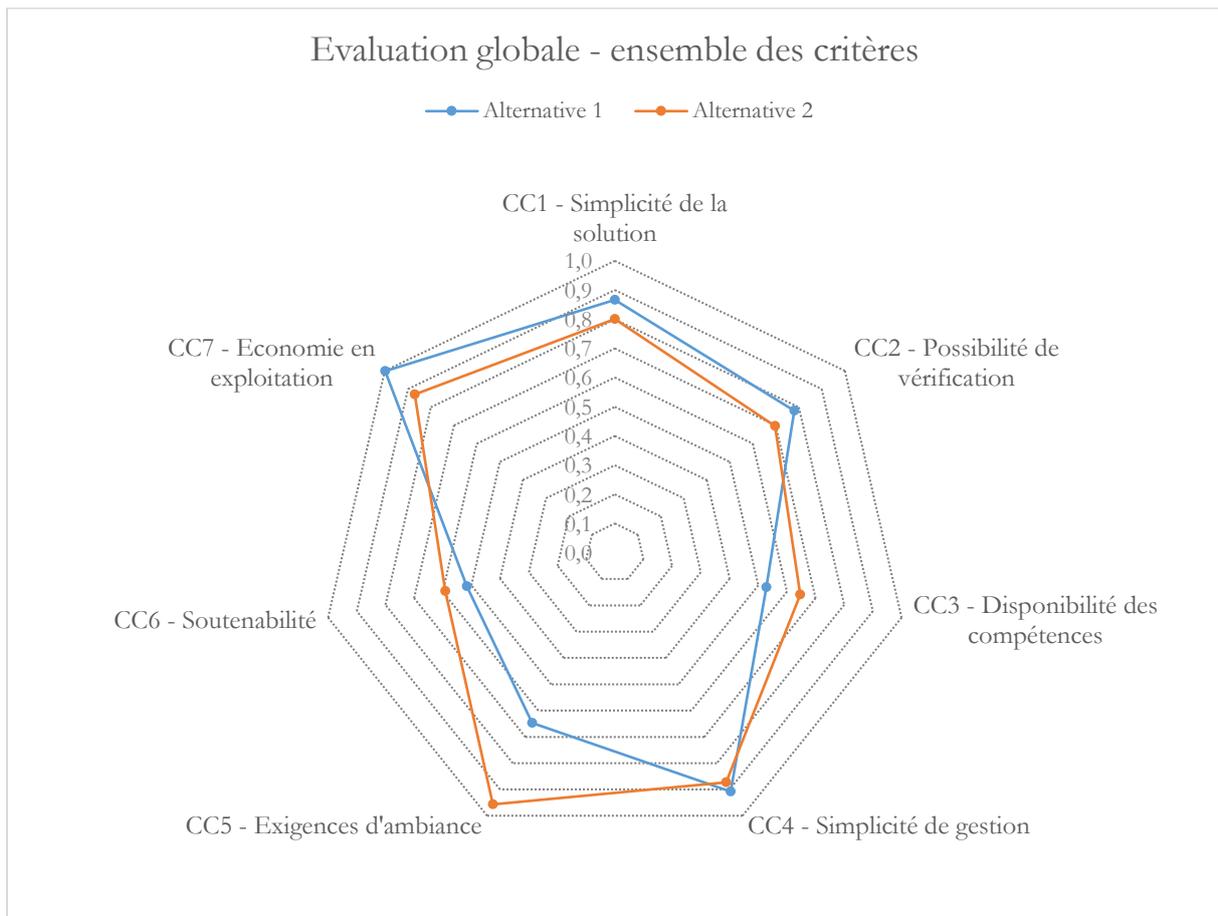


Figure 4-10 – Exemple d'évaluation globale de deux alternatives en considérant une représentation faite sur l'ensemble des critères.

Le deuxième type de représentation, permet d'expliciter les valeurs de l'ensemble des sous-critères (Figure 4-11).

Bien que maintenant l'explicitation permet de comparer les deux alternatives sans une perte d'information, la représentation ne demeure pas trop compréhensible. En effet, le grand nombre de sous-critères rend impossible la comparaison des alternatives. Par exemple, dans la Figure 4-11 nous ne pouvons pas dire si l'alternative 1 est meilleure ou pas que l'alternative 2.

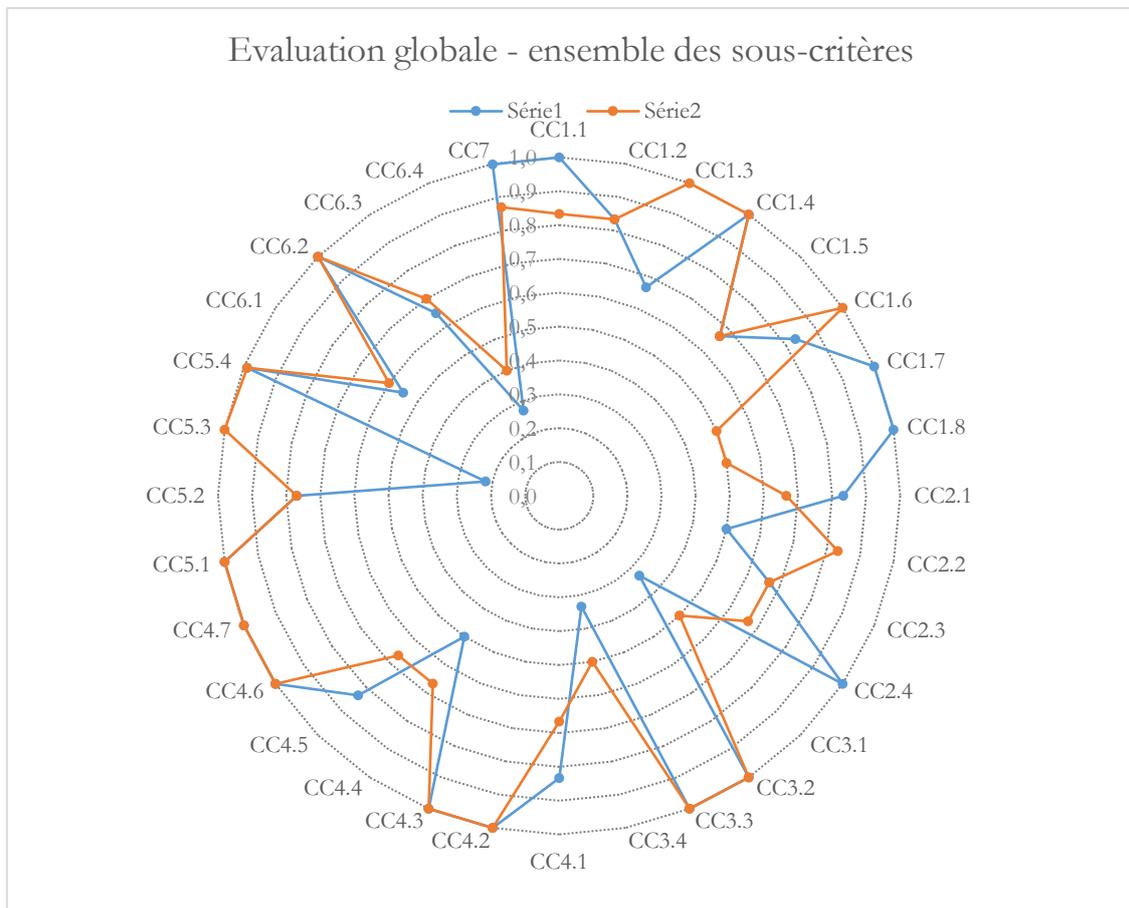


Figure 4-11 - Exemple d'évaluation globale de deux alternatives en considérant une représentation faite sur l'ensemble des sous-critères.

Le troisième type de représentation, faite critère par critère, ne comporte pas une perte d'information. Le problème de compréhension de la comparaison est mitigé car les critères sont analysés un par un et la gestion de l'information demeure plus facile. Chaque diagramme permet de souligner les points faibles d'une alternative par rapport à une autre en considérant un angle de vue plus précis. D'autre part, cela permet au concepteur d'intervenir sur un aspect spécifique ce qui consent une aide à la décision plus ponctuelle.

Par exemple, en référence au critère CC1 de la Figure 4-12, l'alternative 2 pourra être améliorée, vis-à-vis de la constructibilité en considérant la possibilité d'utiliser plus de composants standardisés pour la structure verticale (CC1.1) ; de même, l'alternative 1 pourra être améliorée en recourant à des systèmes de façade intégrant des composants plus standardisés (CC1.3).

Ce type de représentation, par contre, ne consent pas de représenter le critère économique (CC7) car il ne présente pas de sous-critères.

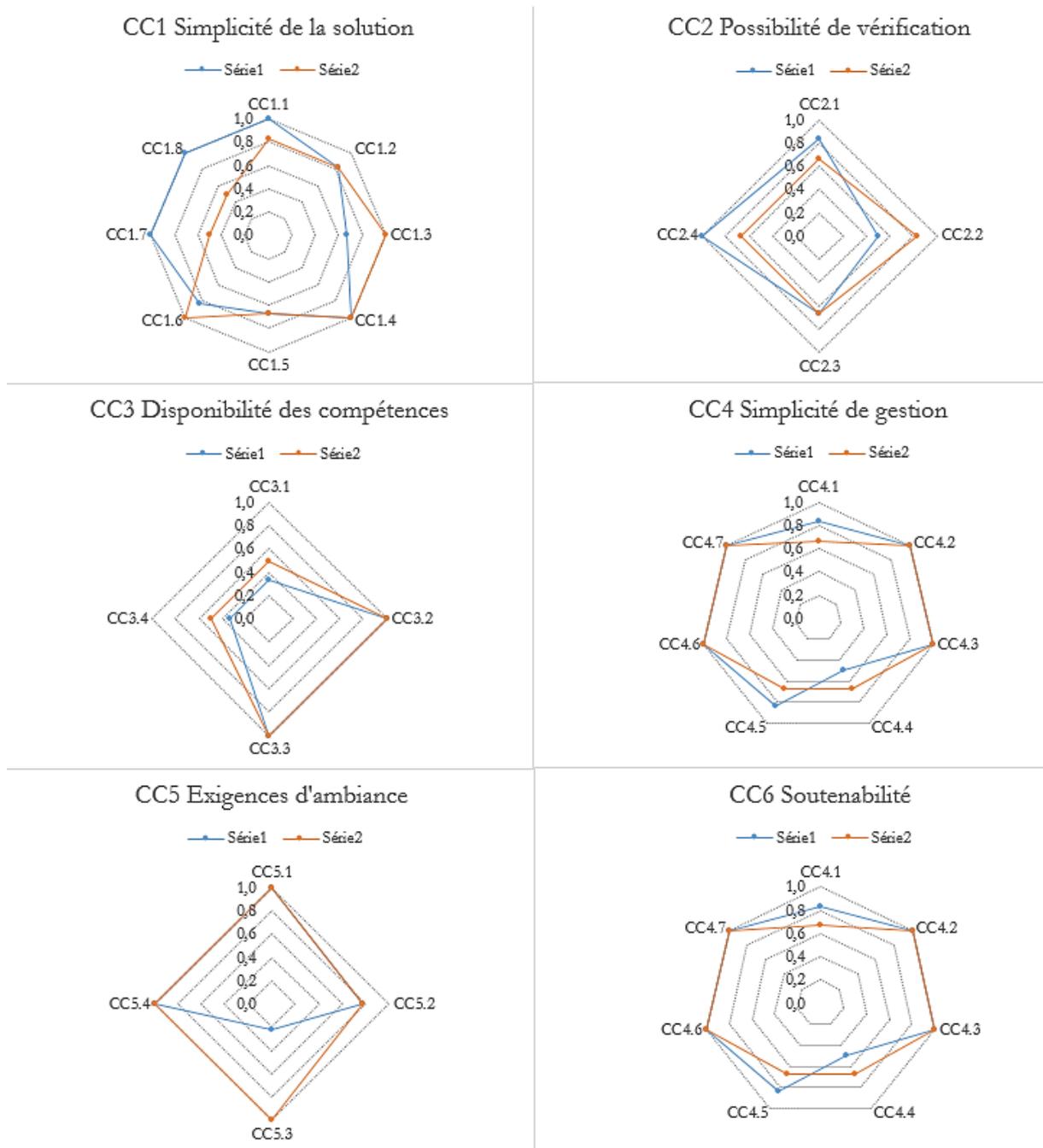


Figure 4-12 - Exemple d'évaluation globale de deux alternatives en considérant une représentation faite sur l'ensemble des sous-critères

Sur la base de cette analyse, nous avons décidé de considérer à la fois le premier type de représentation pour l'évaluation globale et la comparaison des alternatives et le troisième pour l'aide à la décision et l'accompagnement du pré-design.

## Conclusions du Chapitre 4

Ce chapitre, constituant le cœur de la thèse, nous a permis de définir la méthode dans son ensemble.

Les critères, et les relatifs sous-critères, ont été présentés théoriquement et dans les modalités de quantification. L'organisation des sous-critères se fait de façon à inclure l'ensemble des phases du cycle de vie du bâtiment. D'autre part, cette organisation des sous-critères permet de prendre en compte l'apport des divers acteurs en termes de compétences et informations, dont la disponibilité en phase de pré-design permettrait d'améliorer le processus en entier.

Au-delà de la grille de lecture fournie par les critères définis dans le chapitre 3, la méthode propose une quantification des divers critères. Ce cadre méthodologique permet l'évaluation globale de la pertinence du projet en phase de pré-design.

Nous avons vu que la méthode prévoit un système de notation pour les critères les plus qualitatifs : « simplicité de la solution » (CC1), « possibilité de vérification » (CC2), « disponibilité des compétences » (CC3), et « simplicité de gestion » (CC4). Ces critères fournissent à la fois un cadre d'évaluation et, intrinsèquement, des bonnes pratiques pour le concepteur qui peut, afin d'obtenir une note plus élevée, mettre en pratique les principes propres de la constructibilité technique.

D'autres critères (CC5, CC6 et CC7), relatifs à la pertinence vis-à-vis du programme et de la stratégie environnementale et économique du projet, sont estimés à l'aide d'indicateurs plus ou moins connus et prises en compte dans la réglementation française ou dans les méthodes de certifications nationales et internationales (BREEAM, LEED et HQE).

Il est nécessaire de remarquer que dans notre cas nous nous sommes concentrés sur la pertinence, en réservant pour les perspectives les analyses concernant la robustesse (à travers la prise en compte de scénarios de variation). De même, la pertinence aux fonctions d'usages a été traitée exclusivement concernant la fonction de « fournir une ambiance » que le bâtiment devrait expliciter pendant l'exploitation.

Notre attention, en effet, s'intéresse aux aspects principalement liés à la qualité des ambiances internes (confort des usagers) et la performance énergétique. La dernière demeure à la base de la mesure des indicateurs définis pour l'évaluation des critères environnementaux et d'économie en exploitation.

Par rapport aux méthodes permettant de guider la conception en introduisant la constructibilité (constructability) et la performance (analysées dans le chapitre d'état de l'art), notre méthode permet de :

- Créer un lien direct entre ces deux domaines, à l'aide d'une évaluation globale ;
- Introduire une quantification des divers aspects caractérisant la constructibilité technique de l'ouvrage ;
- Introduire dès le début de la conception les bonnes pratiques relatives aux diverses étapes du cycle de vie pouvant améliorer le processus et la communication ;
- Introduire les évaluations de la performance du bâtiment et certains des indicateurs (déjà utilisés dans les réglementations ou dans les labels) afin de vérifier la pertinence du bâtiment.

Ce dernier point demeure essentiel, car, en absence d'une indication précise de la maîtrise d'ouvrage dans le programme, concernant le niveau de performance ou l'indicateur qu'il faut vérifier, la méthode fournit des indications capables de dépasser ce manque d'information initiale.

Concernant l'agrégation des divers sous-critères nous avons décidé d'utiliser une des méthodes d'aide au choix multicritères : *l'Analytical Hierarchy Process*. Cette méthode, déjà largement utilisée dans les applications relatives au bâtiment (comme exposé dans le §2.4) permet de comparer critères de nature différente (qualitatifs ou quantitatifs) ou appartenant à domaines d'application distincts. D'autre part la méthode permet ainsi de réaliser une vérification quant à la cohérence des intensités définies pour les divers sous-critères.

La représentation de l'évaluation, comme nous l'avons vu, concerne deux niveaux. Nous proposons une évaluation globale de la solution (basée sur les sept critères), permettant de décrire globalement la pertinence du pré-design, ainsi qu'une représentation des divers critères pris individuellement. Cette deuxième représentation se montre nécessaire pour éviter une perte d'information (par l'agrégation) et pour mieux comprendre plus précisément les points faibles, et donc, les potentiels d'amélioration du pré-design.

Le chapitre suivant permettra de mettre en situation la méthode et d'en clarifier la démarche à l'aide de trois cas d'études.

## Chapitre 5 : Application de la méthode

Ce dernier chapitre nous présentera la mise en situation de la méthode à l'aide de trois cas d'études.

Les deux premiers, concernant un nouveau bâtiment en Ile de France et une surélévation pour un bâtiment existant en Italie, permettront de vérifier l'applicabilité de la méthode comme un outil de vérification (contrôle et autocontrôle) et d'évaluation de la pertinence de la conception en phase de pré-design.

Le dernier cas d'étude concerne, par contre, l'application de la méthode comme un outil d'aide à la décision pour le choix concernant deux typologies de façade. Il s'agit, en effet, de comparer à travers une analyse holistique un composant d'enveloppe traditionnel et un composant d'enveloppe adaptatif. Le but est de tester l'applicabilité de la méthode pour la prise en compte de l'innovation technologique et de découvrir, à travers les critères, les avantages et les inconvénients de chaque choix.

Afin de mieux comprendre ce que l'on considère comme innovation technologique de l'enveloppe, nous proposons, préalablement au dernier cas d'étude, une analyse des évolutions que l'enveloppe du bâtiment a connu dans les dernières années. Le paragraphe concerné, permettra de fournir une vision globale des avancées technologiques en matière de façade et de définir l'ensemble des composants qui aujourd'hui sont groupés sous le nom de « façades adaptatives ».

## 5.1. Application de la méthode afin d'évaluer un pré-design (contrôle/autocontrôle)

### 5.1.1. Application n°1 : nouveau bâtiment en Ile de France

L'objet de la première étude est le pré-design pour un collège d'environ 700 élèves, comprenant, au-delà des espaces dédiés aux activités du collège, des équipements sportifs et quatre logements de fonction.

Dans ce cas, nous allons utiliser la méthode pour réaliser une évaluation de la performance globale de la conception en phase de pré-design. L'assignation du projet a été réalisée à travers un concours qui s'est terminé en janvier 2017. La phase d'étude pour la première proposition a démarré en novembre 2016. Actuellement<sup>29</sup>, le projet est en phase de réalisation, ce qui nous permet d'en suivre les évolutions.

L'évaluation du pré-design est réalisée à l'aide de la documentation fournie par l'agence d'architecture qui a réalisé le projet (Platane & Ilić associé<sup>30</sup>).

Les principales sources d'information sont :

- Le programme établi pour la réalisation de l'opération ;
- Les tables du rendu de concours ainsi que l'ensemble des dessins architecturaux en format numérique 2D ;
- Une note architecturale et fonctionnelle de présentation du projet ;
- Une note concernant les évaluations énergétiques à travers la méthode RT<sup>1</sup> et les simulations énergétiques dynamiques réalisées lors de l'avant-projet.
- Rencontres avec l'agence d'architecture.

Le projet demeure intéressant pour les buts de l'étude pour plusieurs raisons : 1) il s'agit d'une nouvelle construction dans laquelle nous retrouvons une certaine mixité fonctionnelle<sup>31</sup>. C'est à dire que dans le programme sont prévus plusieurs types d'usages : salles de cours pour les étudiants, salles sportives pour la communauté, logements, etc. Un projet caractérisé par diverses fonctions (éducation, habitation, etc.) nécessite la prise en compte d'exigences diverses, ce qui peut porter à l'utilisation de procédés et matériaux divers. ; 2) le programme de l'opération demande de suivre une démarche HQE sans obtention de label. Cela signifie que, même si la procédure de certification n'est pas demandée, la conception doit tenir en compte et respecter les cibles indiquées dans le label ; 3) le bâtiment est actuellement en phase de réalisation et le projet en phase EXE, cela nous permet d'en suivre les changements en cours de route et, éventuellement, d'enregistrer les problèmes rencontrés.

---

<sup>29</sup> Novembre 2018

<sup>30</sup> <http://www.platane.net/project?id=312>

<sup>31</sup> La mixité fonctionnelle est représentée par l'existence de plusieurs fonctions (par exemple habitat et commerce) dans un quartier, un lotissement ou un bâtiment. En urbanisme elle s'oppose au concept de zoning, qui prévoit de réserver à chaque zone une fonction spécifique.

Dans ce paragraphe, nous présentons rapidement les caractéristiques principales du cas d'étude et, ensuite, nous appliquons la méthode proposée afin de fournir une évaluation globale du pré-design.

#### ■ *Présentation du cas d'étude*

Le nouveau collège Saint-Denis/Aubervilliers s'implante au Sud-Ouest de la commune d'Aubervilliers (au 14, rue du Pilier), au Nord de Paris et à proximité du centre-ville de Saint-Denis.

Le projet se développe sur les deux côtés de la parcelle triangulaire à travers deux immeubles distincts mais connectés entre eux (Figure 5-1). Un premier immeuble (en vert dans la figure), sur la rue au Sud, est réservé à l'activité du collège, à l'espace de la restauration (au RDC) et aux logements (en bleu dans la figure) ; le deuxième immeuble (en orange dans la figure) est dédié à accueillir le pôle sportif, une salle d'exposition et une salle polyvalente. Dans son ensemble les volumes sont assez simples, conçus pour rappeler les axes principaux du site. Les volumes sont coupés de façon à faciliter l'accès au bâtiment au rez-de-chaussée et l'accès à la vue dans la salle de documentation à double hauteur.



Figure 5-1 – Plan de masse et insertion des bâtiments (source : Platane & Ilić)

La structure est réalisée à travers des voiles en béton, sur lesquels sont rapportées les façades. Les divers usages du bâtiment se distinguent aussi à travers le choix des façades (Figure 5-2) : béton lasuré<sup>32</sup> pour le pôle sportif et pour l'ensemble des parois au rez-de-chaussée ; panneaux en aluminium perforé pour les façades relatives à la vie de collège et un revêtement en briques pour les volumes des logements. Pour les zones d'accueil et pour certains des espaces partagés, la conception prévoit le recours au système de façade rideau.

<sup>32</sup> Avec ce terme, l'agence d'architecture considère le parement béton sur lequel est appliquée une couche de teinture de protection et décoration.

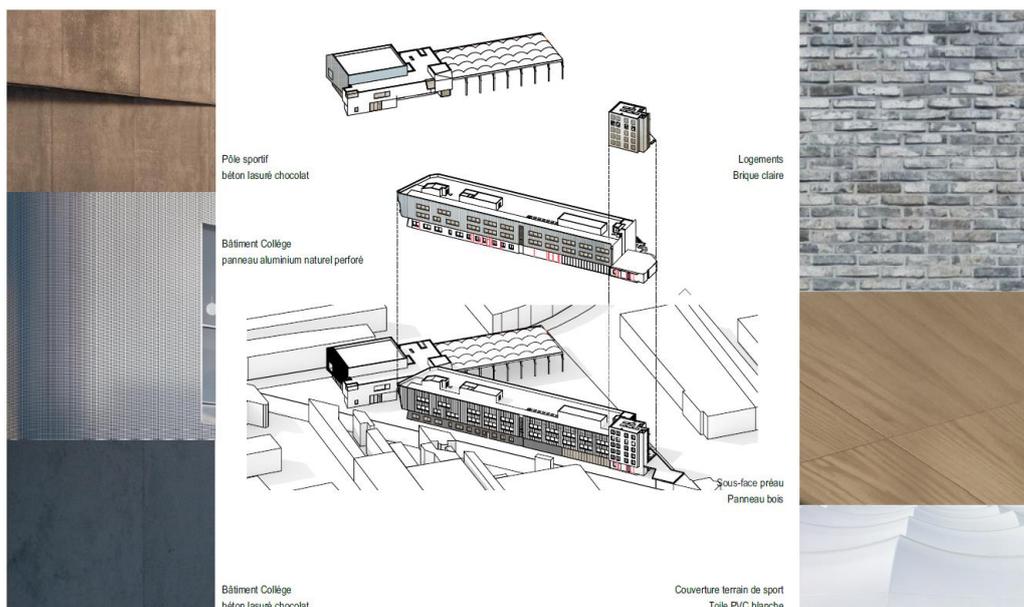


Figure 5-2 – Organisation des typologies de façade en fonction de l'usage (source : Platane & Ilić).

L'ensemble des structures horizontales est constitué par des dalles alvéolaires préfabriquées.

Depuis la note relative aux calculs règlementaires (réalisés par un bureau d'étude) nous savons que l'ensemble des bâtiments ne prévoit pas la climatisation. La production de chaud est assurée par une chaufferie gaz à condensation. Elle assure la production de chaleur du collège, la production de l'ECS du restaurant, et elle permet d'alimenter la sous station secondaire du pôle espaces partagés.

Toutes les zones accessibles aux élèves sont chauffées ; les salles de restauration et le gymnase prévoient des panneaux rayonnants à eau chaude ; la zone d'administration, les locaux de service pour la salle à manger et les logements sont chauffés par des radiateurs à eau chaude. La régulation des panneaux rayonnants permet une variation temporelle de  $0,3^{\circ}\text{C}$  ; alors que les radiateurs sont munis de robinets thermostatiques à variation temporelle inférieure à  $0,41^{\circ}\text{C}$ .

Le complexe ne prévoit pas une GTB, le seul contrôle se fait sur l'éclairage au niveau des zones de circulation verticale avec une programmation horaire.

L'ensemble des solutions d'enveloppe prévoit une isolation thermique réalisée en laine de roche, à exception des voiles en béton du rez-de-chaussée du collège, où il est prévu un élément isolant en polystyrène intégré dans les deux parements en béton. Ce système constructif connu comme « mur procédé GBE » est du type « sandwich » coulé en place. Il est réalisé en mettant en œuvre deux parois en béton armé coulées simultanément avec l'interposition d'un isolant. Comme nous le verrons dans les paragraphes suivants, ce système a été remplacé (en phase de chantier) par un système préfabriqué, du type « prémur » ayant les mêmes caractéristiques thermiques du précédent, mais d'épaisseur différente.

Les épaisseurs des éléments d'enveloppe et les caractéristiques de menuiseries ont été validées en amont de la conception à travers des simulations thermiques.

La gestion des apports solaires pour le volume dédié au collège se fait à travers : des stores extérieurs à lames orientables motorisées pour le bureau d'accueil ; des rideaux intérieurs dans les zones sensibles en correspondance des murs rideaux ; des stores extérieurs motorisés à contrôle

manuel groupé par salle, à l'étage. Pour les logements, les protections solaires sont constituées par des volets roulants en PVC.

▪ *Quantification des critères et évaluation du pré-design*

Sur la base des critères préalablement définis dans le chapitre 4 et des matrices d'intensité, nous allons maintenant évaluer le pré-design du nouveau collège d'Aubervilliers/Saint Denis. De suite, nous reportons entièrement, à titre explicatif, le seul calcul explicitant le critère CC1. Les autres critères seront traités à travers les résultats obtenus. Le pré-design est, enfin, noté globalement. Les résultats sont reportés à travers la note obtenue pour chaque sous-critère, accompagnée par la valeur globale déterminée à travers la méthode d'agrégation et sur la base des matrices d'intensités établies dans le §4.5. Les mêmes résultats sont représentés à la fois critère par critère et, plus tard, sous-forme d'évaluation globale.

Pour le critère CC1 – simplicité de la solution, il faut analyser les caractéristiques des diverses sous-systèmes composant le bâtiment (Structure - Str, Enveloppe - Env, Equipements - Equ). Le niveau de standardisation de la structure verticale (CC1.1) est inférieur au 30%, en prévoyant la réalisation de voiles béton coulés en place. Par contre la note de 6/6 est gagnée, pour le sous-critère CC1.2, grâce à l'utilisation, sur tout le volume, de composants standards au niveau des structures horizontales.

Les surfaces concernant les divers types de façades ont été calculées en considérant les diverses hauteurs sous plafond pour chaque étage respectivement pour le collège et les logements. La somme des surfaces de façades, distinguées par typologie, est reportée dans le Tableau 5-1. L'attribution des coefficients (0,9 pour les façades rapportées aux voiles ; 1 pour les voiles béton lasurées et pour les murs rideaux du type cadre et 0,5 pour les revêtements en briques) permet d'obtenir une valeur moyenne du ratio des surfaces des façades sur la surface totale de 0,86 en moyenne, ce qui fait obtenir une note de 5/6 au sous-critère CC1.3.

Tableau 5-1 – Surfaces des diverses typologies de façade associées aux divers coefficients et calcul de l'indicateur de référence pour le CC1.3

	$S_{f,1}$ (m <sup>2</sup> )	$S_{f,2}$ (m <sup>2</sup> )	$S_{f,3}$ (m <sup>2</sup> )	$S_{f,4}$ (m <sup>2</sup> )	$S_{f,tot}$ (m <sup>2</sup> )	$\frac{\sum S_{f,i} * c_i}{S_{f,tot}}$
	voile et rapportée	voile	brique	cadre		
	$c_1 = 0,9$	$c_2 = 1$	$c_3 = 0,5$	$c_4 = 1$		
RDC	0	937,86	0	211,948	1149,808	1,00
R+1	747,216		148,464		895,68	0,83
R+2	913,264		181,456		1094,72	0,83
R+3	238,694		298,386		537,08	0,67
<b>TOT</b>	<b>1899,174</b>	<b>937,86</b>	<b>628,306</b>	<b>211,948</b>	<b>3677,288</b>	<b>0,86</b>

Les éléments constituant les ouvertures sont groupables en quatre ou cinq lots avec des dimensions standards, donc le sous-critère CC1.4 obtient la note maximale. Les équipements sont prévus pour être intégrés dans les composants constructifs au niveau des faux-plafonds. La conception n'est pas optimisée à travers l'utilisation de solutions d'enveloppe innovantes permettant de minimiser le recours aux équipements techniques ; dans une démarche de prise en compte de l'innovation technologique, à notre avis, cela représente un frein à la conception. Par contre, les gains techniques ont été étudiés par l'équipe de conception afin d'optimiser les correspondances par étage et les cheminements des services de distribution (CC1.5 = 3/6). La production des éléments constructifs

se fait in situ, l'utilisation du procédé GEB est considéré comme un processus de préfabrication foraine à l'unité, et les façades intègrent des composants préfabriqués. Cela comporte une note de 2/6 pour le CC1.6 et le CC1.7. Concernant les interfaces constructives, l'utilisation du béton coulé fixe les jonctions qui demeurent non détachables et donc, non réutilisables ou remplaçables.

Tableau 5-2 – Synthèse des notes acquises par le pré-design concernant le CC1

CC1 - Simplicité de la solution							
CC1.1	CC1.2	CC1.3	CC1.4	CC1.5	CC1.6	CC1.7	CC1.8
$\Sigma Spref/Stot < 30\%$	$\Sigma Spref/Stot = 100\%$ et grille structure horizontale régulière	$80\% \leq (\Sigma Sf^*ci/Stot) * 100 < 100\%$	$\Sigma Nb/Nbtot = 100\%$ (forme et matériaux)	Equipements nécessaires mais ils sont intégrés dans les éléments de construction et la continuité verticale des gaines est assurée	La production prévoit l'utilisation de procédés de préfabrication foraine en unité	Structure complètement réalisée in situ façade intégrant éléments standardisés	Construction complètement réalisée en chantier, certains éléments sont détachables
NCC1.1	NCC1.2	NCC1.3	NCC1.4	NCC1.5	NCC1.6	NCC1.7	NCC1.8
1	6	5	6	3	2	2	2

Comme nous l'avons exposé dans le §4.6, en normalisant les notes obtenues sur la note maximale (6), il est possible d'obtenir la représentation de l'évaluation relative au seul critère CC1 pour le pré-design en considération (Figure 5-3).

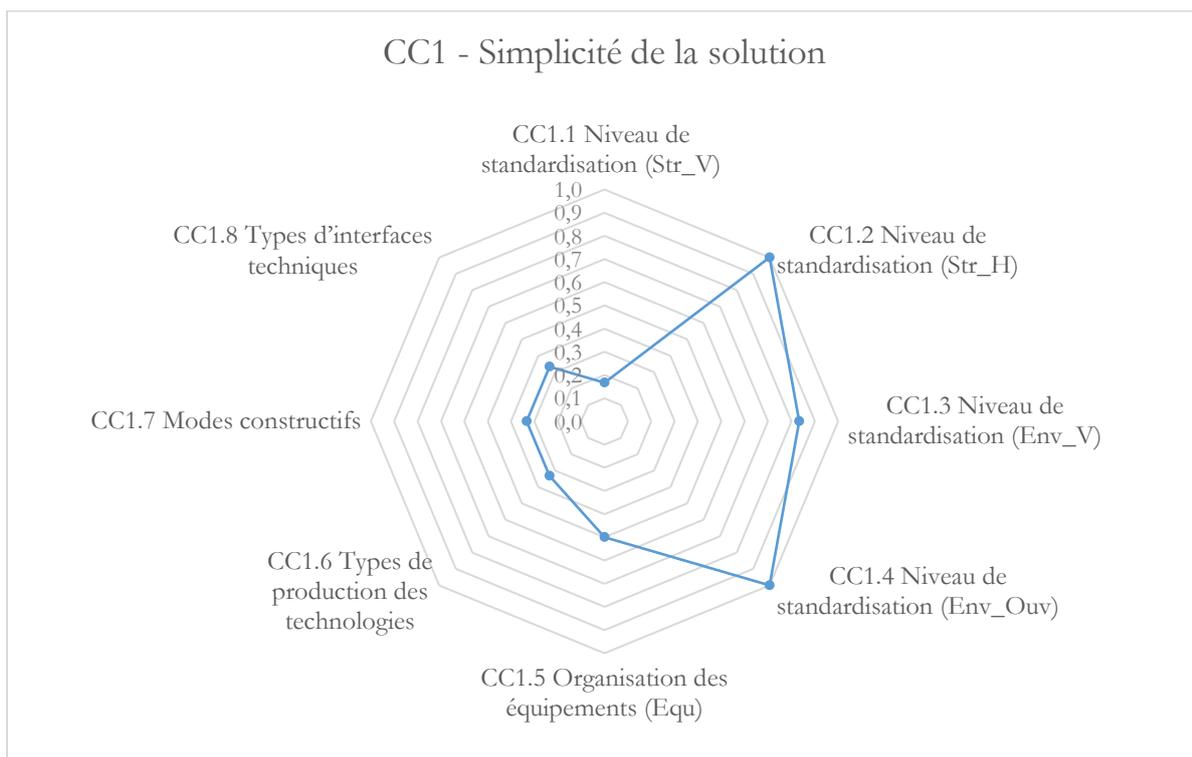


Figure 5-3 – Représentation graphique de l'évaluation relative au critère CC1 – simplicité de la solution pour le collège d'Aubervilliers

Cette représentation met en évidence les leviers d'action sur lesquels le concepteur peut agir afin d'améliorer la conception et mieux prendre en compte les principes de constructibilité du projet.

La valeur globale du pré-design concernant le critère CC1, est évaluée à travers l'agrégation des diverses notes obtenues par les sous-critères. Pour ce faire, nous nous appuyons sur la méthode AHP à l'aide de la matrice d'intensité reportée dans la Figure 5-4.

	CC1.1	CC1.2	CC1.3	CC1.4	CC1.5	CC1.6	CC1.7	CC1.8
CC1.1	1	5	1	3	3	3	3	1
CC1.2	1/5	1	1/3	1/3	1/3	1/3	1/5	1/3
CC1.3	1	3	1	5	3	3	3	1
CC1.4	1/3	3	1/5	1	1/3	1/3	1/3	1
CC1.5	1/3	3	1/3	3	1	1	3	1/3
CC1.6	1/3	3	1/3	3	1	1	3	1
CC1.7	1/3	5	1/3	3	1/3	1/3	1	1
CC1.8	1	3	1	1	3	1	1	1

Figure 5-4 – Matrice d'intensité considérée pour l'agrégation des sous-critères relatifs au critère CC1

Le vecteur des coefficients de pondération  $W = \{w_1, \dots, w_5\}$  est évalué en divisant sa somme des valeurs de l'intensité d'importance d'un critère (en ligne dans la matrice de la Figure 5-4) pour la somme des valeurs en colonne et en faisant la moyenne sur le nombre totale de sous-critères (dans ce cas 8). Le vecteur résultant est reporté dans le Tableau 5-3.

Tableau 5-3 – Vecteur des coefficients de pondération

$w_1$	0,21
$w_2$	0,04
$w_3$	0,22
$w_4$	0,06
$w_5$	0,11
$w_6$	0,12
$w_7$	0,10
$w_8$	0,15

En considérant les valeurs des notations du Tableau 5-2 normalisées pour la valeur maximale possible, nous obtenons les valeurs suivantes (Tableau 5-4) :

Tableau 5-4 – Valeurs des notation normalisées pour le critère CC1

NCC1.1/N	NCC1.2/N	NCC1.3/N	NCC1.4/N	NCC1.5/N	NCC1.6/N	NCC1.7/N	NCC1.8/N
0,17	1,00	0,83	1,00	0,50	0,33	0,33	0,33

Comme exposé dans le chapitre 4, le critère CC1 est évalué avec la formule suivante :

$$CC1 = \sum_{i=1}^5 w_i \left[ \frac{N_{1,i}}{N} \right] = 0,49$$

Le pré-design du collège répond de façon moyenne aux principes de simplicité (CC1). En général, les aspects pouvant améliorer la note du CC1 demeurent dans les choix des procédés constructifs de la structure verticale et dans les matériaux employés.

De suite nous exposons les attributions des notes considérées pour les autres critères sans expliciter l'ensemble des calculs. Les résultats de l'opération d'agrégation sont reportés suite à l'analyse des divers sous-critères.

Pour ce qui concerne la possibilité de vérification CC2, le process s'est réalisé à travers une conception-réalisation, les échanges entre l'équipe de conception et le constructeur sont donc très fréquents ; de plus l'équipe de conception développe le projet sur une plateforme BIM permettant le contrôle des interférences de tout sous-système, et associable aux moteurs de simulation. Le seul

point faible est représenté par la non prise en compte des risques concernant les diverses opérations et par le manque d'un plan de commissionnement ou d'un registre des problèmes (CC2.2). Pour le sous-critère CC2.3, le pré-design obtient la note 6 car les sous-systèmes considérés pour les façades, représentent des procédés connus dont la vérification demeure maîtrisée et la conception prévoit la réalisation d'essais en laboratoire ainsi que la réalisation d'une maquette à l'échelle réelle (mock-up) de la façade. La MOE s'est aussi inquiétée des problématiques relatives à l'accessibilité de l'ensemble des composants afin de permettre les actions de vérification et maintenance en phase d'exploitation. C'est pourquoi le pré-design obtient la note de 6 pour le CC2.4. Globalement les participants aux processus s'inquiètent concernant les actions de vérification tout au long du cycle de vie. Le Tableau 5-5 représente une synthèse de l'évaluation relative au CC2.

Tableau 5-5 – Synthèse des notes acquises par le pré-design concernant le CC2

<b>CC2 - Possibilité de vérification</b>			
<b>CC2.1</b>	<b>CC2.2</b>	<b>CC2.3</b>	<b>CC2.4</b>
La conception fait l'objet d'une révision par un tiers (peer-review) ou d'un PCI, elle est développée à l'aide d'outils BIM associable à moteurs de simulation énergétique et environnementale permettant une optimisation du processus	Les risques concernant les sous-systèmes n'ont pas été pris en compte et aucun plan de commissionnement ou registre des problèmes a été établi	Les systèmes de façade sont connus. Il est quand même prévu que les sous-système façade feront l'objet de réalisation de maquettes physiques à l'échelle réelle afin de déterminer la séquence de montage et l'effet esthétique. Il est ainsi prévu de réaliser des essais en laboratoire et in situ.	Tous les équipements techniques et tous les éléments de la façade (inclus tous les accessoires, comme les revêtements, protections solaires éléments d'éclairage, etc.) sont facilement accessibles, les exigences relatives à dispositifs de vérification, nettoyage et de maintenance ont été prises en compte
<b>NCC2.1</b>	<b>NCC2.2</b>	<b>NCC2.3</b>	<b>NCC2.4</b>
4	1	6	6

Dans la conception du collège d'Aubervilliers, la résolution des détails techniques relatifs aux interfaces est réalisée par la MOE sur une partie des interfaces constructives (plus précisément sur les jonctions façade-structure) (CC3.1=4/6). Les éléments de constructions considérés sont simples et facilement repérables et/ou modélisables dans les logiciels de simulation. Le pré-design obtient donc la note 6 pour le CC3.2. Le point faible du critère CC3 demeure surtout dans le manque de prévision de dispositifs de formation et responsabilisation des usagers. Dans l'objectif de garantir la performance du bâtiment en phase d'exploitation aussi bien que lors de sa réalisation, cet aspect revêt une importance très élevée. La performance devait se garantir aussi à travers l'implication des usagers qui, responsabilisés à l'aide de dispositifs de formation, peuvent apporter formellement leur contribution dans le processus de gestion du bâtiment.

Le Tableau 5-6 représente une synthèse de l'évaluation relative au CC3.

