



**HAL**  
open science

# Les chantiers de l'Eco-Conception : Etat des lieux de la Recherche dans le Bâtiment en France

Xavier Latortue, Bernard Yannou, Yann Leroy, François Cluzel

## ► To cite this version:

Xavier Latortue, Bernard Yannou, Yann Leroy, François Cluzel. Les chantiers de l'Eco-Conception : Etat des lieux de la Recherche dans le Bâtiment en France. [Rapport de recherche] CentraleSupélec, Université Paris-Saclay. 2018. hal-01912988

**HAL Id: hal-01912988**

**<https://hal.science/hal-01912988v1>**

Submitted on 5 Nov 2018

**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.

30 OCTOBRE 2018

# LES CHANTIERS DE L'ECO-CONCEPTION: Etat des lieux de la Recherche dans le Bâtiment en France

XAVIER LATORTUE, BERNARD YANNOU, YANN LEROY, FRANÇOIS CLUZEL  
CENTRALESUPELEC  
Contact : francois.cluzel@centralesupelec.fr



## Table des matières

<b>Avant-Propos .....</b>	<b>3</b>
<b>Chapitre 1 : Mise en évidence des verrous sectoriels .....</b>	<b>4</b>
Introduction .....	4
1. Fragmentation des acteurs et poids des investissements.....	5
1.1. Une cartographie des acteurs.....	5
1.2. Le poids des financements de la question environnementale dans le Bâtiment en France.....	12
2. Le traitement de la question de la performance énergétique.....	13
2.1. L'absence de culture de la performance de l'industrie .....	13
2.2. Les garanties de performances énergétiques.....	14
2.3. Le manque de lisibilité des performances des bâtiments .....	16
3. La mise en évidence de difficultés fondamentales .....	20
3.1. La question des interfaces et de la programmation .....	20
3.2. La question des fonctionnalités du bâtiment .....	22
4. Conclusion .....	24
<b>Chapitre 2 : Les principales entités de Recherche dans le bâtiment en France .....</b>	<b>26</b>
1. Île de France .....	27
1.1. Mines PariTech .....	27
1.2. Centrale Supélec.....	28
1.3. Université Paris-EST .....	28
1.4. Ecole D'Ingénieurs de la Ville de Paris (EIVP) .....	29
1.5. Centre International de Recherche sur l'environnement et le développement (CIRED) .....	30
1.6. ESTP .....	31
1.7. ESITC Cachan .....	31
1.8. UMR AUSser : Architecture Urbanisme Société : Savoirs Enseignement Recherche .....	31
2. Nantes.....	32
2.1. "Université de Nantes/Centrale Nantes "GeM - Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique .....	32
2.2. UMR1563 Ambiances, Architectures, Urbanités.....	32
2.3. Institut Français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux (IFSTTAR).....	33
3. Lyon .....	33
3.1. Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat – ENTPE (Lyon) .....	33
3.2. Université de Lyon : LABEX « Intelligences des Mondes Urbains » .....	34
3.3. Université Claude Bernard Lyon 1 – INSA Lyon .....	35
4. Grenoble .....	35
4.1. INP Grenoble G-SCOP.....	35
4.2. "LABEX - Centre d'Excellence en Matériaux Architecturés Multifonctionnels : .....	36

4.3. Université Savoie Mont Blanc .....	37
4.4. Ecole nationale supérieure d'architecture de Grenoble .....	37
<b>5. Autres entités .....</b>	<b>37</b>
5.1. Lille - Université d'Artois, Université de Lille 1, Ecole des Mines de Douai "Laboratoire Génie Civil et géo-environnement (LGCE) .....	38
5.2. Université de Valenciennes – Laboratoire en Design Visuel et Urbain .....	38
5.3. Nancy - UMR 3495 Modèles et simulations pour l'architecture et le patrimoine (MAP) du Centre de Recherche en Architecture et Ingénierie de Nancy (CRAI) .....	39
5.4. Caen - Ecole Supérieure d'Ingénieurs des Travaux publics de Caen (ESITC) .....	39
5.5. Sceaux – Troyes – Montpellier – Ecole Polytechnique Féminine.....	40
5.6. Montpellier - Université de Montpellier 2 – Laboratoire Mécanique et Génie Civil (LMGC) .....	40
5.7. Toulouse - Université Toulouse III - Paul Sabatier – Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions de Toulouse .....	41
5.8. Corse - Université De Corse Pascal Paoli – UMR6134, Laboratoire sciences pour l'Environnement (SPE).....	41
5.9. Travaux ponctuels sur la thématique d'éco-conception .....	42
 <b>Chapitre 3 : Principales thématiques de Recherche sur la problématique environnementale dans le Bâtiment.</b>	
<b>.....</b>	<b>44</b>
<b>1. Matériaux.....</b>	<b>45</b>
1.1. Les écomatériaux.....	45
1.2. Améliorer la production et le recyclage des matériaux traditionnels.....	45
<b>2. Théorie mathématique/physique appliquée à la performance environnementale des bâtiments.....</b>	<b>47</b>
<b>3. L'Analyse du Cycle de Vie (ACV) .....</b>	<b>49</b>
3.1.1. Le problème des bases de données .....	49
3.2. Les obstacles à la comparaison.....	50
3.2.1. ACV attributionnelle et ACV Conséquentielle diachronique. ....	51
<b>4. La question environnementale dans le processus de conception .....</b>	<b>53</b>
<b>5. La question des usages.....</b>	<b>55</b>
5.1. Les comportements des usagers.....	55
5.2. L'adoption des outils et méthodes d'éco-conception par les professionnels.....	57
<b>6. Des thématiques encore peu abordées dans la Recherche en France .....</b>	<b>59</b>
6.1. La promesse du BIM .....	59
6.2. Les stratégies d'intervention sur les occupants.....	62
6.3. La question de la gestion de la rénovation énergétique dans le contexte collectif.....	66
<b>7. Des thématiques et interrogations transversales.....</b>	<b>68</b>
 <b>Références .....</b>	<b>70</b>

# Avant-Propos

L'objet de cette étude est l'intégration des usages en éco-conception de bâtiment en France. L'étude a été menée dans le cadre du Plan de Recherche Collaborative 15.2 du réseau EcoSD, est pilotée par CentraleSupélec et Vinci Construction et financée par l'Ademe. L'éco-conception se réfère à *«l'ensemble des outils et méthodes permettant de maîtriser les impacts environnementaux inhérents à la conception de tout produit. Elle s'articule pour la Construction autour de deux disciplines : l'architecture bioclimatique et l'évaluation des performances environnementales par l'ACV. Elle introduit une double dimension : le multiscalair pour tenir compte de toutes échelles d'impacts et l'horizon temporel pour anticiper le fonctionnement au cours du cycle de vie. Elle s'inscrit dans un esprit de responsabilité de toutes les parties prenantes puisqu'elle facilite la prise de décision en toute connaissance des causes. C'est donc une démarche par essence économique qui participe de la recherche d'efficience de tout projet relatif à notre cadre de vie en objectivant les externalités.»* (Christophe Gobin)

Dans le contexte du secteur du Bâtiment, la conception et le développement de produits concerne les phases de programmation par la maîtrise d'ouvrage comme les phases de conception des futurs logements par la maîtrise d'œuvre. Néanmoins, le périmètre de l'étude va au-delà et porte plus généralement sur la prise en compte des critères environnementaux dans la conception.