Tableau 5-6 – Synthèse des notes acquises par le pré-design concernant le CC3

CC3 - Disponibilité des compétences			
CC3.1	CC3.2	CC3.3	CC3.4
Les détails techniques concernant les interfaces techniques ont été développés ils sont claires mais ils ne sont pas exhaustifs	Les sous-systèmes peuvent facilement être implémentés dans les divers modèles de simulation, le produit, les caractéristiques et le fonctionnement sont connus et les bibliothèques des outils les intègrent, aucune exigence d'expertise développée	Aucune équipe spécialisée est nécessaire pour la mise en œuvre, l'utilisation d'équipements spéciaux n'est pas demandée	Aucun type de formation est prévu pour les usagers
NCC3.1	NCC3.2	NCC3.3	NCC3.4
4	6	6	1

Concernant la simplicité de gestion (CC4), le pré-design se montre améliorable sur plusieurs points de vue. L'analyse du sous-critère CC4.1 montre que les matériaux pris en compte dans la conception ont une résistance élevée aux agressions de l'environnement. Le pré-design reçoit donc la note de 6 pour ce premier sous-critère. La séquence de montage n'a pas fait l'objet d'une étude. Le manque de temps en phase de conception peut conduire à négliger certains des aspects qui permettraient d'optimiser le processus en réduisant les risques. Concernant la régulation technique, comme déjà dit dans la présentation du cas d'étude, le bâtiment ne prévoit pas d'automatismes, exception faite pour l'éclairage à contrôle horaire (CC4.4 = 3/6). De même, les occupants n'ont pas la complète liberté de modifier la gestion des stores motorisés ou des terminaux, ce qui d'une part peut représenter un moyen de garantie de performance, mais d'autre part ne prend pas en compte l'interaction de l'utilisateur avec le bâtiment. Le sous-critère CC4.5 reçoit, donc, une note de 3/6, comme les derniers deux sous-critères. Concernant ces derniers en effet, les actions de maintenance prévues sont du type légère et fréquente réalisées par des équipes spécialisées ; les éléments, en partie recyclables à la fin de vie du bâtiment, sont par contre difficilement séparables. C'est-à-dire que les éléments constructifs considérés ne prévoient pas une réutilisation future une fois le bâtiment démolé. Le Tableau 5-7 représente une synthèse de l'évaluation relative au CC4.

Tableau 5-7 – Synthèse des notes acquises par le pré-design concernant le CC4

CC4 - Simplicité de la gestion						
CC4.1	CC4.2	CC4.3	CC4.4	CC4.5	CC4.6	CC4.7
Les matériaux choisis ne sont pas dégradables par l'environnement agressif ou par les conditions climatiques, ils ne sont pas incompatibles entre eux	La construction est réalisée avec des éléments lourds, de dimensions qui ne nécessitent pas de transport exceptionnel et en partie transportables par un ou deux ouvriers	Aucune analyse de la séquence de montage	Gestion et contrôle centralisé pour quelques sous-systèmes à réponse locale	L'utilisateur ne peut pas intervenir sur les systèmes adaptatifs car l'adaptivité des sous-systèmes est établie en phase de production des composants	Pour assurer la performance la construction demande maintenance fréquente et légère (mois) (nettoyage) faite par les utilisateurs ou un tiers spécialisés ou pas	Les éléments sont en partie recyclables et/ou réutilisables mais difficilement séparables
NCC4.1	NCC4.2	NCC4.3	NCC4.4	NCC4.5	NCC4.6	NCC4.7
6	3	1	3	3	3	3

L'analyse qui vient d'être effectuée concerne l'évaluation des caractéristiques du pré-design liées au système de notation. L'ensemble des résultats est synthétisé dans le Tableau 5-8. Dans ce tableau nous indiquons la note obtenue pour chaque sous-critère, accompagnée par la valeur globale déterminée à travers la méthode d'agrégation et sur la base des matrices d'intensités établies dans le §4.5. Les mêmes résultats sont ainsi représentés, critère par critère, dans la Figure 5-5 et la Figure 5-6.

Tableau 5-8 - Valeurs des critères acquises à travers le système de notation et l'agrégation pour le collège d'Aubervilliers

Critères	Sous-critères	Valeur acquise	Valeur globale
<b>CC1 - Simplicité de la solution</b>	CC1.1 Niveau de standardisation de la structure verticale (Str_V)	1/6	0,49
	CC1.2 Niveau de standardisation de la structure horizontale (Str_H)	6/6	
	CC1.3 Niveau de standardisation des façades (Env_V)	5/6	
	CC1.4 Niveau de standardisation des ouvertures (Env_Ouv)	6/6	
	CC1.5 Organisation des équipements techniques (Equ)	3/6	
	CC1.6 Type de production des technologies	2/6	
	CC1.7 Modes constructifs	2/6	
	CC1.8 Types d'interfaces techniques	2/6	
<b>CC2 - Possibilité de vérification</b>	CC2.1 Outils et mesures à support de la conception	4/6	0,66
	CC2.2 Prise en compte des risques et mise en place d'un registre des problèmes	1/6	
	CC2.3 Nécessité d'essais	6/6	
	CC2.4 Facilité d'accès à la vérification (en phase d'exploitation).	6/6	
<b>CC3 - Disponibilité des compétences</b>	CC3.1 Développement des détails techniques	4/6	0,71
	CC3.2 Modélisation des éléments	6/6	
	CC3.3 Recours à une main d'ouvre spécialisée et équipement spéciaux (chantier)	6/6	
	CC3.4 Formations prévues pour les usagers	1/6	
<b>CC4 - Simplicité de gestion</b>	CC4.1 Durabilité des systèmes	6/6	0,55
	CC4.2 Transport	3/6	
	CC4.3 Séquence de montage	1/6	
	CC4.4 Régulation et gestion technique	3/6	
	CC4.5 Interaction avec l'utilisateur	3/6	
	CC4.6 Maintenance	3/6	
	CC4.7 Fin de vie	3/6	

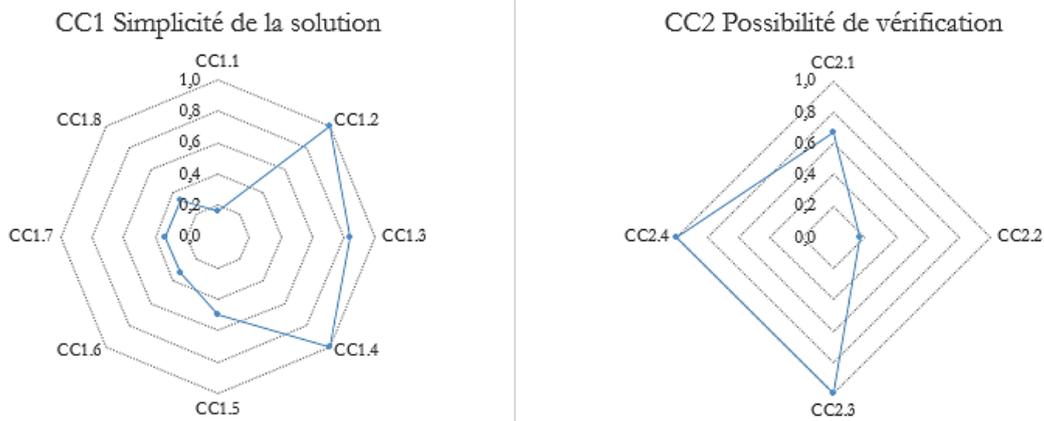
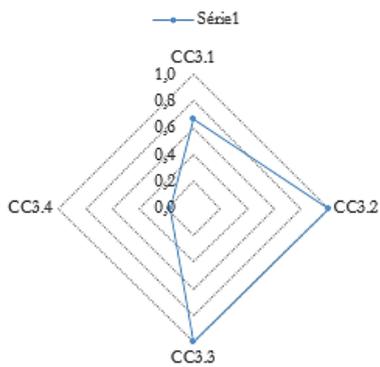


Figure 5-5 - Evaluation critère par critère (CC1, CC2) pour le collège d'Aubervilliers, sur la base du système de notation

CC3 Disponibilité des compétences



CC4 Simplicité de gestion

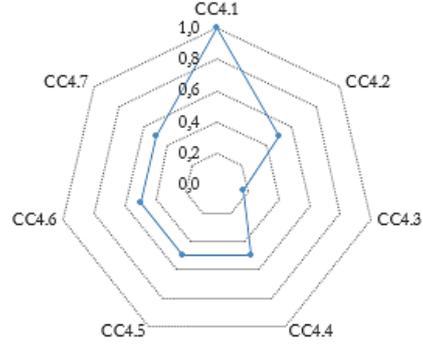


Figure 5-6 - Evaluation critère par critère (CC3, CC4) pour le collège d'Aubervilliers, sur la base du système de notation

Concernant l'évaluation des derniers trois critères CC5, CC6, CC7, représentant respectivement la pertinence vis-à-vis des performances d'usage, l'impact environnemental et l'économie du projet en pré-design, nous sommes basés sur le programme de l'opération et sur les recommandations internationales afin d'établir les valeurs limites à respecter. Sur la base du programme, nous avons pu établir certaines des valeurs limites permettant de calculer les indicateurs présentés dans le chapitre 4. En absence de spécifications dans le programme, pour le critère CC6, les valeurs limites ont été établies en fonction des références normatives concernant le diagnostic de performance, comme prévu par la directive européenne 2010/31/2010 (AFNOR, 2017c).

Les valeurs de référence prises en compte pour l'évaluation des indicateurs établis dans le cadre de la méthode pour les critères CC5, CC6 et CC7, sont résumés dans le Tableau 5-9

Tableau 5-9 - Valeurs de référence considérées pour le calcul des indicateurs de performance

Sous-critère	Indicateur	Valeur de référence		Notes
CC5.1	$\sum S_{prog}$	Collège	3549m <sup>2</sup>	Evaluation faite sur les diverses surfaces de l'opération comme établi par le programme
		Restaurant	514m <sup>2</sup>	
		Etablissement sport	1178m <sup>2</sup>	
		logements	360m <sup>2</sup>	
CC5.2	$FLJ$	$\geq 2\%$		
CC5.3	$n^{\circ}h_{occ}$	$T_{op} \leq 28^{\circ}C$		Évalué pour toutes les zones thermiques
CC6.1	$C_{eau,lim}$	87311,16 m <sup>3</sup>		Calcul de référence en ANNEXE C par rapport à la méthode proposée par la démarche HQE
CC6.2	$S_{disponible}$	8575 m <sup>2</sup>		Surface totale de la parcelle
CC6.3	$CEP_{lim}$	82,5 kW <sub>ep</sub> /m <sup>2</sup>		Limite programmatique
CC6.4	$EGES_{CE,lim}$	$\leq 80 kg_{eq,CO2}/m^2$		Dans cette évaluation nous avons considéré la seule contribution due à la consommation énergétique. (ANNEXE C)
CC7	$CG$	15694000€		Calculé sur 30 ans et avec un coût d'investissement de 15M€, un taux d'actualisation de 5% et un taux d'inflation général de 2% (ANNEXE C)

Ces valeurs ont été déterminées sur la base de la documentation à disposition. Nous avons posé des hypothèses quant à la valeur de référence du critère CC6.4. En effet, le projet n'établit pas une limite maximale des émissions de CO<sub>2</sub>, car, tout en suivant la démarche HQE, il ne prévoit pas

L'obtention d'une certification. Nous nous sommes limités à considérer le niveau le plus élevé établi par les étiquettes de diagnostic énergétique et d'émissions de gaz à effet de serre (AFNOR, 2017c).

Une fois les valeurs de référence déterminées, il s'agit de confronter les valeurs de projet aux limites, comme exposé au paragraphe §4.3. Nous rappelons que, dans ce cas, il s'agit de critères normalisés, donc ce que nous calculons sont des pourcentages d'efficacité par rapport à l'obtention du critère, sans passer par le système de notation.

Les valeurs acquises par les divers sous-critères sont reportés dans le Tableau 5-10. Dans ce cadre, le critère CC5, relatif au respect des exigences d'ambiance, se décline à travers les sous-critères CC5.1, CC5.2 et CC5.3, concernant respectivement le respect des surfaces établies, l'ambiance visuelle et l'ambiance thermique. Pour le pré-design du collège, nous avons considéré un seul sous-critère relatif au confort thermique car le programme prévoit de vérifier que les valeurs de la température opérative soient inférieures au seuil maximal de 28°C dans les zones à occupation prolongée pendant plus de :

- 35 heures pour les locaux d'enseignements ;
- 50 h pour les espaces de bureaux ;
- 10 h pour la salle de restauration ;
- 30h pour l'aire de sport du gymnase ;
- 8% du temps d'occupation pour les logements de fonction.

Les surfaces indiquées dans le programme sont respectées à 100%, dans tous les cas les surfaces prévues demeurent plus élevées que celles des indications programmatiques. Concernant l'ambiance visuelle, l'indicateur de référence pour l'étude est le FLJ, qui, comme présenté dans le §4.2.5, est représenté par le rapport entre l'éclairage à l'intérieur et l'éclairage à l'extérieur. Ce rapport doit avoir une valeur de 2% sur le 80% de l'espace et, comme indiqué dans la documentation fournie, il demeure respecté. En phase d'esquisse, les dimensions des ouvertures ont été définies sur la base de cet indicateur. Le niveau de confort est ainsi respecté dans toutes les pièces, cela est dû aussi aux itérations, effectuées sur le projet, assistées par les simulations énergétiques. Le 0,03 qui manque à l'obtention de la cible dans sa globalité, est dû à un nombre d'heure inférieur à la limite imposée par le programme, durant laquelle la température opérative dépasse 28°C. Globalement le critère CC5 obtient une valeur de 0,98.

La soutenabilité globale (CC6), inclue les évaluations relatives aux économies des ressources d'eau, de sol et d'énergie, ainsi que les émissions de CO<sub>2</sub> du pré-design. Les économies de ressources en eau ont été évaluées en considérant les valeurs des consommations d'eau de la note environnementale. La limite a été établie sur la base des indications de la démarche HQE pour ce qui concerne les équipements sanitaires. Cette démarche permet de comparer la consommation calculée (avec des équipements de projet), avec une consommation de référence (incluant des équipements de référence). Nous avons ainsi pris en compte les surfaces de récupération comme la toiture des deux bâtiments et les surfaces végétalisées. Concernant le sol, les économies faites par rapport à la surface disponibles s'élèvent au 71%. En effet, une grande partie des surfaces est destinée à des espaces partagés en plein air pour les élèves. Les économies quant aux ressources énergétiques sont relativement faibles par rapport à la limite imposée. De toute façon la consommation (61,7 kW<sub>ep</sub>/m<sup>2</sup>) demeure inférieure à cette limite. Le CC6.4 obtient une valeur de 0,86. En absence d'indication dans le programme, qui impose de suivre la démarche HQE, mais

sans l'obtention du label, nous avons imposé la valeur limite pour les émissions de CO<sub>2</sub>. La valeur choisie est de  $80 \text{ kg}_{\text{eq,CO}_2}/(\text{m}^2 \cdot \text{an})$ . Cette donnée correspond à la limite supérieure de la classe F d'une étiquette de diagnostic énergétique concernant les émissions de gaz à effet de serre relative à la seule consommation d'énergie. Dans ce cadre, le bâtiment émet  $11,16 \text{ kg}_{\text{eqCO}_2}/(\text{m}^2 \cdot \text{an})$ , valeur calculée en considérant les données des consommations relatives aux rapports des simulations et les données environnementales fournies par la base INIES (voir l'ANNEXE C pour le calcul). Globalement, à travers l'agrégation, le pré-design du collège obtient une valeur de 0,69 pour le critère de soutenabilité, ce qui signifie que la conception respecte les attentes du programme mais elle pourrait s'améliorer sur le plan énergétique.

L'impact économique de la consommation énergétique sur le coût global est assez faible, ce qui permet d'obtenir une valeur de 0,96 pour le critère CC7. Ce critère demeure plus représentatif en présence d'une limitation concernant l'indicateur de coût déclaré dans le programme et en considérant aussi les autres contributions relatives à l'exploitation de l'ouvrage. En effet, le coût supplémentaire qui concerne la seule contribution énergétique en exploitation représente, généralement une petite partie du coût global. Cela signifie que, pour comme l'indicateur est conçu (en dépendant du rapport entre le coût global et le coût d'investissement), il nous fournira une valeur toujours très élevée. Comme nous le verrons dans le troisième cas d'étude, ce critère revêt une plus grande importance dans le cadre de la comparaison de diverses solutions de projet. Dans ces cas, le coût d'investissement et le coût d'exploitation peuvent changer en fonction des solutions de projet choisies. Le choix entre les diverses solutions pourra donc être lié aussi à l'efficacité économique fournie par les diverses solutions sur une long terme.

Tableau 5-10 - Valeurs des critères acquises à travers l'évaluation des indicateurs et leur agrégation pour le collège d'Aubervilliers

Critères	Sous-critères	Valeur acquise	Valeur globale
<b>CC5 - Exigences d'ambiance</b>	CC5.1 Réponse aux exigences d'espaces	1	0,98
	CC5.2 Ambiance visuelle	1	
	CC5.3 Ambiance thermique en été	0,97	
<b>CC6 - Soutenabilité</b>	CC6.1 Economie des ressources en eau	0,96	0,69
	CC6.2 Economie des ressources en sol	0,71	
	CC6.3 Economie des ressources énergétiques	0,25	
	CC6.4 Réduction des émissions de CO <sub>2</sub>	0,86	
<b>CC7 - Economie en exploitation</b>			0,96

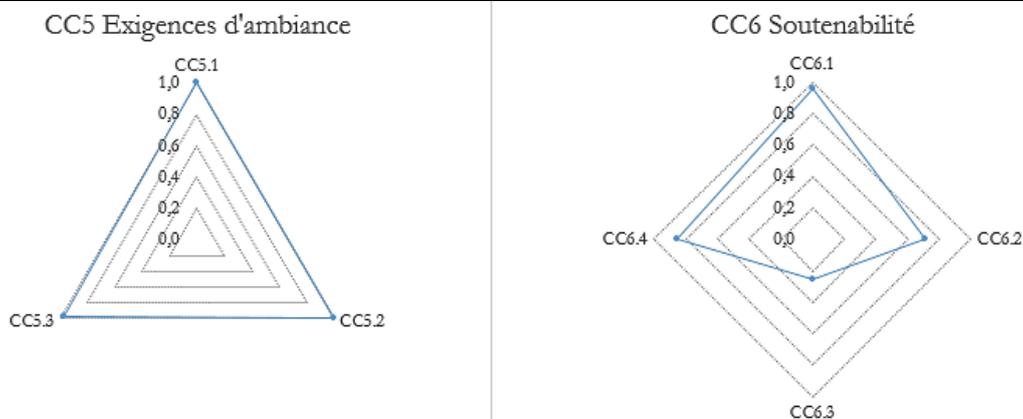


Figure 5-7 - Evaluation critère par critère (CC5 et CC6) pour le collège d'Aubervilliers, sur la base des indicateurs

Globalement le pré-design se démontre pertinent vis-à-vis de certaines exigences, plus que moyen concernant les contrôles et les compétences en jeu, ainsi qu'améliorable sur le plan de la soutenabilité, de la simplicité du produit et de la gestion du processus.

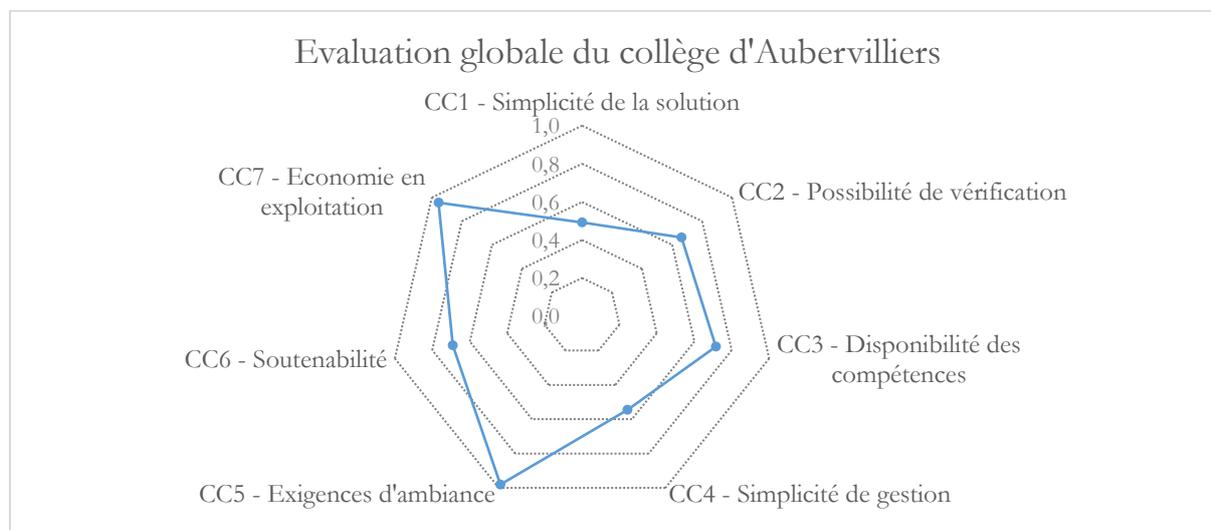


Figure 5-8 – Evaluation globale pour le collège d'Aubervilliers

■ *Comparaison entre l'alternative prévue et l'alternative retenue*

Le cas d'étude d'Aubervilliers nous permet d'étudier les évolutions que le projet a pu subir tout au long de sa conception. En effet, en phase de chantier (EXE), comme déjà dit pendant la présentation du cas d'étude, le constructeur a préféré un système constructif plus simple pour les parois du rez-de-chaussée. Le système à coffrage intégré (le « prémur ») a donc été préféré au « procédé GBE » indiqué par l'équipe de conception, pour tout le rez-de-chaussée du collège (Figure 5-9 et Figure 5-10). Ce nouveau système est préfabriqué en usine en intégrant les allocations pour les ouvertures. Le processus de préfabrication permet de réaliser des panneaux de grandes longueurs (12m). Par contre, à résistance thermique équivalente, le « prémur » est caractérisé par une épaisseur inférieure. Cela implique de réfléchir à nouveau sur la connexion entre les panneaux au RDC et les voiles béton (coulé en place) à l'étage. Il s'agit de résoudre un problème d'alignement des éléments en correspondance des étages, mais surtout, de retoucher les calculs énergétiques pour la prise en compte des ponts thermiques.

Afin de vérifier l'effet que ce nouveau choix technique comporte sur l'évaluation globale du pré-design nous avons donc décidé de réaliser une comparaison entre les deux solutions.

Dans ce cas, nous considérons la solution initialement prévue que nous appelons « alternative 1 », réalisée avec le procédé GEB, et la solution incluant le système retenu, appelé « alternative 2 » et prévoyant le système à coffrage intégré « prémur ». La comparaison des sous-critères concerne, par contre, la seule constructibilité technique. Le changement s'est réalisé en phase de chantier et le projet nécessite encore la mise à jour des résultats des études énergétiques, dont actuellement<sup>33</sup> nous ne disposons pas. Nous faisons, donc, l'hypothèse que les résultats ne changent pas concernant les indicateurs pris en compte pour les CC5, CC6 et CC7.

<sup>33</sup> Novembre 2018

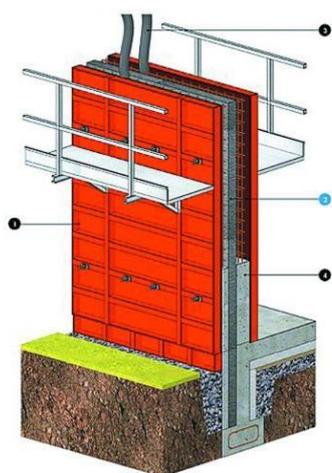


Figure 5-9 – procédé GBE (source : [www.gbe-innovation.fr](http://www.gbe-innovation.fr))



Figure 5-10 – système à coffrage intégré « prémur » (source : [www.batiproducts.com](http://www.batiproducts.com))

Le seul critère impacté par le changement du mode constructif est donc le CC1 prenant en compte la simplicité de la solution Tableau 5-11.

Le choix du nouveau système impacte la standardisation de la structure verticale. Le ratio entre les structures préfabriquées sur la totalité des structures passe de 0 à 35%. La note pour le sous-critère CC1.1 passe donc de 1 à 2. Les autres sous-critères influencés par ce changement sont le CC1.6 et le CC1.7. Ces derniers concernent les types de production des sous-systèmes structure et enveloppe et les modes constructifs.

Tableau 5-11 – Comparaison des notes obtenues par les deux alternatives pour le critère CC1 « simplicité de la solution »

Sous-critères	Alternative 1	Alternative 2
CC1.1 Niveau de standardisation de la structure verticale (Str_V)	1/6	2/6
CC1.2 Niveau de standardisation de la structure horizontale (Str_H)	6/6	6/6
CC1.3 Niveau de standardisation des façades (Env_V)	5/6	5/6
CC1.4 Niveau de standardisation des ouvertures (Env_Ouv)	6/6	6/6
CC1.5 Organisation des équipements techniques (Equ)	3/6	3/6
CC1.6 Type de production des technologies	2/6	4/6
CC1.7 Modes constructifs	2/6	6/6
CC1.8 Types d'interfaces techniques	2/6	2/6
<b>CC1 - Simplicité de la solution</b>	<b>0,49</b>	<b>0,63</b>

Dans le cas de l'alternative 1 (procédé GEB) la structure est complètement réalisée in situ et prévoit des procédés de préfabrication foraines, alors que pour l'alternative 2 il est prévu de réaliser les divers panneaux en usine et à l'unité (selon la longueur des panneaux et les ouvertures présentes). L'ensemble des structures verticales et horizontales demeure, dans le cas de l'alternative 2, pour la plupart préfabriqué avec une façade rapportée, ce qui porte la note du sous-critère CC1.7 de 2 à 6. Globalement le critère de simplicité passe de 0,49 à 0,63.

An niveau graphique ce changement se traduit, comme représenté dans la Figure 5-11 par un élargissement de la surface comprise entre les divers sous-critères. Dans la figure, la courbe bleue correspond à l'« alternative 1 », alors que la courbe orange correspond à la solution de coffrage intégré (« alternative 2 »)

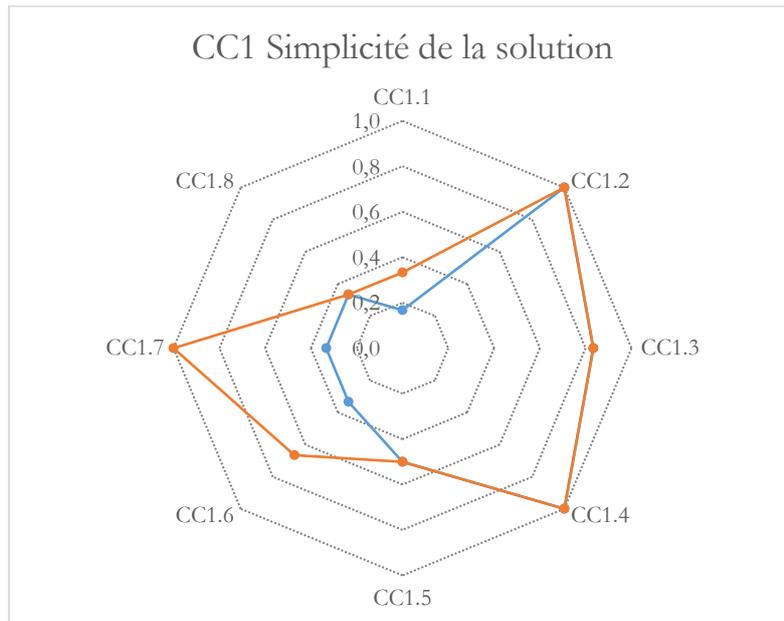


Figure 5-11 - Comparaison des deux alternatives pour le critère CC1 « simplicité de la solution »

A l'échelle globale, le diagramme permettant de comparer les deux alternatives (Figure 5-12) montre la différence concernant le seul critère influencé. La figure nous permet de remarquer comme, en absence de la représentation détaillée des divers critères, le changement de pratique demeure presque inaperçu.

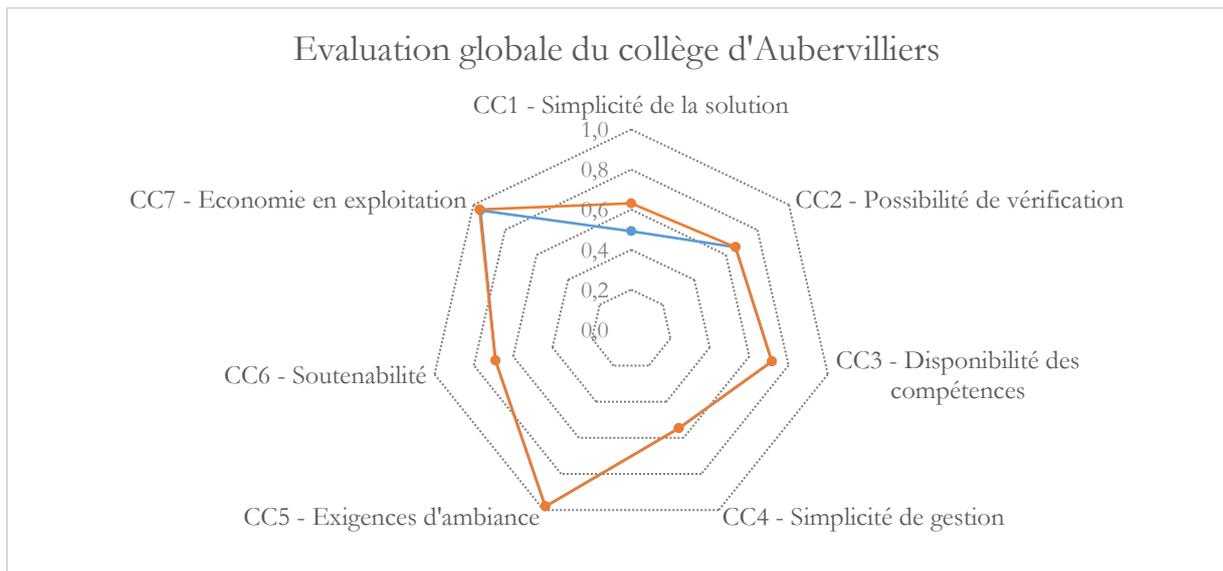


Figure 5-12 – Comparaison à l'échelle globale pour les deux alternatives analysés

En utilisant la méthode pour une première évaluation du pré-design, la maîtrise d'œuvre aurait pu probablement réfléchir à la possibilité de recourir au système de coffrage intégré, finalement retenu, bien avant la réalisation du chantier. Cela aurait permis d'éviter une nouvelle itération des études en cours de route, ce qui représente un frein pour le bon déroulement du processus. D'autre part le concepteur aurait eu l'avantage d'éviter une réflexion ultérieure concernant les interfaces entre les composants d'enveloppe (avancement des menuiseries dans l'épaisseur du « prémur ») et entre les divers systèmes constructifs (« prémur » au rez-de-chaussée et voile béton coulé en place à l'étage).

### 5.1.2. Application n°2 : surélévation d'un bâtiment en Italie

Dans ce paragraphe nous montrons l'utilisation de la méthode pour l'évaluation d'un projet de surélévation d'un bâtiment existant en Italie. Cette opération intéresse une portion du complexe immobilier du site du CNR (Centre National des Recherches) dans la ville de Pise. L'évaluation a concerné la phase du « *progetto di fattibilità tecnica e economica* » en Italie. Comme déjà exposé dans le §1.1, ce type d'étude représente le premier niveau de conception en Italie.

Les documents concernant ce niveau et à notre disposition étant :

- La documentation administrative de l'opération de l'appel d'offre ;
- Tous les plans (architecturaux et des systèmes électrique, mécanique, structural) en format numérique 2D ;
- La relation expliquant les choix de conception, accompagnés par les niveaux de performance prévus, l'ensemble des systèmes techniques considérés, le phasage de la réalisation ;
- L'ensemble des relations techniques concernant les calculs réalisés sur la base des choix de conception. Cela représente un dimensionnement initial des composants technologiques sur les plans : structurel, énergétique, hydrologique, économique et les premières indications sur la mise en œuvre.

A notre avis ce cas d'étude demeure intéressant, d'une part pour le périmètre d'étude, car il s'agit d'une intervention sur un bâtiment existant et, d'autre part, pour les moyens mis en œuvre en termes de compétences. En effet, l'opération, dont l'appel d'offre est daté 2016, a ensuite vu la mise en place d'une maquette numérique BIM et la participation de l'Université de Florence pour la réalisation du couplage de la maquette BIM et du planning 4D lors des phases finales de la conception.

Dans ce paragraphe, nous présentons les caractéristiques principales du cas d'étude et, ensuite, nous appliquons la méthode proposée afin de fournir une évaluation globale du pré-design.

#### ■ *Présentation du cas d'étude*

Le complexe immobilier du CNR de Pise a été réalisé en 1999. Il concerne trois corps connectés par des passerelles. Les trois corps sont organisés de la façon suivante :

- le bâtiment « A » concerne des services généraux du site ;
- le bâtiment « B » concerne l'ensemble des instituts de recherche ;
- le bâtiment « C » représente l'unité de recherche clinique.

Dans les années suivantes la réalisation du complexe, d'autres travaux (terminés en 2005) ont intéressé le site adjacent, ce qui a permis d'agrandir la surface du CNR (Figure 5-13).

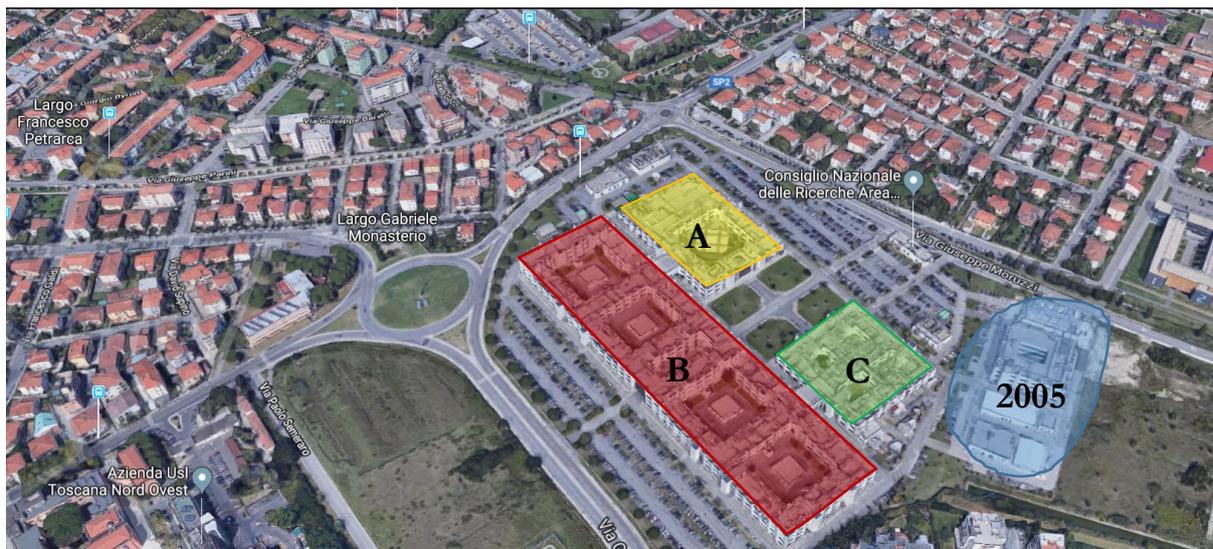


Figure 5-13 – Localisation des trois corps dans le site du CNR de Pise

L'objet de l'opération immobilière actuelle est la surélévation d'une portion du bâtiment « B » (en rouge dans la Figure 5-14).

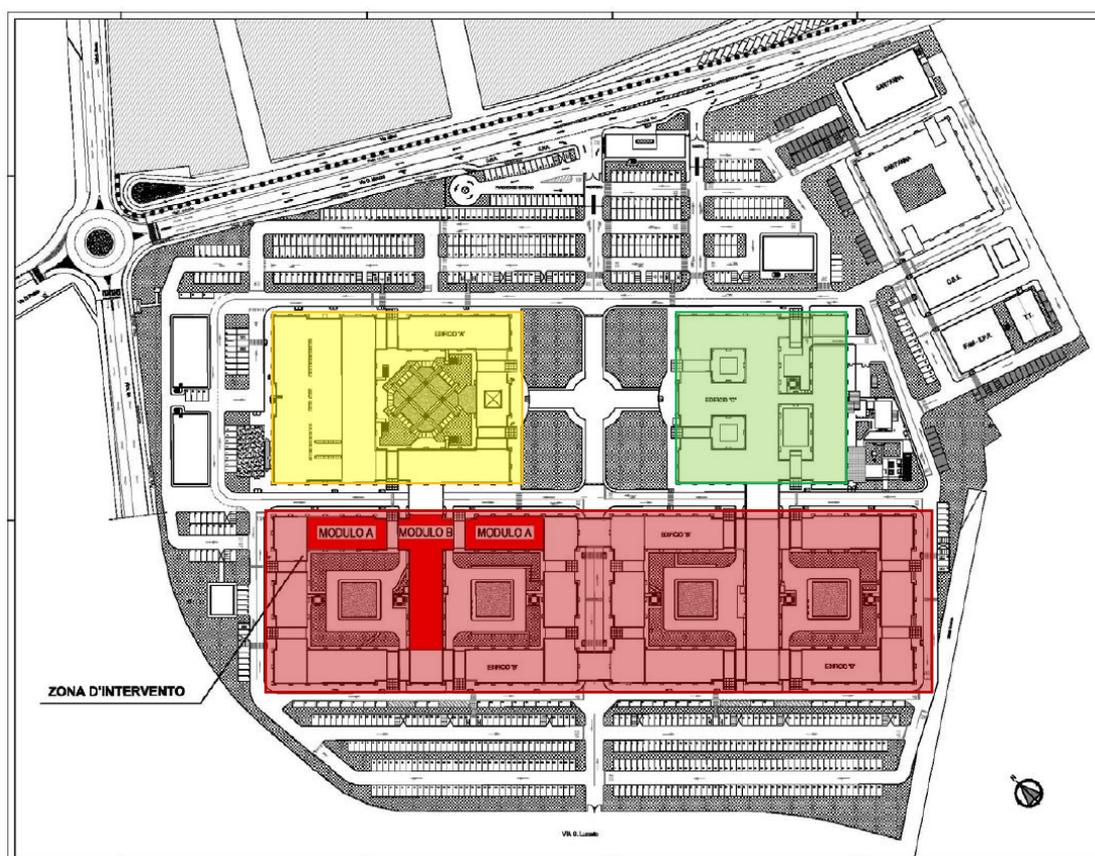


Figure 5-14 – Détermination de la zone d'intervention pour le « bâtiment B » (en rouge).

La surélévation partielle du bâtiment « B » naît de l'exigence de réaliser des espaces adéquats aux activités, toujours plus développées, d'un des instituts de recherche (« *l'Istituto di Informatica e Telematica* »), actuellement situé dans le même bâtiment. La possibilité de réaliser une surélévation avait déjà été prévue lors de la conception du complexe, en 1990. Cette opération constitue, donc, un achèvement du projet initial.

La nouvelle surface se développe sous-forme d'un T pour un total de 1300 m<sup>2</sup>, repartis sur un module central et deux latéraux. Les espaces sont organisés en trois sections dédiées à :

- des bureaux, de typologies diverses (bureaux fermés, ou *open-space*) ;
- des locaux réservés à l'administration et à une salle réunion ;
- des zones opératives et salle machine.

La conception du nouveau volume s'est basée sur la modularité de la structure du bâtiment existent.

Dans la solution proposée, la surélévation est réalisée à travers une structure portante en bois qui repose sur l'existante dalle alvéolée en béton précontraint. La nouvelle structure, se réalisera sur la toiture du bâtiment existent, ce qui implique une requalification de l'ensemble des équipements techniques, situés en toiture avant et pendant la phase d'appel d'offre.

La connexion entre ces deux éléments (dalle existante et nouvelle structure) se fait à travers un soubassement en béton coulé en place. Toute la structure est réalisée par emboîtement des éléments suivant l'ordre « soubassement – parois – poutres et dalle de toiture » (Figure 5-15).

Les produits choisis par l'équipe de conception sont préfabriqués en usine, et la mise en œuvre se fait, pour la plupart, à travers des connexions mécaniques.