Les bâtiments concernés par cette étude sont aussi bien les bâtiments tertiaires que les logements. Enfin sans se cloisonner exclusivement à l'hexagone, l'étude s'attachera plus particulièrement au contexte français. En effet la combinaison des caractéristiques du secteur, du marché, de la législation, et des comportements des professionnels fait de la France un contexte d'étude particulier.

L'objectif n'est donc pas de limiter l'étude aux outils et méthodes adoptées par l'industrie, mais englobe aussi la mise en évidence de l'attitude de l'industrie du Bâtiment, et des directions prises par la Recherche en France sur cette thématique. Le document est découpé en trois chapitres. L'objet du premier chapitre est la mise en évidence de verrous sectoriels qui sont des freins au développement de l'éco-conception. Le second chapitre a pour objectif d'identifier les principales entités de Recherche traitant l'éco-conception en France. Le troisième et dernier chapitre consiste en un passage en revue des principales thématiques traitant de l'éco-conception du Bâtiment dans la Recherche en France.

# Chapitre 1 : Mise en évidence des verrous sectoriels

## Introduction

Le traitement de la problématique environnementale est une question relativement récente dans le bâtiment. Si les premières réglementations thermiques pour le bâtiment apparaissent en 1974 suite au premier choc pétrolier, elle ne concerne alors que les bâtiments neufs résidentiels. En 1988, la réglementation évolue sensiblement et s'élargit aux bâtiments neufs non résidentiels. Il faudra attendre les années 2000 pour voir émerger une prise de conscience avec successivement la RT 2000, la RT 2005 puis la RT 2012 qui imposent des méthodes de calculs et des objectifs de réductions de consommation des bâtiments. Cette prise de conscience, est quelque peu tardive pour un secteur qui représente entre 16% et 50% des consommations nationales d'énergie dans le monde, et 40 % de la consommation totale d'énergie et environ 25 % des émissions totales de CO2 en France. L'objet de cette partie est de comprendre certains des facteurs qui expliqueraient la difficulté à apporter des solutions satisfaisantes à la problématique environnementale dans le bâtiment. Dans un premier temps, nous constaterons un nombre élevé d'institutions publiques ou industrielles travaillant sur cette question, malgré un manque cruel de synergie et des investissements faibles. Dans un second temps nous mettrons en évidence le manque de culture de la performance dans le Bâtiment, les efforts menés pour y pallier avec plus ou moins de succès, ainsi que les travaux visant à simplifier la lecture des performances environnementale des bâtiments. Enfin nous concluons sur le fait que la problématique environnementale met en évidence des difficultés fondamentales du secteur, comme la gestion des interfaces, et le manque de rigueur et de précision dans la programmation. A ce titre certains travaux portant sur l'analyse fonctionnelle des bâtiments sont des pistes pertinentes pour une rationalisation des procédures et un lissage des interfaces, tous deux nécessaires à un meilleur traitement de la question environnementale.

# 1. Fragmentation des acteurs et poids des investissements

Le ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie a identifié le « Bâtiment à faible impact environnemental » comme l'une des 19 filières industrielles stratégiques contribuant à protéger l'environnement et à créer de la valeur ajoutée (Commissariat général au développement durable ; 2012). L'objectif de cette partie est de mettre en évidence le nombre importants d'acteurs institutionnels travaillant sur la problématique sans toutefois faire apparaître une synergie entre les acteurs.

## 1.1. Une cartographie des acteurs

On constate un manque de concertation entre un nombre important d'acteurs industriels sur l'ensemble du territoire. Ainsi on observe l'existence de nombreux réseaux, pôles de compétitivité, clusters, ou plateformes traitant ou accompagnant la question des problématiques environnementales du Bâtiment. Les efforts portés par ces différentes entités ne semblent pas coordonnés. Cette absence de synergie et de confrontation des stratégies est symptomatique d'un secteur structurellement fragmenté, et donc peu enclin au partage de bonnes pratiques et de retours d'expériences.

### 1.1.1. Les plateformes

- Le Plan Bâtiment Durable, l'Ademe, Oseo et le CSTB ont lancé en 2012 la création d'un réseau de plates-formes Bâtiment Energie. L'ambition de ce réseau de plateformes est d'être un interlocuteur privilégié des professionnels afin (i) d'accompagner la mutation du secteur pour atteindre les objectifs fixés par le Grenelle de l'Environnement sur la question du bâtiment, et (ii) constituer un outil de dynamisation des entreprises locale. Plus concrètement chacune des plateformes a pour objectif de remplir les missions suivantes (Plan Bâtiment Grenelle ; 2011b) :
- **« La démonstration »** : dissémination des « bonnes pratiques », formation sur projet et exemplarité ;
- **La création et le développement d'entreprises** : partage des savoirs et des compétences au niveau local mais aussi national et dynamisation du tissu entrepreneurial local ;
- **La formation** : formation initiale et continue à tous les niveaux (formation de formateurs et labellisation de formations) ;
- **Le transfert de la recherche et du développement** : transfert technologique, validation des travaux en laboratoire, phases de tests des professionnels et accélération de l'amenée vers le marché de nouveaux produits et services. On compte à l'heure actuelle 10 plateforme réparties sur le territoire, chacune se concentre sur une thématique spécifique pour laquelle elle constitue la référence nationale (Plan Bâtiment Grenelle, 2011b).



Figure 1. Plateformes Bâtiment-Energies en France (Commissariat général au développement durable ; 2012)

### 1. CODEM PICARDIE

En plus de la recherche sur les éco-matériaux et l'animation de réseaux, la plateforme CoDEM propose des essais sur la caractérisation des matériaux et des procédés, et assiste les entreprises en les conseillant sur l'amélioration de leurs procédés de fabrication de matériaux.

### 2. EFFICACITY

La plateforme Efficacity cherche à dépasser l'échelle de la problématique énergétique du bâtiment pour atteindre l'échelle de l'ilot, du quartier voir de la ville.

Les travaux de cette plateforme se centrent sur le développement d'une approche coordonnée entre les réseaux de distribution, les flux de personnes, de marchandises, d'information et les activités. La plateforme vise par ailleurs à concevoir, développer et étudier les impacts de solutions innovantes technologiques et/ou organisationnelles en termes d'efficacité énergétique sur les différentes échelles de la ville.

### 3. POLE ALSACE ENERGIVIE

Cette plateforme se concentre sur les problématiques liées aux bâtiments à énergie positive. L'objectif est de développer des méthodes de conception et de construction de systèmes constructifs à faible impact environnemental, tout en prenant en compte les questions de contrôle-commande. Au-delà des systèmes constructifs à proprement dit, la plateforme engage



une réflexion sur la question de la normalisation (principalement du BEPOS) ainsi que sur les contrats de performance énergétique. Par ailleurs, la structure étudiée la question de la géothermie profonde et ses applications industrielles potentielles pour le bâtiment.

#### 4. ATLANTECH

La plateforme ATLANTECH se concentre sur les problématiques liées à la réhabilitation des bâtiments. La priorité de la plateforme est la mise en œuvre, et la diffusion de techniques, technologies et processus constructifs pour la réhabilitation. Parmi les moyens à disposition la plateforme dispose d'un bâtiment pilote permettant la validation de processus de montage et de mise en œuvre de moyens dans des conditions réelles de réhabilitation.

#### 5. GREENERB@T

La plateforme GREENERB@T dispose de halles climatiques permettant aux industriels d'expérimenter, concevoir, tester et certifier des ensembles de systèmes soumis à des environnements climatiques maîtrisés et répétables. De plus, elle fournit différents outils de formations pour les acteurs de la filière bâtiment.

#### 6. C&BCONSTRUCTIONS ET BIORESSOURCES et CORDOBA

La plateforme C&BCONSTRUCTIONS ET BIORESSOURCES se concentre sur les utilisations des matériaux biosourcés (hors bois) et ce sur toute la filière : de la production à son utilisation sur les bâtiments finis.

La plateforme CORDOBA s'attache à développer l'étude et le développement de la réhabilitation énergétique des bâtiments anciens.

#### 7. INSTITUT NATIONAL DE L'ENERGIE SOLAIRE et ASTUS CONSTRUCTION

L'Institut National de l'Energie Solaire comporte deux plateformes : la première concerne la R&D sur le développement d'innovations photovoltaïques, thermiques et énergétique pour le bâtiment ; et l'autre vise à la formation et la diffusion vers les professionnels sur les questions de l'énergie solaire pour le bâtiment.

La plateforme ASTUS CONSTRUCTION a pour objectif d'accompagner les entreprises à innover et à diffuser leurs innovations suivant 3 axes stratégiques :

- *Développer des systèmes constructifs innovants*
- *Améliorer les processus de construction et industrialiser la filière*
- *Prendre en compte systématiquement l'usage du bâtiment dès l'amont des projets*

Pour cela la plateforme dispose d'une halle technologique pour faire des tests d'assemblages

sur des prototypes à échelle 1.

#### 8. INSTITUT NATIONAL D'EXCELLENCE FACTEUR 4 (INEF 4)

L'INEF 4 entretient des relations privilégiées avec Nobatek et l'Université de Bordeaux et concentre son activité sur la Réhabilitation et les constructions durables, en particulier ceux issus de la filière sèche et notamment celle du bois tout en opérant une veille technologique à l'internationale.

#### 9. CLIMAT MEDITERRANEEN (en cours de création, peu d'informations disponibles)

#### 10. ESKAL EUREKA : Plate-forme Qualité d'usage, technologie avancée, processus optimisés

Le cluster Eskal Eureka constitue aussi une plateforme dont les objectifs sont l'amélioration la qualité globale de la construction/rénovation, l'optimisation des processus « usage/conception/construction/exploitation », et la réduction des coûts. Pour cela le cluster déploie ces efforts dans des actions de transfert, de formation, et de démonstration envers les entreprises mais aussi les étudiants.

### **1.1.2. Les pôles de compétitivité**

Le Réseau Bâtiment Durable comprend ainsi une vingtaine de pôles de compétitivités répartis sur le territoire et traitant de la problématique environnementale à travers différents spectres :

- La problématique des matériaux
- Les composants et systèmes pour un bâtiment durable
- L'intégration dans le bâtiment : systèmes constructifs, conception, interfaces et énergies renouvelables
- L'intégration du bâtiment dans son environnement : outils de conception, du bâtiment à son environnement

Ce réseau Bâtiment Durable joue un rôle vital dans la R&D du secteur en France, en effet 90 % des projets relatifs au bâtiment durable présentés par des pôles de compétitivité aux financements du Fonds Unique Interministériel (FUI) le sont par des pôles membres du réseau (Commissariat général au développement durable ; 2012).



Figure 2 : Les pôles de compétitivités du réseau Bâtiment Durable (Commissariat général au développement durable ; 2012)

Parmi les différents pôles, le pôle **Advancity** est spécialisé sur les questions d’habitat, de construction, d’aménagement, de gestion urbaine, de mobilité et d’économie d’énergie. On peut citer 3 projets particulièrement pertinents dans la question environnementale autour du bâtiment :

- **Le projet Callisto-Sari** : L’objectif est de développer la réalité virtuelle pour le secteur de la construction. L’ambition est de développer un système d’immersion innovant permettant de simuler l’intérieur d’un bâtiment en reproduisant les rendus lumineux et acoustiques, et à termes de le relier à la maquette 3D d’un bâtiment.
- **Le projet Epit 2.0** : L’objectif est la création d’un système d’information pour la gestion de l’énergie et de l’empreinte carbone dans les éco-quartiers. Le système doit pour cela assurer le monitoring et le pilotage des ressources en énergie renouvelables, le stockage, et la distribution de l’énergie dans l’éco-quartier
- **Le projet Sustains** : Il s’agit du développement d’un outil d’aide à la décision pour la planification urbaine et le choix de systèmes énergétiques intégrant les dimensions sociales, économiques, énergétiques et la durabilité des modèles urbains.