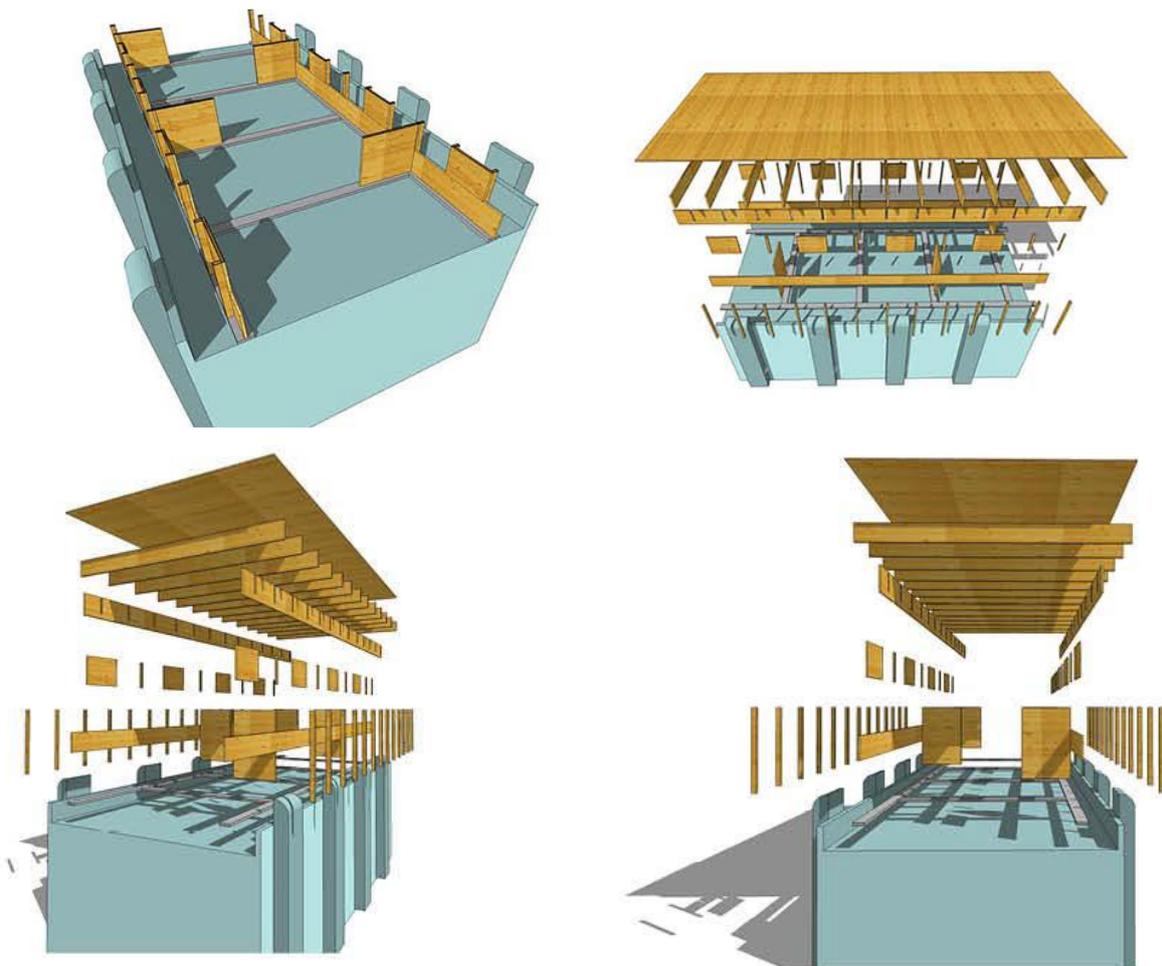


Figure 5-15 - Vues en éclaté des structures pour la surélévation du CNR de Pise

L'enveloppe (qui constitue aussi la structure verticale) est réalisée à travers des panneaux en bois lamellé croisé (connu comme CLT ou X-Lam) de l'épaisseur de 100 mm, dans lesquels sont

intégrées des fenêtres en bandeau et sur lesquels est rapporté un système de façade ventilée avec un bardage en grès.

Le système constructif des parois verticales opaques prévoit l'assemblage de trois composants principaux :

- Composant de base pour la paroi : panneau de CLT posé en continu sur toute la longueur de la paroi entre le soubassement et la fenêtre ;
- Composant de paroi entre les fenêtres : panneau de CLT posé entre les composants vitrés et fonctionnant comme un piédroit pour l'architrave au-dessus ;
- Composant d'architrave pour la paroi : comme pour le composant de base, il s'agit de panneaux en CLT arrivant jusqu'aux fenêtres et déjà préparés pour accueillir les éléments constituant la structure de la toiture.

La structure de toiture est réalisée par deux composants principaux :

- Les poutres en CLT de section 120x1000mm ;
- Panneaux en CLT de 80mm.

Ces derniers sont connectés à la partie supérieure des poutres, afin de constituer un système structurel rigide capable de couvrir des grandes portées (supérieures à 10 m) (par exemple pour les bureaux type *open-space*). La surface extérieure de la toiture est complétée par une solution imperméable et ventilée sur laquelle sont posés les panneaux photovoltaïques et des systèmes de solaire thermique.

L'ensemble de la structure est enfin complété par deux éléments ayant la fonction de contreventement : des voiles rigides en CLT, de l'épaisseur de 100 mm, posés à l'intérieur et orthogonales aux parois ; et par un système de lésènes<sup>34</sup> (posées à toute hauteur sur la paroi extérieure en correspondance des points de connexion entre les poutres et les composants d'architrave).

Plus précisément, l'enveloppe verticale, d'épaisseur globale 44 cm, est caractérisée par un important niveau d'isolation thermique afin d'assurer des bonnes conditions internes. La façade est rapportée à la structure et prévoit une isolation par l'extérieur et une structure secondaire permettant de réaliser une couche de ventilation naturelle entre la couche d'isolation et le revêtement en grès (Figure 5-16).

La conception de la toiture prévoit deux couches d'isolation thermique en fibre de bois, protégés par un pare vapeur, ainsi qu'une structure secondaire permettant de réaliser un système de toiture ventilée. La finition de la toiture plane est réalisée en tôle métallique.

---

<sup>34</sup> Ressaut vertical de faible saillie, plaqué sur les murs extérieurs d'un édifice



- Electriques : courant fort et faible, éclairage, liaison équipotentielle, paratonnerre et parafoudre, etc.
- Spéciaux : diffusion sonore, télécommunications, supervision et régulation, systèmes domotiques, détection incendie, etc.

Dans la zone des bureaux les équipements sont organisés de façon à avoir une distribution centrale dans les couloirs se déployant, ensuite, dans chaque pièce. La climatisation se fait au niveau des faux plafonds à travers un plenum dans lequel l'air, provenant de la CTA, est envoyé. L'introduction de l'air dans la pièce se fait, donc, à travers les éléments perforés du faux plafond (Figure 5-18) de façon à éviter un jet direct d'air et avoir un effet rayonnant des panneaux. Chaque pièce est dotée d'un système de réglage pour la gestion de la domotique de l'équipement relatif (protections solaires, éclairage, climatisation etc.).



Figure 5-18 – Détail de la typologie de faux plafonds prévus.

#### ▪ *Les hypothèses pour l'évaluation des indicateurs de performance*

Pour l'évaluation des indicateurs de performance permettant l'analyse des critères CC5, CC6 et CC7, nous nous sommes basés sur la documentation à disposition afin de pouvoir réaliser un modèle numérique. Les données à disposition concernaient les besoins énergétiques et l'ensemble des composants techniques, par contre, nous n'avons pas à disposition une évaluation du niveau de confort thermique et visuel. Le modèle pour la simulation thermique dynamique a été réalisé à l'aide du logiciel de simulation EnergyPlus v8.9.

Dans ce cadre, il est nécessaire de souligner que le but est de démontrer l'applicabilité de la méthode proposée et non d'évaluer l'efficacité énergétique et les conditions de confort de la solution proposée. Les résultats venant des simulations ne sont, donc, pas forcément correspondantes à la réalité, mais ils représentent des valeurs sur lesquelles baser notre évaluation globale. C'est pourquoi nous nous sommes concentrés uniquement sur l'analyse de la portion du module central dédié aux bureaux (Figure 5-19).

Nous avons décidé d'exclure du modèle les zones latérales pour plusieurs raisons :

- leur usage est destiné à plusieurs types de fonctions : bureaux, laboratoires ou à des locaux d'administration ;
- nous sommes intéressés plutôt à l'analyse des zones Sud et Nord car elles peuvent présenter des problèmes en termes de confort thermique et visuel (nous faisons l'hypothèse que si le

respect des conditions de confort pour les zones à orientation Sud et Nord est vérifié, alors il sera aussi vérifié pour les autres zones);

- la modélisation, dans notre cas, représente un prétexte pour obtenir des données permettant l'application de la méthode proposée.

Le zonage thermique a donc été réalisé sur le volume du module central en considérant une division des zones thermiques du type *core-perimeter*. Ce type de zonage suit les indications de l'Annex G de l'ASHRAE 90.1 (ASHRAE, 2013b) et il est utilisable dans le cadre d'un processus de certification LEED qui en reconnaît la validité. Il permet d'avoir une zone thermique pour chaque orientation et une zone thermique centrale. Dans une étape de conception préliminaire, un zonage de ce type permet de comprendre le potentiel et les limites de chaque orientation (Smith, 2012). La géométrie du modèle prévoit aussi un plenum représentant le volume d'air compris entre la toiture et les faux plafonds et à travers lequel le système permet l'injection et l'extraction de l'air. L'équipement de CVC a été modélisé à travers un système idéal de puissance illimitée.

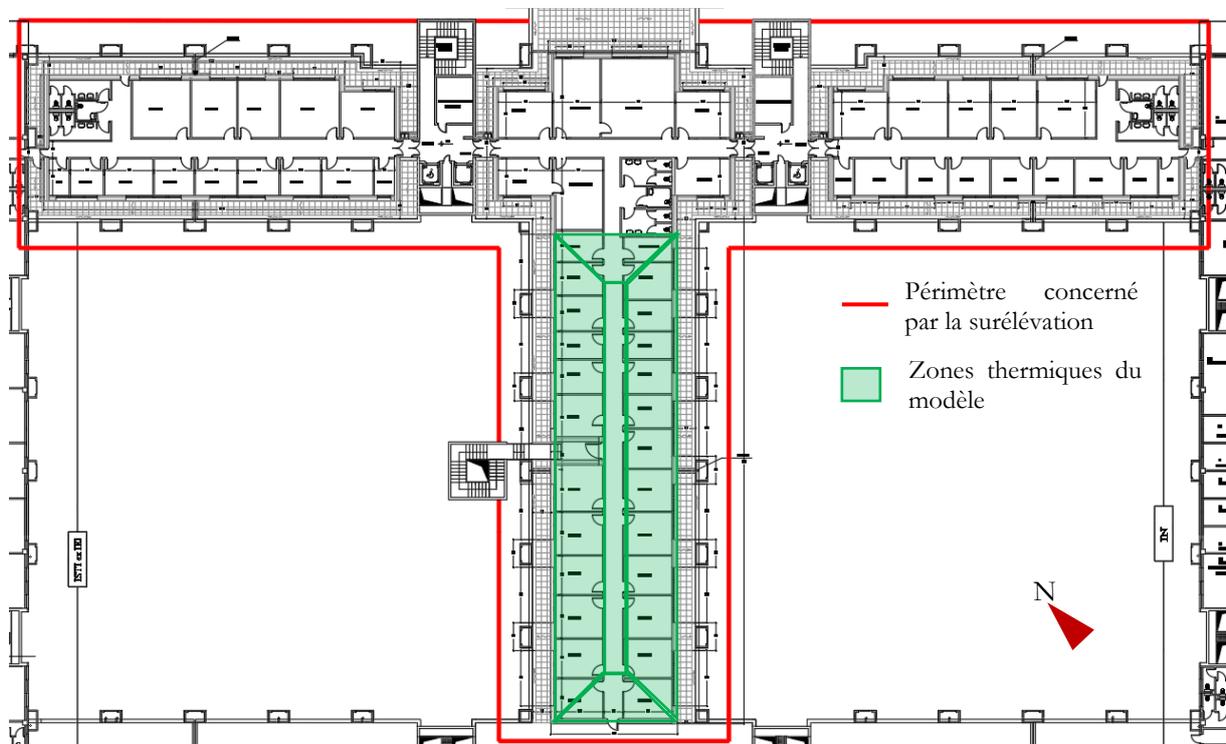


Figure 5-19 – Périmètre d'étude (en vert) pour l'évaluation des performances déterminé sur le plan su pré-design

La portion analysée concerne une surface de plancher de 450m<sup>2</sup> (soit 10x45m). Les bureaux sont distribués sur les côtés longs (au Sud et au Nord) pour une épaisseur de 4m respectivement et séparés par un couloir centrale d'épaisseur 2m. Le bâtiment est tourné de 45° par rapport au Nord.

Les conditions climatiques ont été considérées à travers le fichier météorologique de l'année de référence pour la ville de Pise. L'occupation est prévue pour une plage horaire de 8h à 18h avec un taux d'occupation plus ou moins variable.

Les consignes pour la température de l'air sont fixées en suivant la documentation relative au pré-design et sont insérées dans un thermostat prévoyant un point de consigne double :

- pour le chauffage à 20°C pendant la journée et 16,5°C dans la nuit ;
- pour le rafraîchissement à 26°C dans la journée et 29,5°C dans la nuit.

Le débit d'air considéré pour la ventilation est de 0,2 vol/h, comme établi dans la documentation relative au pré-design. Les équipements électriques sont estimés, pour les zones du périmètre, avec une puissance de 16W/m<sup>2</sup> et, dans la zone centrale (de circulation), avec une puissance de 4W/m<sup>2</sup>. Les équipements d'éclairage sont considérés ayant une puissance de 5W/m<sup>2</sup> couplés à un scénario d'usage typique d'un bureau.

Les composants d'enveloppe ont été modélisés à travers les valeurs de résistance thermique fournie dans la documentation à disposition. Pour les parois opaques  $R_p = 7,63 \text{ (m}^2\cdot\text{K)/W}$ , pour la toiture  $R_t = 6,14 \text{ (m}^2\cdot\text{K)/W}$  sans prendre en compte leurs contribution en termes d'inertie thermique. Les partitions internes verticales et horizontales ont été considérées également sans masse thermique et avec une faible résistance thermique. Le plancher bas et la paroi Est sont considérés adiabatiques, car adjacentes à d'autres parties du bâtiment. Les éléments vitrés, de dimensions 4,8x1,8m, sont distribués uniformément sur les parois Nord et Sud (Figure 5-20). Ils ont été considérés avec une modélisation basée sur les seuls paramètres thermo optiques ( $U_w = 1,8 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$  ;  $g = 0,5$  et  $TL = 0,7$ ). Les systèmes de protections solaires sont constitués par un débord du toit de 1,3m et par un système de stores internes à contrôle solaire. Les stores s'activent quand l'irradiance<sup>35</sup> solaire sur le composant vitrée atteint la valeur de 189W/m<sup>2</sup>. Cette hypothèse a été prise en compte en accord avec l'étude de Wankanapon et Mistrick (Wankanapon & Mistrick, 2011).

Pour l'évaluation des indicateurs relatifs à la lumière naturelle, nous avons établi un point de référence au centre de la zone Nord et un autre point dans la zone Sud avec une hauteur de 0,8m (hauteur d'un plan de travail). Pour les deux points il est donc possible de contrôler les valeurs de l'éclairage et de l'indice d'éblouissement sur l'année. La valeur limite des deux grandeurs est établie respectivement à 300lx (limite inférieure) et de 22 (limite supérieure). Pour l'évaluation de l'autonomie spatiale lumineuse en lumière naturelle (sDA%) nous avons établi une grille de 50 points à la hauteur du plan de travail (0,8 m) distribués sur la zone Nord et sur la zone Sud (Figure 5-20) .

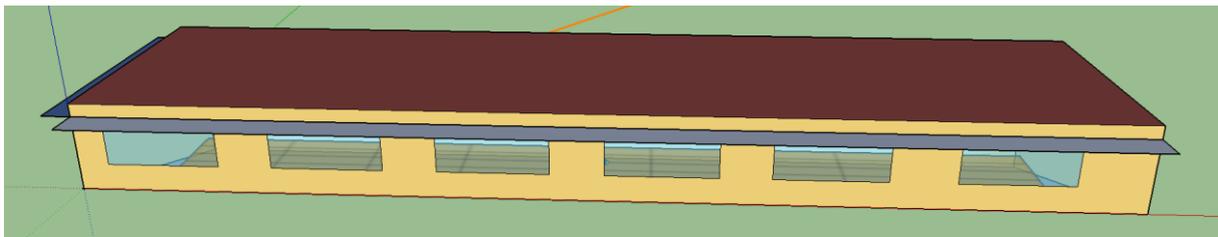


Figure 5-20 – Représentation de la géométrie du modèle réalisé. Détail de la zone Sud dans laquelle est représentée la grille de points pour l'évaluation du sDA%

La simulation a été réalisée sur toute l'année avec un pas de temps de 15min en utilisant les données météorologiques de l'année de référence du site. Les résultats analysés sont sur base horaire.

#### ▪ *Quantification des critères et évaluation du pré-design*

En suivant le système de notation, le pré-design est noté comme représenté dans le Tableau 5-12. Comme pour le cas d'étude précédent, dans le tableau nous indiquons la note obtenue pour chaque sous-critère, accompagnée par la valeur globale déterminée à travers la méthode d'agrégation et les

---

<sup>35</sup> Flux radiatif surfacique reçu par une surface (W/m<sup>2</sup>)

matrices d'intensités établies dans le §4.5. Les mêmes résultats sont ainsi représentés dans la Figure 5-21 et, plus tard, dans l'évaluation globale (Figure 5-23).

Sur le plan de la constructibilité technique, le pré-design répond bien aux principes de simplicité. Les sous-systèmes de structure et d'enveloppe, comme nous l'avons vu dans la présentation du cas d'étude, sont réalisés à travers des composants standards produits en usine et assemblés à sec pendant le chantier. Cependant, les leviers pour l'amélioration du critère CC1 demeurent principalement dans la standardisation des sous-systèmes de façades (pour lesquels nous avons un  $c_i = 0,9$  car la typologie de façade est rapportée) et dans l'organisation des équipements. En effet, la conception n'est pas optimisée à travers le recours à des solutions d'enveloppe innovantes permettant de minimiser les équipements techniques.

Tableau 5-12 – Valeurs des critères acquises à travers le système de notation et l'agrégation pour la surélévation partielle du bâtiment « B » du CNR de Pise

Critères	Sous-critères	Valeur acquise	Valeur globale
<b>CC1 - Simplicité de la solution</b>	CC1.1 Niveau de standardisation de la structure verticale (Str_V)	6/6	0,90
	CC1.2 Niveau de standardisation de la structure horizontale (Str_H)	5/6	
	CC1.3 Niveau de standardisation des façades (Env_V)	5/6	
	CC1.4 Niveau de standardisation des ouvertures (Env_Ouv)	6/6	
	CC1.5 Organisation des équipements techniques (Equ)	4/6	
	CC1.6 Type de production des technologies	5/6	
	CC1.7 Modes constructifs	6/6	
	CC1.8 Types d'interfaces techniques	6/6	
<b>CC2 - Possibilité de vérification</b>	CC2.1 Outils et mesures à support de la conception	5/6	0,78
	CC2.2 Prise en compte des risques et mise en place d'un registre des problèmes	3/6	
	CC2.3 Nécessité d'essais	4/6	
	CC2.4 Facilité d'accès à la vérification (en phase d'exploitation).	6/6	
<b>CC3 - Disponibilité des compétences</b>	CC3.1 Développement des détails techniques	2/6	0,53
	CC3.2 Modélisation des éléments	6/6	
	CC3.3 Recours à une main d'oeuvre spécialisée et équipement spéciaux (chantier)	6/6	
	CC3.4 Formations prévues pour les usagers	2/6	
<b>CC4 - Simplicité de gestion</b>	CC4.1 Durabilité des systèmes	5/6	0,95
	CC4.2 Transport	6/6	
	CC4.3 Séquence de montage	6/6	
	CC4.4 Régulation et gestion technique	6/6	
	CC4.5 Interaction avec l'utilisateur	5/6	
	CC4.6 Maintenance	6/6	
	CC4.7 Fin de vie	6/6	

Concernant le critère relatif à la possibilité de vérification CC2, le pré-design gagne une note de 5/6 pour le sous-critère CC2.1, grâce à l'utilisation de procédés BIM en conception et pour l'utilisation du planning 4D (réalisé en collaboration avec l'Université de Florence) pour la réalisation du chantier. Dans la documentation fournie il manque, par contre, toute indication concernant une démonstration de la mise en place d'une approche de conception intégrée ou d'une révision par un tiers. La prise en compte des risques concernant certains des composants (par exemple l'utilisation d'un type d'isolant différent pour les parties inférieures de la façade) fait gagner une note de 3/6 au pré-design qui ne démontre pas une mise en place d'un planning de commissionnement ou d'un registre de problèmes. Les indications sur les vérifications en

laboratoire, de perméabilité à l'air in situ et sur la production des éléments et sur le montage, font gagner une note de 4/6 au pré-design. Une note plus élevée ne peut pas être obtenue car la documentation relative au pré-design ne reporte aucune indication quant à la réalisation de maquettes à l'échelle réelle permettant de conforter la mise en œuvre et le résultat esthétique de la solution de façade. La mise en place de composants techniques permettant une vérification aisée en phase d'exploitation (comme par exemple les éléments des faux plafonds) permet d'obtenir une note de 6/6 pour le sous-critère CC2.4. Finalement, la valeur globale pour le critère CC2 est de 0,78, améliorable en agissant sur les aspects manquants que nous venons de souligner.

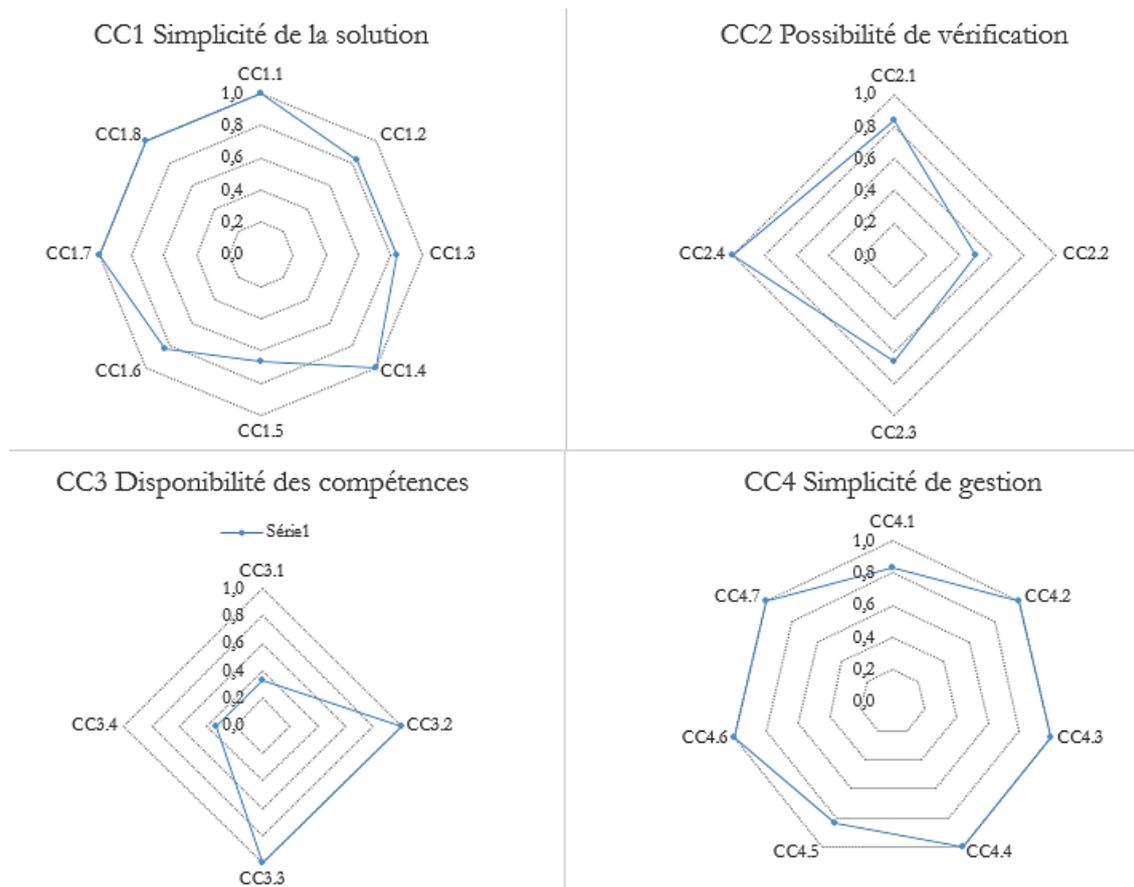


Figure 5-21 – Evaluation critère par critère (CC1, CC2, CC3 et CC4) pour la surélévation de la portion du bâtiment « B » du CNR de Pise, sur la base du système de notation

Dans les documents que nous avons à disposition il n'y a presque aucune indication concernant les détails techniques (CC3.1). Par contre, les sous-systèmes sont connus, car il s'agit de composants déjà très utilisés dans les constructions, et leur mise en œuvre ne demande pas l'intervention d'une équipe spécialisée ou de machines complexes, ce qui fait gagner une note de 6/6 aux sous-critères CC3.2 et CC3.3. La formation des usagers est mise en place à travers des spécifications relatives à l'usage des systèmes de régulation dans chaque pièce. Dans une démarche visant à optimiser la performance énergétique des bâtiments, la mise en place de formations ou de dispositifs permettant à l'occupant de se responsabiliser vis-à-vis des enjeux énergétiques, représentent un aspect qui demeure non négligeable. C'est pourquoi la note attribuée au CC3.4 est de 2/6. La valeur du CC3 de 0,53 peut, donc, être améliorée à travers le développement des détails techniques et la prise en compte de dispositifs de formations pour les usagers.

La simplicité de gestion tout au long du cycle de vie (CC4) est globalement très élevée (0,95). Cela est principalement dû : à la maîtrise du transport des éléments (CC4.2) ; à la prise en compte de la séquence des opérations de mise en œuvre (CC4.3) ; à la mise en place de dispositifs permettant à l'occupant de contourner les automatismes (CC4.5) ; à la mise en place de solutions qui demandent une maintenance légère (CC4.6) et ; par la mise en place d'un système de gestion et de suivi technique des équipements (CC4.4). Ce dernier représente un des points forts du projet, car le réglage des équipements peut se réaliser localement, en fonction des paramètres mesurés à l'aide de capteurs prévus dans chaque pièce.

Concernant l'évaluation des trois derniers critères CC5, CC6, CC7, représentant respectivement la pertinence vis-à-vis des performances d'usage, l'impact environnemental et l'économie du projet en pré-design, le manque de données relatives aux limites programmatiques, nous a conduit à établir des valeurs limites de référence. Les valeurs ont été établies en fonction des références normatives, l'ensemble des valeurs est reporté dans le Tableau 5-13.

Tableau 5-13 – Valeurs de référence considérées pour le calcul des indicateurs de performance

Sous-critère	Indicateur	Valeur de référence	Notes
CC5.1	$\sum S_{prog}$	450 m <sup>2</sup>	Evaluation faite sur la surface totale de l'intervention
CC5.2	sDA	≥ 50%	Analysé en considérant une activation des protections solaires quand la radiation solaire sur la fenêtre a une valeur de 189 W/m <sup>2</sup> . Grille de 50 points distribués sur la zone Nord et la zone Sud à une hauteur de plan de travail (0,8 m).
CC5.3	n <sup>o</sup> h <sub>occ</sub>	T <sub>op</sub> ≤ 28°C	L'indicateur a été évalué pour la zone Sud (CEN, 2007)
CC5.4	n <sup>o</sup> h <sub>occ</sub>	T <sub>op</sub> ≥ 19°C	L'indicateur a été évalué pour la zone Nord (CEN, 2007)
CC6.1	C <sub>eau,lim</sub>	171,864 m <sup>3</sup> /occ. an	Calcul de référence en ANNEXE par rapport à la méthode proposée par la démarche HQE (Certivea, 2015)
CC6.2	S <sub>sisponible</sub>	-	En s'agissant d'une surélévation il n'y a aucune utilisation de ressource en sol
CC6.3	CEP <sub>lim</sub>	≤ 90 kWh <sub>EP</sub> /m <sup>2</sup>	Nous avons imaginé d'atteindre le niveau d'un bâtiment de classe B dans le cadre d'un diagnostic de performance énergétique (Directive 2010/31/EU).
CC6.4	EGES <sub>CE,lim</sub>	≤ 20 kg <sub>eq,CO2</sub> /m <sup>2</sup>	Dans cette évaluation nous avons considéré la seule contribution due à la consommation énergétique, la limite est établie sur la base des classes environnementales d'un diagnostic de performance énergétique (Directive 2010/31/EU)
CC7	CG	1651000 €	Calculé sur 30 ans et avec un coût d'investissement de 15922307 € pour la seule portion de 450m <sup>2</sup> , et pour la seule consommation énergétique un Taux d'actualisation de 4% et un taux d'inflation général de 2% ; 0,105€ considéré comme le prix du kWh selon les données statistiques italiennes

Une fois les valeurs de référence déterminés, il s'agit de confronter les valeurs de projet aux limites, comme exposé au paragraphe §4.3. Nous rappelons que, dans ce cas, il s'agit de critères normalisés, donc ce que nous calculons sont des pourcentage d'efficacité par rapport à l'obtention du critère, sans passer par le système de notation. Les résultats de l'évaluation sont reportés dans le Tableau 5-14, ainsi que graphiquement dans la Figure 5-22.

Pour le sous-critère CC5.1 le respect des surfaces est complètement vérifié, donc la valeur acquise est de 1. Concernant le sous-critère CC5.2 relatif à l'ambiance lumineuse, d'après le calcul sur la grille de 50 points, le sDA sur l'année pour la zone au Sud demeure de 65%, par rapport aux valeurs de référence, on obtient une valeur de 0,77 de pertinence. Concernant le niveau de confort en été

et en hiver on obtient que la totalité des valeurs de température opérative, pendant les heures d'occupation demeurent dans les limites correspondantes. Globalement le critère CC5, obtient la valeur 0,96 à travers l'agrégation des divers sous-critères.

Concernant la soutenabilité CC6, le calcul effectué pour les économies en eau (CC6.1) a été effectué en considérant que seul 10% de la toiture puisse récupérer une partie des eaux de pluie, à cause de la présence des panneaux photovoltaïques en toiture. Nous avons ainsi imaginé la mise en place d'équipements sanitaires plus performants que ceux de référence. Avec ces hypothèses, la consommation en eau, compte tenu de la surface de récupération est de 77,41m<sup>3</sup>/occ.an, ce qui, par rapport à la valeur de référence, permet une économie de 55%. L'économie en sol est respectée à 100% car il s'agit d'une surélévation. Suite aux calculs effectués en considérant un COP de la pompe à chaleur de 3,5 et un coefficient de conversion en énergie primaire de 3,167, la consommation en énergie primaire est de 73,7kWh/m<sup>2</sup>.an. La valeur de référence a donc été fixée à 90kWh/m<sup>2</sup>, ce qui correspond à un bâtiment de classe B. Le pré-design, avec les hypothèses que nous avons faites pendant la modélisation, ne respecte pas les limites d'un bâtiment basse consommation (CEP<50kWh/m<sup>2</sup>) et il est donc nécessaire d'intervenir sur la conception pour ne pas dégrader la performance et prendre en compte l'hypothèse d'une consommation plus élevée. La même condition se vérifie avec le sous-critère CC6.4 car l'émission de CO<sub>2</sub> calculée est de 18,31 kg<sub>eq</sub>CO<sub>2</sub>. La limite choisie est de 80 kg<sub>eq</sub>CO<sub>2</sub>, ce qui correspond à un bâtiment de classe F. Par rapport à cette limite, la solution se montre très efficace. Une limite plus contraignante, représentant un bâtiment plus soutenable, comporterait une réduction de cette efficacité.

Tableau 5-14 – Valeurs des critères acquises à travers l'évaluation des indicateurs et leur agrégation pour la surélévation partielle du bâtiment « B » du CNR de Pise

Critères	Sous-critères	Valeur acquise	Valeur globale
<b>CC5 - Exigences d'ambiance</b>	CC5.1 Réponse aux exigences d'espaces	1	0,96
	CC5.2 Ambiance visuelle	0,77	
	CC5.3 Ambiance thermique en été	1	
	CC5.4 Ambiance thermique en hiver	0,99	
<b>CC6 - Soutenabilité</b>	CC6.1 Economie des ressources en eau	0,55	0,57
	CC6.2 Economie des ressources en sol	1	
	CC6.3 Economie des ressources énergétiques	0,18	
	CC6.4 Réduction des émissions de CO <sub>2</sub>	0,77	
<b>CC7 - Economie en exploitation</b>			0,96

Les bénéfices venant de la production d'énergie n'ont pas pu être pris en compte à cause de l'impact que la production des éléments photovoltaïques (I<sub>p</sub>) a sur le calcul des bénéfices mêmes. Au niveau économique, la performance de coût atteint la valeur de 0,96.

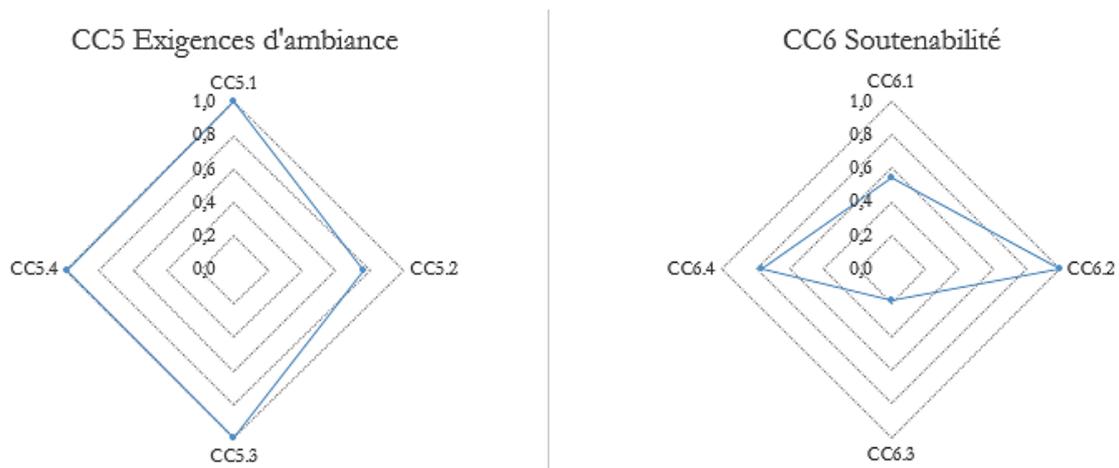


Figure 5-22 – Evaluation globale critère par critère (CC5 et CC6) pour la surélévation de la portion du bâtiment « B » du CNR de Pise

De manière générale la solution proposée dans le pré-design, demeure bien structurée par rapport aux critères de constructibilité technique, de gestion et de confort. Sur la base des hypothèses prises en compte, l'amélioration du pré-design pourrait résoudre certains des problèmes et, peut-être optimiser la conception du point de vue de la performance énergétique et des émissions de CO<sub>2</sub>.

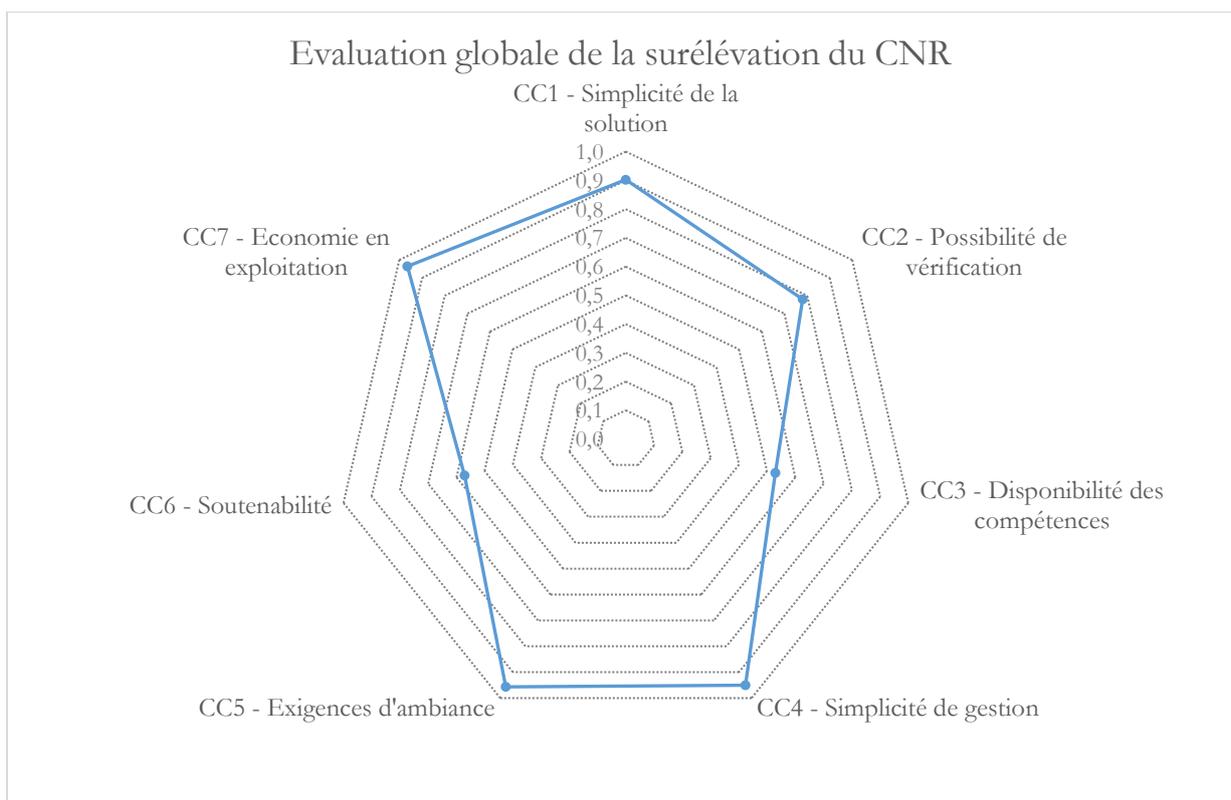


Figure 5-23 – Evaluation globale pour la surélévation de la portion du bâtiment « B » du CNR de Pise

Nous tenons encore une fois à souligner que l'analyse de ce cas d'étude demeure un prétexte pour la démonstration de l'applicabilité de la méthode. Les résultats sont basés sur les hypothèses que nous avons fait lors du calcul (qui peuvent ne pas correspondre au cas réel) et, surtout, sur les valeurs limites considérées.

## 5.2. Application de la méthode pour le choix entre une façade adaptative et une façade intégrant des protections solaires (aide au choix)

### 5.2.1. Préambule : l'innovation technologique et les obstacles à l'intégration

Dans les dernières décennies les nouveaux bâtiments réalisés ont sensiblement évolué face à l'exigence de réduire la demande énergétique. Sous l'impulsion des standards et des labels, de plus en plus ambitieux, on est rapidement passé du bâtiment économe en énergie, à la maison passive, jusqu'à l'intégration de systèmes de production d'énergie de source renouvelable. Ce paragraphe ne prétend pas faire l'état de l'art de l'histoire des innovations technologiques des bâtiments, mais de mettre en évidence, leur rôle dans l'évolution des performances, et les obstacles à leur intégration malgré leurs apports technologiques indéniables. Pour illustrer cette analyse, nous allons focaliser le discours sur l'enveloppe du bâtiment, car parmi les composants du bâtiment, l'enveloppe a représenté et représente toujours plus un levier d'action et d'innovation pour la construction. Elle peut être une interface, une zone de liaison, un espace de transition entre différents milieux. Elle peut être considérée de façon diverse par rapport aux fonctions et à l'intervenant dans le processus de construction.

*« L'enveloppe du bâtiment est un lieu de jonction entre des facteurs multiples, concernant de nombreux intervenants à l'acte de construire. Leur objectif commun est de parvenir à optimiser l'ensemble des fonctions qu'elle a à assurer<sup>36</sup> »*

Le bâtiment, a évolué au fur et à mesure, devant faire face à exigences et enjeux différents (ADEME, 2010). Les innovations sont passées surtout par les technologies d'enveloppe. Dans ce chapitre les évolutions principales des solutions d'enveloppe sont explicitées. Des solutions passives aux façades adaptatives, l'enveloppe se charge toujours plus d'importance et cela doit être pris en compte au début de la conception. Suite à une analyse temporelle des solutions d'enveloppe, les obstacles liés à la prise en compte de l'innovation dans la conception sont soulignés.

#### ▪ *L'évolution du bâtiment à travers l'innovation de l'enveloppe*

Dans les années '60 il n'existe pas vraiment un souci d'économie d'énergie et les études sur les technologies d'enveloppe visent à : 1) réduire le besoin thermique, à travers une conception raisonnée et basée sur l'occupant, par exemple en étudiant l'orientation des espaces en fonction de l'usage ; 2) augmenter les apports solaires nets, notamment au moyen des vitrages et 3) implanter des systèmes de récupération de chaleur « passifs ». Le terme passif, dans ce cas se réfère aux systèmes qui reposent sur l'utilisation optimale des éléments de l'architecture comme les géométries ou les éléments d'enveloppe, la structure ou les matériaux. Les systèmes passifs doivent pouvoir absorber le rayonnement solaire, stocker la chaleur et le restituer selon besoin. En France, les principes de la climatisation naturelle sont analysés par le chercheur français Félix Trombe qui expérimente des techniques d'accumulation de la chaleur dans le mur du bâtiment. C'est la

---

<sup>36</sup> Pierre HERANT, Chef du Département Bâtiment et Urbanisme, Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie, Conclusions de la journée thématique « Bâtiment 2010 » consacrée à l'enveloppe du bâtiment, 04/03/2004 (ADEME, 2010)

technologie du Mur Trombe (Figure 5-24), qui consiste à créer un espace entre un vitrage et un mur massif placé plus à l'intérieur. Cet espace se comporte comme une serre, alors que le mur va accumuler les apports solaires traversant le vitrage. Des ouvrants placés dans le mur permettent la circulation de l'air à l'intérieur (capteur à air).