### 1.1.3. Les clusters

Le **réseau Inter-Clusters** réunit une **trentaine** de Clusters du BTP qui ont pour *objectif soutenir et d’accélérer les projets durables pour développer la compétitivité des entreprises*. Selon leurs spécificités, les structures membres exercent les missions suivantes (interclusters.fr) :

- Animation, formation, diffusion d'informations et promotion de l'éco-construction ;
- Développement économique, mise en réseau d'entreprises et structuration de filière ;
- Centres de transferts technologiques, pôles de compétitivité, innovation.



Figure 3 Le réseau interclusters du bâtiment ([interclusters.fr](http://interclusters.fr), consulté en 2016)

#### 1.1.4. Les institutions de référence

En plus des plateformes, des pôles de compétitivité et des clusters, le secteur du Bâtiment est aussi encadrés par des institutions de référence qui sont soit contrôlées par les ministères publics, soit semi publics soit encore issus de l'effort partagé de différents groupe d'intérêt de la construction. Parmi les différentes institutions de références nous pouvons citer :

- La **FFB** : La Fédération Française du Bâtiment, est présente dans chaque département et chaque région, et se présente comme le **porte-parole du Bâtiment**. En plus de **défendre les intérêts du secteur** auprès du gouvernement, il intervient à Bruxelles, notamment au sein de la Fédération de l'Industrie Européenne de la Construction.
- Le **PUCA** : Le Plan Urbanisme Construction Architecture est une **agence interministérielle** créée en 1998. Les activités de l'agence portent principalement sur des **programmes de recherche** incitative, de recherche-action et *apporte son soutien à l'innovation et à la valorisation dans les domaines de l'aménagement des territoires, de l'urbanisme, de l'habitat, de l'architecture et de la construction.*
- Le **Plan Bâtiment Durable** : Lancé en janvier 2009, et **rattaché au Ministère de l'Environnement**,

de l'Énergie et de la Mer et au **Ministère du Logement et de l'Habitat durable**, sa mission est **l'accompagnement des acteurs de l'immobilier et du bâtiment** afin d'**atteindre les objectifs énergétique** fixés au secteur. Parallèlement elle assure la **concertation** entre les entreprises, les administrations, et les cabinets ministériels dans **l'élaboration des textes législatifs**.

- Le **CSTB** : Le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment est un Établissement public à caractère industriel et commercial et exerce *4 activités clés* : **recherche et expertise, évaluation, certification et diffusion des connaissances**. Son champ de compétences couvre les produits de construction, les bâtiments et leur intégration dans le quartier et la ville. Son action couvre aussi bien **l'appui aux pouvoirs publics** sur les questions de **certification**, que l'offre d'une **expertise d'étude et l'évaluation technique** des produits et procédures pour le **secteur privé**.
- L'**IFPEB** : L'Institut Français pour la Performance du Bâtiment est un **effort conjoint** de différents **acteurs économiques privés** du Bâtiment et de l'immobilier. Il se présente comme une **consultance mutualisée** à destination de ses membres avec l'objectif d'une montée en compétence du secteur sur les questions de la **construction durable**.

Au travers le passage en revue des plateformes, des pôles de compétitivités, des clusters et des institutions de référence on constate que les problématiques environnementales et énergétiques sont traitées par de nombreux acteurs sans réelle coordination. Certes la fragmentation des acteurs sur le territoire permet une dissémination forte des innovations, mais il semble que l'innovation sur els question énergétiques profiterait d'une majeure concentration des efforts. Comme le résume le rapport intermédiaire du Plan Bâtiment Grenelle (2011a) « *La dispersion généralisée est un constat général que l'on peut également faire dans le domaine de la recherche et du développement (R&D) du secteur du bâtiment. Les acteurs en matière de R&D sont nombreux sur le territoire. (...) . Ces acteurs sont des experts qui devraient être des porteurs d'innovation dans leur domaine, innovation d'autant plus fructueuse qu'ils dialogueraient entre eux. (...) Il n'existe à l'heure actuelle aucun lieu ou réseau de discussion ou d'intégration globale. La multiplicité des acteurs a également pour effet de rendre l'accès à l'information et aux documentations des programmes de R&D difficile. Elle est à l'heure actuelle réservée aux « habitués » et aux structures importantes.* ». Cette problématique est d'autant plus forte s'il on prend en compte les modestes investissements dans l'innovation et la R&D dans le bâtiment en France.

## 1.2. Le poids des financements de la question environnementale dans le Bâtiment en France

Les chiffres concernant les investissements sur la question environnementale sont difficiles à obtenir, cependant ils mettent en évidence des ordres de grandeurs qui contrastent avec d'autres secteurs.

Néanmoins, en 2013, le secteur du Bâtiment représente 50% des investissements dans le **capital tangible** (hors R&D, études et frais administratifs) en faveur du climat en France, soit environ **18,1 milliards d'euros** (Hainaut *et al.*, 2015). Ces investissements tangibles sont portés en majorité par les ménages au travers les travaux d'aménagement, l'acquisition de biens, ou les coûts d'acquisition du capital.

En comparaison, en 2012, la dépense en R&D des entreprises lié au secteur « *Primaire - Energie – BTP* » représente 5% toutes activités confondues, soit environ **2,3 milliards d'euros** (Ministère de l'éducation nationale, de l'enseignement supérieur et de la Recherche, 2015). A titre de comparaison le budget de R&D l'équipementier automobile Renault (première entreprise innovante de France) est d'environ 4 milliards en 2012.

Le rapport intermédiaire du Plan Bâtiment Grenelle (2011a) avance quelques chiffres permettant qui confirment ces ordres de grandeurs : « *Alors que le secteur du BTP contribue à 11% du Produit Intérieur Brut (PIB) du pays, il ne représente que 0,1% des dépenses de R&D pour une moyenne nationale de 2,4 %.* ». Ces investissements modestes dans la R&D du Bâtiment sont par ailleurs à rapporter aux nombre importants d'acteurs institutionnels ou universitaires qui se répartissent les investissements. En effet « *le foisonnement des acteurs dans le secteur favorise une duplication des efforts et une moindre efficience des investissements consentis* » (Rapport intermédiaire du Plan Grenelle ; 2011a). Au niveau sectoriel, on observe peu de collaboration en termes d'innovation ou de Recherche entre les grandes entreprises du bâtiment (Vinci, Bouygues, Eiffage). Il existe peu d'efforts d'innovation sur les phases amonts tels que les étapes de programmation ou de conception, et restent limités à des projets pilotes dont les résultats ne sont pas toujours partagés. On n'observe que peu de collaboration autour de la construction de référentiels de performance communs. L'innovation existe cependant, mais est principalement focalisée sur des solutions techniques, des matériaux ou des procédés de mise en œuvre.