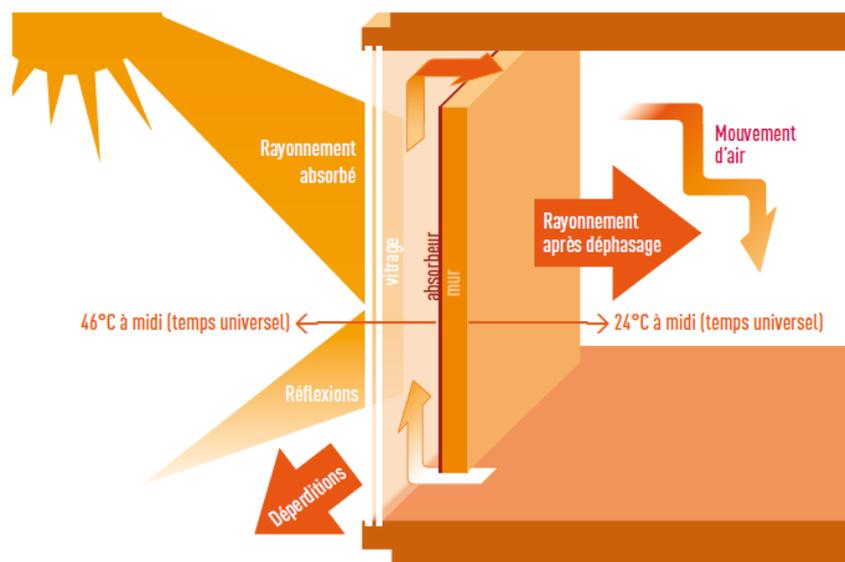


Figure 5-24 – Fonctionnement du Mur Trombe (Liébard & De Herde, 2005)

Le principe de l'accumulateur à air débouche ensuite sur les technologies d'accumulation à eau (Figure 5-25). Elles règlent les gains solaires directs à travers la mise en place d'isolants mobiles ou de murs d'eau : une surface vitrée permet de réchauffer un mur en béton constituant un réservoir d'eau opaque. De l'élément verticale l'attention se dirige ensuite sur les systèmes à masse d'eau horizontaux.

L'innovation technologique avance aussi sur la réalisation de panneaux isolants coulissants permettent d'adapter la configuration de l'isolation en fonction des besoins de chauffage ou de refroidissement de façon manuelle. L'idée de créer un espace tampon pour le captage du rayonnement solaire (tel que le Mur Trombe) porte dans les années suivantes à la conception des façades double peau. Ces façades présentent une paroi extérieure vitrée et une paroi intérieure plus massive (opaque ou transparente).

Au début des années 70, le choc pétrolier apporte un changement de tendance. La France met en place un programme de réduction de la consommation énergétique et la nécessité de mieux isoler les bâtiments s'impose. L'isolation thermique des parois externes se propage et l'innovation se développe autour des matériaux d'isolation. Les recherches de ces années concernent des problématiques plutôt liées à la durabilité des matériaux, à la mise en œuvre et aux systèmes de finitions extérieures et de protection des éléments d'isolation. Les premiers retours d'expérience démontrent que cette nouvelle technologie demeure, par contre, indissociable du chauffage et de la ventilation. On voit apparaître les problématiques liées aux ponts thermiques au niveau des jonctions avec les structures, qui procurent des condensations et de l'humidité dans les bâtiments. Autres techniques d'isolation thermique se développent comme l'isolation par l'intérieur. La maîtrise des déperditions devient un sujet central et en 1974 la réglementation thermique, pour la première fois, établit des normes d'isolation pour les nouveaux bâtiments.

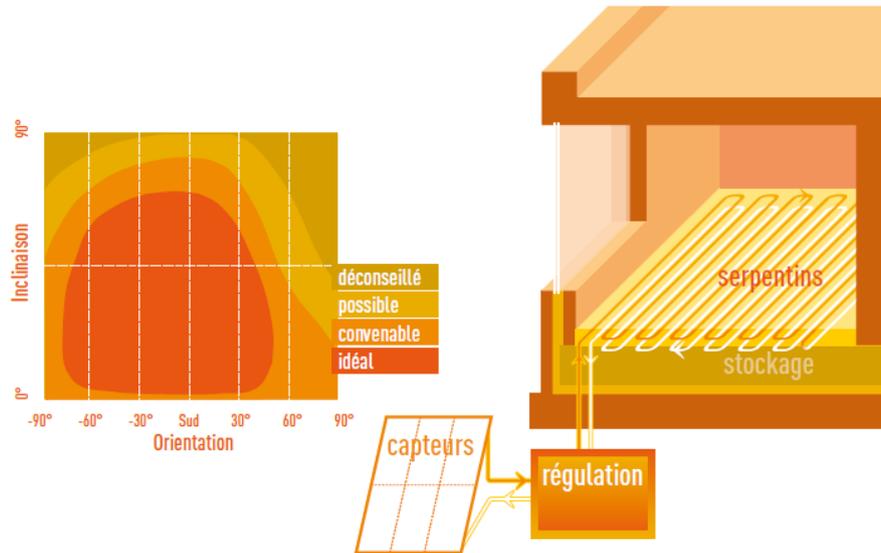


Figure 5-25– Fonctionnement des capteurs à eau (Liébard & De Herde, 2005)

A partir des années 80, plusieurs programmes de recherche sont lancés et l'innovation du bâtiment se développe, pour les parois opaques, vers les éléments coffrant isolants et l'isolation dynamique (on parle aussi de *breathing walls*) et, pour les parois vitrées, vers les vitrages à faible émission et le composant-fenêtre.

L'isolation dynamique (Favoino, et al., 2017b) est une évolution du Mur Trombe et consiste à transformer une paroi en échangeur à travers une circulation d'air (qui a la possibilité d'être préchauffé) à l'intérieur de l'élément même (Figure 5-26 et Figure 5-27).

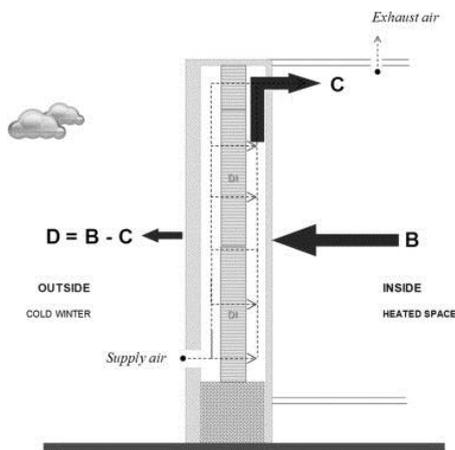


Figure 5-26 – Fonctionnement de l'isolation dynamique (B = déperditions thermiques, C = chaleur récupérée, D = déperditions nettes) (Imbabi M. S.-E., 2012)

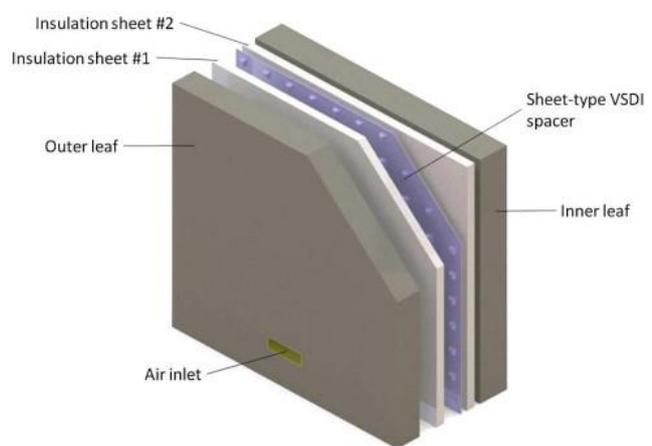


Figure 5-27 – Exemple de composition d'une paroi intégrant un système d'isolation dynamique (Imbabi M. S.-E., 2012)

D'autre part, les recherches concernant à faciliter la faisabilité technique et la mise en œuvre conduisent à la conception des systèmes comme les « blocs coffrages » qui permettent de réaliser l'isolation des parois par empilement (Figure 5-28).



Figure 5-28 – Représentation de l'utilisation des systèmes bloc-coffrage (source : [www.batiproduits.com](http://www.batiproduits.com))

Pour les parois vitrées, l'innovation s'est plutôt basée sur la réduction de l'émissivité des vitrages. L'émissivité caractérise les échanges par rayonnement, le principe consiste à déposer sur le verre une mince couche métallique invisible, qui permet le passage des rayons solaires de courtes longueurs d'ondes (comme pour la lumière), mais devient opaque aux rayons solaires de grandes longueurs d'ondes (Figure 5-29). Les composants-fenêtres<sup>37</sup> parieto-dynamique (Figure 5-30) ajoutent à la fonction habituelle d'une paroi vitrée la fonction supplémentaire de préchauffage de l'air neuf entrant dans le logement.

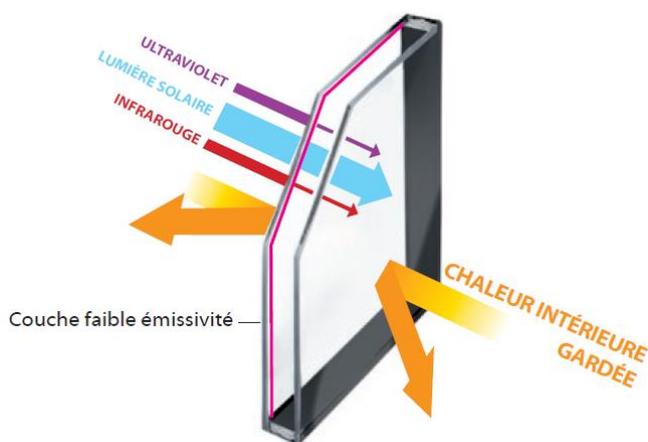


Figure 5-29 - Fonctionnement des vitrages à basse émissivité (source : [www.aluminiumhabitat.fr](http://www.aluminiumhabitat.fr))

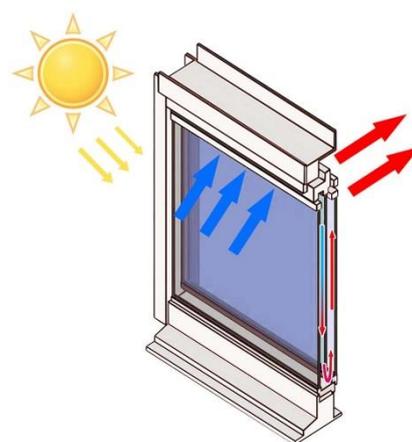


Figure 5-30- Principe de fonctionnement d'une fenêtre parieto-dynamique (source : [www.lemoniteur.fr](http://www.lemoniteur.fr) © Ifore)

A travers la prise en compte des enjeux architecturaux, la technologie se développe via la large conception et l'utilisation des façades légères (avec des épaisseurs réduites), généralement associées

<sup>37</sup> Un composant-fenêtre est un ensemble comprenant à la fois la menuiserie, l'encadrement, les vitrages et les occultations.

à des structures du type poteau-poutre et des dalles en béton pour garder l'inertie thermique. Aujourd'hui, l'enjeu environnemental s'impose en termes d'énergie grise et d'émissions de CO<sub>2</sub> sur l'ensemble du cycle de vie.

Dans ce cadre, l'enveloppe devrait, idéalement, être capable d'accomplir plusieurs fonctions en lien avec l'environnement et les contextes extérieur et intérieur. Le bâtiment du futur est un bâtiment intelligent (Figure 5-31) où l'enveloppe intègre plusieurs éléments à caractère dit dynamique, adaptatif, responsif, intelligent, intégré. L'idée de la multifonctionnalité de l'enveloppe est exprimée en 1981 à travers une publication de Mike Davies (Davies, 1981).

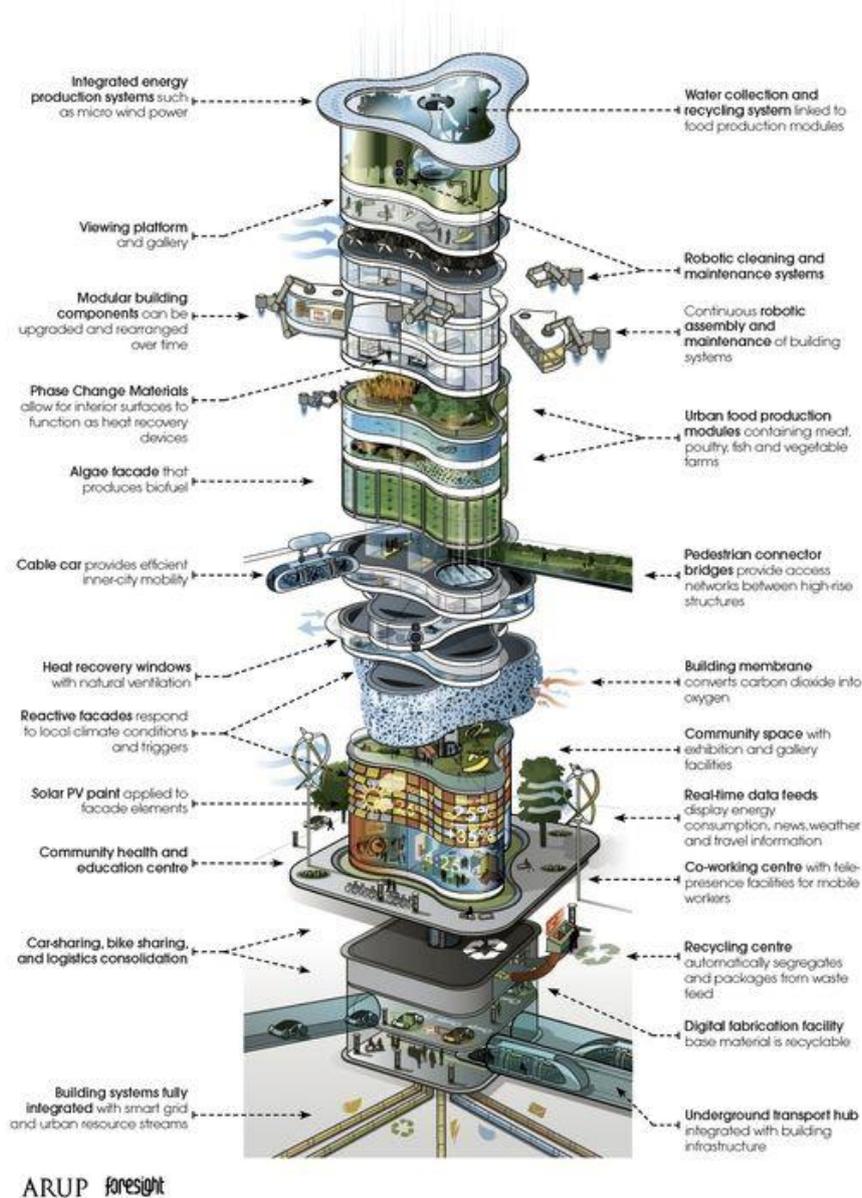


Figure 5-31 - Le bâtiment intelligent imaginé par ARUP pour l'année 2050 (source : ARUP)

L'auteur propose la vision d'une enveloppe qu'il appelle le « *Polyvalent Wall* » ou « mur polyvalent ». Il s'agit d'un système idéal constitué par l'assemblage d'une série de couches entre deux fines couches de vitrage. Ce prototype (Figure 5-32) est théoriquement en mesure de satisfaire les différentes exigences d'isolation thermique, protection solaire ajustable (à l'aide de revêtements

électrochimiques) et production d'énergie (à travers l'intégration du photovoltaïque). Son idée, jamais pratiquement réalisée, casse complètement la vision traditionnelle de la façade et pousse le monde de la recherche à s'intéresser au développement des façades innovantes et multifonctionnelles.

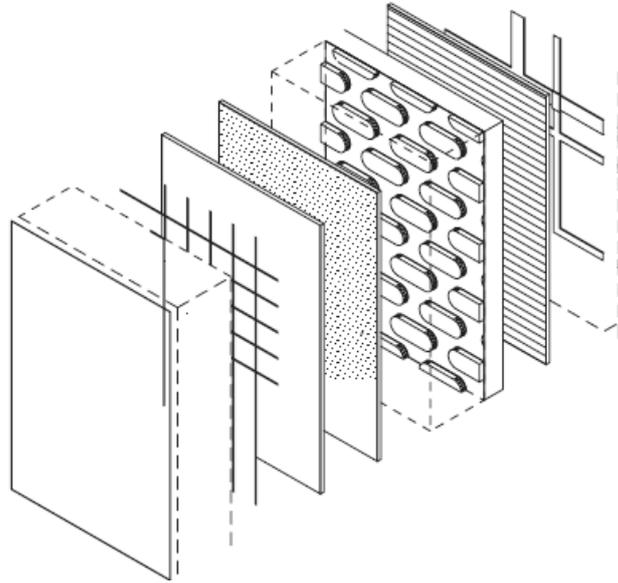


Figure 5-32 - L'idée du « mur polyvalent » proposée par Mike Davies (Davies, 1981)

En suivant l'exemple de Davies, Knaack et ses collègues présentent l'idée de la façade intégrée (Knaack, et al., 2007). Il s'agit d'un système d'enveloppe (Figure 5-33) qui puisse comprendre les composants opaques et transparentes et permettant de répondre dans son épaisseur à toutes les exigences de performance.

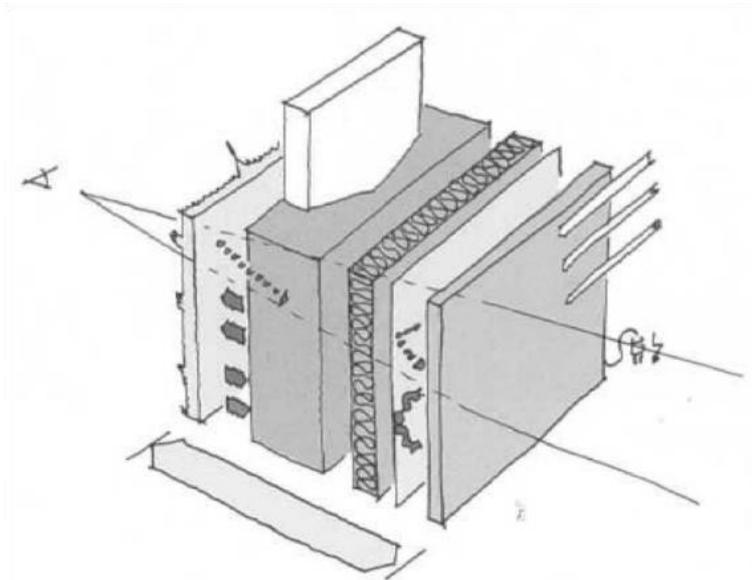


Figure 5-33 - Le concept de façade intégrée par Knaack qui remplit plusieurs fonctions dans un seul élément (structurale, d'isolation, étanchéité à l'eau et à l'air, ventilation, production d'énergie, contrôle de la radiation et transparence)

Le prototype est ensuite développé en modules qui intègrent les équipements de chauffage, de refroidissement et de ventilation. Le système prévoit également une isolation acoustique, des

éléments transparents permettant d'avoir un bon apport de lumière naturelle ainsi que les protections solaires comme montré dans les Figure 5-34 et Figure 5-35.

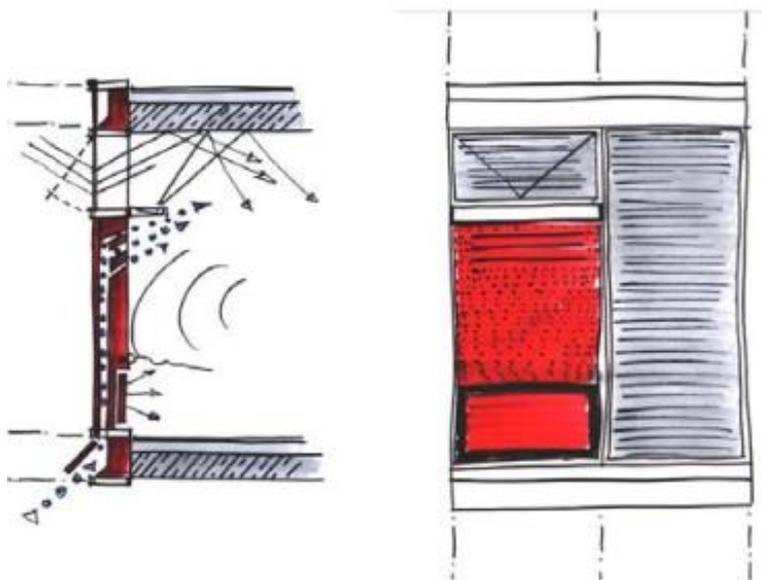


Figure 5-34 - Esquisse de module de façade multifonctionnel réalisé pour le « Capricorn Haus » à Düsseldorf.  
(source : [www.gatermann-schossig.de](http://www.gatermann-schossig.de))



Figure 5-35 - Mise en œuvre des i-module pour l'enveloppe du « Capricorn Haus » (source : [www.architectscience.com](http://www.architectscience.com))

Les recherches se sont de plus en plus concentrées sur ces problématiques en analysant aussi la possibilité, avec le développement de la technologie, d'intégrer l'automatisation de la réponse aux sollicitations venant de l'environnement extérieur, intérieur ou d'une logique de contrôle.

Dans les recherches des dernières années les auteurs se réfèrent à ces types de systèmes de façon différente à travers les adjectifs « *adaptive* », « *smart* », « *responsive* », « *active* », « *kinetic* », « *intelligent* ». Une synthèse des termes utilisés est représentée par la Figure 5-36.



Figure 5-36 - Les différentes définitions des systèmes d'enveloppe multifonctionnelles en littérature (Aelenei, et al.,2016)

Suite à l'analyse effectuée sur les définitions présentes en littérature, nous proposons une synthèse des définitions les plus utilisées et que l'on considère actées, sous forme de tableau (Tableau 5-15). Ce tableau permet d'avoir une vision plus claire des significations et de la hiérarchie des appellations.

En 2014 le « *Adaptive Facade Network* » a été créé dans le cadre d'une COST (*European Cooperation in Science and Technology*) (Aelenei, et al., 2015). L'objectif principal de cette COST Action est l'harmonisation de la connaissance en se basant sur les travaux de recherche développés par les instituts au niveau européen. Cette démarche permet un échange actif entre les différents pays et partenaires académiques en facilitant le processus créatif et la naissance de nouvelles directions de recherche.

La COST Action TU 1403 est organisée à travers 4 Groupes de travail (*Working Group*) :

- **WG1** : Technologies et produits adaptatifs (*Adaptive technologies and products*) ;
- **WG2** : Performance du composant et méthodes de caractérisation (*Component performance and characterization methods*) ;
- **WG3** : Intégration à échelle du bâtiment et méthodes d'évaluation tout au long du cycle de vie des façades adaptatives (*Whole building integration and whole-life evaluation methods of adaptive facades*) ;
- **WG4** : Diffusion et recherches futures (*Dissemination and future research*).

Le premier groupe de travail (WG1) est chargé, entre autre, de réaliser une base de données recueillant les diverses technologies de façades adaptatives. Les autres groupes de travail interviennent supportant le WG1 pour alimenter cette base de données.

Tableau 5-15 - Synthèse des définitions et leur domaine de compétence

Appellation	Définition	Echelle	Hierarchie	Réf.
<i>Kinetic</i>	capables de varier la position, la géométrie ou qui peuvent effectuer un mouvement	Composants Bâtiments	Intègre : « <i>Active</i> »	(Fox & Yeh, 1999) (Ramzy & Fayed, 2011) (Wang et al., 2012) (Pacheco-Torgal, et al., 2015)
<i>Intelligent</i>	prévoit la présence d'un capteur, un contrôleur et un actionneur et capable de prendre en compte les événements passés	Façades Bâtiment	Intègre : « <i>Active</i> » « <i>Passive</i> » « <i>Smart</i> » « <i>Kinetic</i> »	(Wigginton & Harris, 2002) (Ochoa & Capeluto, 2008)
<i>Smart</i>	qui change ses caractéristiques sous la directe influence de l'environnement, sans forcément besoin de se connecter à un contrôle central	Matériau - Intrinsic - Convertisseur	Intègre : « <i>Active</i> » « <i>Passive</i> »	(Fox & Yeh, 1999) (Addington & Schodek, 2005) (Dewidar & Mohamed, 2013) (Hasselaar, 2006) (Panopoulos & Papadopoulos, 2017)
<i>Passive</i>	qui n'a pas une réaction mécanique par rapport au changement de circonstances	Composants	-	(Ochoa & Capeluto, 2008) (Hasselaar, 2006) (La Maison Passive, 2016)
<i>Active</i>	qui est capable automatiquement de changer en réponse à un input ou une rétroaction	Composants	-	(BPIE, 2011) (Ochoa & Capeluto, 2008) (Dewidar & Mohamed, 2013) (Hasselaar, 2006) (Nagy, et al., 2016)
<i>Responsive</i>	qui fait quelque chose comme réaction par rapport à un certain environnement ou flux	Façades Equipements Eléments secondaires	Intègre : « <i>Intelligent</i> » synonyme de « <i>Adaptive</i> »	(Aschehoug & Perino, 2009) (Dewidar & Mohamed, 2013)
<i>Adaptive</i>	qui change rapidement et de façon réversible quelqu'une de ses fonctions, caractéristiques ou comportements dans le temps, en réponse aux variations des exigences de performance et des conditions limites, avec l'objectif d'améliorer la performance globale du bâtiment	Façades Composants	Intègre : « <i>Intelligent</i> » « <i>Responsive</i> »	(Fox & Yeh, 1999) (Wang, et al., 2012) (Hasselaar, 2006) (Nagy, et al., 2016) (Aschehoug & Perino, 2009) (Del Grosso & Basso, 2013) (Loonen, et al., 2013) (Ogwezi, et al., 2011)

En accord avec les dernières recherches il a été établi d'utiliser le terme de « *Adaptive facades* » (façades adaptatives) pour définir l'ensemble de ces systèmes. Dans cette définition il est possible d'inclure les autres termes. La définition donnée par Loonen en 2015 (Loonen, et al., 2015) reprend la définition déjà donnée pour les *Climate-adaptive building shell (CABS)* en 2013 (Loonen, et al., 2013) et lui donne une signification plus large. La notion de CABS permettait, en effet, de ressembler sous la même famille l'ensemble de technologies d'enveloppe du bâtiment capables d'adapter leur comportement ou performance en fonction des conditions climatiques.

Les façades adaptatives sont des « systèmes multifonctionnels et adaptatifs pour lesquels l'interface entre l'intérieur et l'extérieur (l'enveloppe ou ses composants) est capable de changer (mécaniquement ou chimiquement) ses fonctions, propriétés ou comportements dans le temps, en réponse à un changement des conditions limites (par exemple le climat extérieur) ou des exigences de performance (par exemple le confort de l'occupant), avec l'objectif d'améliorer globalement la performance du bâtiment » (Loonen, et al., 2015).

Suite à cette définition, Struck (Struck, et al., 2015) développe les sujets touchés par le WG3. Il met en évidence les aspects liés à la conception du bâtiment intégrant des façades adaptatives et à la problématique de l'évaluation de la performance globale.

L'effort de produire une classification pour mieux comprendre et distinguer ces technologies a été réalisé dans les derniers 20 ans. Les dernières recherches (Aelenei, et al., 2016) (Aelenei, et al., 2015), montrent qu'il s'agit d'un exercice très compliqué. En effet chaque technologie a ses spécificités en termes, par exemple de fonctionnement, de mécanisme d'activation ou d'échelle spatiale (niveau systémique).

Parmi les dernières propositions de classifications la plus représentative est, peut-être, celle proposée par Loonen et al. (Loonen, et al., 2015), (Loonen, et al., 2016). Cette classification permet de souligner les divers aspects caractérisant les solutions technologiques.

La description des catégories se fait à travers une matrice de lecture (Figure 5-37).

Goal / purpose	Responsive function	Operation	Technologies (materials & systems)	Response time	Spatial scale	Visibility	Degree of adaptability
Thermal comfort	Prevent, Reject, Admit or Modulate (Store, Distribute) <u>solar gains</u> , and conductive, convective and long-wave radiant <u>heat flux</u>	Intrinsic	Shading	Seconds	Building material	No	On-off
		Extrinsic	Insulation	Minutes	Façade element	Low	Gradual
			Switchable glazing	Hours			
			PCM	Day-night	Wall	High	
Indoor air quality	Controlled porosity for exchange and filtering of <u>outside air</u>		Solar tubes	Seasons	Fenestration		
			BIPV and solar thermal systems	Years	Roof		
			Shape memory alloys	Decades	Whole building		
Visual performance (illuminance, glare, view)	Prevent, Reject, Admit or Redirect <u>visible light</u>		Façade openings				
Acoustic quality	Prevent, Reject, Admit or Redirect <u>sound pressure</u>		Kinetic systems				
			Radiant glazing				
Energy generation	Collect and convert <u>wind energy</u> and <u>sunlight</u> into electricity and thermal energy		...				
Personal control	User interaction and adaptation to individual needs						

Figure 5-37 – Matrice de description d'une façade adaptative (Loonen, et al., 2015)

La grille de lecture permet de mettre en évidence :

- L'objectif, (*Goal, purpose*), c'est à dire la performance à atteindre (confort thermique, visuel, etc.) ;
- La fonction de réponse (*responsive fonction*), c'est-à-dire la fonction qui engage l'adaptabilité vis –à-vis d'une sollicitation spécifique (par exemple admettre ou bloquer la radiation solaire) ;

- Le type de réaction (*operation*), qui peut être intrinsèque (ajustement automatique des performances) ou extrinsèque (l'information est traduite par un système d'activation) ;
- Le type de technologie (*technologies –material & systems*), cette entrée permet de spécifier le type de technologie (isolation, protection solaire ou autre) ;
- Le temps de réponse (*response time*) l'ordre de grandeur du temps d'adaptation ;
- Le niveau systémique (*spatial scale*), cet élément permet de spécifier si la solution technologique concerne l'échelle système, sous-système, composant, etc. ;
- La visibilité (*visibility*) cette entrée permet de prendre en compte une des plus anciennes fonctions de la façade, c'est-à-dire la fonction esthétique ;
- Le degré d'adaptation (*degree of adaptability*), cela permet d'explicitier si la modalité de l'adaptation est du type on-off ou graduel.

Les façades adaptatives sont toujours plus présentes sur le marché. Par contre leur intégration demeure limitée dans la pratique actuelle : les indicateurs de performance utilisées pour les façades traditionnelles perdent de valeurs pour ces technologies, mais ils n'existent pas non plus des nouveaux indicateurs universellement reconnus ; l'interaction entre façade, environnement (intérieur et extérieur), équipements et usager, ne sont pas facilement maîtrisables ; les retours d'expérience ne sont pas assez robustes pour s'engager dans une démarche aussi compliquée en conception.

Dans le cadre de l'évaluation de la performance, les façades adaptatives montrent des difficultés ultérieures par rapport aux façades traditionnelles, en termes de modélisation et de représentation (Loonen, et al., 2016) :

- Evaluation en parallèle de plusieurs domaines différents ;
- Définition de la technologie dans l'interface des logiciels ;
- Processus de résolution des modèles de conduction à travers les éléments ;
- Modéliser la stratégie de contrôle ;
- Modéliser l'interaction des occupants avec la technologie.

En termes de commissionnement et de contrôle des performances, ils n'existent pas encore des spécifications et des standards à suivre pour la mise en place de tests et des vérifications (Attia, et al., 2015)

Comme nous l'avons vu, les choix concernant les solutions innovantes (tel que les façades adaptatives) doivent se réaliser en pré-design, c'est pourquoi dans le paragraphe suivant nous montrons l'application de la méthode comme un outil d'aide au choix pour les solutions de façade.

### 5.1.3. Application 3 : Module de bureau

Dans ce paragraphe nous utilisons la méthode afin de permettre un aide au choix vis-à-vis de divers composants d'enveloppe. Pour ce faire, nous allons considérer un module de bureau avec deux alternatives techniques de façade :

- SS : Façade légère ventilée avec une fenêtre et des protections solaires extérieures ;
- SW : Façade légère ventilée intégrant un vitrage à adaptation solaire (et donc, sans protections solaires).

Pour le cas SW nous considérons un vitrage électrochimique, capable de modifier ses paramètres thermo – optiques grâce à un impulsion électrique. Nous analysons aussi quatre diverses logiques de contrôle. Le but est de montrer l'applicabilité de la méthode pour des solutions technologiques innovantes et pour le support au choix se basant sur une évaluation holistique.

Dans les prochains sous-paragraphe nous présentons le cas d'étude, les alternatives prises en compte pour enfin traiter l'analyse et l'évaluation du cas d'étude à l'aide de la méthode.

#### ■ *Présentation du cas d'étude*

Le cas d'étude est représenté par un module de bureau du bâtiment « Influence », situé en Ile de France. Ce bâtiment fait partie d'une opération de requalification urbaine qui portera à la réalisation du futur éco-quartier de la ZAC de Docks à Saint Ouen (93). L'entier site compte 100 hectares situés au Nord de Paris. Le « Influence » consiste en 33000 m<sup>2</sup> de bureaux et services. Le bâtiment a été classifié comme « Very Good » selon le label BREEAM (Figure 5-38 et Figure 5-39).

La structure du bâtiment est réalisée en béton avec un système poteau-poutre. Le bâtiment présente une façade légère ventilée avec des grandes baies vitrées. Extérieurement, une deuxième peau en métal entoure le volume, constituant, ainsi, un système de protection solaire fixe, en correspondance des fenêtres (Figure 5-40). Les lames horizontales sont de forme rectangulaire (270 x 45 cm) avec un coefficient de transmission solaire de 0,2.



Figure 5-38 – Vue d'ensemble du projet concernant le bâtiment « Influence »



Figure 5-39 – Etage type et détermination du module de bureau considéré pour l'étude

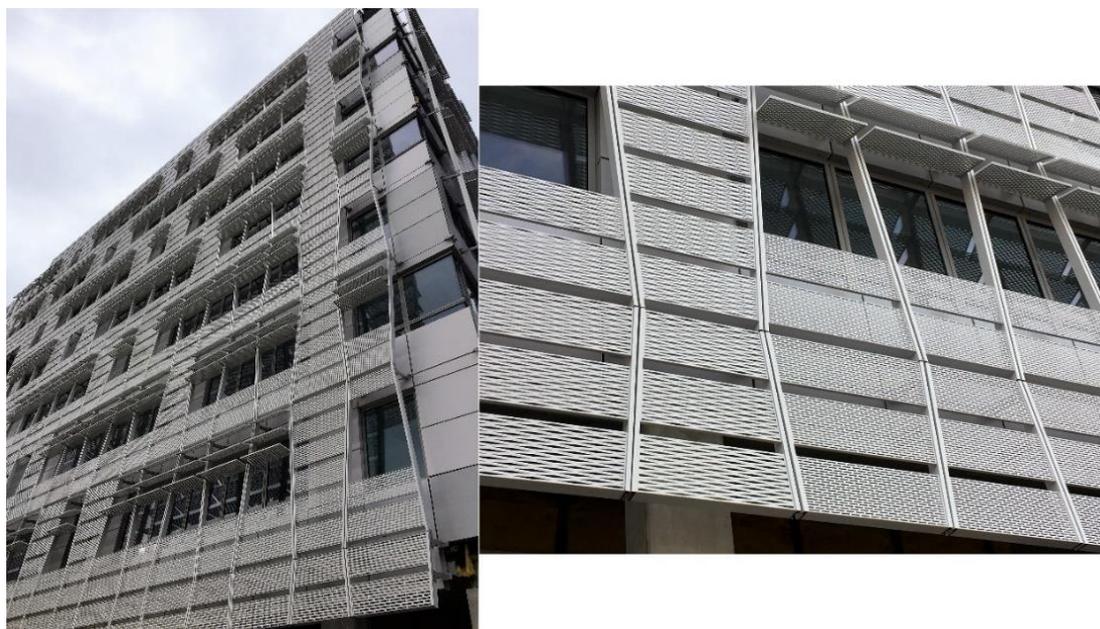


Figure 5-40 – Façades du bâtiment « Influence »

Le bâtiment est organisé sur sept étages caractérisés par une hauteur sous-plafond de 2,70m.

Chaque étage est équipé de plafonds rayonnants utilisés à la fois en été pour le rafraîchissement et en hiver pour le chauffage.

Les caractéristiques des panneaux rayonnants, utilisés dans le modèle étudié, ont été fournies par le producteur des systèmes rayonnants.

Il s'agit d'un panneau métallique micro perforé (1,5mm de diamètre) sur toute la surface, à exception des bandes (10mm) sur le périmètre. L'échange thermique se fait à travers un circuit hydraulique constitué par une serpentine en cuivre associée à des diffuseurs en aluminium anodisé soudés aux panneaux. Un voile acoustique non tissé de laine de verre est fixé à entre la surface interne du panneau et les tubes, afin d'avoir une meilleure absorption acoustique. Pour l'isolation thermique, le système prévoit une plaque de plâtre et un isolant en laine de roche du côté de la dalle.

Le mode de fonctionnement du plafond rayonnant est :

- Température de l'eau d'entrée : 14 °C
- Débit d'eau maximum : 0,117 l/s

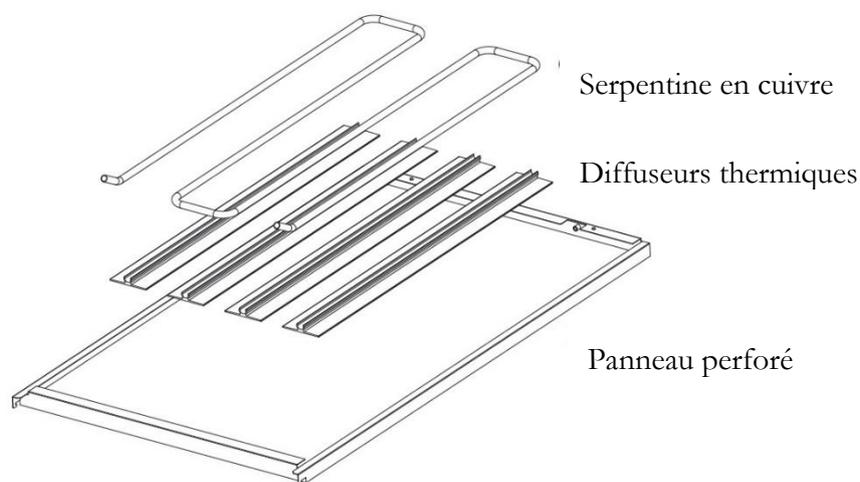


Figure 5-41 – structure du panneau rayonnant



Figure 5-42 – Installation des panneaux rayonnants dans le bâtiment « Influence »

Les caractéristiques et les propriétés des matériaux du système radiant sont définies dans le Tableau 5-16

Tableau 5-16 – Caractéristiques des matériaux des panneaux

Matériel	Plaque de plâtre	Panneau de laine de roche	Voile acoustique non tissé	Plaque d'acier galvanisé
Épaisseur [mm]	13	18	0.1	0.5
Conductivité thermique [W/(mK)]	0,19	0,038	0,04	50
Masse Volumique [kg/m <sup>3</sup> ]	668	52	305	2016
Chaleur spécifique [J/(kgK)]	1090	657	1630	910

Le système rayonnant est associé à un système de ventilation permettant de renouveler mécaniquement l'air à l'intérieur du bâtiment, ainsi que garantir des bonnes conditions thermo-hygrométriques internes afin de prévenir le risque de condensation superficielle du panneau. La

stratégie de ventilation considérée dans le modèle est du type « *mixed-mode* ». Il s'agit d'une ventilation par mélange<sup>38</sup>, le système à débit variable, permet de contrôler la température de l'air à l'intérieur de la pièce. Ce système est associé à un régulateur d'air extérieur et un récupérateur de chaleur. Les caractéristiques de la stratégie de ventilation sont :

- Température de l'air d'entrée : 19 °C ;
- Débit d'air maximum : 50 m<sup>3</sup>/h.

Le module de bureau est exposé au Sud et il a une dimension de 2,70x5,00m en plan et une hauteur sous-plafond de 2,7m ; la géométrie prévoit aussi la modélisation d'un plenum de l'épaisseur de 0,60m. La seule paroi exposée à l'extérieur est la paroi Sud, qui est presque entièrement vitrée (Ratio surface vitrée/façade = 0,98). Dans le modèle du bureau type nous avons donc considéré l'échange thermique exclusivement à travers la paroi au Sud, et nous avons considéré les autres parois comme adiabatiques.

Nous avons donc imaginé de devoir choisir, pour la façade Sud du module de bureau, entre : 1) le cas réel avec un double vitrage et un système de protection solaire, et 2) une solution technologique plus innovante, c'est-à-dire, un vitrage à adaptation solaire qui remplace le double vitrage et les protections solaires. Dans le paragraphe suivant nous analysons les caractéristiques de ces deux solutions techniques.

#### ▪ *L'analyse des solutions de façade*

Les typologies de façade, pour la réalisation du comparatif à l'aide de la méthode proposée, sont les suivantes et elles sont représentées synthétiquement dans les Figure 5-43 et Figure 5-44 :

- SS : façade prévoyant une fenêtre en double vitrage et des protections solaires ;
- SW : façade intégrant un vitrage à adaptation solaire permettant de réduire les apports solaires à l'intérieur du bâtiment.

Le premier cas, représente la solution prévue dans le projet du bâtiment « Influence ».

Dans le deuxième cas nous considérons un vitrage électrochrome. Ce type de système permet de contrôler les propriétés thermo-optiques de manière réversible via l'application d'une basse tension (1- 5 W). Le vitrage électrochrome est constitué de deux vitres entre lesquelles il est placé un film composé de fines couches d'électrodes et de contre-électrodes, séparées par un conducteur de charge appelé électrolyte. Le passage du courant électrique provoque une réaction d'oxydoréduction qui change la couleur du verre, qui devient plus foncé.