## 2. Le traitement de la question de la performance énergétique

Au-delà de la même de la dimension structurelle du secteur et des financements, l'absence de culture de la performance présente un second obstacle à l'intégration des usages en éco-conception dans le Bâtiment.

### 2.1. L'absence de culture de la performance de l'industrie

Globalement, la performance des projets en termes de respect des objectifs de délais, prix, qualité des prestations du bâti final et plus globalement productivité n'est pas encore à la hauteur d'autres secteurs industriels, comme par exemple le secteur manufacturier.

Catherine Comet (2004) insiste sur le décalage du secteur du bâtiment où la reconnaissance de la qualité passe par le renom des professionnels, et donc des contacts de proximité fortes. Plus que par des indicateurs de performance et de qualité sur des projets, la stratégie de captation des clients par les professionnels (et plus particulièrement par les artisans) passe par les réseaux entre professionnels.

Par ailleurs, « *Si les mesures de productivité soulèvent des difficultés en général (Vincent, 1968), les spécificités de la construction en représentent de nouvelles (Fournier, 1985).* » Comet (2004). Ainsi le chantier est considéré comme *boîte noire* étant donné la difficulté à analyser les mécanismes de productivité associés. Les raisons de cette situation se trouvent probablement dans l'activité de construction qui n'est pas répétable, dans les conditions de production qui ne sont pas contrôlées, et dans la fragmentation des différents acteurs d'un projet (imposée par la législation sur les projets publics). La comparaison des projets et l'évaluation de leur productivité est donc problématique.

Par ailleurs la difficulté de diffusion de l'innovation ralentit les éventuels gains de productivité potentiels. En effet, dans les projets de construction, les relations entre acteurs sont éphémères et créer des relations durables permettant de capitaliser de l'expérience et de mettre en place des stratégies de capitalisation est difficile. Comme le précisent Bougrain and Carassus (2003), en de multiples occasions, les équipes impliquées sur un projet se décomposent. De fait, toute capitalisation des expériences est délicate (Lahdenperä, 1998; Egan, 1998). Cette absence de relation sur la durée, réduit l'homogénéité de comportement des acteurs du point de vue de la formation des normes et des attitudes (Guilhon, 1996). Pour Bougrain and Carassus (2003) la fragmentation rend le partage des fruits de l'innovation difficile (Lahdenperä, 1998; Egan, 1998; PCA, 1996). Veltz (1996) quant à lui met en avant la méfiance vis-à-vis des partenaires : une innovation réussie est une innovation qui améliore la situation économique des acteurs. Plus ils sont nombreux, plus les risques de voir le voisin

s'approprier les effets de votre innovation sont grands. Cette situation peut conduire à un quasi-immobilisme.

De même Gruneberg (1997) revient sur la problématique des propriétaires fonciers : les bénéficiaires ultimes des améliorations dans les technologies de construction, qui se traduisent par une efficacité accrue de la production et une baisse des coûts, sont les propriétaires fonciers qui s'approprient une part importante du surplus produit par les ouvriers du bâtiment. Investir des moyens dans une innovation qui profitera aux partenaires peut donc être un obstacle pour une partie des acteurs. D'autre part, étant donnée la diversité des parties prenantes, celles-ci n'ont pas les mêmes perspectives concernant l'innovation. Pour du Tertre et Le Bas (1997) Les acteurs impliqués dans la gestion de projet et ceux qui assurent la gestion de la production sur chantier ne s'appuient pas sur une vision commune des enjeux de l'innovation. Les uns se focalisent davantage sur les aspects techniques de l'innovation, les autres sur les modifications organisationnelles qu'elle provoque. La recomposition des équipes projets accentue cette divergence.

Il faut cependant relativiser cette absence de culture de la performance et un certain consensus existe sur la capacité des acteurs à s'autoréguler. En effet, la reconnaissance des professionnels est liée à la satisfaction des clients et par conséquent au bouche à oreille qui en découle. La santé des entreprises est donc directement liée à la perception que les clients ont de leur travail, et toute mauvaise prestation est susceptible d'impacter fortement les entreprises. Néanmoins, il semble que *« ces dispositifs traditionnels soient remis en cause par l'urbanisation, l'attitude de plus en plus consumériste des clients, l'affaiblissement des sociabilités de voisinage ainsi que l'incertitude sur la qualité des prestations. »* (Comet, 2004).

## **2.2. Les garanties de performances énergétiques**

Afin de **garantir la performance des bâtiments et de convaincre les preneurs de décisions** de l'intérêt d'investir dans des bâtiments « propres », le secteur a développé des garanties de performances énergétiques. Celles-ci ont l'objectif d'assurer un niveau de consommation faible des bâtiments construits ou rénovés. A l'heure actuelle, les propositions portent sur **deux garanties** principales (extraits du rapport sur la garantie énergétique du plan Bâtiment Durable, 2012):

- La **garantie de performance énergétique intrinsèque (GPEI)**, au stade conception et travaux, qui garantit les performances énergétiques intrinsèques à l'immeuble, dans lesquelles il est prévu que les performances recherchées seront supérieures à celles de la réglementation thermique s'appliquant aux travaux envisagés. Cette garantie ouvre la possibilité d'inclure des scénarios



d'utilisation plus adaptés que ceux de la réglementation, et permet donc aux prestataires de proposer une offre sur mesure aux clients. Le contrôle de la performance n'est pas réalisé sur les consommations réelles, mais sur dossier (vérification des méthodes de calcul et du choix des matériaux) et sur site (vérification des matériaux, des épaisseurs d'isolants, mesure de la perméabilité à l'air, de la ventilation etc...) avant la réception du bâtiment. Ces contrôles permettent de traiter les dysfonctionnements avant la livraison de l'immeuble.

- La **garantie de résultats énergétiques (GRE)**, qui incorpore l'exploitation et l'usage et de décline dans la durée. Le GRE repose sur un niveau maximal de consommations énergétiques réelles et mesurables, ou sur un pourcentage de réduction des consommations énergétiques réelles par rapport à une situation de référence avant contrat, et doit respecter des paramètres de confort spécifiés (température, ventilation, qualité de l'air, etc.) pendant une durée de couverture contractualisée. En plus de la diminution des charges de fonctionnement et des rejets de gaz à effet de serre, le GRE permet de sécuriser dans une certaine mesure l'investissement initial, et incite le prestataire à améliorer la performance énergétique.

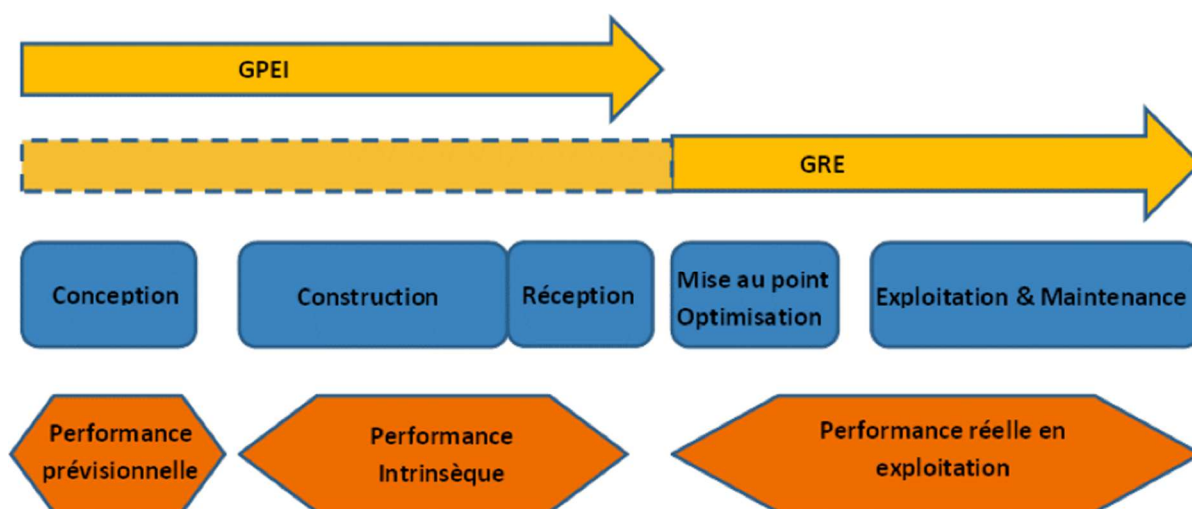


Figure 4 LA GPEI et la GRE dans le processus de construction (ademe.fr, 2016)

Ces différentes garanties se basent construction de scénarios d'occupation et de comportement des occupants en cohérence avec le programme de la maîtrise d'ouvrage. L'effort sur les garanties de performance obligera donc les professionnels à monter en compétence sur la modélisation des occupants et à faire du programme un document analytique, systématique et objectivable.

Ces garanties ne sont pas les seuls signes de reconnaissance de la qualité des bâtiments, ils émergent dans un secteur particulièrement prolifique en termes de labels et certifications.

### 2.3. Le manque de lisibilité des performances des bâtiments

A l'heure actuelle, il existe plus d'une vingtaine de labels ou certifications permettant d'afficher la qualité énergétique des bâtiments en France et répondant à des cibles et des contraintes différentes.

A titre d'exemples (non exhaustif) : *NF Maison Individuelle*, *NF Logement*, *Qualitel*, *Promotelec Performance*, *NF Maison Rénovée*, *Patrimoine Habitat*, *Patrimoine Copropriété*, *Label Promotelec Rénovation Énergétique*, *HPE Rénovation*, *BBC effinergie Renovation*, *effinergie Rénovation*, *BBC effinergie*, *effinergie +*, *BEPOS effinergie 2013*, *Bâtiment basse consommation Prioriterre RT 2012*, *Habitat et Environnement*, *Patrimoine Habitat et Environnement*, *Patrimoine copropriété &*



*Environnement, NF HQE, Passiv' Haus, Minergie etc...*

Ces différents labels et certifications répondent à des produits différents : neufs/rénovation, individuel/collectif, et sont décernés par des organismes différents sur des cibles différentes et par une démarche qui varie. Pour Comet (2004) les signes de reconnaissance de la qualité sont une réponse à une attitude de plus en plus consumériste des clients, cependant « les consommateurs semblent, d'un côté, ignorants des signes de reconnaissance de la qualité et, de l'autre, relativement méfiants vis-à-vis de ces signes. Il faut avouer que ces derniers ont tendance à foisonner, sans que de réels efforts de visibilité soient faits auprès du grand public. ». Le nombre élevé de labels/certifications/démarches ne permet donc pas aux habitants d'accéder à une information claire leur permettant d'évaluer et de comparer simplement les qualités environnementales d'un bâtiment. Il convient donc d'uniformiser le

Figure 5

message et d'améliorer l'affichage des performances des bâtiments afin de faciliter la compréhension.

La lecture des performances est d'autant plus difficile qu'il n'existe pas de consensus sur les outils d'ACV, qui permettent d'évaluer la qualité environnemental des projets de construction. Les calculs issus des différents logiciels sont non seulement dépendants de la base de donnée utilisées, du logiciel utilisé et de l'usage même des fonctionnalités du logiciel. On constate ainsi une difficulté à obtenir des données comparables. Les performances de différents bâtiments calculées par des acteurs et des outils différents ne sont donc pas comparables. Pour les professionnels, l'impossibilité de comparer les performances de projets différents pose le problème du positionnement des projets les uns par rapport aux autres. Il apparaît donc nécessaire de procéder à une harmonisation dans les bases de données utilisées et dans les logiciels utilisés (voir chapitre 3 partie 3).

Pour pallier à ces difficultés, la mise en place d'un standard commun, accepté et utilisé par l'ensemble du secteur français semble une direction pertinente. Chez nos voisins Allemands, le système de certification DGNB-LEGEK (Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen).

Le système DGNB propose 6 différents critères d'appréciation pour l'évaluation d'un bâtiment:

- La qualité environnementale,
- La qualité économique,
- La qualité socioculturelle et fonctionnelle,
- La qualité technique,
- La qualité du processus, et,
- La qualité du site

Ces 6 critères sont composés au total de 41 indicateurs, qui mesurés et pondérés permettent une évaluation de la performance d'un bâtiment qui n'est pas limitée à sa performance énergétique. Le système de certification propose des adaptations en fonction du type de bâtiment (Bureaux, écoles, hôpitaux etc..).