Pour ce deuxième cas nous avons considéré un produit présent sur le marché (SageGlass®), dont les caractéristiques thermo-optiques font partie de la base de donnée du logiciel WINDOW v7.6. Nous avons, donc considéré la composition et les caractéristiques fournies par le logiciel. À l'aide de ce logiciel nous avons ainsi déterminé les principales propriétés thermo-optiques du vitrage à adaptation (dans ses états clair et foncé) afin de réaliser une comparaison avec le double vitrage original. Les caractéristiques principales des composants vitrées sont reportées dans le Tableau

---

<sup>38</sup> Il s'agit d'une stratégie de ventilation dans lequel l'air est insufflé et extrait par le plafond et/ou les parois. Cela peut se réaliser aussi en considérant à la fois la ventilation naturelle par ouverture des fenêtres et le système de ventilation mécanique (Awbi, 2015).

5-17, dans lequel l'alternative SS concerne la solution avec le double vitrage, alors que SW-Clear et SW-Dark concernent respectivement l'état clair et foncé du vitrage électrochrome.

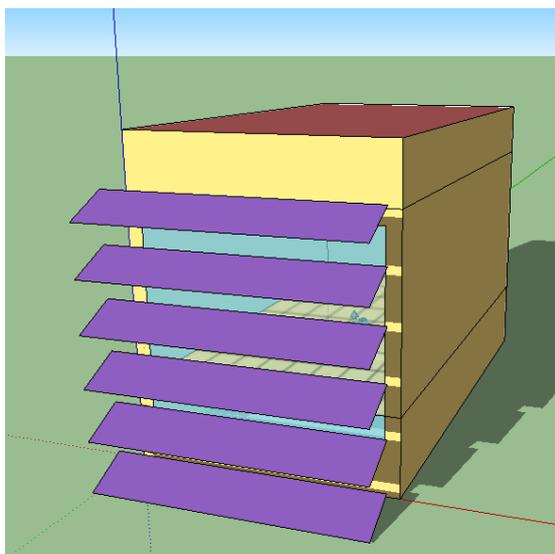


Figure 5-43 – Système SS (protections solaires)

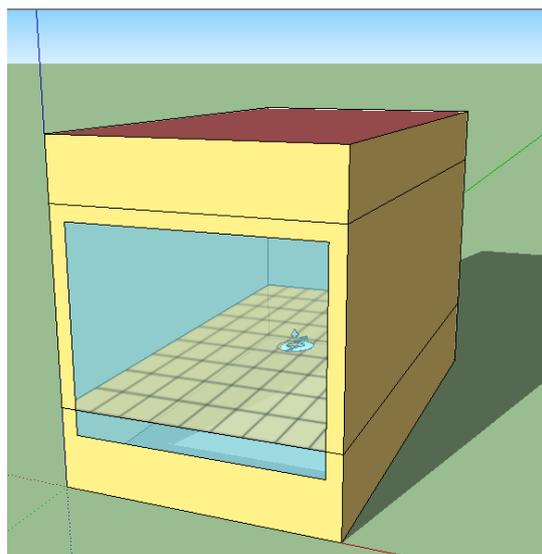


Figure 5-44 – Système SW (Vitrages à adaptation)

Tableau 5-17 – Caractéristiques synthétiques des vitrages

Grandeur thermo-optique	SS	SW - Clear	SW - Dark
Facteur solaire	0,29	0,41	0,09
Facteur U [W/(m <sup>2</sup> K)]	1,03	1,03	1,03
Transmission visible	0,59	0,6	0,1

Pour le deuxième système (SW) nous avons établi plusieurs logiques de contrôle :

- SWSolar : le vitrage change sa coloration en fonction de l'irradiation solaire sur la fenêtre. Dans ce cas nous avons fixé une activation du vitrage quand l'irradiation solaire sur le vitrage atteint la valeur de 189W/m<sup>2</sup>. Cette valeur a été établie sur la base de (Wankanapon & Mistrick, 2011). Dans ce cas, il est ainsi prévu un contrôle sur l'éblouissement dans le point de référence placé au milieu de la pièce à une hauteur de 0,80m.
- SWT26 : le vitrage change sa coloration en fonction de la température de l'air à l'intérieur. La température de consigne a été considérée à 26°C. Dans ce cas, il est ainsi prévu un contrôle sur l'éblouissement dans le point de référence placé au milieu de la pièce à une hauteur de 0,80m.
- SWDaylight&Glare : le vitrage change sa coloration en fonction des valeurs de l'éclairage dû à la lumière naturelle pour un point de référence, placé au milieu de la pièce à une hauteur de 0,80m. Nous avons établi la valeur limite (inférieure) pour l'éclairage naturel à 300 lux. Dans ce cas, il est ainsi prévu un contrôle sur l'éblouissement dans le point de référence placé.
- SWDaylight : la stratégie est équivalente à la précédente mais dans ce cas nous négligeons le contrôle de l'éblouissement.

Concernant l'occupation, prévue entre 8h et 18h dans les jours de travail (modulé sur la journée en fonction de l'horaire) nous avons considéré deux personnes occupant le bureau, les apports

internes sont estimés 131,8W (incluant les contributions de convection, rayonnement et chaleur latente) (ASHRAE, 2016). Les apports relatifs aux équipements électriques ont été estimés à 16,15 W/m<sup>2</sup> en accord avec (Wilkins & Hosni, 2011). L'éclairage artificiel est réalisé à travers des LEDs ayant une puissance de 5W/m<sup>2</sup>. La fraction radiative à longue longueur d'onde est de 37%, alors que la fraction visible est de 18% en accord avec (Illuminating Engineering Society of North America, 1993)

▪ *Quantification des critères et évaluation globale*

L'évaluation globale de la solution à l'aide de la méthode proposée, dans ce cas, se concentre plutôt sur les performances strictement liées aux critères CC5, CC6 et CC7. En effet en imaginant l'utilisation du même système constructif pour les deux solutions (SS et SW) et à parité de gestion technique et formation des usagers, l'évaluation de la constructibilité technique diffère principalement du point de vue de la modélisation des éléments (CC3.2) et pour l'interface avec l'utilisateur (CC4.5) (Tableau 5-18).

Tableau 5-18 - Valeurs des critères acquises à travers le système de notation et l'agrégation pour les deux solutions d'enveloppe.

Sous-critères	SS	SW
CC1.1 Niveau de standardisation de la structure verticale (Str_V)	3/6	3/6
CC1.2 Niveau de standardisation de la structure horizontale (Str_H)	6/6	6/6
CC1.3 Niveau de standardisation des façades (Env_V)	5/6	5/6
CC1.4 Niveau de standardisation des ouvertures (Env_Ouv)	5/6	5/6
CC1.5 Organisation des équipements techniques (Equ)	4/6	4/6
CC1.6 Type de production des technologies	5/6	5/6
CC1.7 Modes constructifs	2/6	2/6
CC1.8 Types d'interfaces techniques	5/6	5/6
<b>CC1 - Simplicité de la solution</b>	<b>0,70</b>	<b>0,70</b>
CC2.1 Outils et mesures à support de la conception	6/6	6/6
CC2.2 Prise en compte des risques et mise en place d'un registre des problèmes	6/6	6/6
CC2.3 Nécessité d'essais	5/6	5/6
CC2.4 Facilité d'accès à la vérification (en phase d'exploitation).	6/6	6/6
<b>CC2 - Possibilité de vérification</b>	<b>0,98</b>	<b>0,98</b>
CC3.1 Développement des détails techniques	6/6	6/6
CC3.2 Modélisation des éléments	6/6	4/6
CC3.3 Recours à une main d'œuvre spécialisée et équipement spéciaux (chantier)	6/6	6/6
CC3.4 Formations prévues pour les usagers	3/6	3/6
<b>CC3 - Disponibilité des compétences</b>	<b>0,95</b>	<b>0,89</b>
CC4.1 Durabilité des systèmes	6/6	6/6
CC4.2 Transport	4/6	4/6
CC4.3 Séquence de montage	6/6	6/6
CC4.4 Régulation et gestion technique	6/6	6/6
CC4.5 Interaction avec l'utilisateur	1/6	4/6
CC4.6 Maintenance	6/6	6/6
CC4.7 Fin de vie	4/6	4/6
<b>CC4 - Simplicité de gestion</b>	<b>0,83</b>	<b>0,87</b>

Dans ce cas, la solution SS, plus simple, obtient une valeur plus élevée en termes de compétences demandées en phase de conception pour l'évaluation de la performance. Les composants de la première alternative sont connus et facilement repérables dans les bibliothèques de la plupart des logiciels d'évaluation. Le vitrage électrochrome, par contre, demande une compétence ultérieure

et, évidemment, le recours à une modélisation un peu plus complexe. Cela comporte, concernant le sous-critère CC3.2, une note 6/6 pour le système SS et 4/6 pour le SW.

Pour le deuxième sous-critère impacté (CC4.5), les deux systèmes obtiennent respectivement une note de 1/6 (la solution technique ne s'adapte pas) et 4/6 (l'utilisateur peut intervenir sur la logique de contrôle du système adaptatif mais pas directement) en fonction du degré d'adaptation du système.

Les représentations graphiques de la Figure 5-45 permettent d'apprécier cette différence concernant les deux critères CC3 et CC4.

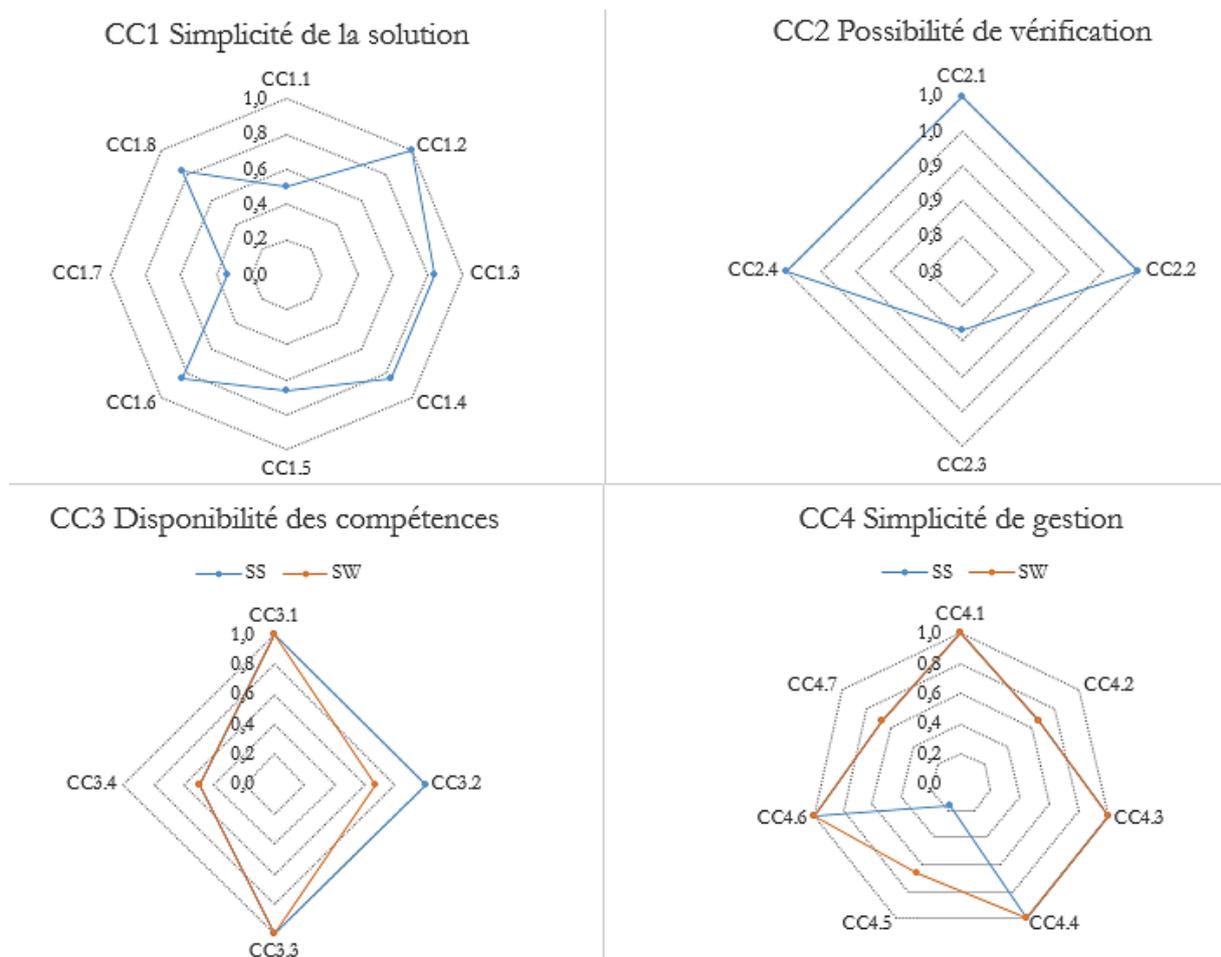


Figure 5-45 - Evaluation globale critère par critère (CC1, CC2, CC3 et CC4) pour les deux solutions de façade.

Dans le cadre de l'évaluation des indicateurs de performance nous nous limitons à comparer les diverses solutions sans directement vérifier le respect des performances établie dans le programme (auquel nous n'avons pas accès). C'est pourquoi, pour les valeurs de références (Tableau 5-19), nous n'avons pas considéré une limite inférieure du sDA. La comparaison se fait en fonction de l'apport en lumière naturelle de chaque configuration.

Pour les valeurs limites de la consommation en énergie primaire (CEP) et des émissions de gaz à effet de serre (EGES), nous avons considéré, en fonction de l'ordre de grandeur des résultats, la valeur la plus élevée relative respectivement à la classe énergétique et d'émissions de gaz à effet de serre proposée par le système de signature d'un bâtiment (AFNOR, 2017c). La comparaison des solutions se fait sur la base de l'économie réalisée par rapport à la valeur maximale de la classe

considérée. Nous négligeons les comparaisons en termes de sol et eau en considérant que les diverses solutions auront la même consommation en eau et en sol.

Afin de mieux apprécier la comparaison des résultats concernant l'indicateur CC7, le calcul du coût global a été effectué sur la base d'un investissement relatif à la seule solution technologique considérée. Sur la base des données venant des catalogues des producteurs, nous avons estimé un investissement de 350 €/m<sup>2</sup> pour la solution SS (150€/m<sup>2</sup> pour le double vitrage et 200€/m<sup>2</sup> pour la protection solaire) et un coût d'investissement de 600€/m<sup>2</sup> pour les systèmes SW.

Tableau 5-19 – Valeurs de référence considérées pour le calcul des indicateurs de performance

Sous-critère	Indicateur	Valeur de référence		Notes
CC5.2	$sDA$	–		Analysé en considérant les diverses logiques de contrôle sur une grille de 100 points à une hauteur de plan de travail (0,8 m) distribués sur la zone.
CC5.3	$n^{\circ}h_{occ}$	$T_{op} \leq 28^{\circ}C$		L'indicateur a été évalué pour la zone Sud
CC5.4	$n^{\circ}h_{occ}$	$T_{op} \geq 19^{\circ}C$		L'indicateur a été évalué pour la zone Nord
CC6.3	$CEP_{lim}$	$\leq 330 kWh_{EP}/m^2$		En fonction de l'ordre de grandeur des résultats nous avons imaginé d'atteindre le niveau d'un bâtiment de classe E.
CC6.4	$EGES_{CE,lim}$	$\leq 35 kg_{eq,CO_2}/m^2$		Dans cette évaluation nous avons considéré la seule contribution due à la consommation énergétique pour une durée de vie de 30 ans. En fonction de l'ordre de grandeur des résultats nous avons considéré la limite supérieure pour un bâtiment de classe D concernant les émissions de GES
CC7	$CG$	SS	2700€	Calculé sur 30 ans et avec un coût d'investissement de 450 € pour la solution SS et 600€ pour la solution SW, et pour la seule consommation énergétique un Taux d'actualisation de 4% ; 0,027€ considéré comme le prix du kWh par gaz et 0,044 par électricité selon les données statistiques françaises.
		SWSolar	3987€	
		SWT26	3987€	
		SWDaylight&Glare	3952€	
		SWDaylight	3918€	

Comme résumé dans le Tableau 5-20 et représenté dans la Figure 5-46, la solution SS demeure légèrement plus avantageuse du point de vue de la soutenabilité (CC6). En fonction des consommations finales et des valeurs des données environnementales de la base de données INIES, la solution avec le système SS émet 20,28 kg<sub>eq</sub>CO<sub>2</sub>, contre les 22,19 kg<sub>eq</sub>CO<sub>2</sub> des solutions les plus énergivores (SWSolar et SWT26). En termes de conditions d'ambiance la solution la plus performante est la SWDaylight, car elle arrive à assurer une autonomie lumineuse en lumière naturelle de 300lux sur le 25% de la surface de la pièce.

Sur le plan économique (CC7) la solution la plus performante demeure toujours la SWDaylight. En effet, même si le coût d'investissement est plus élevé de la solution SS, sur le long terme, l'utilisation du système SW demeure plus efficace. Pour la solution SS nous avons une valeur de 0,62, contre le 0,74 du SWDaylight.

Tableau 5-20 - Valeurs des critères acquises à travers les indicateurs pour les deux solutions d'enveloppe

Sous-critères	SS	SWSolar	SWT26	SWDaylight&Glare	SWDaylight
CC5.1 Réponse aux exigences d'espaces	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
CC5.2 Ambiance visuelle	0,00	0,00	0,00	0,20	0,25
CC5.3 Ambiance thermique en été	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
CC5.4 Ambiance thermique en hiver	0,71	0,71	0,71	0,71	0,71
<b>CC5 - Exigences d'ambiance</b>	<b>0,71</b>	<b>0,71</b>	<b>0,71</b>	<b>0,75</b>	<b>0,76</b>
CC6.1 Economie des ressources en eau	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
CC6.2 Economie des ressources en sol	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
CC6.3 Economie des ressources énergétiques	0,34	0,28	0,28	0,32	0,34
CC6.4 Réduction des émissions de CO <sub>2</sub>	0,42	0,37	0,37	0,38	0,39
<b>CC6 - Soutenabilité</b>	<b>0,38</b>	<b>0,33</b>	<b>0,33</b>	<b>0,35</b>	<b>0,37</b>
<b>CC7 - Economie en exploitation</b>	<b>0,62</b>	<b>0,72</b>	<b>0,72</b>	<b>0,73</b>	<b>0,74</b>

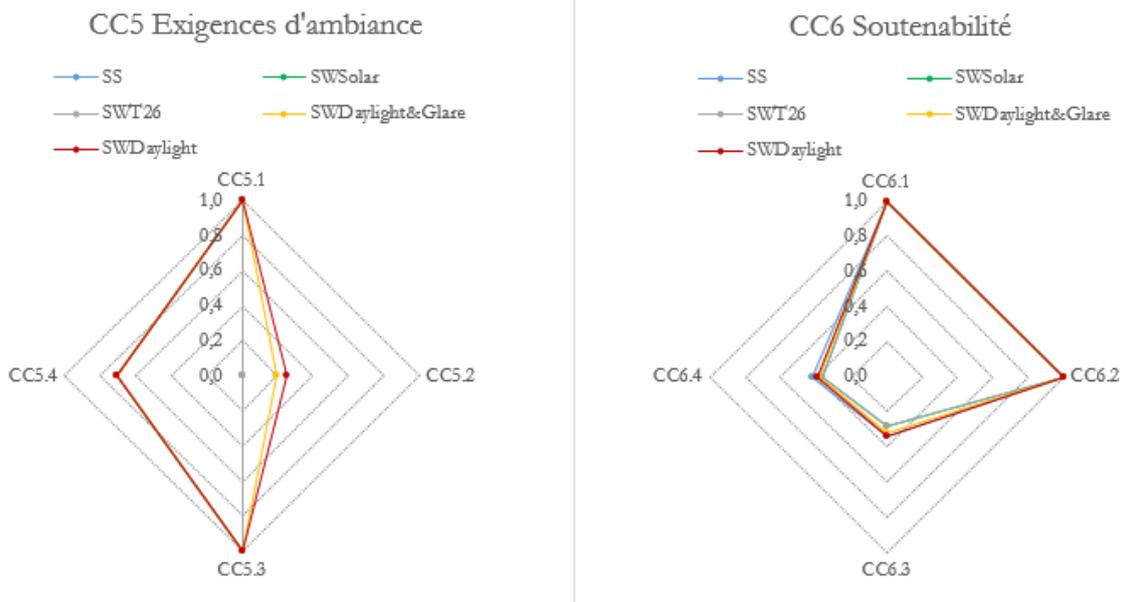


Figure 5-46 - Evaluation globale critère par critère (CC5 et CC6) pour les cinq solutions de façade.

Globalement la solution la plus avantageuse demeure la SWDaylight, à condition, par contre, de réaliser un effort majeur en phase de conception pour la réalisation des modèles d'évaluation (Figure 5-47).

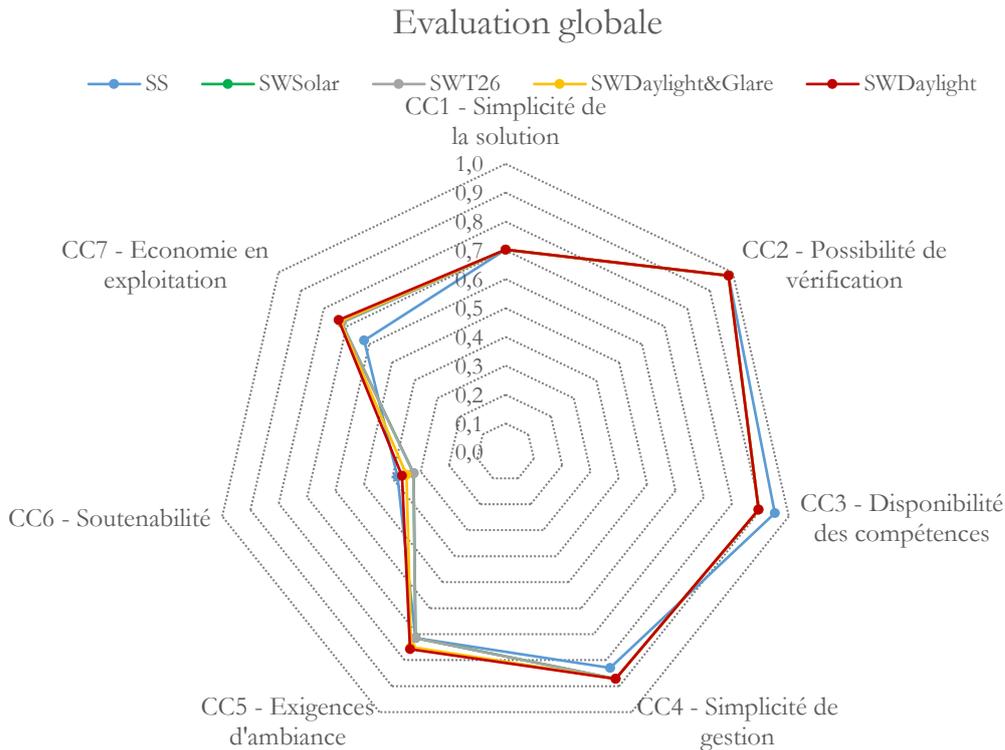


Figure 5-47 – Comparaison des divers systèmes en termes de constructibilité globale.

## Conclusions du chapitre 5

Dans ce chapitre nous avons montré la mise en situation de la méthode pour divers cas d'études. L'application de la méthode au nouveau collège d'Aubervilliers/Saint Denis nous a permis de constater l'efficacité de la méthode pour une première évaluation de la pertinence d'un nouveau projet en phase de pré-design. La comparaison des alternatives nous permet de souligner le caractère pédagogique des divers critères. Les divers niveaux de notation fournissent un encouragement à la réflexion pour le concepteur, qui sera naturellement porté à améliorer son esquisse en travaillant sur les divers aspects pour lesquels le pré-design montre des faiblesses. Le projet du collège a subi des changements en cours de route, en passant d'un système constructif réalisé en chantier à une alternative préfabriquée. La comparaison entre les caractéristiques du pré-design original et celles du projet en phase avancée nous a permis d'apprécier l'utilité de la méthode comme outil de prise en compte des principes de constructibilité.

Le deuxième cas d'étude souligne le lien entre les aspects de constructibilité technique et les niveaux de performance. Pour ce deuxième cas, en effet, nous remarquons un très bon niveau de constructibilité technique mais une négligence quant à l'atteinte des niveaux de performance établis. Ces deux aspects nécessitent d'être prise en compte de façon conjointe en phase de pré-design et, dans ce cas, l'utilisation de la méthode permettrait de corriger la conception le plus tôt possible.

Le troisième cas d'étude nous a permis de vérifier : 1) l'applicabilité de la méthode afin de comparer plusieurs solutions de façade et permettre un aide au choix ; 2) la possibilité de prise en compte de solutions techniques innovantes en amont de la conception.

## Conclusions et perspectives

Les projets de construction peuvent subir, tout au long du cycle de vie, des dérives quant à l'atteinte des objectifs de coût, délai et qualité de l'ouvrage. La constructibilité se propose de résoudre ces problèmes en anticipant les efforts de chaque acteur quant au choix à effectuer, en s'appuyant sur le partage des expériences et des connaissances. Cette discipline demeure, par contre, encore peu intégrée de façon formelle dans le panorama français de la construction. A notre avis, l'anticipation sur laquelle la discipline de la constructibilité se concentre, doit se localiser dans une étape demeurant prépondérante vis-vis des choix de conception : le pré-design.

Comme nous l'avons vu, les choix opérés pendant le pré-design posent les bases pour les stratégies de conception et définissent les conditions aux limites dans lesquelles le processus se déroulera. Dans ce contexte, la conception ne peut pas faire abstraction des principes techniques et constructifs. Le pré-design est le moment dans lequel il faut prendre le temps de réfléchir aux pistes de conception conjointement aux solutions techniques et à l'innovation utilisables, afin de répondre de façon adéquate au cahier des charges. Prendre les bons choix en phase de pré-design représente déjà une garantie de performance.

Afin de comprendre si les choix effectués sont les bons, par contre, il faut anticiper les évaluations de la performance ; performance qui doit être considérée dans sa signification plus globale d'explicitation des fonctions. Ces évaluations concernent à la fois le processus de construction et le produit final, qui est le bâtiment.

L'ensemble de ces aspects a été traité dans le chapitre initial qui, délimite le périmètre d'action de notre recherche et qui établit les objectifs visés par la thèse : proposer une méthode permettant d'évaluer la pertinence d'un pré-design vis-à-vis de la constructibilité comme nous l'entendons, c'est-à-dire des exigences programmatiques ainsi que des concepts de constructibilité technique.

L'état de l'art (présenté dans le chapitre 2) nous a permis de dégager les principes et les concepts définissant la constructibilité dans sa signification « anglo-saxonne » (constructability), ainsi que de comprendre les méthodes d'utilisation pratique de cette discipline. Comme en France la constructibilité interroge ainsi le domaine de la garantie de la performance. C'est pourquoi nous avons analysé en parallèle les outils et les méthodes d'accompagnement et d'évaluations du pré-design. Afin de permettre une évaluation du pré-design et de supporter les choix de conception, nous avons, donc proposé une méthode d'évaluation se basant sur la définition de « pertinence ».

A l'aide de la méthode « 4A », à travers laquelle la pertinence peut être structurée, nous avons défini (dans le chapitre 3) sept critères permettant d'évaluer la pertinence d'un pré-design vis-à-vis de la faisabilité technique des solutions et des exigences exprimées dans le cahier des charges (réponse aux fonctions d'usages, stratégies environnementale et économique).

- CC1 : La simplicité de la solution ;
- CC2 : Les possibilités de vérification ;
- CC3 : La disponibilité des compétences ;
- CC4 : La simplicité de la gestion sur le cycle de vie ;

- CC5 : Pertinence/Robustesse vis-à-vis des fonctions d'usage ;
- CC6 : La soutenabilité environnementale ;
- CC7 : L'économie du pré-design

Ces critères représentent une nouvelle grille d'analyse et de lecture des projets en amont de la conception. Les divers critères ont ensuite été détaillés en sous-critères et indicateurs. Les deux domaines analysés dans la recherche bibliographique, constructibilité « technique » et performance, ont représentés un réservoir d'information dont nous nous sommes servis pour alimenter les divers sous-critères.

Le cœur de la thèse est représenté par le chapitre 4 dans lequel nous avons défini la structure de la méthode et nous avons détaillé les divers critères et leurs modalités d'évaluations.

Les critères plutôt afférant à la constructibilité « technique » (CC1, CC2, CC3 et CC4), demeurant plutôt qualitatif pour ce qui concerne les choix opérés en pré-design, sont évalués à l'aide d'un système de notation, expressément établi pour prendre en compte les aspects principaux du processus de construction du bâtiment. Pour les autres critères, pour lesquels plusieurs méthodes et recommandations déjà existent, nous nous sommes appuyé sur des indicateurs et sur leur normalisation par rapport aux valeurs de référence établies par le programme. Cela permet d'évaluer si le pré-design demeure pertinent ou pas vis-à-vis du niveau de performance demandé.

Afin d'agrèger les divers sous-critères et de fournir une optimisation de chaque critère, nous nous sommes appuyés sur la méthode d'aide à la décision multicritère basée sur l'Analytical Hierarchy Process. Pour ce faire, nous avons ainsi établi la valeur d'importance des divers sous-critères à travers une comparaison par paires (comme prévu par la méthode). Sur la base des retours d'expérience et de la recherche bibliographique concernant les causes de dégradation de la performance, nous avons donc établi l'ensemble des matrices d'intensité. Cela permet une objectivation de la méthode qui ne demeure pas ajustable par l'utilisateur.

Le système de représentation choisi permet d'avoir à la fois une vision d'ensemble de la constructibilité du pré-design, ce qui facilite une comparaison de plusieurs solutions, et une vision spécifique, critère par critère des divers aspects. L'utilisation des deux modes de représentation vise à ne pas perdre des informations concernant les caractéristiques du pré-design.

Dans le chapitre 5 nous avons enfin testé la méthode afin d'en mesurer le potentiel et les limites. Les cas d'études analysés, représentent un prétexte pour la vérification de l'applicabilité de la méthode, la discussion que nous proposons se base principalement sur le cadre méthodologique. Cela nous permet de dégager des points de force et de faiblesse de la méthode.

La méthode demeure utilisable pour une évaluation et une vérification de la cohérence du pré-design, ainsi que comme un outil d'aide à la décision pour les choix concernant les sous-systèmes techniques.

Elle se distingue des autres méthodes d'évaluations car elle permet d'intégrer la notion de constructibilité dans le pré-design de façon claire et formelle. D'autre part, l'évaluation de la performance que nous proposons est holistique et concerne, à la fois la performance du processus, dans la mesure dans laquelle la méthode pousse à aller plus loin dans l'application des principes concernant les aspects techniques, et la performance du bâtiment. La méthode assume ainsi une

connotation pédagogique basée sur les principes de constructibilité technique. Les concepteurs sont poussés à obtenir la note la plus élevée possible et donc à réajuster le pré-design en agissant sur les divers aspects liés à l'ensemble du cycle de vie par le biais d'une collecte d'information auprès d'autres acteurs, ou de l'utilisation des protocoles de commissionnement.

La structure de la grille d'évaluation demeure flexible, les spécifications demeurent adaptables en fonction du contexte d'application et actualisable dans le temps. Les coefficients relatifs à la typologie des façades peuvent ainsi être adaptés et spécifiés en fonction du constructeur impliqué dans le processus, sur la base de la documentation de son retour d'expérience.

En générale, la grille de lecture proposée par la méthode représente la base et un point de départ pour une méthodologie de commissionnement holistique en phase de pré-design qui pourrait être introduite dans le cadre législatif futur (comme c'est le cas pour la ville de Singapour).

Pour comme la méthode est conçue aujourd'hui, elle est directement applicable à des projets plutôt simples, c'est-à-dire à des projets n'impliquant pas trop de modes constructifs ou de taille moyenne. Cette limitation peut par contre être dépassée à travers un ultérieur développement des modes d'évaluations des sous-critères et à travers la création d'une passerelle avec des outils informatiques et des maquettes numériques. Ce développement permettrait :

- 1) d'établir les diverses quantités de matériaux et de composants de façon automatique et, donc, d'intégrer dans l'évaluation du critère environnementale l'estimation de l'émission de gaz à effet de serre, due aux produit de construction ;
- 2) une automatisation du processus d'évaluations et la mise en place d'un processus interactif dans lequel le concepteur pourrait directement tester les effets des divers choix techniques, sur le plan globale de la constructibilité ;
- 3) la mise en évidence automatique des points de vigilance à prendre en compte pour la bonne réussite du processus.

Un autre axe de développement prévoit l'utilisation de méthodes d'optimisation multiobjectif agissant sur les critères déterminés dans le cadre de la thèse. En effet, les problèmes d'optimisation multiobjectif permettent d'optimiser simultanément l'ensemble des composantes du vecteur construit à partir de la fonction objectif (relatif aux divers critères). Cela permettrait de définir la/les solution/s optimale/s de conception en phase de pré-design vis-à-vis des divers critères.

Certains développements concernent aussi le point de vue méthodologique. Nous nous sommes effectivement concentrés sur la seule fonction de « fournir une ambiance » pour le critère CC5. Afin de mieux prendre en compte la pertinence du pré-design, il demeure nécessaire d'inclure aussi les autres fonctions du bâtiment. Dans ce cadre il se rendra nécessaire de réfléchir aux indicateurs pouvant décrire les autres fonctions d'usage. Pour rappel, le bâtiment devrait être capable de fournir :

- 1) un volume dimensionné pour cet usage ;
- 2) un confort d'ambiance physiologique ;
- 3) une protection contre les agents extérieurs ;
- 4) une capacité à utiliser un certain nombre d'outils ;
- 5) une possibilité de s'isoler ou de rejoindre la collectivité ;
- 6) un accès aux services présents sur le site ;
- 7) une certaine valorisation sémiologique du bâtiment.

La fonction relative à la protection implique, par exemple, une réflexion qui concerne la résistance mécanique des éléments. La fonction relative aux outils, permettrait de considérer, en fonction de l'usage, les types d'outils disponibles en phase d'exploitation pour les usagers. Les divers indicateurs devront être formulés en accord avec les informations limitées de l'étape de pré-design.

Un autre développement possible de la méthode concerne l'intégration de la notion de robustesse. En effet nous l'avons définie, mais nous nous sommes concentrés sur l'évaluation de la pertinence. A travers la formulation de scénarios de variation associés à l'incertitude caractérisant le pré-design, il serait donc possible d'itérer la méthode afin d'élaborer l'évaluation de la robustesse, ainsi que la comparaison entre diverses solutions de pré-design. Cela pourrait être développé dans un environnement paramétrique permettant de faciliter la définition des paramètres variables.

Enfin, d'autres développements pourront concerner le changement d'échelle, en passant du bâtiment à l'échelle de l'ilot et du quartier. Sur le plan méthodologique cela impose un réaménagement des indicateurs et des méthodes et des modèles d'évaluation des divers critères, qui devront s'adapter à la nouvelle échelle contextuelle.

L'ensemble de ces développements constitue un axe de recherche permettant d'améliorer le processus de construction visant à la garantie de performance, à travers la réalisation d'un outil de commissionnement dédié au pré-design.

## Références

- Addington, D. M., & Schodek, D. L. (2005). *Smart Materials and New Technologies - For architecture and design professions*. Oxford: Architectural Press.
- ADEME. (2010). *Histoire de la recherche sur l'enveloppe du Bâtiment, de l'habitat bioclimatique au bâtiment à énergie positive. Rôle de l'ADEME*. ADEME.
- Aelenei, D., Aelenei, L., & Vieira, C. P. (2016). Adaptive Façade: Concept, Applications, Research Questions. *Energy Procedia*(91), 269-275.
- Aelenei, L., Brzezicki, M., Knaack, U., Luible, A., Perino, M., & Wellershoff, F. (2015). *Adaptive Facade Network – Europe*. TU Delft Open for the COST Action 1403 adaptive facade network.
- AFNOR. (2002). NF EN ISO 7726 Ergonomie des ambiances thermiques - Appareils de mesure des grandeurs physiques.
- AFNOR. (2011). NF EN 12464-1 Lumière et éclairage - Éclairage des lieux de travail - Partie 1 : lieux de travail intérieurs.
- AFNOR. (2013). NF X35-103 Ergonomie - Principes d'ergonomie applicables à l'éclairage des lieux de travail.
- AFNOR. (2014). *NF EN 1325 Management de la valeur - Vocabulaire - Termes et définitions*.
- AFNOR. (2017). ISO 12345 : Acoustique du bâtiment - Calcul de la performance acoustique des bâtiments à partir des performances des éléments.
- AFNOR. (2017). NF EN 16798-3 Performance énergétique des bâtiments - Ventilation des bâtiments - Partie 3 : pour bâtiments non résidentiels - Exigences de performances pour les systèmes de ventilation et de climatisation (Modules M5-1, M5-4).
- AFNOR. (2017c). NF EN ISO 52003-1 - Performance énergétique des bâtiments - Indicateurs, exigences, appréciations et certificats - Partie 1 : aspects généraux et application à la performance énergétique globale.
- Altomonte, S., & Luther, M. B. (2006). A Roadmap to Renewable Adaptive Recyclable A Roadmap to Renewable Adaptive Recyclable. *PLEA-25th Conference on Passive and Low Energy Architecture*, (p. 14). Geneve.
- Ang, G., Groosman, M., & Scholten, N. (2007). Dutch performance-based approach to building regulations and public procurement. *Building Research & Information*(33), 107-119.
- AQC. (2017). *Bâtiment : bien utiliser les textes de référence dès la conception*. Pôle Prévention Construction. Paris: Agence Qualité Construction. Consulté le Mai 2018, sur

<http://www.qualiteconstruction.com/sites/default/files/2017-11/PT-Batiment-Bien-Utiliser-Textes-Reference.pdf>

- Arantes, L. (2013). *L'intégration des données énergétiques dans la conception architecturale située*. Thèse de doctorat en matériaux, mécanique, génie civil, électrochimie, Université de Grenoble. Récupéré sur <https://tel.archives-ouvertes.fr>
- Arditi, D., Elhassan, A., & Toklu, Y. C. (2002). Constructability Analysis in the Design Firm. *Journal of Construction Engineering and Management*, 117–126.
- Aschehoug, Ø., & Perino, M. (2009). *Annex 44 Integrating Environmentally Responsive Elements in Buildings; Expert Guide – Part 2 Responsive Building Elements*. Aalborg University.
- ASHRAE. (2013a). ASHRAE Standard 55-2013 Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. Atlanta, GA: ASHRAE: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
- ASHRAE. (2013b). Standard 90.1 Appendix G, The Performance Rating Method. Atlanta, GA: ASHRAE: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
- ASHRAE. (2016). ASHRAE Standard 62.1-2016 Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality. Atlanta, (GA): ASHRAE: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
- Attia, S. (2017). Evaluation of adaptive facades: The case study of Al Bahr Towers in the UAE. *QScience Connect , Shaping Qatar's Sustainable Built Environment – 2*, 12.
- Attia, S., Favoino, F., Loonen, R., Petrovski, A., & Monge-Barrio, A. (2015). Adaptive Façades System Assessment: An initial review. *10th Conference on Advanced Building Skins* (pp. 1275-1283). Bern: Munich: Economic Forum.
- Attia, S., Gratia, E., De Herde, A., & Hensen, J. (2012). Simulation-Based Decision Support Tool for Early Stages of Zero-Energy Building Design. *Energy and Buildings*, 2–15.
- Awbi, H. B. (2015). Ventilation and air distribution systems in buildings. *Front. Mech. Eng.*, 1, 4 pp. Consulté le Octobre 2018, sur <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmech.2015.00004/full>
- Azarian, A., & Pollet, Y. (2016). *Analyse fonctionnelle des systèmes*. les Presses de l'Ecole des Mines.
- Bansac, F. (2017). *De la Conception à la Construction: Guide pour l'Architecture de Bâtiments*. Architecte de Bâtiments. Récupéré sur [www.architecte-batiments.fr](http://www.architecte-batiments.fr)
- BCA. (2017). *Code of practice on Buildability*. Singapore: Building Construction Authority. Consulté le Mai 2018, sur <https://www.bca.gov.sg/BuildableDesign/others/cop2017.pdf>
- Berglund, B., Lindvall, T., & Schwela, D. H. (1999). Guidelines for Community Noise. London: WHO World Health Organization.
- Bovill, C. (1991). *Architectural Design: Integration of Structural and Environmental Systems*. New York: Van Nostrand Reinhold.