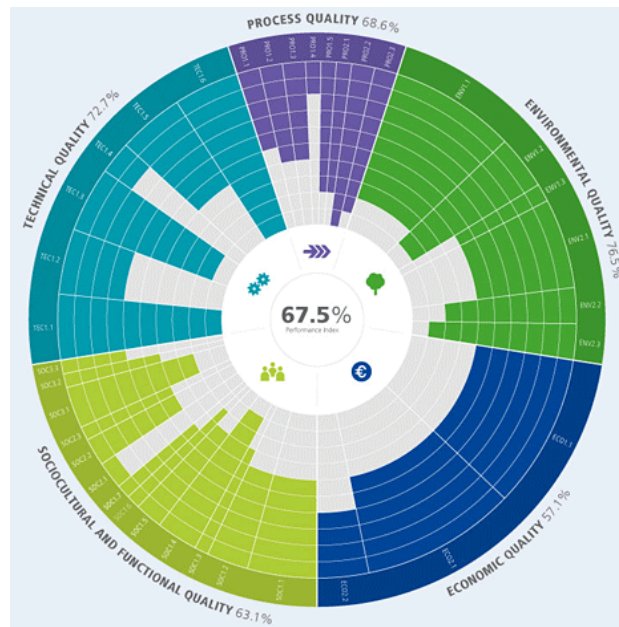
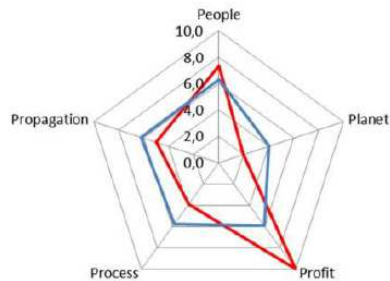


Figure 6: Visualisation des performances proposées par le référentiel DGNB (DGNB, 2015))

En théorie, ce type de certification, permettrait de mieux harmoniser l'affichage des performances des bâtiments en France. Cette proposition fait écho aux recommandations du pôle de compétitivité Advancity qui cite les référentiels EURBANLAB et EFFICACITY INSIGHT. Le référentiel EURBANLAB propose 5 critères : Peuple, Planète, Profit, Processus, et Propagation. Le référentiel EFFICACITY INSIGHT propose quant à lui plusieurs critères (8 ou 12 selon les sources) et selon des standards géographiques propres. Ces critères sont associés à des indicateurs quantitatifs ou qualitatifs (voir figure). Les performances sont présentées graphiquement sous forme de radar, d'une manière analogue au référentiel allemand DGNB.

**Visualisation de performances  
thème par thème pour  
le référentiel EURBANLAB**



**Visualisation de performances  
indicateur par indicateur pour le  
référentiel EFFICACITY INSIGHT  
(méthode appelée « signature urbaine »)**

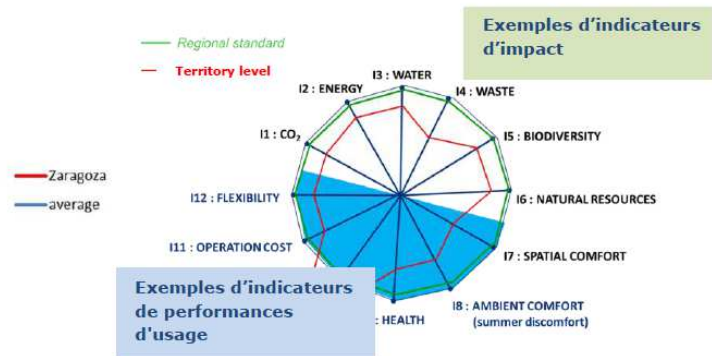


Figure 7: Visualisations des performances proposées par les référentiels EURBANLAB et EFFICACITY INSIGHT

La présentation graphique permet une visualisation simple et rapide des performances, et le cas échéant la comparaison des performances de différents projets. Les performances mises en avant ne sont pas limitées aux performances environnementales et prennent en compte des indicateurs de performances d'usage. Ces différentes visualisations permettent une lecture et une comparaison plus claire de la performance des bâtiments.

Il est cependant important d'être capable de mesurer objectivement les niveaux atteints sur chacun des critères et que ces derniers soient représentatifs de la nature du bâtiment (tertiaire, logement, école...) et de la région dans lequel se situe le bâtiment. Le développement d'une visualisation des performances ne sera donc possible qu'au travers un effort concentré des acteurs du Bâtiment sur la définition et la mesure des critères de performance, et ce, sur l'ensemble du territoire.

### 3. La mise en évidence de difficultés fondamentales

Nous l'avons vu au travers des différentes questions abordées jusqu'ici, la problématique énergétique met en évidence certaines des difficultés fondamentales inhérentes au secteur du Bâtiment. La fragmentation du secteur et des acteurs, le manque de capitalisation des projets, le manque de culture de la performance, la non-répétabilité et donc la difficulté à comparer des projets sont autant de facteurs qui impactent le traitement de la question environnementale dans le Bâtiment. Dans une dynamique d'éco-conception, les acteurs se doivent de repenser le bâti et de monter en compétence sur un certain nombre de questions.

#### 3.1. La question des interfaces et de la programmation

Comet (2004) considère que les réserves de productivité dans le BTP « *se situent principalement dans la gestion des interfaces* » et que « *l'émergence d'une rationalité de système serait une réponse, portée, particulièrement en France, par les maîtres d'ouvrage et les grandes entreprises. Cette rationalité de système consiste en une gestion plus globale du cycle de production, sur le mode du système intégré. La gestion des interfaces doit permettre une meilleure maîtrise de la qualité, des coûts et des délais.* ». Si ce constat est particulièrement flagrant pour la phase de production il est aussi visible dans les étapes amont.

La loi MOP et en particulier la démarche d'attribution des marchés par lot est un obstacle à une démarche de système et contribue à une *gestion des interfaces* difficiles. Elle encourage un fonctionnement par silos et nuit à une « réponse système ». La séparation de la MOA, MOE et Entreprises de réalisation n'est obligatoire que pour les projets soumis à la loi MOP (projets publics ou assimilés), mais reste le modèle de référence pour les autres projets (non publics). Cependant, pour les projets non publics il existe d'autres formes d'organisations comme le groupement momentané d'entreprise (groupement d'entreprises en charge de la réalisation), ou le « clé en main » (la MOA n'a qu'un seul interlocuteur qui se charge de la MOE + Réalisation), ils ne sont cependant pas la norme.

On observe de nombreuses conséquences de cette organisation. Une première conséquence visible réside dans le surcoût final du produit par rapport à la valeur acquise durant le projet. Christophe Gobin estime ainsi un décalage de l'ordre de 30% entre la valeur acquise et les dépenses effectués à l'issus du projet (figure 8). Ce décalage est dû à la remise en cause systématique des décisions de l'intervenant précédent, et témoigne du manque de cohésion et de cohérence entre les différents intervenants qui se succèdent. La logique individuelle des intervenants domine sur la cohérence collective et dégrade ainsi la valeur acquise par le client.