- Boxer, E., Henze, G. P., & Hirsch, A. (2017). A Model-Based Decision Support Tool for Building Portfolios under Uncertainty. *Automation in Construction*(78), 34-50.
- BPIE. (2011). *Europe's buildings under the microscope, a country-by-country review of the energy performance of buildings*. Buildings Performance Institute Europ (BPIE).
- Brager, G. S., & De Dear, R. J. (1998). Thermal adaptation in the built environment: a literature review. *Energy and Buildings, Volume 27, Issue 1*, 83-96.
- Brand, S. (1994). *How buildings learn: What happens after they're built*. New York: Penguin.
- Brand, S. (1994). *How buildings learn: What happens after they're built*. New York: Penguin.
- Brans, J., & Mareschal, B. (2005). PROMETHEE methods. Dans J. Figueira, S. Greco, & M. Ehrgott, *Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys*. New York: Springer.
- BRE. (1986). *BRE Digest 310 Estimating daylight in buildings: Part 2*. (B. R. Establishment, Éd.) Garston: Littlefair P.J.
- BREEAM. (2016). *BREEAM Interantional New Construction*. Technical Manual. Consulté le Septembre 2018, sur <http://www.breeam.com>
- Browning, T. (2001). Applying the design structure matrix to system decomposition and integration problems: a review and new directions. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 48(3), 292–305.
- Building and Construction Authority. (2017b). *Facade Access Design Guide*. Singapore: Building and Construction Authority. Récupéré sur [https://www.bca.gov.sg/PerformanceBased/others/DM\\_FADG\\_2017.pdf](https://www.bca.gov.sg/PerformanceBased/others/DM_FADG_2017.pdf)
- Burroughs, H. E., & Hansen, S. J. (2011). *Managing indoor air quality*. Lilburn: Fairmont Press.
- Busby Perkins & Will and Stantec Consulting. (2007). *Roadmap for the Integrated Design Process*. Consulté le Juin 2017, sur <http://www.greenspacencr.org/events/IDRoadmap.pdf>
- Capasso, A. (2006). *Costruire per abitare. Conoscere e governare l'organismo architettonico dalla programmazione alla dismissione. Tecnologia architettura didattica*. Aracne Editore.
- Carlucci, S. (2013). *Thermal Comfort Assessment of Buildings*. Milan: Springer.
- Carlucci, S., Causone, F., De Rosa, F., & Pagliano, L. (2015). A review of indices for assessing visual comfort with a view to their use in optimization processes to support building integrated design. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 47, 1016-1033.
- CAUE92. (2018, Septembre). *Acteurs et étapes de la conception et de la construction d'un bâtiment*. Récupéré sur [http://www.caue92.fr/IMG/pdf/tableau\\_construction\\_copiel-2.pdf](http://www.caue92.fr/IMG/pdf/tableau_construction_copiel-2.pdf)
- Celebi, G. (2011). Development of a Building System. *Journal of Polytechnic*, 14(3), 14 pp.
- CEN. (2007). *Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics*. Brussels: European Standardization Committee.

- CEN/TC 350. (2004). NF P 01-010 : Qualité environnementale des produits de construction - Déclaration environnementale et sanitaire des produits de construction. Comité Européen de Normalisation.
- Certivea. (2015). *Référentiel Pour La Qualité Environnementale Des Bâtiments – Bâtiments Tertiaires*.
- Certivea. (2016). *HQE Batiment Durable - Synthèse de L'offre Benchmark et Services d'accompagnement*. Document de synthèse.
- Charleson, A. W. (1998). Aesthetics of Architectural Structure and Services Integration. *The 32nd International ANZAScA Conference*, (pp. 145-150). Wellington,. Consulté le Juillet 2016, sur <http://anzasca.net/wp-content/uploads/2014/08/ANZASCA-1998-Charleson-AestheticsStructureServicesIntegration.pdf>
- Chien, S. F., & Wang, H. J. (2014). Smart Partition System - A Room Level Support System for Integrating Smart Technologies into Existing Buildings. *Frontiers of Architectural Research*, 3(4), 376–385.
- CII. (1986). *Constructability: A Primer*. Austin: Construction Industry Institute.
- CII. (1993). *Constructability Implementation Guide*. University of Texas at Austin. Austin: Construction Industry Institute.
- CII. (2012). *CII Best Practices Guide: Improving Project Performance, Version 4.0*. Austin: Construction Industry Institute.
- CIIA. (1993). *Constructability Principles File*. Construction Industry Institute of Australia.
- Cinelli, M., Coles, S. R., & Kirwan, K. (2014). Analysis of the potentials of multi criteria decision analysis methods to conduct sustainability assessment. *Ecological Indicators*, 138 - 148.
- CIRIA. (1983). *Buildability : An assessment*. London: Construction Industry Research and Information Association.
- CLEA. (2015). *Resultats du projet de recherche CLEA Confort Lumière Energie Ambiance*. Consulté le Octobre 2018, sur <http://www.guide-clea.fr/>
- Commings, D. E., & v. Meier, A. (1978). Classes of Acoustical Comfort in Housing. *Commission of the European Communities. EUR 5618 EN. Environment and quality of life*.
- Construction Management Committee of the ASCE. (1991). Constructability and Constructability programs: White Paper. *J. Constr. Eng. Manage.*, 117(1), 67–89.
- Corrado, V., & Mechri, H. (2009). Uncertainty and Sensitivity Analysis for Building Energy Rating. *Journal of Building Physics*, 33(2), 1744-2591.
- COSTIC. (2008). *Memento du commissionnement pour des équipements techniques aux qualités durables*. Hawaii Communication. Récupéré sur [https://www.costic.com/sites/default/files/upload/rapport/memento\\_commissionnement\\_costic\\_2008.pdf](https://www.costic.com/sites/default/files/upload/rapport/memento_commissionnement_costic_2008.pdf)

- Cuperus, Y. (2001). An Introduction to Open Building. *Proceedings of the 9th Annual Conference of the International Group for Lean Construction*, (p. 10).
- Davies, M. (1981). A Wall for all seasons + Uses for glass in building. *Riba Journal-Royal Institute of British Architects*(88), 55-57.
- De Dear, R. J., & Brager, G. S. (2002). Thermal comfort in naturally ventilated buildings: revisions to ASHRAE Standard 55. *Energy and buildings*, vol. 34, n° 6,, 549-561.
- De Dear, R. J., Brager, G. S., & Cooper, D. (1997). *Developing an Adaptive Model of Thermal Comfort and Preference. Final Report, ASHRAE RP-884*. ASHRAE.
- De Dear, R., & Brager, G. S. (1998). Developing an Adaptive Model of Thermal Comfort and Preference. *ASHRAE Transactions 104 (Part 1)*, 1–18.
- De la Bretesche, B. (2000). *La Méthode APTE : analyse de la valeur, analyse fonctionnelle*. Editions Pétrelle.
- Del Grosso, A. E., & Basso, P. (2013). Design concepts for adaptive multi-functional building envelopes. *Proceedings of the 6th ECCOMAS thematic conference on smart structures and materials, SMART2013*. Turin, Italy.
- Deniz, O. S., & Ekinci, S. (2016). A Decision-Making Process for Selecting Building Envelope Assemblies. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 549 - 555.
- Dewidar, K. M., & Mohamed, N. M. (2013). Living Skins: A New Concept of Self Active Building Envelope Regulating Systems. *SB13*, (p. 8). Dubai.
- Donnarumma, G., & Fiore, P. (2016). A Multi-Criteria Model for the Comparison of Building Envelope Energy Retrofits. *Technologies and Materials for Renewable Energy, Environment and Sustainability* (pp. 186 - 194). Paris, France: AIP Conference Proceedings.
- Duffy, F. (1990). Measuring building performance. *Facilities*, 8(5), 17 pp.
- Durmisevic, E. (2006). *Transformable building structures: design for disassembly as a way to introduce sustainable engineering to building design & construction*. Technische Universiteit Delft. Delft: Cedris M&CC.
- Echeverry, D., Ibbs, C., & Kim, S. (1991). Sequencing knowledge for construction scheduling. *Journal of Construction Engineering and Management*(117), 118-130.
- European Committee for Standardization. (2002). EN 12665:2005 Light and lighting - Basic terms and criteria for specifying lighting requirements.
- European Committee for Standardization. (2011). EN 12464-1:2002 Light and lighting - Lighting of work places - Part 1: Indoor work places.
- European Parliament and Council. (2010). Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings. 13-35. Off J Eur Union L153.

- Fadoul, A., Tizani, W., & Koch, C. (2017). Constructability Assessment Model for Buildings Design. *Proceedings of the 24th EG-ICE International Workshop on Intelligent Computing in Engineering 2017*, (pp. 86-95). Nottingham.
- Fanger, P. O. (1970). *Thermal comfort: analysis and applications in environmental engineering*. Copenhagen: Danish Technical Press.
- Favoino, F., Giovannini, L., & Loonen, R. (2017a). Smart Glazing in Intelligent Buildings: What Can We Simulate? *GPD Glass Performance Days 2017*, (pp. 8-15). Tampere, Finland.
- Favoino, F., Jin, Q., & Overend, M. (2017b). Design and control optimisation of adaptive insulation systems for office buildings . Part 1 : Adaptive technologies and simulation framework. *Energy*, 127, 301-309.
- Fox, M., & Yeh, B. (1999). Intelligent Kinetic Systems in Architecture. *Managing Interactions in Smart Environments (MANSE '99)*, (pp. 91-103). Dublin.
- Garrabé, M. (1992). Méthode d'évaluation de la pertinence d'un projet. *Tiers-Monde*, 129, 209 - 227.
- Giama, E., & Papadopoulos, A. M. (2012). Sustainable Building Management: Overview of Certification Schemes and Standards. *Advanced in Building Energy Research*, 6, 242-258.
- Gibson, E. J. (1982). *Working with the Performance Approach in Building*. Rotterdam, The Netherlands: International Council for Research and Innovation in Building and Construction, CIB Report Publication 64.
- Gobin, C. (2003). Analyse fonctionnelle et construction. *Techniques de l'Ingénieur*, 15 p. Récupéré sur <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/construction-et-travaux-publics-th3/l-environnement-societal-de-la-construction-42236210/analyse-fonctionnelle-et-construction-c3052/>
- Gobin, C. (2008). Efficience d'une construction - Contribution à un développement durable Efficience d'une construction. *Techniques de l'Ingénieur*, 12 p. Récupéré sur <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/construction-et-travaux-publics-th3/l-environnement-societal-de-la-construction-42236210/efficience-d-une-construction-c3040/>
- Gobin, C. (2009). Construction et coûts associés : vers une économie des coûts ignorés. *Techniques de l'Ingénieur*, 11 p. Récupéré sur <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/construction-et-travaux-publics-th3/l-environnement-societal-de-la-construction-42236210/construction-et-couts-associes-vers-une-economie-des-couts-ignores-c3053/>
- Gobin, C. (2010). *Réussir une construction en éco-conception : l'anticipation du cycle de vie, l'exigence de chacun des acteurs*. Paris: Presses de l'Ecole des Mines.
- Gobin, C. (2015). Enrichissement de l'analyse fonctionnelle - Apport de la construction. *Techniques de l'Ingénieur*, 11 p. Récupéré sur <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/construction-et-travaux-publics-th3/l-environnement-societal-de-la-construction-42236210/enrichissement-de-l-analyse-fonctionnelle-c3060/>

- Gobin, C. (2017a). La constructibilité - Une approche duale de la construction. *Techniques de l'Ingénieur*, 18 p. Récupéré sur <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/construction-et-travaux-publics-th3/l-environnement-et-construction-42552210/la-constructibilite-c8118/>
- Gobin, C. (2017b). Diagnostic de pertinence - Comment évaluer l'opportunité d'un projet. *Techniques de l'Ingénieur*, 15 p. Récupéré sur <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/construction-et-travaux-publics-th3/l-environnement-societal-de-la-construction-42236210/diagnostic-de-pertinence-c3059/>
- Gowri, K. (2005). Desktop Tools for Sustainable Design. *ASHRAE Journal*, 47, 42–46.
- Gramez, A., & Boubenider, F. (2017). Acoustic comfort evaluation for a conference room: A case study. *Applied Acoustics*, 118, 39-49.
- Greco, S., Matarazzo, B., & Slowiński, R. (2004). Axiomatic characterization of a general utility function and its particular cases in terms of conjoint measurement and rough-set decision rules. *Eur. J. Oper. Res.*, 158, 271–292.
- Habraken, N. J. (2002). The Uses of Levels. *Open House International*, 27(2), 1-17.
- Harputlugil, G., & Hensen, J. (2006). The relation between building assessment systems and building performance simulation. *Proceedings of the 6th Int. Postgraduate Research Conf. in the Built and Human Environment*, (pp. 333-343).
- Hasselaar, B. L. (2006). Climate adaptive skins: Towards the new energy-efficient façade. Dans C. A. Brebbia, M. E. Conti, & E. Tiezzi, *Management of Natural Resources, Sustainable Development and Ecological Hazards* (pp. 351-360). Southampton: WIT Press.
- Hauglustaine, J.-M., Francy, S., Baltus, C., & Liesse, S. (2006). *L'isolation thermique des façades verticales - Guide pratique pour les architectes*. UCL - ULg, Ministère de la Région Wallonne - DGTRE. Consulté le Juin 2017, sur <https://energie.wallonie.be/>
- Hensen, J. L., & Lamberts, R. (2011). *Building Performance Simulation for Design and Operation*. London: Spon Press.
- Heschong, L., & HMG. (2012). *Daylight Metrics - PIER Daylighting Plus Research Program*. California Energy Commission.
- Hollberg, A., Lichtenheld, T., Klüber, N., & Ruth, J. (2018). Parametric real-time energy analysis in early design stages: a method for residential buildings in Germany. *Energ. Ecol. Environ.*, 3(1), 13-23.
- Hopfe, C. J., & Hensen, J. (2011). Uncertainty analysis in building performance simulation for design support. *Energy & Buildings*, 43(10), 2798–2805.
- Hopfe, C., Struck, C., Harputlugil, G., Hensen, J., & De Wilde, P. (2005). Exploration of the use of building performance simulation for conceptual design. *proceedings of the IBPSA-NVL conference*, (p. 8). Delft.

- Hopfe, J. C., Augenbroe, G., & Hensen, J. (2013). Multi-criteria decision making under uncertainty in building performance assessment. *Building and Environment*, 69, 81-90.
- Huet, M., & Dauger, A. (2013). *Plan Bâtiment Durable, La Garantie de Performance Énergétique. Encadrement légal du risque de mise en jeu de la garantie décennale, Méthodologie pratique de la garantie de performance énergétique intrinsèque (GPEI)*. Paris: Plan Bâtiment Durable. Consulté le Mars 2018, sur <http://www.planbatimentdurable.fr>
- Ibañez-Puy, M., Vidaurre-Arbizu, M., Sacristán-Fernández, J. A., & Martín-Gómez, C. (2017). Opaque Ventilated Façades: Thermal and energy performance review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 79, 180 - 191.
- IEA. (2013). *Roadmap 2035 2040 2045 2050 Energy efficient building envelopes*. International Energy Agency, Technology, OECD/IEA.
- IES. (2013). *Approved Method: IES Spatial Daylight Autonomy (sDA) and Annual Sunlight Exposure (ASE)*. Illuminating Engineering Society.
- Imbabi, M. S., & Peacock, A. (2003). Smart breathing walls for integrated ventilation, heat exchange, energy efficiency & air filtration. *ASHRAE/CIBSE conference*, (p. 21). Edinburgh.
- Imbabi, M. S.-E. (2012). A Passive – Active dynamic insulation system for all climates. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 1(2), 247–258.
- International WELL Building Institute. (2018). *The WELL Building Standard - v1 with Q3 2018 addenda*. New York: Delos Living LLC.
- ISO. (2005). ISO 7730:2005 Ergonomics of the thermal environment - Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria. Geneva: ISO, International Organization for Standardization.
- ISO/TC 207. (2006). EN ISO 14040 : Management environnemental - Analyse du cycle de vie - Principes et cadre. Comité Européen de Normalisation.
- Iwaro, J., & Mwashia, A. (2013). The impact of sustainable building envelope design on building sustainability using Integrated Performance Model. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 2(2), 153-171.
- Jiang, L. (2016). *A constructability review ontology to support automated rule checking leveraging building information models*. Ph.D Thesis in Philosophy, The Pennsylvania State University. Récupéré sur <https://etda.libraries.psu.edu>
- Juaristi, M., Gomez-Acerbo, T., & Monge-Barrio, A. (2018). Qualitative analysis of promising materials and technologies for the design and evaluation of Climate Adaptive Opaque Facades. *Building and Environment*, 144, 482-501.
- Juran, J. M., & Godfrey, A. B. (1951). *Juran's Quality Handbook*. n.l.: McGraw Hill.
- Kifokeris, D., & Xenidis, Y. (2017). Constructability: Outline of Past, Present, and Future Research. *Journal of Construction Engineering and Management*, 143(8), 13 p. .

- Klein, T. (2013). *Integral Facade Construction. Towards a new product architecture for curtain wall*. n.l.: Architecture and Building Environment.
- Knaack, U., Klein, T., Bilow, M., & Auer, T. (2007). *Facades : Principles of Construction*. Basel: Birkhäuser Verlag AG.
- Koles, G., Hitchcock, R., & Sherman, M. (1996). *METRICS for Building Performance Assurance*. University of California. Berkley: Energy and Environment Division Lawrence Berkley National Laboratory.
- Kotireddy, R., Hoes, P.-J., & Hensen, J. L. (2018). A methodology for performance robustness assessment of low-energy buildings using scenario analysis. *Applied Energy*, 212, 428-442.
- La Maison Passive. (2016). *Bâtiments Passifs, Actifs pour plus de confort – Guide professionnel pour le bâtiment passif en France*. Paris: La Maison Passive.
- LEED. (2018). *LEED v4 for BUILDING DESIGN AND CONSTRUCTION*. n.l.: LEED. Récupéré sur [https://www.usgbc.org/sites/default/files/LEED%20v4%20BDC\\_07.2.18\\_current.pdf](https://www.usgbc.org/sites/default/files/LEED%20v4%20BDC_07.2.18_current.pdf)
- Leupen, B. (2006). *Frame and generic space*. Rotterdam: 010 Publishers.
- Liébard, A., & De Herde, A. (2005). *Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatiques*. Paris: Observ'ER.
- Illuminating Engineering Society of North America. (1993). *Lighting Handbook: Reference & Application*, 8th Edition. 355. New York.
- Loonen, R., Favoino, F., Hensen, J., & Overend, M. (2016). Review of current status, requirements and opportunities for building performance simulation of adaptive facades. *Journal of Building Performance Simulation*, 10(2), 205-223.
- Loonen, R., Rico-Martinez, J., Favoino, F., Brzezicki, M., Menezes, C., La Ferla, G., & Aelenei, L. (2015). Design for façade adaptability – Towards a unified and systematic characterization. *Proc. 10th Energy Forum - Adv. Build. Ski.* (pp. 1274–1284). Bern: Economic Forum.
- Loonen, R., Trčka, M., Cóstola, D., & Hensen, J. (2013). Climate adaptive building shells: State-of-the-art and future challenges. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 25, 483–493.
- MacLeamy, P. (2004, August). *Collaboration, Integrated Information and the Project Lifecycle in Building Design, Construction and Operation*. n.l.: Construction Users Roundtable.
- MacPherson, R. K. (1962). The assessment of the thermal environment a review. *British Journal of Industrial Medicine*, 19, 151-164.
- Mallory-hill, S. (2004). *Supporting strategic design of workplace environments with case-based reasoning*. Thèse, Technische Universiteit Eindhoven, Eindhoven.
- Manso, M., & Castro-Gomes, J. (2015). Green wall systems: A review of their characteristics. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 863-871.

- Marszal, A., Heiselberg, P., Bourrelle, J., Misall, E., Voss, K., Sartori, I., & Napolitano, A. (2011). Zero Energy Building – A review of definitions and calculation methodologies. *Energy Buildings*(43), 971-979.
- Matthews, P. (2008). A Bayesian support tool for morphological design. *Advanced Engineering Informatics*, 236-253.
- McGeorge, D., Zou, P., & Palmer, A. (2013). *Construction Management - new directions* (éd. Third). UK: Wiley-Blackwell.
- Miles, L. (1961). *Techniques of Value Analysis and Engineering*. McGraw Hill Co. publishers.
- Ministère de l'Environnement, de l'Energie et de la Mer; Ministère du Logement et de l'Habitat Durable. (2016). *Référentiel "Energie-Carbone" pour les bâtiments neufs - Niveaux de performance "Energie-Carbone" pour les bâtiments neufs*. Consulté le Octobre 2018, sur [http://www.cohesion-territoires.gouv.fr/IMG/pdf/referentiel\\_energie\\_carbone\\_niveau\\_de\\_performance.pdf](http://www.cohesion-territoires.gouv.fr/IMG/pdf/referentiel_energie_carbone_niveau_de_performance.pdf)
- Ministry of the Environment, Singapore. (1996). Guidelines for good indoor air quality in office premises. Singapore: Institute of Environmental Epidemiology, Ministry of the Environment, Singapore.
- Moghtadernejad, S., Chouinard, L. E., & Saeed Mirza, M. (2018). Multi-criteria decision-making methods for preliminary design of sustainable facades. *Journal of Building Engineering*, 19, 181-190.
- Mols, T., Blumberga, A., & Karklina, I. (2017). Evaluation of climate adaptive building shells: multi-criteria analysis. *Energy Procedia*, 128, 292–296.
- Morbiter, C. A. (2003). *Towards the integration of simulation in the Building Design Process*. PhD Thesis in Philosophy, University of Strathclyde. Récupéré sur <http://www.esru.strath.ac.uk>
- Nagy, Z., Svetozarevic, B., Jayathissa, P., Begle, M., Hofer, J., Lydon, G., & Willmann, A. (2016). The Adaptive Solar Facade : From concept to prototypes. *Front. Archit. Res.*, 5(2), 143-156.
- Negendahl, K. (2015). Building performance simulation in the early design stage: An introduction to integrated dynamic models. *Automation in Construction*, 54, 39-53.
- NF EN 15459-1. (2017, Juillet). Performance énergétique des bâtiments - Procédure d'évaluation économique des systèmes énergétiques des bâtiments - Partie 1 : méthode de calcul, Module M1-14 - Systèmes de chauffage et systèmes de refroidissement à eau dans les bâtiments - Performance én.
- Nima, M. A., Abdul-Kadir, M. R., & Jaafar, M. S. (2001). Constructability implementation: A survey in the Malaysian construction industry. *Construction Management and Economics* , 19, 819-829.
- Ochoa, C. E., & Capeluto, I. G. (2008). Strategic decision-making for intelligent buildings: Comparative impact of passive design strategies and active features in a hot climate. *Build. Environ.*, 43, 1829–1839.

- Ogwezi, B., Bnsar, R., Cook, G., & Sakula, J. (2011). Multifunctional, Adaptable Facades. *TSBE EngD Conference* (p. 10). University of Reading: TSBE Centre.
- Østergård, T., Jensen, R. L., & Maagaard, S. E. (2016). Building simulations supporting decision making in early design – A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, *61*, 187-201.
- Pacheco-Torgal, F., Lambrincha, J., Diamanti, M., & al. (2015). *Biotechnologies and biomimetics for civil engineering*. Springer.
- Panopoulos, K., & Papadopoulos, A. M. (2017). Smart facades for nonresidential buildings: an assessment. *Advances in Building Energy Research*, *11*(1), 26-36.
- Picco, M., Lollini, R., & Marengo, M. (2014). Towards Energy Performance Evaluation in Early Stage Building Design : A Simplification Methodology for Commercial Building Models. *Energy & Buildings*, *76*, 497–505.
- Preiser, W., Vischer, J. C., & al. (2005). *Assessing Building Performance*. Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann.
- Pushkar, S., & Verbitsky, O. (2015). Analyzing the Shearing-Layer Concept Applied to Urban Green System. *International Journal of Civil and Environmental Engineering*, *9*(8), 1062 - 1068.
- Ramzy, N., & Fayed, H. (2011). Kinetic systems in architecture: New approach for environmental control systems and context-sensitive buildings. *Sustain. Cities Soc.*, *1*(3), 170-177.
- Rasmussen, B., & Rindel, J. H. (2003). Sound insulation of dwellings - Legal requirements in Europe and subjective evaluation of acoustical comfort. *Proceedings DAGA*, 118-121.
- Reinhart, C. (2001). *Daylight availability and manual lighting control in office buildings - Simulation studies and analysis of measurement*. Freiburg: Germany Fraunhofer Institute.
- Rey Gozalo, G., Trujillo Carmona, J., Barrigón Morillas, J. M., Vélchez-Gómez, R., & Gómez Escobar, V. (2015). Relationship between objective acoustic indices and subjective assessments for the quality of soundscapes. *Applied Acoustics*, *97*, 1-10.
- Rezaallah, A., Bolognesi, C., & Khoraskani, R. (2012). LEED and BREEAM ; Comparison between policies, assessment criteria and calculation methods. *Conference: BSA 2012 – Proceedings of the 1st International Conference on Building Sustainability Assessment*, (p. 10). Porto.
- RIBA. (2013). *Plan of Work 2013 Overview*. Récupéré sur <https://www.ribaplanofwork.com>
- Roozenburg, N., & Eekels, J. (1995). *Product Design: Fundamentals and Methods*. n.l.: Wiley-Blackwell.
- Rosenstein, F., Bibet-Chevalier, A., Billon, V., Huet, C., Lebreton, P., Pierre, B., . . . Jandon, M. (2017). *Les premiers résultats de l'Observatoire des Contrats de Performance Énergétique*. Récupéré sur <https://www.ademe.fr>
- Roy, B. (1996). *Multicriteria Methodology for Decision Aiding*. n.l.: Kluwer Academic Publishers.
- Rush, R. D. (1986). *The building systems integration handbook*. New York: The American Institute of Architects and John Wiley & Sons.

- Russell-Smith, S., Lepech, M., Fruchter, R., & Littman, A. (2015). Impact of progressive sustainable target value assessment on building design decisions. *Building and Environment*, 85, 52–60.
- Saaty, T. (1980). *The Analytic Hierarchy Process*. New York: McGraw-Hill.
- Saaty, T. (1990). *The Analytic Hierarchy Process – planning, priority setting, resource allocation*. Pittsburgh: RWS Publications.
- Salazar, G., & Brown, D. (1988). The Effects of Construction Knowledge on the Automation of Preliminary Building Design. *Proceedings 5th International Symposium on Robotics in Construction*. Tokyo.
- Santamouris, M. (2003). *Solar Thermal Technologies for Buildings: The State of the Art*. London: James & James.
- Sattrup, P. A., & Bjørn, S.-A. J. (2011). A Methodological Study of Environmental Simulation in Architecture and Engineering. Integrating Daylight and Thermal Performance across the Urban and Building Scales. *Proceedings of the Symposium on Simulation for Architecture and Urban Design*, (pp. 115–23).
- Schmidt III, R., & Austin, S. (2016). *Adaptable Architecture, theory and practice*. London and New York: Routledge.
- Schmidt III, R., Deamer, J., & Austin, S. (2011). Understanding adaptability through layer dependencies. *International Conference on Engineering Design ICED11*, (p. 12 pp). Technical University of Denmark.
- Sebesta Blomberg and Associates, Inc. (2013). *Whole Buildign Commissionin Process Manual*. Washington: U.S. Departement of Veterans Affairs, Office of Construction and Facilities.
- Setién, I. N. (2014). Towards an open and user driven housing architecture Layers Principle, Infrastructure Types and Technical Devices. *I Congreso Internacional de Vivienda Colectiva Sostenible*, (pp. 96–101). Barcelona.
- Siegel, J. A. (2016). Primary and secondary consequences of indoor cleaners. *Indoor Air — International Journal of Indoor Environment and Health*, 26, 88-96.
- Slaughter, E. S. (2001). Design strategies to increase building flexibility. *Building Research & Information*, 29(3), 208-217.
- Ślowiński, R., Greco, S., & Matarazzo, B. (2002). Axiomatization utility decision-rule of utility, outranking and decision preference models for multiple-criteria classification problems under partial inconsistent with the dominance principle. *Control Cybernetics*, 31, 1005–1035.
- Smith, L. (2012). Beyond the Shoebox: Thermal Zoning Approaches for Complex Building Shapes. *ASHRAE Transactions*, 118 Issue 2, 141 -148.
- Stamatiadis, N., Sturgilla, R., & Amiridi, K. (2017). Benefits from Constructability Reviews. *Transportation Research Procedia*, 2889–2897.
- Stasse, F. (2002). *La Véritable Histoire de la Grande Bibliothèque*. Paris: Editions du Seuil.

- Struck, C. (2012). *Uncertainty Propagation and Sensitivity Analysis Techniques in Building Performance Simulation to Support Conceptual Building and System Design*. PhD Thesis in Building Physics and Systems, Technische Universiteit, Eindhoven. Récupéré sur <https://pure.tue.nl>
- Struck, C., & Hensen, J. (2007). On supporting design decisions in conceptual design addressing specification uncertainties using performance simulation. *proceedings in Building Simulation 2007*, (pp. 1434–1439).
- Struck, C., Almeida, M., Silva, S., Mateus, R., Lemarchand, P., Petrovski, A., . . . de Wit, J. (2015). Adaptive facade systems – review of performance requirements, design approaches, use cases and market needs. *Proc. 10th Energy Forum - Adv. Build. Ski.* (pp. 1254-1264). Bern: Economic Forum.
- Szigeti, F., & Davis, G. (2005). *Performance based building : conceptual framework*. n.l.: Performance Based Building Thematic Network. Consulté le Juin 2017, sur <http://www.irbnet.de/daten/iconda/CIB22199.pdf>
- UNI. (1981). UNI 8290-1 Edilizia residenziale. Sistema tecnologico. Classificazione e terminologia.
- Urban, B., & Glicksman, L. (2006). The MIT design advisor – a fast, simple tool for energy efficient building design simulation – user interface simulation – graphical results. *National, Second, and IBPSA-USA Conference, August 2-4*, (pp. 270-276). Cambridge MA.
- Van Dijk, E. J., & Luscuere, P. G. (2002). An Architect Friendly Interface for a Dynamic Building Simulation Program. *Sustainable Building 23-25 Sept. 2002*, (p. 6). Oslo .
- Van Moeseke, G. (2013). *Pour des projets de qualité énergétique. Proposition d'actualisation des approches de l'énergie en architecture sur base des principes du développement soutenable*. Thèse en Architecture et Climat, Université catholique de Louvain.
- Velázquez Romo, E. E. (2015). *Processus de conception énergétique de bâtiments durables*. Thèse de Doctorat, École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers Spécialité “ Conception ”, Bordeaux.
- Wang, J. J., Beltrán, L. O., & Kim, J. (2012). From Static to Kinetic : A Review of Acclimated Kinetic Building Envelopes. *Proceedings of the solar conference* (pp. 4022-4029). Denver: ASES.
- Wankanapon, P., & Mistrick, R. G. (2011). Roller shades and automatic lighting control with solar radiation control strategies. *BUILT*, 1(1), 36-42. Consulté le Septembre 2018, sur <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.208.7805&rep=rep1&type=pdf>
- Wei, W., Ramalho, O., & Mandin, C. (2015). Indoor air quality requirements in green building certifications. *Building and Environment*, 92, 10–19.
- WHO. (1986). EURO Reports and Studies 103: Indoor air quality research. Copenhagen: World Health Organization Regional Office for Europe.
- Wigginton, M., & Harris, J. (2002). *Intelligent Skins*. Oxford: Butterworth-Heinemann.

- Wilkins, C. R., & Hosni, M. H. (2011, May). Plug Load Design Factors. *ASHRAE Journal*, 53(5), 30-34.
- Yitmen, I., & Akyel, S. (2005). Challenges of best practices for constructability implementation: North Cyprus construction industry. *Proceedings of 11th joint CIB international symposium, combining forces advancing facilities management and construction through innovation. Understanding construction business and companies in the new millennium*, (pp. 85–96). Helsinki, Finland.
- Zhang, C., Zayed, T., Hijazi, W., & Alkass, S. (2016). Quantitative Assessment of Building Constructability Using BIM and 4D Simulation. (S. R. Inc., Éd.) *Open Journal of Civil Engineering*, 6(3), 442-461.



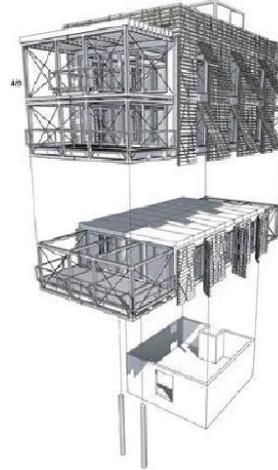


## ANNEXE A – Fiches des découpages recensés

## FICHE 1 : UNI 8290-1981 (norme Italienne) (UNI, 1981)

### Sous-systèmes :

1. *Struttura portante* – Structure
2. *Chiusure* – Enveloppe
3. *Partizione interna* – Partitions internes
4. *Partizione esterna* – Partitions externes
5. *Impianto di fornitura servizi* – Equipements de services
6. *Impianto di sicurezza* – Equipements de sécurité
7. *Attrezzatura interna* – Outils internes
8. *Attrezzatura esterna* – Outils externes



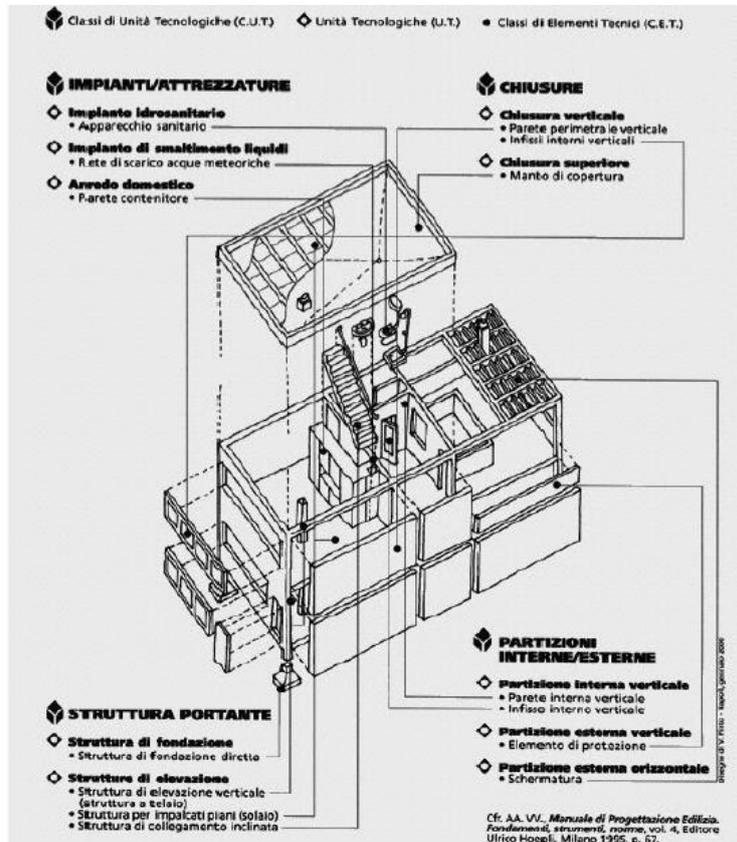
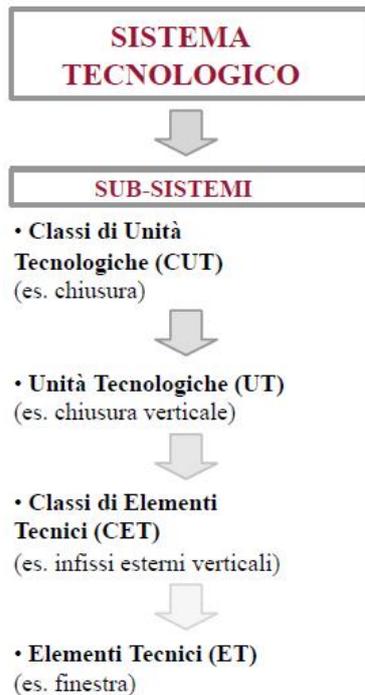
## SYSTEME BATIMENT



**Système Environnementale (UNI 7867)**  
performance d'ambiance - méta projet

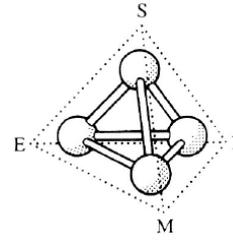
**Système Technologique (UNI 8290)**  
performance des composants - projet

**Norma UNI 8290-1:1981**  
Edilizia residenziale – Sistema  
Tecnologico – Classificazione e  
terminologia



Sous-systèmes :

1. *Structure* – Structure
2. *Envelope* – Enveloppe
3. *Mechanical* – Equipements
4. *Interior* – Environnement intern

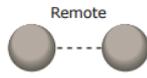


➤ **Analyse sur l'intégration des sous-systèmes** (Celebi, 2011) (Altomonte & Luther, 2006) (Charleson, 1998) (Bovill, 1991)

**Integration Levels**

**Definitions**

**1. Remote: systems are physically separated from one another but yet still coordinated functionally**



Remote

**2. Touching: One system rests on another**



Touching

**3. Connected: one system is mechanically fastened and dependent on another**



Connected

**4. Meshed: systems occupy the same space**



Meshed

**5. Unified: systems share the same physical elements**



Unified

Five Levels of Integration  
Image by MIT OCW.

Figure A-1: niveaux d'intégration par Rush

Bovill (Bovill, 1991) développe le concept d'intégration entre la structure et les systèmes des services.

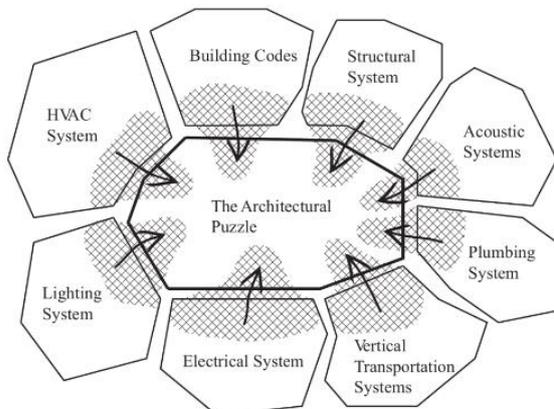


Figure A-2 : Modèle d'intégration par Bovill

➤ **Performance à atteindre**

- Spatiale
- Thermique
- Qualité de l'air
- Acoustique
- Visuelle
- Intégrité du bâtiment

**Roof Assembly:**

Roof structure and structural deck (S)  
Roofing (E)  
Ceiling (I)  
Lighting (MI)

**Wall Assembly:**

Wall structure (the support plus any lateral bracing, shear panels, or sheathing) (S)  
Exterior wall covering (EI)  
Windows and doors (EI)  
Interior wall covering (I)

**Interior Floor Assembly:**

Interior floor structure and floor deck (S)  
Floor covering (I)  
Furniture and interior partitions (I)  
Ceiling below (I)  
Lighting below (MI)

**On-grade Floor Assembly:**

Floor structure (S)  
Floor covering (I)  
Membrane, vapor barrier (E)  
Mechanical subsystems (M) (electricity, piping, and wiring), wherever they occur

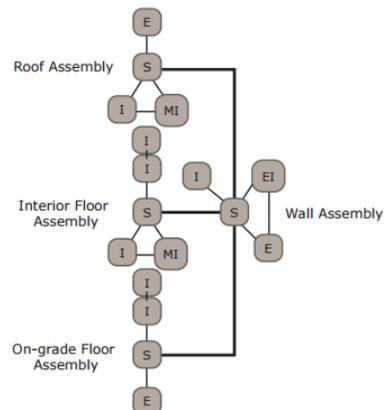


Figure A-3 : Diagramme d'intégration

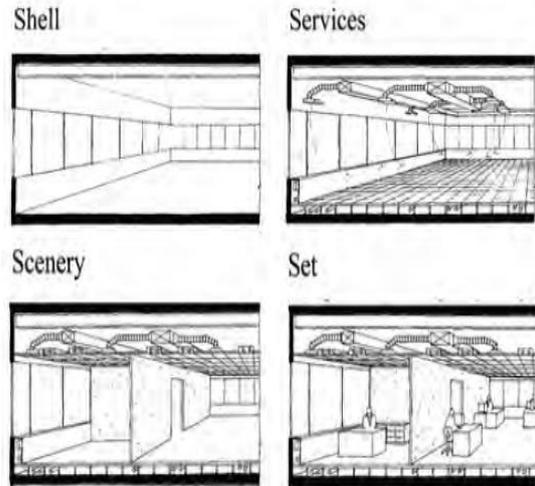
### FICHE 3 : Duffy 1990 (Duffy, 1990)

#### Sous-systèmes :

1. *Shell* – Structure et Enveloppe
2. *Services* – Equipements
3. *Scenery* – Partitions intérieures
4. *Set* – Finitions

#### ➤ *Shearing Layers*

- **Shell** : structure qui dure pendant la durée de vie du bâtiment (50 – 30 ans)
- **Services** : câblage, plomberie, climatisation, ascenseurs, qui doivent être remplacés environ après 15 ans ;
- **Scenery** : disposition des divisions, faux plafonds, etc., qu'il faut changer chaque 7-5 ans ;
- **Set** : changement des meubles par les occupants, (1 mois – 1 semaine)



### FICHE 4 : Slaughter 2001 (Slaughter, 2001)

#### Sous-systèmes :

1. *Structure* - Structure
2. *Exterior enclosure* - Enveloppe
3. *Services* - Equipements
4. *Interior finish systems* - Parachèvements

#### ➤ *Flexibilité et Adaptabilité*

Slaughter (Slaughter, 2001) analyse le système bâtiment et propose son découpage dans le cadre de la flexibilité et l'adaptabilité du système. Autour du même enjeu est développé le travail de Durmisevic (Durmisevic, 2006) qui analyse l'industrialisation du système à travers un travail sur les interfaces et leurs degrés d'importance.

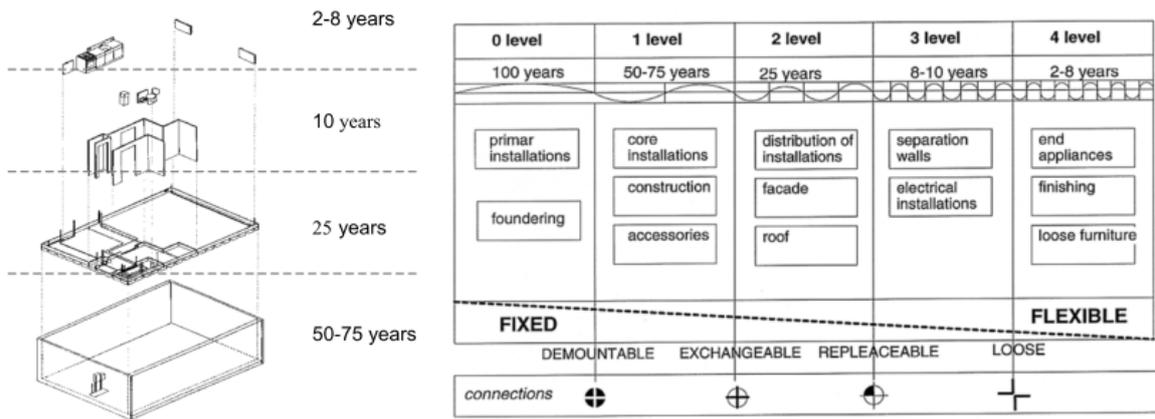


Figure A-4 : proposition de systématisation du système et des interfaces en accord avec les différents cycles de vie (Durmisevic, 2006).

**FICHE 5 : Habraken 1998** (Habraken, 2002)

**Sous-systèmes :**

1. *Skeleton/ base building* - Structure
2. *Infill/ fit-out* - Aménagements

➤ *Open building*

Le concept « *Open Building* » (Cuperus, 2001) a été développé par Habraken (Habraken, 2002). Il s'agit d'une approche de conception, reconnue au niveau international comme une vague architecturale. Les bâtiments et les quartiers ne peuvent pas être vus comme des artefacts statiques, même si stable pendant une longue période, donc il faut prévoir des « mises à jour » sociales et techniques pour garder leur attractivité, fonctionnalité sécurité<sup>39</sup>. D'une part Habraken introduit les principes de « *Open Building* » et d'autre part il suggère les différents niveaux de prise de décision Figure A-5

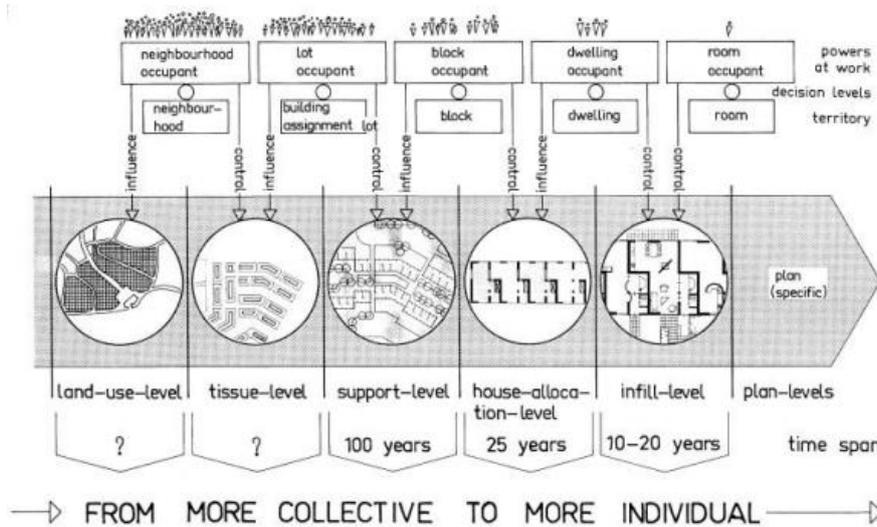


Figure A-5 : niveaux de prise de décision

Les composants clés de « *Open Building* » sont :

- **Support /skeleton/ base building** : Il comprend la structure principale, l'enveloppe, la circulation avec aussi les sorties de sécurité, les supports mécaniques des équipements ce niveau limite et comprend le niveau inférieur des aménagements (*infill*).
- **Infill /fit-out** : configuration globale des parts physiques à service de chaque usage

*The idea of distinct Levels of intervention in the built environment, such as those represented by "base building" and "fit-out", or by urban design and architecture.*

*The idea that users / inhabitants may make design decisions as well as professionals.*

*The idea that, more generally, designing is a process with multiple participants also including different kinds of professionals.*

*The idea that the interface between technical systems allows the replacement of one system with another performing the same function. (such as different fit-out systems applied in a given base building.)*

*The idea that built environment is in constant transformation and change must be recognized and understood.*

*The idea that built environment is the product of an ongoing, never ending design process, in which environment transforms part by part.*

Figure A-6 : les idées à la base de *Open Building*



Figure A-7 : MATURA System

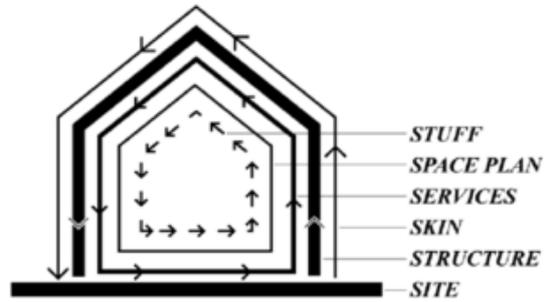
A partir des idées à la base de « *Open Building* » (Figure A-6), Habraken et Van Randen ont développé MATURA system (Figure A-7) (Chien & Wang, 2014)

<sup>39</sup> Stephen KENDALL sur le concept de « *Open Building* » <http://open-building.org/ob/concepts.html>

**FICHE 6 : Brand 1994 (Brand, 1994)**

**Sous-systèmes :**

1. *Site* – Site
2. *Structure* - Structure
3. *Skin* - Enveloppe
4. *Services* – Services Equipements
5. *Scenery* – Partitions intérieures
6. *Stuff* – Meubles



➤ *Shearing Layers*

- **Site** : contexte géographique, localisation urbaine, parcelle, dont le contour survit à la génération de bâtiments.
- **Structure** : les fondations et les parties qui soutiennent les charges (30 – 300 ans)
- **Skin** : Surfaces extérieurs aujourd’hui change chaque 20 an.
- **Services** : « intestin » équipements du bâtiment (7 – 15 ans)
- **Space plan** : disposition intérieure, (30 ans - 3 ans)
- **Stuff** : meubles (1mois)

➤ *Cadre organisationnel*

Par rapport aux sous-systèmes de Brand, Sattrup réalise un lien entre les composants et proposent une méthodologie d’organisation en fonction des variables de conception (Figure A-8) (Sattrup & Bjørn, 2011).

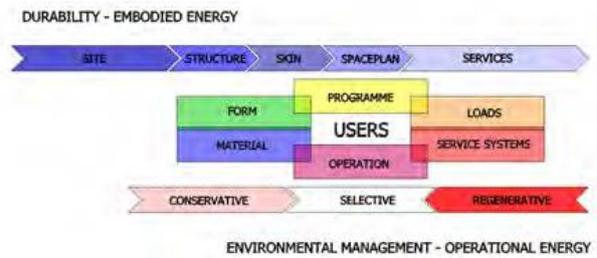


Figure A-8 : Conception intégrant le bâtiment et le cadre opérationnel. Les domaines peuvent être décrits à travers des variables spécifiques Erreur ! Source du renvoi introuvable.

➤ *Influence des sous-systèmes sur les labels (Pushkar & Verbitsky, 2015)*

Par rapport aux sous-systèmes de Brand, Pushkar et Verbitsky réalisent un lien entre chaque sous-système et les critères de certification, comme LEED BREEAM et CASBE, pour évaluer l’influence de chaque composant sur les critères environnementaux considérés dans les labels à l’échelle quartier.

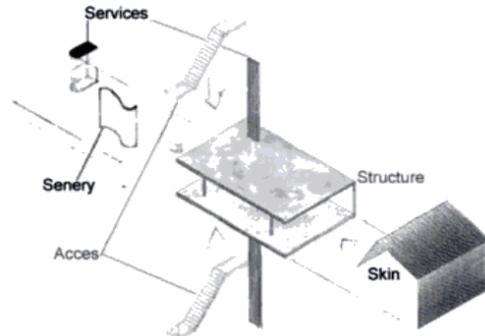
TABLE I  
LEED v4 FOR NEIGHBORHOOD DEVELOPMENT SEPARATION OF MAXIMUM AVAILABLE POINTS TO THE RELEVANT SHEARING LAYERS

Symbol	Credit name	Layers					
		Building Layers 11.25			Service Layers 19.75		
		Si <sup>b</sup>	St <sup>b</sup>	Sk <sup>b</sup>	Se <sup>b</sup>	Sp <sup>b</sup>	Stt <sup>b</sup>
GIB <sup>a</sup>	total points: 31	5	2.5	3.75	13.25	1.25	5.25
GIB P1	certified green building	0	0	0	0	0	0
GIB P2	minimum building energy performance			0	0		
GIB P3	indoor water use reduction				0		
GIB P4	construction activity pollution prevention	0					
GIB c1	certified green building	1	1	1	1	0.5	0.5
GIB c2	optimized building energy performance			0.5	1.5		
GIB c3	indoor water use reduction				1		
GIB c4	outdoor water use reduction	0.5			1		0.5
GIB c5	building reuse		0.5	0.5			
GIB c6	historic resource preservation and adaptive reuse			1		0.5	0.5
GIB c7	minimized site disturbance	1					
GIB c8	rainwater management	2					2
GIB c9	heat island reduction	0.5		0.5			
GIB c10	solar orientation		1				
GIB c11	renewable energy production				3		
GIB c12	district heating and cooling				2		
GIB c13	infrastructure energy efficiency				1		
GIB c14	wastewater management				2		
GIB c15	recycled and reused infrastructure						1
GIB c16	solid waste management			0.25	0.25	0.25	0.25
GIB c17	light pollution reduction				0.5		0.5

Figure A-9 : Lien entre les critères du LEED ND et les sous-systèmes (Pushkar & Verbitsky, 2015)

Sous-systèmes :

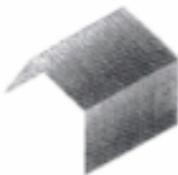
1. *Structure* - Structure
2. *Skin* - Enveloppe
3. *Services* - Equipements
4. *Scenery* – Parachèvements
5. *Access* - Circulation



➤ *Découpage*



*Structure* : transmet les charges au sol



*Skin* : Sépare l'intérieur de l'extérieur et en même temps présente le bâtiment à l'extérieur



*Scenery* : organise l'espace à l'intérieur



*Services* : règlent les flux d'eau, énergie, information et air et comprennent



*Access* : s'occupe de l'accessibilité aux espaces et/ou aux maisons individuelles.

➤ *Déconnexions*

Les niveaux ne sont pas autonomes ni indépendants, ils deviennent indépendants si entre eux il y a une disjonction.

Leupen définit :

**Disjonction** : pour être indépendant les sous-systèmes doivent être disjoints et physiquement séparés. En architecture la disjonction complète n'est pas réaliste.

**Articulation** : l'autonomie d'un composant peut être incrémentée par l'articulation. Le bâtiment est un assemblage de composants articulés entre eux. L'articulation assure un niveau de flexibilité à l'artefact.

**Excision** : quand il y a une disjonction, il y a une excision (Figure A-10). L'excision marque le bord où les composants étaient liés. Il faut définir quel composant a été débranché de l'autre, le lieu de la disjonction et le degré de connexion qui demeure pour chaque composant.

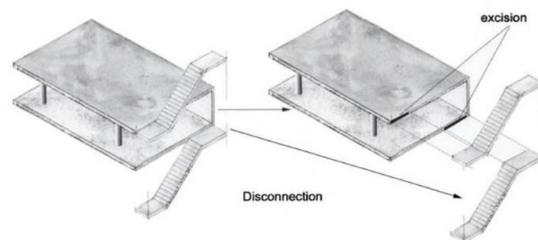


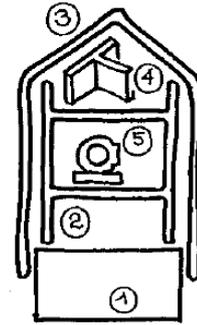
Figure A-10 : Disjonction et excision

A travers des cas d'études Leupen analyse les sous-systèmes et leur lien (Leupen, 2006)

## FICHE 8 : Découpage fonctionnel (Gobin, 2003)

### Sous-systèmes :

1. *Adaptation*
2. *Structure*
3. *Enveloppe*
4. *Partition*
5. *Équipement*
6. *Parachèvement*



### ➤ *Découpage*

<b>1- Adaptation</b>	Ensemble de composants permettant l'insertion dans le site et les divers branchements aux réseaux.
<b>2 – Structure</b>	Composants permettant de superposer les surfaces d'activité.
<b>3 – Enveloppe</b>	Composants permettant de mener des activités en dehors des intempéries (hors d'eau et hors d'air).
<b>4 – Partition</b>	Ensemble des composants délimitant les zones d'activités et de ceux en permettant l'accès.
<b>5 – Équipement</b>	Ensemble des composants permettant l'usage des outils et assurant l'énergie nécessaire pour le maintien de l'ambiance.
<b>6 – Parachèvement</b>	Ensemble des composants qui assurent la finition de chaque sous-ensemble précédent.

Figure A-11: Spécification des sous-systèmes fonctionnels

### ➤ *Définition des fonctions d'usage*

Fonctions d'usage	Apport des composants constructifs
<b>Espace</b>	Contribution à la matérialisation de l'espace dans sa géométrie et la délimitation de ses formes
<b>Ambiance</b>	Contribution au maintien du niveau des performances de confort
<b>Protection</b>	Contribution à la protection des personnes et à la sécurité des biens
<b>Biens &amp; outils</b>	Contribution au bon fonctionnement des différents équipements
<b>Maîtrise des relations</b>	Contribution pour filtrer et contrôler l'accès entre une personne et les autres
<b>Intégration au site</b>	Contribution pour bénéficier des services disponibles sur le site sans y porter préjudice
<b>Sémiologie</b>	Conditions de rendu : choix des matériaux dans leur texture, leur toucher, leur aspect, leur couleur mais également ergonomie

Figure A-12 : Apports des composants constructifs aux fonctions d'usage

### ➤ *L'analyse fonctionnelle*

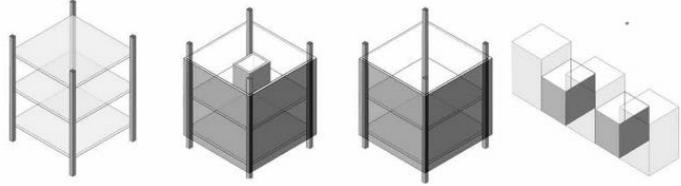
L'intérêt de l'analyse fonctionnelle est de permettre un **référencement des ouvrages** qui ne soit pas lié à des corps de métiers (les moyens) mais qui corresponde **aux services rendus** (les attentes).

Le résultat s'articule suivant **deux niveaux** : la définition de six sous-ensembles génériques (Fig. 14) puis l'analyse de chacun d'eux. Le bâtiment est vu comme un support à la réalisation des **fonctions d'usage** (Figure A-12)

## FICHE 9 : Israel Hagore Setién 2014 (Setién, 2014)

### Sous-systèmes :

1. *Skeleton* - Structure
2. *Envelope* - Enveloppe
3. *Services* - Services
4. *Infills* - Aménagements
5. *Open Space* - Espace ouvert



### ➤ « *Open Buildings* » et infrastructures

Setién reprend et intègre le découpage de Habraken (Habraken, 2002), et, en conséquence le concept de « Open Building ». Son objectif est de montrer les opportunités liées au découpage et introduire le concept d'infrastructure. Le terme infrastructure est utilisé par rapport à des composants du bâtiment fixes et collectifs. Enfin il propose des solutions techniques pour chaque infrastructure.

### Types d'infrastructures :

#### ▪ Infrastructure comme Structure

L'infrastructure comprend les éléments qui transmettent les charges et les accès, le reste des composants (partitions, façade etc.) appartient à l'Aménagement. (Par exemple : maisons autonomes dans bâtiment multiétage).

#### ▪ Infrastructure comme Enveloppe

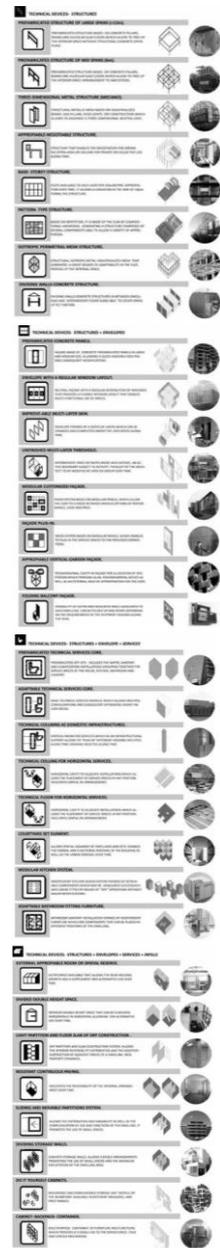
Les enclosures extérieures deviennent l'infrastructure et représentent le bâtiment. Deux phases de construction : infrastructure enveloppe et partition de l'espace. 4 aspects fondamentaux : 1) conception du périmètre et de l'enveloppe, 2) la relation entre la hauteur entre les dalles et la profondeur des dalles, 3) la position des services et les éléments d'accès (ascenseurs, escaliers, gaines techniques), 4) le système structural. Possibilité de réaliser une optimisation des espaces à travers la subdivision des plans ouverts.

#### ▪ Infrastructure comme Services

Dans cette situation, les services (cuisine, salle d'eau) deviennent part du système infrastructurel avec la façade les accès et la structure. Cette vision permet une conception qui démarre avec un positionnement stratégique de ces composants, pour être libre après de concevoir au mieux le projet et faciliter la disposition des gaines techniques.

#### ▪ Infrastructures avec Espace Ouvert

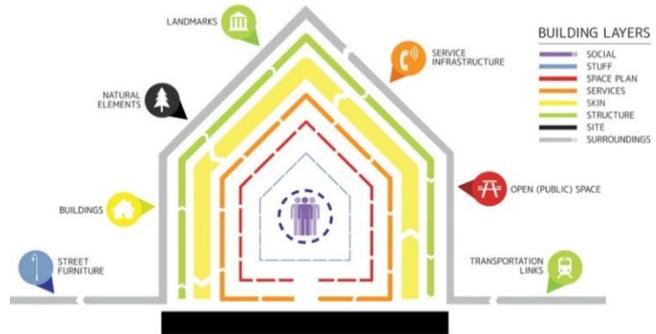
L'infrastructure est un espace ouvert qui peut être pensé en fonction de l'usage en prévoyant la flexibilité d'usage. Cet espace ouvert n'est pas en commun avec toutes les infrastructures du bâtiment mais sa prise en compte est importante pour considérer la possibilité d'extension de la maison. Cet espace n'est pas juste un espace (interne ou externe) mais une zone suggestive où prévoir de l'occupation (terrasses, toitures etc. que après peuvent être divisées).



**FICHE 10 : Schmidt III Austin 2016 (Schmidt III & Austin, 2016)**

**Sous-systèmes :**

1. *Surroundings* - Environnement
2. *Site* - Site
3. *Structure* - Structure
4. *Skin* - Enveloppe
5. *Services* - Services
6. *Space plan*- Partitions intérieures
7. *Stuff*– Meubles
8. *Social* - Sociale



➤ *Découpage et adaptabilité*

Schmidt III (Schmidt III, et al., 2011) réalise le lien entre les composants de Brand et les six formes d'adaptabilité. Ce lien permet de comprendre comment un bâtiment peut évoluer dans le temps (Tableau A-1). Ensuite l'auteur développe le découpage de Brand en considérant autres deux *layers* : *Social* (milieu humain) et *Surroundings* (contexte extérieur). Ces sous-systèmes peuvent encore être déclinés en sous-systèmes.

Stratégie	Type de changement	Layer(s)	Fréquence de changement
Ajustable	Tâche	<i>Stuff</i>	Elevée
Versatile	Espace	<i>Stuff, Space</i>	Elevée
Réaménageable	Performance	<i>Space, Service, Skin</i>	Modérée
Convertible	Fonction	<i>Space, Service, Skin</i>	Modérée
Echelonnable	Dimension	<i>Space, Service, Skin, Structure</i>	Modérée/ Basse
Déplaçable	Emplacement	<i>Structure, Site</i>	Basse

Tableau A-1 - Adaptabilité et layers (Schmidt III, et al., 2011)

➤ *Relations entre niveaux*

Parallèlement l'étude de Schmidt se concentre aussi sur les relations entre les sous-systèmes, le type de connections et les stratégies envisageables en phase de conception. L'outil utilisé pour définir les relations est la *Dependency Structure Matrix* (DSM) (Schmidt III & Austin, 2016).

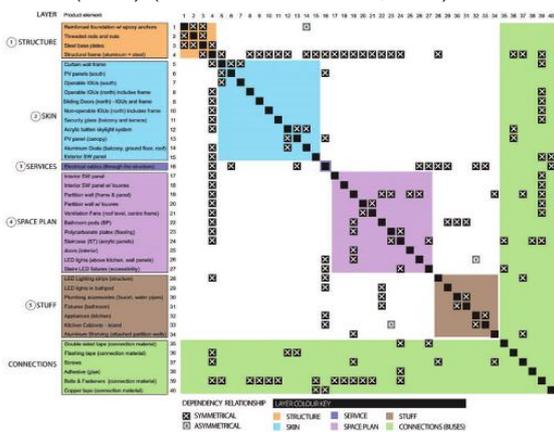


Figure A-13 - DSM initiale

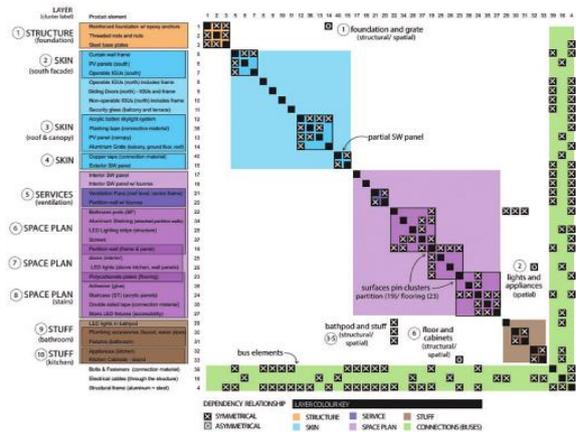


Figure A-14 - DSM après manipulation

## ANNEXE B – Indicateurs et normes de référence pour le critère CC5

La norme EN 15251 (CEN, 2007) définit, entre autre, quatre catégories de bâtiments pour lesquels il faudra assurer des niveaux de confort plus ou moins importants (Tableau B-1).

Tableau B-1 - Description des catégories de bâtiment considérés dans la (CEN, 2007)

Catégories	Explications
I	Niveau élevé attendu qui est recommandé pour les espaces occupés par des personnes très sensibles et fragiles avec des exigences spécifiques comme des personnes handicapées, malades, de très jeunes enfants et des personnes âgées
II	<b>Niveau normal attendu qu'il convient d'utiliser pour les bâtiments neufs et les rénovations</b>
III	Niveau modéré acceptable attendu qui peut être utilisé dans les bâtiments existants
IV	Valeurs en dehors des critères des catégories ci-dessus, Il convient que cette catégorie soit acceptée seulement pour une partie restreinte de l'année

Pour une meilleure compréhension des indicateurs choisis, nous tenons, à présenter dans cette section certains des indicateurs disponibles en littérature et considérés par les normes, accompagnés par leurs modèles d'évaluation correspondantes. Ces indicateurs sont pris en compte par les modèles considérés dans la méthode d'évaluation proposée.

## B. 1 – Confort thermique

Le confort thermique peut se définir comme « la condition d'esprit exprimant une satisfaction par rapport à l'environnement thermique » (ASHRAE, 2013a). Cet état peut être influencé par les des différences individuelles en termes d'humeur, personnalité et culture, ou par autres facteurs sociaux, individuels, organisationnels. MacPherson (MacPherson, 1962) a classifié les métriques relatives au confort thermique en trois catégories :

- celles basées sur la mesure des paramètres physiques de l'environnement ;
- celles basées sur la mesure de l'effet physiologique produite par l'environnement ;
- celles basées sur le calcul de l'échange thermique entre l'occupant et l'environnement.

La première classe de métrique, est basée sur la mesure directe des paramètres caractérisant l'ambiance thermique, qui sont généralement analysés à l'aide de régressions linéaires. Un exemple de ces métriques directes sont la température équivalente, la température de globe noir et la température opérative come dans l'Eq. B-1. (Carlucci, 2013). La température opérative est la température uniforme d'un espace fermé où l'occupant échangerait la même quantité de chaleur par rayonnement et par convection que dans l'environnement réel non uniforme.

$$T_{opérative} = \alpha \cdot T_{air} + (1 - \alpha) \cdot T_{moyenne\ radiante} \quad \text{Eq. B-1}$$

Les valeurs du coefficient  $\alpha$  peuvent se déterminer à travers le Tableau B-2, dans lequel elles sont reportées en fonction de la vitesse de l'air :

Tableau B-2 - Valeur du coefficient  $\alpha$  en fonction de la vitesse de l'air (CEN, 2007)

Valeur de la vitesse de l'air (m.s <sup>-1</sup> )	< 0,2	0,2 < v < 0,6	0,6 < v < 1,0
Valeur du coefficient $\alpha$	0,5	0,5	0,7

La température opérative est donc, généralement considérée comme la moyenne entre la température moyenne radiante des parois et la température de l'air.

Les métriques basées sur la pression physiologique ont été développées à travers la corrélation d'une vaste gamme de conditions environnementales et des paramètres comportementaux avec

L'effet thermique produit sur des individus. La détermination de ces métriques a été réalisée en exposant un échantillon de personnes à diverses conditions environnementales et en se basant sur le constat que à condition de stress environnemental égal correspond un effet physiologique égal. La relation, entre les divers paramètres et l'effet produit, peut donc, s'exprimer sous forme d'une équation de régression multiple. (MacPherson, 1962). Les métriques relatives à cette famille peuvent dépendre de plusieurs paramètres environnementaux. Les plus simples ou leurs versions simplifiées, concernent jusqu'à deux paramètres à la fois et elles peuvent être représentées dans le diagramme psychrométrique comme des régions ou des zones (Carlucci, 2013).

Les métriques se basant sur le bilan thermique du corps humain s'expliquent à travers le calcul de l'échange entre le l'occupant et l'environnement. Cela concerne la combinaison des paramètres physiologiques (par exemple la température moyenne de la peau), comportementales (par exemple le métabolisme selon le type d'activité et la résistance thermique des vêtements), et les paramètres physiques de l'environnement (température de l'air, température moyenne radiante des parois, vitesse de l'air et humidité relative) (Carlucci, Thermal Comfort Assessment of Buildings, 2013). La majorité de ces indicateurs ont été développés en étudiant la sensation thermique des personnes placées dans une chambre climatique (à conditions contrôlés), habillées avec diverses combinaisons de vêtements et en réalisant diverses activités.

Jusqu'à présent, on distingue deux grandes théories (approches) du confort thermique :

- La théorie du confort statique : décrite parfois comme approche rationnelle ou encore l'approche par bilan thermique, elle provient d'essais réalisés en chambre test.
- La théorie du confort adaptatif : ayant pour but d'évaluer le confort sous des conditions plus réelles, elle provient de tests effectués sur site.

La théorie du confort statique communément appelée, approche de l'équilibre thermique, est basée sur les expériences de Fanger (Fanger, 1970) dans une chambre climatique sur un total de 1296 sujets. Dans ces études, les occupants étaient invités à porter des vêtements standardisés ainsi qu'à respecter une activité bien précise. Les occupants été exposés à différents conditions environnementales et ils étaient invités à exprimer leur sensation de confort thermique sur l'échelle représenté en Figure B-1.

Froid	Frais	Légèrement frais	Neutre	Légèrement tiède	Tiède	Chaud
-3	-2	-1	0	1	2	3

Figure B-1 - Echelle des sept sensations thermiques (ISO, 2005)

Le modèle de Fanger combine les théories de l'équilibre thermique avec la thermorégulation physiologique pour déterminer une plage de températures de confort ou l'occupant se sentirait confortable.

Pour quantifier la sensation de confort des occupants d'un bâtiment, P.O Fanger a créé deux indicateurs : le PMV et le PPD.

On définit le PMV (*Predicted Mean Vote*), prédiction du vote moyen, comme un indice qui donne la valeur moyenne des votes, par rapport à la sensation thermique ressentie, d'un groupe de personnes sur l'échelle de sensation thermique définie ci-dessus

- Si la valeur du PMV est 0, la valeur du PMV est optimale ;

- Si elle est négative, la température ambiante est plus basse que la température souhaitée ;
- Inversement, si elle est positive, elle est plus élevée.

On définit le PPD (*Predicted Percentage of Dissatisfied*), comme le pourcentage de personnes qui ne sont pas satisfaites par l'ambiance thermique, car elles la considèrent soit trop chaude soit trop froide. Les occupants insatisfaits sont définis comme ceux qui exprimeraient une note « hot », « warm », « cool » ou « cold » sur l'échelle des sensations thermique (ISO, 2005). C'est pourquoi, le PPD peut se calculer en fonction du PMV à travers l'Eq. B-2 .

$$PPD = 100 - 95 \cdot \exp(-0,03353 \cdot PMV^4 - 0,2179 \cdot PMV^2) \quad \text{Eq. B-2}$$

Même dans les conditions optimales de confort, il restera toujours 5% d'insatisfaits.

Pour les modèles de calcul des deux indices on renvoie à la norme NF EN ISO 7730 (ISO, 2005)

Les deux indices peuvent être utilisés pour la conception des bâtiments chauffés et climatisés.

Pour une combinaison fixée activité/vêtement, une humidité relative de 50 % fixée et des vitesses d'air faibles, il est possible d'établir une plage correspondante des températures opératives et d'exprimer les critères sous la forme d'une plage de température. Pour la conception et le dimensionnement, il convient de prendre en compte des critères supplémentaires pour l'ambiance thermique (courant d'air, gradients verticaux de température d'air, température du sol, asymétrie de la température rayonnante) (ISO, 2005).

Pour la conception de bâtiments chauffés et climatisés de catégorie II du Tableau B-3 (niveau normal attendu pour les bâtiments neufs et les rénovations) de la norme (CEN, 2007), il est recommandé d'avoir une valeur du PPD n'excédant pas 10% et un PMV compris entre -0,5 et 0,5.

Tableau B-3 - Valeurs recommandées de PPD et PMV dans la conception des nouveaux bâtiments

Catégorie	Etat thermique global du corps	
	PPD %	Vote Moyen Prévisible
II	< 10	- 0,5 < PMV < 0,5

Les températures dans le Tableau B-4 représentent des températures opératives (AFNOR, 2002) pour les charges nominales aux conditions climatiques de base. Le plus souvent la température moyenne de l'air ambiant peut être utilisée comme température de calcul, mais s'il se trouve dans la pièce de grandes surfaces dont la température diffère notablement de la température de l'air il est recommandé d'utiliser la température opérative. La température de conception moyenne peut être différente des valeurs présentées afin de prendre en compte, par exemple, l'habitude locale ou le désir d'économiser l'énergie tant que la variation journalière par rapport à la température de conception se situe dans la plage donnée et que les occupants ont le temps et l'opportunité de s'adapter à la température de conception modifiée.

Tableau B-4 - Exemples de températures intérieures de base recommandées pour la conception des bâtiments et des systèmes de chauffage, de ventilation et de climatisation (CEN, 2007)

Type de bâtiment ou d'espace - Catégorie	Température opérative °C	
	Minimum pour le chauffage (saison hivernale) ~ 1,0 clo <sup>40</sup>	Maximum pour le rafraîchissement (saison estivale) ~ 0,5 clo
<u>Bureau individuel</u> (fermé) <u>Bureau paysagé</u> (ouvert) <u>Salle de réunion</u> <u>Auditorium</u> <u>Cafeteria/Restaurant</u> Sédentaire ~ 1,2 met <sup>41</sup>	20	26

L'approche adaptatif pour l'évaluation du confort, représente une suite de l'approche statique. Elle intègre dans le modèle l'influence des paramètres sociaux (âge, genre, statut économique) ; contextuels (conception du bâtiment ; fonction du bâtiment ; saison ; climat ; etc.) et cognitifs (préférence et attentes) (De Dear & Brager, 1998). Le modèle est donc capable de prendre en compte l'adaptation de l'occupant à l'environnement thermique dans lequel il se trouve. L'adaptation peut être principalement de trois types (De Dear & Brager, 2002) : 1) Adaptation physiologique, relative à l'autorégulation du corps humain à une stimulation thermique ; 2) adaptation psychologique, qui ne peut pas directement être détectée, mais qui représente « la mesure dans laquelle l'habituation et l'attente modifient la perception et la réaction à l'information sensorielle » et 3) adaptation comportementale, qui concerne les actions réalisées par les occupants afin d'atteindre un bon niveau de confort thermique (Brager & De Dear, 1998).

La mise en évidence des limites concernant l'approche statique pour des bâtiments naturellement ventilés a porté ensuite à la proposition d'un algorithme mettant en relation la température de confort et la température de l'air extérieur (De Dear, et al., 1997).

La norme EN 15251 (CEN, 2007) reporte l'algorithme d'évaluation de limites supérieures et inférieures de la température opérative calculée en fonction de la température moyenne glissante des jours précédents pour chaque catégorie de bâtiment, comme représenté en Figure B-2.

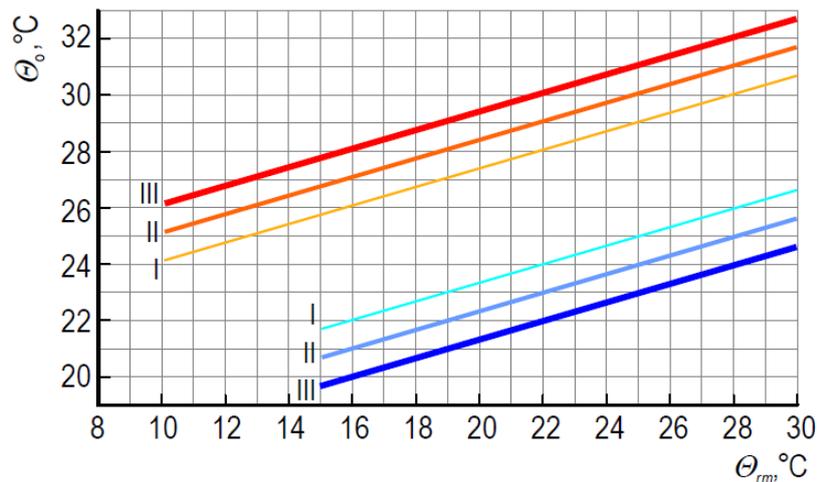


Figure B-2 - Valeurs de conception de la température opérative  $\theta_o$  pour bâtiment sans climatisation en fonction de la température extérieure moyenne glissante  $\theta_m$  (CEN, 2007)

<sup>40</sup> L'unité conventionnelle de résistance thermique pour la vêtue (1 clo = 0,155 m<sup>2</sup>K/W)

<sup>41</sup> L'unité conventionnelle pour l'activité métabolique (1met = 58 W/m<sup>2</sup>)

Les limites pour la catégorie II sont exprimées dans l'Eq. B-3 :

$$\theta_{i,max} = 0,33 \theta_{rm} + 18,8 + 3$$

$$\theta_{i,min} = 0,33 \theta_{rm} + 18,8 - 3$$

Eq. B-3

$\theta_{i,max}$  : limite supérieure de la température opérative intérieure en °C

$\theta_{i,min}$  : limite inférieure de la température opérative intérieure en °C

$\theta_{rm}$  : température journalière extérieure glissante moyenne en °C.

Ces limites s'appliquent pour la limite haute si  $10\text{ °C} < \theta_{rm} < 30\text{ °C}$  et pour la limite basse si  $15\text{ °C} < \theta_{rm} < 30\text{ °C}$ . Au-dessus de  $25\text{ °C}$ , ces graphes sont basés sur une base de données restreinte.

Il convient d'appliquer les limites de température suivantes en saison chaude dans les bâtiments non climatisés :

- $\theta_{rm} < 10\text{ °C}$  : utiliser pour la limite supérieure, les mêmes valeurs que pour les bâtiments climatisés ;
- $\theta_{rm} < 15\text{ °C}$  : utiliser pour la limite inférieure, les mêmes valeurs que pour les bâtiments climatisés

De la même façon que l'EN 15251, la norme américaine ASHRAE 55 (ASHRAE, 2013a), propose l'intégration du confort adaptatif pour des bâtiments naturellement ventilés. Cependant son utilisation a été restreinte pour les conditions suivantes : bâtiment sans climatisation ni ventilation mécanique ; le système de chauffage est désactivé ; des métabolismes entre 1 met et 1,3 met ; des résistances thermiques des vêtements entre 0,5 clo et 1 clo ; et enfin des températures extérieures (moyenne journalière) exclusivement entre  $10\text{ °C}$  et  $33\text{ °C}$ . Dans ce cas, les conditions de confort sont alors traduites en graphe avec des limites d'acceptabilités fixées à 80% et à 90 % (Figure B-3).

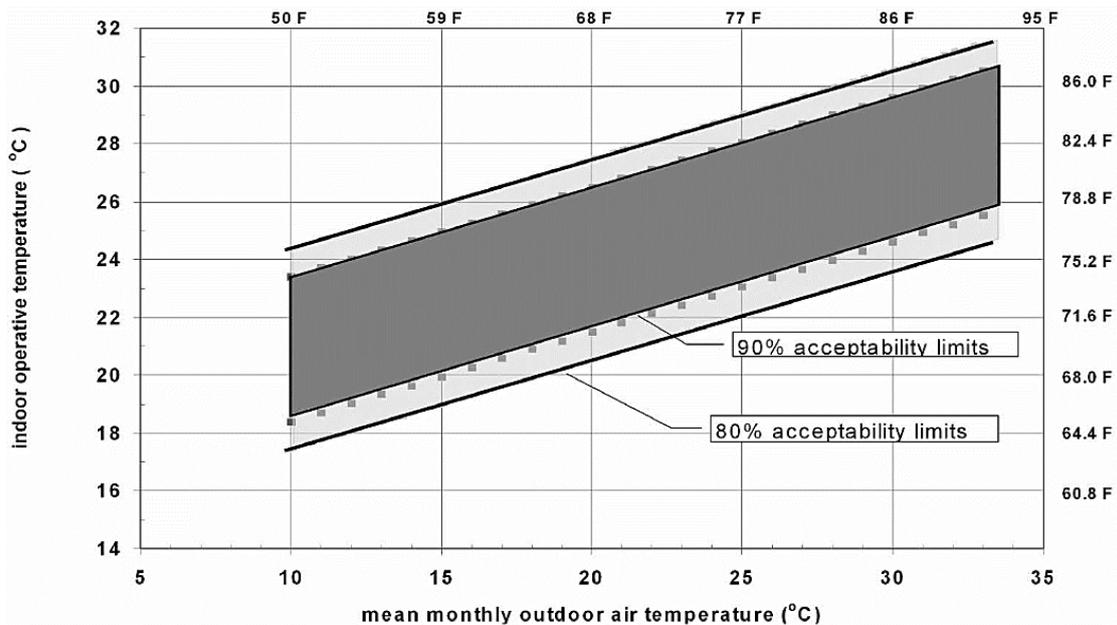


Figure B-3 - Températures acceptables pour les bâtiments naturellement ventilés selon (ASHRAE, 2013a)

## B. 2 – Confort visuel

Le confort visuel est défini par les standard européen EN 12665 (European Committee for Standardization, 2002) comme «une condition subjective de bien-être visuel apportée par l'environnement visuel». Cela dépend principalement de trois facteurs : 1) la physiologie de l'œil humain ; 2) les paramètres physiques capables de décrire la quantité de lumière et sa distribution dans l'espace ; 3) l'émission spectrale de la source de lumière (Carlucci, et al., 2015).

Au-delà du Code du Travail qui impose les exigences minimums réglementaires, la normalisation a établi et met à jour un certain nombre de normes relatives au confort visuel. Deux normes sont importantes à retenir ici : la norme (AFNOR, 2011) relative à l'éclairage intérieur des lieux de travail et la norme NF X35-103 (AFNOR, 2013) relative à l'ergonomie de la vision. La première définit les exigences auxquelles doit satisfaire une installation d'éclairage pour que la tâche visuelle des personnels s'effectue dans de bonnes conditions, tandis que la seconde décrit des principes ergonomiques et une méthode visant à définir les éléments essentiels à l'éclairage des lieux de travail.

Le confort visuel est généralement étudié à travers l'évaluation des facteurs caractérisant la relation entre les exigences de l'occupant et l'environnement lumineux. Le standard européen EN 12646-1 (AFNOR, 2011) reporte les paramètres principaux qui déterminent l'environnement lumineux par rapport à l'éclairage artificiel et naturel, c'est-à-dire les grandeurs photométriques listées ci-dessous (Figure B-4).

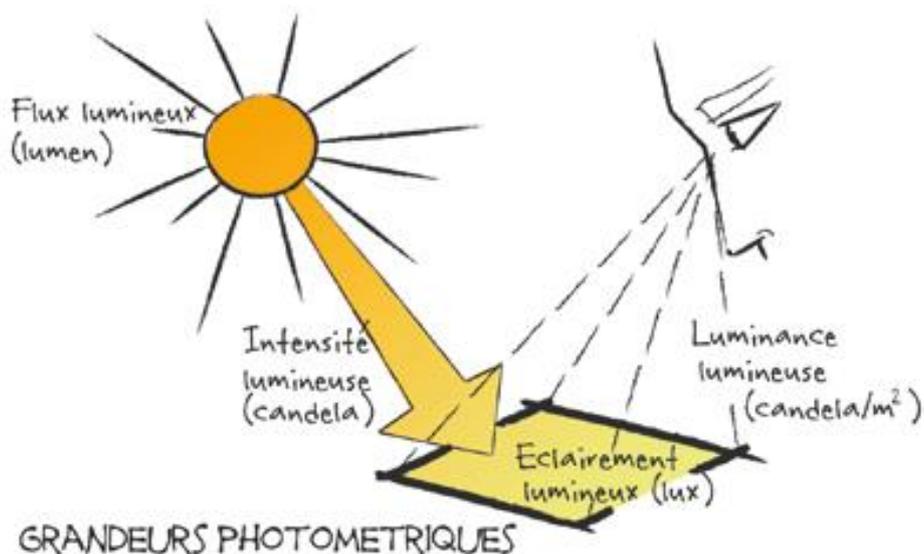


Figure B-4 – Représentation des grandeurs photométriques

- Le flux lumineux est la puissance lumineuse émise par une source dans toutes les directions. L'unité de flux lumineux est le lumen (lm).
- L'intensité lumineuse est le flux lumineux émis par une source lumineuse ponctuelle dans une direction donnée. L'unité de l'intensité lumineuse est la candela (cd).
- L'éclairage lumineux correspond à un flux lumineux reçu par unité de surface. L'unité d'éclairage lumineux est le lux (lx).

- La luminance lumineuse est l'intensité lumineuse d'une source lumineuse dans une direction donnée, divisée par l'aire apparente de cette source dans cette même direction. L'unité est la candela par mètre carré (cd/m<sup>2</sup>). La luminance lumineuse est la seule grandeur photométrique appréciable par le système visuel.

La norme liste les paramètres les plus importants qui déterminent l'ambiance lumineuse comme :

- la distribution des luminances ;
- l'éclairement ;
- la direction de la lumière et l'éclairage de l'espace intérieur ;
- la variabilité de la lumière (niveaux et couleur de la lumière) ;
- le rendu des couleurs et la couleur apparente de la lumière ;
- l'éblouissement ;
- le papillotement.

D'autre part, d'autres paramètres rentrent en jeu dans la caractérisation du confort visuel (European Committee for Standardization, 2011) comme :

- Les propriétés intrinsèques (dimension, forme, position, couleur et réflectance de détail et de contexte) ;
- La capacité ophtalmique de la personne (activité visuelle, perception de la profondeur, perception de la couleur) ;
- L'environnement lumineux intentionnellement amélioré et conçu, l'absence d'éclairement éblouissant, le bon rendu de couleur, la signalisation et les systèmes de direction optiques et tactiles pouvant améliorer la visibilité et l'orientation.

Même si ces facteurs sont en relation l'un avec l'autre, les indicateurs utilisés sont généralement focalisés singulièrement sur un de ces paramètres.

En suivant la revue proposée par Carlucci (Carlucci, et al., 2015), il est possible de distinguer quatre type principaux d'indicateurs. Les plus diffusés sont les indicateurs visant à évaluer ou prédire le risque d'éblouissement (50%), viennent ensuite des indicateurs concernant la quantité de lumière (26%), la qualité de lumière (21%) et l'uniformité de lumière (3%).

Dans ce cadre, le facteur de lumière du jour (FLJ) représente l'indicateur le plus répandu pour l'appréciation de la qualité de l'éclairage naturel d'un local. Cet indicateur exprime le ratio entre l'éclairement intérieur ( $E_{int}$ ) en un point d'un plan et l'éclairement extérieur horizontale ( $E_{ext}$ ) en site dégagé en condition de ciel couvert, en prenant donc en compte les conditions jugées les plus défavorables (comme exprimé dans l'équation Eq. B-4).

$$FLJ (\%) = \frac{E_{int}}{E_{ext}} \quad \text{Eq. B-4}$$

Le FLJ peut être déterminé à l'aide de simulations numériques ou de formules mathématiques en fonction de l'angle de ciel visible, des caractéristiques et des dimensions des vitrages et des parois

internes (BRE, 1986). L'utilisation de formules conventionnelles pour la détermination du FLJ peut être utile en phase d'esquisse mais en phase de conception il sera nécessaire de recourir à d'autres méthodes. En effet un des inconvénients de cet indicateur est qu'il ne tient pas en compte l'orientation et la position géographique du site, d'autre part, il considère la seule condition de ciel couvert. Dans le cas des simulations, selon le modèle de ciel utilisé, les écarts entre les résultats des simulations et les mesures expérimentales peuvent demeurer très importants (Reinhart, 2001). La prise en compte d'autres métriques et de méthodes de calculs avancées est donc indispensable. Le FLJ ponctuel peut être évalué à travers des méthodes analytiques de décomposition du FLJ en trois composantes (directe, réfléchi externe et réfléchi interne) qui sont calculées séparément. D'autre part, d'autres indicateurs, plus récents et se basant sur les simulations, commencent à être considérés. Parmi ces indicateurs on retrouve l'Autonomie spatiale en éclairage naturel (*Spatial Daylight Autonomy, sDA*) et l'Exposition Annuel au Soleil (*Annual Sunlight Exposure, ASE*) (IES, 2013). Différemment du FLJ, ces indicateurs considèrent la variation du climat dans le site et permettent l'évaluation des consommations sur l'année.

L'autonomie lumineuse (DA) est définie comme le nombre d'heures annuelles (sur une plage horaire définie, par exemple 8h-18h) qui atteignent la consigne d'éclairement sur un point de la pièce, grâce à la seule lumière naturelle. Son évaluation se base sur les données météorologiques du site et son calcul commence à être intégré dans plusieurs logiciels (Eq. B-5).

$$DA (\%) = \frac{\sum_i wf_i \cdot t_i}{\sum_i t_i} \in [0, 1] \quad \text{Eq. B-5}$$

Avec :

$$wf_i = \begin{cases} 1 & \text{si } E_{LJ} \geq E_{lim} \\ 0 & \text{si } E_{LJ} < E_{lim} \end{cases}$$

et :

$E_{LJ}$  = Eclairement horizontale d'un point, donnée par la seule lumière naturelle (lx)

$E_{lim}$  = valeur limite d'éclairement à assurer (lx)

$t_i$  = heure d'occupation dans l'année

L'autonomie spatiale lumineuse en éclairage naturel (sDA) est une métrique différente, décrivant l'approvisionnement en lumière naturelle suffisante pour un espace. Elle est définie comme « le pourcentage de surface analysée [...] rencontrant les limites inférieures d'éclairement naturel demandé dans une certaine fraction de temps dans un an » (IES, 2013).

Le calcul se fait à l'aide de la simulation en évaluant l'autonomie lumineuse pour chaque point de la grille, représentant la discrétisation de la surface d'intérêt et en réalisant une addition des valeurs des seuls points avec une autonomie lumineuse supérieure à une certaine valeur.

$$sDA_{x/y\%} (\%) = \frac{\sum_i (wf_i \cdot DA)}{\sum_i p_i} \in [0, 1] \quad \text{Eq. B-6}$$

Avec :

$$wf_i = \begin{cases} 1 & \text{si } DA \geq DA_{lim} \\ 0 & \text{si } DA < DA_{lim} \end{cases}$$

et :

$x$  = indice de référence pour la limite du niveau d'éclairement

$y$  = indice de référence pour la fraction de temps

$p_i$  = points considérés dans la grille

$DA$  = Autonomie d'éclairement pour chaque point e la grille (%)

$DA_{lim}$  = valeur limite d'autonomie d'éclairement (%)

Le *Illuminating Engineering Society* (IES) recommande un  $sDA_{300/50\%}$  pour une analyse d'une valeur suffisante de lumière naturelle. Cela représente le pourcentage des points de la surface analysée qui atteint une valeur supérieur d'éclairement de 300 lux pour au moins 50% des heures d'occupation (évalué sur une plage de 8h à 18h) pour des données météorologiques typiques annuelles du site. Cet indicateur représente la performance de la pièce dans son ensemble car relatif à la surface rencontrant les exigences.

Le calcul de l'autonomie lumineuse peut se faire, surtout en première approche et dans la phase d'esquisse, à l'aide de courbes de fréquence de dépassement de l'éclairement horizontale ou de relations entre le DA, le FLJ et l'éclairement horizontale interne demandé.

En référence au diagramme de la Figure B-5, si une salle à Paris a un FLJ moyen de 2% et la consigne est fixé à 300 lux, on peut calculer, à l'aide de la définition de base, que l'éclairement horizontal diffus extérieur sera de 15000 lux. A travers le diagramme on peut déduire que la salle aura une  $DA = 45\%$  moyenne sur l'année (en rouge dans la figure). A l'aide des données météorologiques mensuelles, il sera aussi possible d'établir la fluctuation de cette valeur pendant les divers mois. D'autre part, si l'objectif est que la salle soit autonome en lumière naturelle pour 60% du temps avec une consigne de 300 lux, il faudra dimensionner les ouvertures de façon à avoir un FLJ moyen de 2,5% environ.

Cette méthode demeure très pratique en phase d'esquisse. D'autre part, pour des résultats plus précis, l'autonomie lumineuse sera préférablement calculée à l'aide d'outils de simulations numériques qui utilisent des statistiques de données météorologiques et des algorithmes de calcul validés.

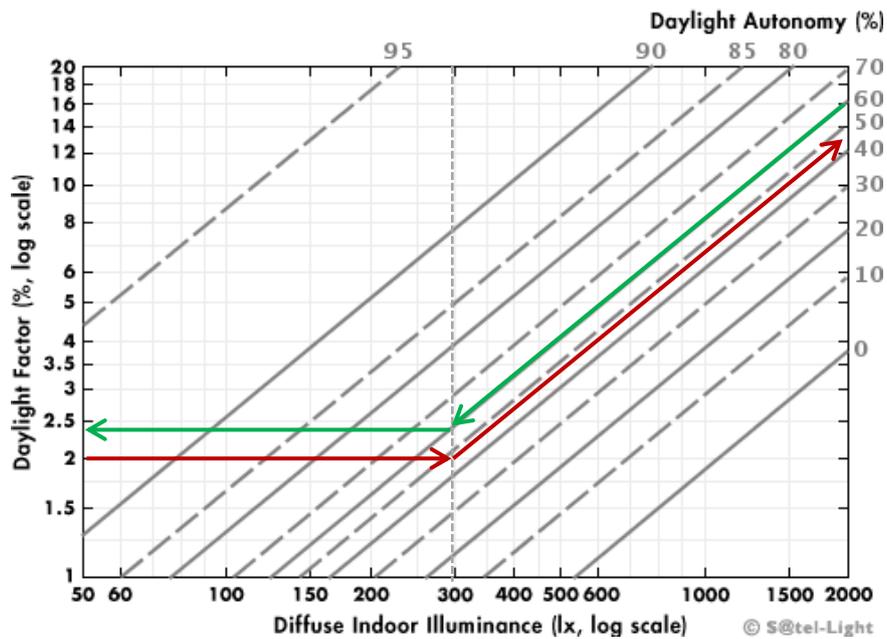


Figure B-5 – Diagramme de DA pour Paris moyenné sur l'année entre 8h et 18h avec la détermination des grandeurs

L'autre indicateur proposé par (IES, 2013), et déjà cité plus avant est le *Annual Sunlight Exposure* (ASE). L'idée sur laquelle cet indicateur se base est que l'éblouissement est provoqué par l'éclairement direct du soleil et donc qu'il sera nécessaire de le limiter. L'objectif de cette métrique est de quantifier à la fois les problèmes d'éblouissement et de surchauffe due aux apports solaires. Il est défini comme « la fraction d'une surface d'analyse [...] excédant un certain niveau d'éclairement direct solaire pour plus d'un nombre d'heures spécifié par an » (Heschong & HMG., 2012). De la même façon que le sDA, le ASE représente une fraction de la surface d'une salle déterminée en considérant l'éclairement et des valeurs temporelles. Les points sur la grille recevant au moins 1000 lux pour plus de 250 heures du temps d'occupation annuel, sont prises en compte dans le calcul du ASE. Dans ce cas l'indicateur s'écrit comme  $ASE_{1000,250}$ . Il n'y a pas des valeurs seuil pour cette métrique. En s'appuyant sur (Heschong & HMG., 2012) 10% ou plus représente un environnement insatisfaisant pour le confort visuel, 7% représente un niveau neutre et 3% un espace avec des caractéristiques évidemment acceptables. Il est ainsi recommandé d'utiliser cette méthode de calcul du ASE avant d'ajouter des protections solaires orientables capables de bloquer l'éclairement direct. Cet indicateur, par contre, ne prend pas en compte autres probables sources d'éblouissement divers de la lumière directe du soleil (Heschong & HMG., 2012).

Par rapport aux certifications de qualité environnementale des ouvrages, on peut retrouver des indicateurs et des limites pour atteindre un certain niveau de performance.

Sur la base du guide réalisé à travers le projet de recherche CLEA (Confort Lumière Energie Ambiance), les tableaux suivants proposent une synthèse des indicateurs et des aspects architecturaux à prendre en compte pour atteindre les cibles des labels concernant l'éclairage et la lumière naturelle (Tableau B-5, Tableau B-6, Tableau B-7)

Tableau B-5 – Prise en compte de la quantité de lumière dans les référentiels HQE, LEED et BREEAM

Label	Alternatives pour l'évaluation et la prise en compte de la quantité de lumière
<b>HQE</b>	<b>FLJ ponctuel</b> minimum à respecter sur 80% de la zone de 1 <sup>er</sup> rang pour 80% des locaux. Le seuil à respecter diffère en fonction de la typologie de la pièce et du niveau de performance visé.
<b>LEED</b>	<b>Autonomie lumineuse spatiale</b> minimum à respecter. Le seuil à respecter diffère en fonction de la typologie du bâtiment (hors établissements de santé) et du niveau de performance visé (ex : 2 points si 55% et 3 points si 75%).
	<b>Niveau d'éclairement calculé minimum</b> à respecter pour deux conditions de ciel. Les deux conditions de ciel sont : 9h du matin à l'équinoxe par ciel clair (heure solaire) 3h de l'après-midi à l'équinoxe par ciel clair. Le seuil à respecter doit être compris entre 100 et 3000 lux et diffère en fonction du niveau de performance visé (ex : 1 point si 75% des espaces et 2 points si 90% des espaces)
	<b>Niveau d'éclairement mesuré minimum</b> à respecter pour deux conditions de ciel. Le seuil à respecter doit être compris entre 300 et 3000 lux et diffère en fonction de la surface du local où la mesure est effectuée.
<b>BREEAM</b>	Respecter les <b>exigences nationales</b> réglementaires <b>ET</b> <b>FLJ moyen</b> à respecter sur 80% de la surface du local
	<b>Autonomie lumineuse</b> annuelle à respecter sur 80% de la surface du local – Le seuil à respecter est de 2650 heures à 200 lux <b>ET</b> <b>Valeur d'uniformité</b> (exprimé comme le ratio FLJmin/FLJmoy) minimum à respecter – Le seuil à respecter est 0,4
	Valeur de <b>FLJ ponctuel moyen</b> > seuil sur 80% surface et en fonction de la localisation de l'opération ex : > 0,72 % à Paris
	<b>Traitement qualitatif</b> – Vue du ciel à partir du plan de travail (0,7 m) <b>ET</b> <b>Dimensionnement du local</b> à respecter – Le seuil à respecter est : $d/w + d/HW < 2/(1 - RB)$ <i>d</i> : la profondeur de la pièce, <i>w</i> : la largeur de la pièce, <i>HW</i> : la hauteur du linteau de fenêtre depuis le sol de l'étage <i>RB</i> la réflectance moyenne des surfaces de la partie arrière de la pièce.

Tableau B-6 - Prise en compte de la répartition de lumière dans les référentiels HQE, LEED et BREEAM

Label	Alternatives pour l'évaluation et la prise en compte de la répartition de la lumière
<b>HQE</b>	Traitement qualitatif de l' <b>éblouissement</b> (mise en place de dispositifs architecturaux ou techniques)
<b>LEED</b>	Traitement qualitatif de l' <b>éblouissement</b> (mise en place de dispositifs architecturaux ou techniques) <u>Notes</u> :
	– L' <b>éblouissement</b> est partiellement traité dans la méthode de calcul de l'autonomie lumineuse où il convient de démontrer via simulation que pas plus de 10% des espaces naturellement éclairés ne reçoit un rayonnement solaire direct pour plus de 250 heures par an à hauteur du plan de travail (en l'absence de stores). – Si le bâtiment est livré en blanc, cette exigence est reportée sur les futurs locataires via un cahier des charges preneur.
<b>BREEAM</b>	Traitement qualitatif de l'éblouissement (mise en place de dispositifs architecturaux ou techniques)

Tableau B-7- Prise en compte de la qualité de lumière dans les référentiels HQE, LEED et BREEAM

Label	Alternatives pour l'évaluation et la prise en compte des aspects qualitatifs
HQE	Pourcentage minimum de <b>la surface des espaces sensibles</b> ayant accès à des vues sur l'extérieur à respecter – Le seuil à respecter est de 100% <b>ET</b> Traitement qualitatif de la maîtrise de l'ambiance visuelle (mise en place de dispositif(s) fonctionnel(s) permettant aux usagers <b>d'agir sur l'éclairage naturel</b> dans les locaux)
LEED	Pourcentage minimum des espaces régulièrement occupés ayant une <b>ligne de vue sur l'extérieur</b> au travers d'un vitrage transparent à respecter – Le seuil à respecter est de 75% des espaces régulièrement occupés
BREEAM	Pourcentage minimum de positions au sein des espaces sensibles (« relevant building areas ») étant à <b>moins de 7 mètres d'un mur avec une fenêtre ou une ouverture</b> permanente qui permet une vue convenable vers l'extérieur – Le seuil à respecter est de 100% <u>Notes :</u> – <b>La fenêtre ou ouverture doit représenter au moins 20% du mur</b> – Si la profondeur de la pièce est supérieure à 7m, Valeur minimum à respecter pour le pourcentage d'ouverture – supérieur ou égal aux valeurs du tableau 1.0 du standard BS 8206. – Le référentiel BREEAM valorise (pour les établissements de santé) la mise en place d'une stratégie de <b>promotion de l'art</b> qui peut porter sur l'amélioration du cadre de vie, la relation du bâtiment avec le contexte

Dans le chapitre 5 des applications, les indicateurs de référence pour le confort visuel seront, sauf autre spécification dans le programme, le Daylight Autonomy, ou le spatial Daylight Atonomy, afin d'évaluer l'approvisionnement nécessaire en lumière naturelle. Une analyse du risque d'éblouissement sera ainsi traitée.

### B. 3 – Qualité de l'air

La qualité de l'air est la « nature » de l'air qui affecte la santé et le bien-être des occupants dans les espaces internes. Le lien entre la santé et la qualité de l'air est à la base de la définition fournie par le World Health Organization (WHO, 1986) : «l'état physique et chimique de l'air, au niveau de la zone de respiration des occupants, capable de produire un état de bien-être mental, physique et social et qui ne consiste pas seulement en une absence de maladie ou d'infirmité ».

Le standard ASHRAE (ASHRAE, 2016) définit la qualité de l'air acceptable comme : « l'air dans lequel il y a une absence des contaminants à des concentrations nuisibles, comme définis par autorités de compétence, et pour lequel une grande majorité des personnes exposées (80% ou plus) n'exprime pas une insatisfaction ».

Les facteurs affectant l'air à l'intérieur, pouvant appauvrir la qualité de l'air sont (Ministry of the Environment, Singapore, 1996) :

- La présence de sources de pollution interne ;
- La mauvaise conception, absence de planification des actions de maintenance et absence de prise en compte de l'exploitation des équipements de conditionnement d'air ou de ventilation mécanique

La qualité de l'air est déterminée donc par une gamme de conditions caractérisées, d'une part, par les interactions entre les sources, la présence des évier (pouvant émaner un mauvais odeur et pouvant représenter un dépôt de contaminants) et les mouvements de l'air dans les locaux et, d'autre part, par l'échange entre le bâtiment et l'extérieur (Burroughs & Hansen, 2011).

Le mouvement de l'air peut concerner 1) la circulation naturelle de l'air à travers le local, qui peut être influencée par les activités des occupants ; 2) le mouvement de l'air entraîné par les systèmes de ventilation mécanique ; 3) les infiltrations et les exfiltrations entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment ; 4) l'action de pistons d'ascenseur, effet de cheminée thermique et la différence de pression de l'air.

Il n'existe pas un indicateur commun normalisé pour la caractérisation de la qualité de l'air intérieur. La qualité de l'air intérieur est donc, souvent, exprimée en termes de niveau requis de ventilation ou de concentrations en CO<sub>2</sub>.

Il est généralement accepté que la qualité de l'air intérieur soit influencée par deux types d'émissions :

- Des personnes et de leurs activités (bio effluent, fumée de cigarette),
- Du bâtiment et de son mobilier et du système de chauffage, ventilation et conditionnement d'air lui-même. Ce que l'on peut appeler les composantes du bâtiment.

Les méthodes pour améliorer la qualité de l'air posent sur trois approches de base : 1) la réduction des sources de pollution ; 2) le recours à la ventilation adéquate des ambiances ; 3) le recours à des systèmes d'épuration de l'air (Siegel, 2016).

Généralement la méthode la plus effective est l'élimination des sources de polluants ou la réduction de leurs émissions. Certaines sources, comme celles contenant de l'amiante, sont scellées ou confinées ; des autres, comme par exemple les cuisinières à gaz, peuvent être ajustées afin d'en réduire les émissions. Dans certains cas le seul contrôle de la source peut représenter une solution avantageuse en termes économiques afin d'assurer une bonne qualité de l'air, plutôt que l'augmentation des débits de ventilation, qui peut représenter une stratégie énergivore.

La deuxième approche pour réduire les concentrations des polluants est d'agir sur la ventilation, naturelle (par ouvertures dans l'enveloppe) ou mécanique. Dans ce cadre, la détermination de la ventilation requise se base sur les critères de santé et de confort, dans la plupart des cas les critères de santé sont satisfaits par les critères de confort.

Pour la santé on fait référence aux émissions des composants spécifiques ; le confort est plutôt lié à la qualité de l'air ressentie (odeur, irritation).

La norme EN 15251 (CEN, 2007) propose diverses méthodes afin d'exprimer les critères :

- Calcul de la ventilation avec une méthode basée sur l'occupation et les composants
- Calcul du débit en fonction des personnes ou des mètres carrés de surface au sol
- Calcul du débit basé sur la conservation de la masse et les critères requis pour le niveau de CO<sub>2</sub>

Dans la méthode basée sur l'occupation et les composants, le débit calculé inclue deux composantes comme exprimé par l'Eq. B-7 :

- Ventilation pour la pollution due à l'occupation
- Ventilation pour la pollution due aux composants du bâtiment

$$q_{tot} = n \cdot q_p + A \cdot q_B \quad \text{Eq. B-7}$$

$q_{tot}$  = débit total de ventilation de la pièce, l/s ;

$n$  = valeur de calcul du nombre de personnes dans la pièce ;

$q_p$  = débit de ventilation pour l'occupation par personne, l/(s.pers) ;

$A$  = surface au sol de la pièce, m<sup>2</sup> ;

$q_B$  = débit de ventilation pour les émissions du bâtiment, l/(s.m<sup>2</sup>).

Les débits de ventilation pour les seuls occupants ( $q_p$ ) sont donnés dans le Tableau B-8 :

Tableau B-8 - Débits de ventilation requis de base pour diluer les émissions dues aux personnes

Catégorie	Pourcentage attendu d'insatisfaits	Débit par personne (l/s/pers)
II	20	7

Les débits de ventilation pour les émissions de polluants ( $q_B$ ) sont fournis dans le Tableau B-9 et en faisant la distinction entre bâtiment peu et très peu polluants reporté dans le Tableau B-10 :

Tableau B-9 - Débits de ventilation requis de base pour diluer les émissions dues aux composants

Catégorie	Bâtiments très peu polluants	Bâtiments peu polluants	Autres bâtiments
II	0,35 l/(s.m <sup>2</sup> )	0,7 l/(s.m <sup>2</sup> )	1,4 l/(s.m <sup>2</sup> )

Tableau B-10 - Distinction entre bâtiment très peu polluant et peu polluant

	Bâtiment peu polluant	Bâtiment très peu polluant
émission des composés organiques volatiles (TVOC)	< 0,2 mg/m <sup>2</sup> h	< 0,1 mg/m <sup>2</sup> h
émission de formaldéhyde	< 0,05 mg/m <sup>2</sup> h	< 0,02 mg/m <sup>2</sup> h
émission d'ammoniac	< 0,03 mg/m <sup>2</sup> h	< 0,01 mg/m <sup>2</sup> h
émission de composés cancérigènes (IARC)	< 0,005 mg/m <sup>2</sup> h	< 0,002 mg/m <sup>2</sup> h
matériau inodore	insatisfaction < 15 %	insatisfaction < à 10 %

Sur la base de ces valeurs, des exemples de calculs de débits totaux de ventilation sont calculés pour des bâtiments non industriels et non résidentiels, effectués à l'aide de l'équation (catégorie II) :

Tableau B-11 - Débits de ventilation recommandés pour les bâtiments non résidentiels avec densité d'occupation par défaut pour deux catégories de pollution due au bâtiment lui-même (D'après le CR 1752)

Type d'espace	Surface au sol m <sup>2</sup> /personne	$q_p$	$q_B$	$q_{tot}$	$q_B$	$q_{tot}$	$q_B$	$q_{tot}$	Supplément si autorisation de fumer
		l/(s.m <sup>2</sup> ) occupation	l/(s.m <sup>2</sup> ) Très peu polluant		l/(s.m <sup>2</sup> ) Peu polluant		l/(s.m <sup>2</sup> ) Polluant		l/(s.m <sup>2</sup> )
Bureau fermé	10	0,7	0,3	1,0	0,7	1,4	1,4	2,1	0,5
Bureau paysagé	15	0,5	0,3	0,8	0,7	1,2	1,4	1,9	0,5
Salle de réunion	2	3,5	0,3	3,8	0,7	4,2	1,4	4,9	3,6
Auditorium	0,75	10,5	0,3	10,8	0,7	11,2	1,4	11,9	
Restaurant	1,5	4,9	0,3	5,2	0,7	5,6	1,4	6,3	
Magasin	7	1,5	0,7	2,2	1,4	2,9	2,1	3,6	

Dans la méthode basée sur le débit de ventilation par personne ou par m<sup>2</sup> de surface au sol, il s'agit de considérer soit les débits exprimés par personne soit les débits exprimés par mètre carré de surface au sol, par rapport aux sources de polluants présentes dans l'espace. Les valeurs sont celles vues dans les Tableau B-8, Tableau B-9, Tableau B-10, et Tableau B-11.

Par rapport à ces valeurs on peut considérer :

- La valeur additionnée
- La valeur la plus élevée entre le débit exprimé par personne ou par mètre carré de sol
- Une valeur comprise entre la valeur additionnée et plus élevée (par personne ou par mètre carré)

Si la réglementation nationale ne stipule pas la méthode retenue, le choix est au concepteur qui devra la justifier.

Dans la dernière méthode, les débits de ventilation requis peuvent être calculés sur la base de l'équation de conservation de la masse pour la concentration de CO<sub>2</sub> (AFNOR, 2017) en tenant compte de la concentration de CO<sub>2</sub> extérieure (Tableau B-12). Dans ce cas on se base sur la différence de concentration de CO<sub>2</sub> entre l'intérieur et l'extérieur, dont il faut tenir compte dans les calculs énergétiques.

Tableau B-12 - Exemples de concentrations de CO<sub>2</sub> recommandées au-dessus de la concentration à l'extérieur pour les calculs énergétiques dans le cas d'une ventilation modulée à la demande

Catégorie du bâtiment	Concentration maximale $\Delta\text{CO}_2$ (intérieur – extérieur) pour le calculs énergétiques
II	500 ppm

L'épurement de l'air joue un rôle important dans la réduction et la prévention de problèmes liés à la qualité de l'air interne. Les dispositifs d'épurement d'air éliminent grand part des particules passant à travers eux, en réduisant globalement la concentration des particules présentes dans les locaux. L'épurement de l'air concerne ainsi l'utilisation et la maintenance des filtres des systèmes CVC. L'efficacité de ces dispositifs dépend de leur capacité à collecter les polluants et de combien d'air arrive à passer à travers l'élément d'épuration ou de filtrage. Un système très efficace de collecte caractérisé par un faible débit d'air traversant, ou un dispositif laissant passer un grand débit d'air mais une petite capacité de collecte, ne représentent pas des dispositifs très efficaces.

L'application de la méthode proposée néglige cet aspect en considérant que les composants choisis dans le cadre du projet sont certifiés vis-à-vis des émissions de polluants et que les stratégies de ventilations et les débits de ventilation ont été conçus pour assurer une bonne qualité de l'air intérieur.

## B. 4 – Confort acoustique

Physiquement il n'existe pas de différence entre le son et le bruit. Le son est une perception sensorielle et l'ensemble des configurations des ondes sonores peut prendre le nom de bruit, musique, voix, etc. Le bruit est défini comme un son indésirable (Berglund, et al, 1999).

Le confort acoustique est défini comme la capacité des bâtiment à protéger les utilisateurs contre le bruit en fournissant un environnement acoustiquement souhaitable pour la réalisation des activités humaines (Commins & v. Meier, 1978).

Une bonne ambiance acoustique est essentielle pour le confort et la productivité dans les lieux de travail. Dans les espaces fermés, où l'échange d'information orale et le processus d'apprentissage

demandent une intensive communication verbale, une bonne conception est nécessaire afin d'optimiser les fonctions primaires des espaces intéressés (Gramez & Boubenider, 2017).

Le confort acoustique est un concept lié à l'absence de son indésirable et à la capacité de réaliser des activités acoustiques sans déranger les autres occupants. Afin d'atteindre un bon niveau de confort acoustique dans le bâtiment, certaines exigences doivent être respectées concernant l'isolation des bruits aériens, l'isolation du son venant des impacts, le niveau sonore venant du trafic et des équipements du bâtiment (Rasmussen & Rindel, 2003).

Une faible isolation acoustique entre deux habitation peut causer des conflits et être la cause de limitation des activités, et donc du manque de fonctionnalité du bâtiment.

Une série d'indicateurs ont été établi pour l'évaluation et la vérification de l'environnement acoustique. Il est possible de considérer trois types d'approches pour l'étude de l'acoustique et de son influence sur la vie quotidienne, la physiologie et la santé des personnes (Rey Gozalo, et al., 2015). Dans la pratique ces approches ne sont pas toujours traitées de façon indépendante, ces sont les approches :

- Physique ;
- Psychophysique ;
- Basée sur la perception

La première a pour objectif d'évaluer l'acoustique de l'environnement et afin d'en réaliser une comparaison avec certaines valeurs de référence de niveaux sonores. Il s'agit de l'approche utilisée pour la réalisation de cartes de bruit. Néanmoins, les amplitudes du son mesurées dans cette approche (généralement, les niveaux équivalent du son, dBA), bien que largement utilisé, ont une faible relation avec la perception humaine.

L'approche psychophysique à l'objectif spécifique d'étudier la relation entre l'environnement sonore et les sensations ressentie par l'occupant. Plus spécifiquement il s'agit d'établir le lien entre les grandeurs physiques associées au son et la réaction des personnes. Par exemple la variation du son objective est enrichie par une contribution subjective afin de prendre en compte les aspects qui impactent négativement le bien-être physique et psychologique des usagers. Deux sons divers avec le même niveau de bruit peuvent produire des sensations très différentes à l'écoute.

Enfin, l'approche se basant sur la perception vise à identifier et décrire les bases des processus psychologiques qui sont à la base de l'appréciation du son par les personnes. L'ambiance sonore est traitée principalement comme une source d'information et un élément de relation entre l'occupant et l'environnement.

Les performances acoustiques des espaces peuvent être évaluées à partir des performances acoustiques des composants et des caractéristiques des locaux. Dans ce cadre, la norme (AFNOR, 2017), faisant partie d'une série de normes spécifiant les modèles de calcul acoustique dans les bâtiments, fournit une série d'indicateurs (concernant l'isolation et les niveaux sonores) et un modèle d'évaluation se basant sur les spécifications des éléments du bâtiment.

## ANNEXE C – Exemples de calcul des indicateurs

## C. 1 – Exemple de calcul des consommations d'eau en référence à la cible 5 du label HQE

Calcul des consommations avec équipements standards pour la surélévation du CNR

Equipements	Consommation des équipements [L/min]	Durée [minutes ou nb chasse]	Utilisation [moyenne journalière/visiteur]		Utilisation [moyenne journalière/usagers permanents]		Nb Vis/j		Nb Perm/jour		Cons 1/j
			h	f	h	f	h	f	h	f	
Chasse d'eau	6	1	0,33	1	1	2	0	0	49	21	546
Robinet de lavabo	10	0,25	1	1	2						245
Evier économe	12	0,25	0	0	1						147
Douche	12	7	0	0	0	0					0
Urinoir	3	1	1	0	1	0					147
$C_{eau} \left[ \frac{m^3}{an} \right]$											286

Calcul des consommations avec équipements performants pour la surélévation du CNR

Equipements	Consommation des équipements [L/min]	Durée [minutes ou nb chasse]	Utilisation [moyenne journalière/visiteur]		Utilisation [moyenne journalière/usagers permanents]		Nb Vis/j		Nb Perm/jour		Cons 1/j
			h	f	h	f	h	f	h	f	
Chasse d'eau	3,75	1	0,33	1	1	2	0	0	49	21	546
Robinet de lavabo	4	0,25	1	1	2						245
Evier économe	12	0,25	0	0	1						147
Douche	12	7	0	0	0	0					0
Urinoir	3	1	1	0	1	0					147
$C_{eau} \left[ \frac{m^3}{an} \right]$											194



## C. 2 – Calcul des émissions de CO2 pour le collège d'Aubervilliers

Le sous-critère CC6.4 relatif aux émissions de gaz à effet de serre est calculé en fonction des seules consommations énergétiques finales.

Résultats des simulations depuis le rapport fourni par le bureau d'étude :

Postes	Energie	Périmètre global	
		kWh EF	kWh EF / m <sup>2</sup> (SU + circulation)
Chauffage	Gaz	196 718	29.54
Eau chaude Sanitaire	Gaz	50 918	7.65
TOTAL	Gaz	247 636	37.2
	Electricité	301 066	45.2
	ENR	3834	0.6

Donnée environnementales INIES :

- Combustion d'un kWh de gaz naturel en chaudière :

Impact environnemental en termes de réchauffement climatique : 0,243 kg<sub>eq</sub>CO<sub>2</sub>

- Mise à disposition d'un kWh d'électricité:

Impact environnemental en termes de réchauffement climatique : 0,066 kg<sub>eq</sub>CO<sub>2</sub>

En utilisant l'indicateur établi dans le paragraphe §4.3 :

$$CC6_{CO2} = 1 - \frac{EGES_{Bat}}{EGES_{lim}}$$

En absence d'indications fournies par le programme, nous considérons la limite supérieure de 80kg<sub>eq</sub>CO<sub>2</sub> qui représente un classement F pour le classement des bâtiments dans le cadre d'un diagnostic de performance (NF EN ISO 52003-1)

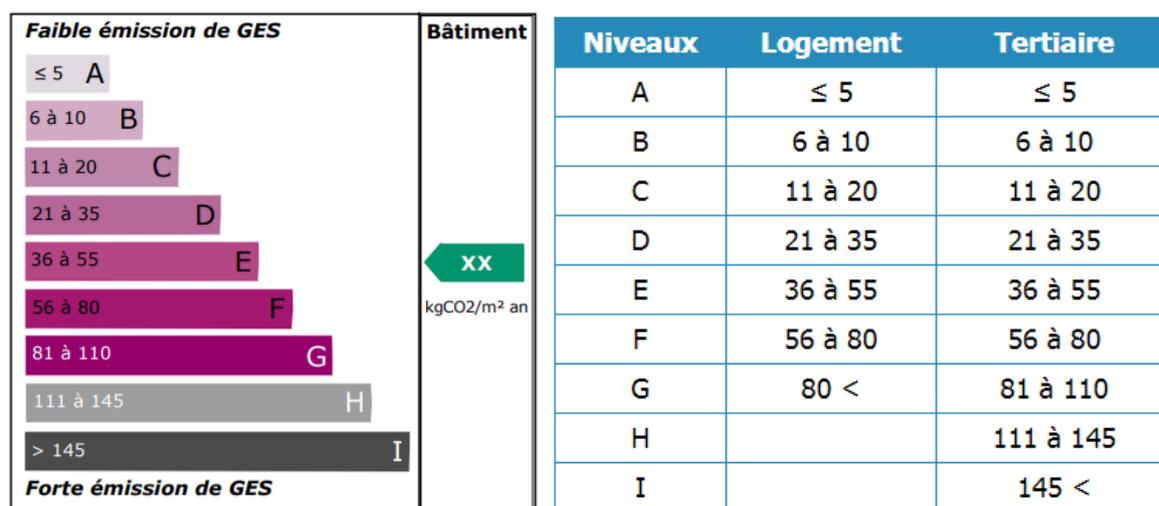


Figure C-1 – Classements des bâtiments dans le cadre du diagnostic de performance environnementales due à la consommation énergétique

Pour une surface de 7173 m<sup>2</sup> nous avons, donc :

EGES BAT	11,16	kgeqCO <sub>2</sub> /an.m <sup>2</sup>
EGES LIM	80	kgeqCO <sub>2</sub> /an.m <sup>2</sup>
<b>CC6.4</b>	<b>0,86</b>	pour les seules émissions en exploitation

En utilisant le référentiel E+C- (Ministère de l'Environnement, de l'Energie et de la Mer; Ministère du Logement et de l'Habitat Durable, 2016)

A <sub>i</sub>		α		M <sub>gctype</sub>	M <sub>gcgeo</sub>	M <sub>calt</sub>	M <sub>gsurf</sub>	M <sub>park</sub>		
logement	Autre	logement	Autre					logement	collège	
C1	1550	1625	600	525	1,1	1,1	0	0	32	18,9996752
C2	1000	850	250	10	1,1	1,1	0	0	32	18,9996752

On obtient :

EGES<sub>max</sub> = 1753,23 kgeqCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup> (50 ans) pour le niveau C1

EGES<sub>max</sub> = 870,08 kgeqCO<sub>2</sub> /m<sup>2</sup> (50 ans) pour le niveau C2

Sur l'année :

EGES<sub>max</sub> = 35 kgeqCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>.an pour le niveau C1

EGES<sub>max</sub> = 17 kgeqCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>.an pour le niveau C2

L'émissions de gaz à effet de serre due à la seule consommation énergétique présente, donc le 32% de la limite sur l'année du niveau C1

### C. 3 – Exemple de calcul concernant le coût global

$$CG = CO_{inv} + \sum_j \left[ \sum_i^{t_{TC}} (CO_{a(i)}(j) * (1 + RAT_{xx(i)}(j)) + CO_{CO2(i)}(j)) * D_f(i) + CO_{disp(TLS)}(j) - VAL_{ft_{TC}}(j) \right]$$

$CG$  = coût global actualisé ;

$CO_{inv}$  = coût d'investissement initial ;

$CO_{a(i)}(j)$  = coût annuel pour l'année  $i$  du composant ou du service  $j$  ;

$RAT_{xx(i)}(j)$  = évolution des prix pour l'année  $i$  du composant ou du service  $j$

$CO_{CO2(i)}(j)$  = coût des émissions de  $CO_2$  pour la mesure  $j$  durant l'année  $i$

$D_f(i)$  = facteur d'escompte de l'année  $i$  ;

$CO_{disp(TLS)}(j)$  = coût (d'élimination) final pour le décommissionnement, la déconstruction et l'élimination dans la dernière année du cycle de vie TLS du composant  $j$  ou du bâtiment rapporté à la première année  $T_0$  ;

$VAL_{ft_{TC}}(j)$  = valeur résiduelle du composant  $j$  dans l'année TC à la fin de la période de calcul (et rapportée à la première année  $T_0$ )

Les contributions que nous avons considérées sont relatives à la consommation énergétique et à l'investissement initial :

$$CG = CO_{inv} + \left[ \sum_i^{t_{TC}} CO_{a(i)}(j) * (1 + RAT_{xx(i)}(j)) \right]$$

Pour le cas de la surélévation de 450 m<sup>2</sup> :

CO <sub>inv</sub> global	4600000 €	→ 3538 €/m <sup>2</sup>
CO <sub>inv</sub> portion	1592307,69 €	
variation des coût du service		
RAT	4%	
Inflation	2%	
Prix du kWh <sup>42</sup>	0,105 €/kWh (*)	
Consommation en énergie finale		
Chauffage	20278,8093 kWh	
Eclairage	4688,16934 kWh	
Coût exploitation		
CO <sub>a</sub> =	2622 €/an	CG <sup>43</sup> = 1651000 €
<b>CC7 = 0,96</b>		

<sup>42</sup> selon les données Eurostat (<https://ec.europa.eu/eurostat>)

<sup>43</sup> <http://www.coutglobal.developpement-durable.gouv.fr/analyse/perimappli/cas/E>