On constate ainsi une externalisation des risques et des responsabilités vers l'intervenant suivant dans le processus. Christophe Gobin (2009) illustre ce phénomène avec l'exemple suivant : « *L'architecte qui a gagné un concours va chercher à réussir son projet sans prendre sur lui les difficultés d'exécution ou de mise en œuvre. En effet, il part du principe que les entreprises de construction sont là pour résoudre les problèmes de réalisation. De même, l'entreprise adjudicatrice d'un marché cherchera à retrouver les conditions d'emploi de solutions éprouvées en proposant des aménagements du projet architectural. Cette succession de reprises du projet qui sont organisées pour optimiser les conditions propres à chaque intervenant s'effectue au détriment d'une consolidation cumulative du projet collectif* ». En conséquence, il est difficile de tracer les responsabilités dans les décisions prises et l'engagement des différentes parties prenantes est limité.

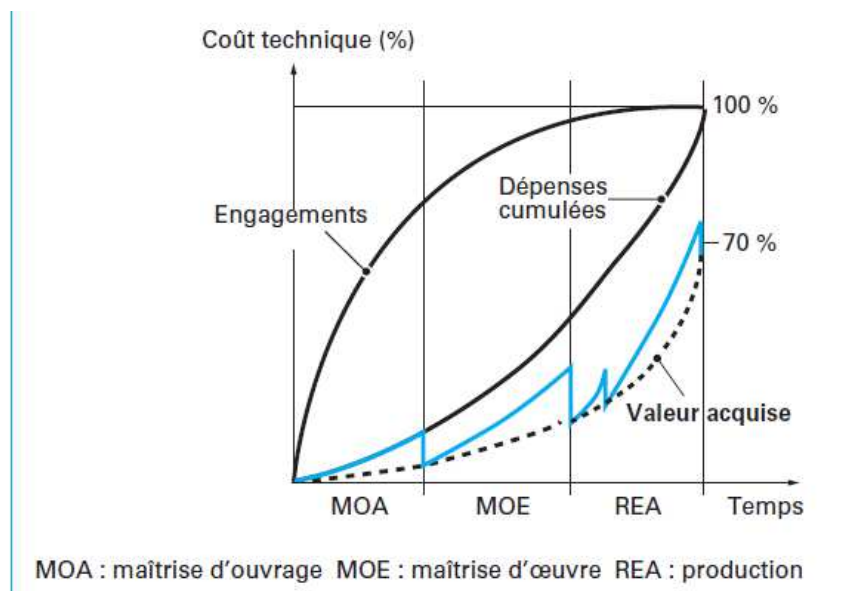


Figure 8: Reconstitution de la valeur acquise (Gobin, 2009)

Face aux défis posés par les contraintes environnementales, et au vu des garanties de performance, il est nécessaire que l'ensemble des acteurs de la chaîne de valeurs, notamment la MOA montent en compétence. Dans un contexte d'éco-conception, il est nécessaire que le programme soit précis et prenne en compte des contraintes qui vont au-delà de l'aspect économique. Il est nécessaire d'envisager l'ancrage du bâtiment dans son contexte urbain, et d'anticiper au mieux les usages des futurs occupants, afin de déterminer des objectifs de performance cohérents avec les attentes des futurs utilisateurs. En effet la MOA (ou l'AMO le cas échéant) est en charge du programme, document fondateur du projet. Il est nécessaire que les hypothèses et contraintes formulées dans ce programme soient précises, et détaillées pour fournir à la MOE une base de travail à ses décisions de conception. Le programme doit devenir un document analytique et systématique reposant sur des critères objectivables. En aval, l'ACV permettra d'objectiver la réponse formulée par la MOE au programme

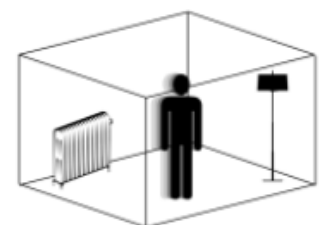
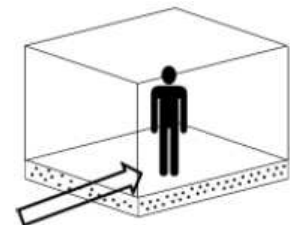
imposé par la MOA. A l'image des cahiers des charges fonctionnels de l'industrie manufacturière, la rationalisation de la programmation passera probablement par un questionnement sur la fonction du bâtiment.

### 3.2. La question des fonctionnalités du bâtiment

Le programme de la MOA est crucial dans la problématique énergétique et met en avant la question de la fonction du bâtiment. Cependant, à l'heure actuelle, les questions portant sur la fonction, la finalité et les externalités associées au bâtiment ne sont abordées de manière analytique et systématique par les professionnels que de manière exceptionnelle. Il semble cependant pertinent d'adopter une approche fonctionnelle de la programmation et de la conception des bâtiments. Déterminer de manière précise les fonctions proposées par les futurs bâtiments permettra de rationaliser les programmes et leurs conséquences en termes économiques et énergétique.

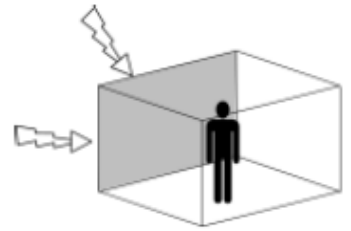
À ce titre on peut évoquer les travaux de Cluzel *et al.* (2016) Basés sur les travaux de Gobin (2006) qui se sont attaché à produire un inventaire des fonctions que doit remplir un bâtiment. Dans leurs travaux le bâtiment peut être décomposé en 7 fonctions principales (illustrations de Cluzel *et al.*, 2016 :

- **Fournir un espace pour mener ses activités** : L'espace offert par le bâtiment doit permettre aux usagers de conduire les activités qu'il souhaite réaliser et naturellement permettre un accès sans difficultés. L'occupant, son comportement, ses attentes, et ses activités peuvent évoluer avec le temps, le bâti doit donc pouvoir être agencé de manière optimale afin de pouvoir assurer l'évolution de l'occupant.
- **Fournir une ambiance** : A tout moment, le bâtiment doit contribuer aux confort thermique, lumineux, olfactif (renouvellement d'air) et acoustique de l'individu afin de lui permettre de réaliser ses activités dans des conditions appropriées. Les prestations du bâti doivent assurer le confort de l'occupant en limitant cependant les impacts sur l'environnement.

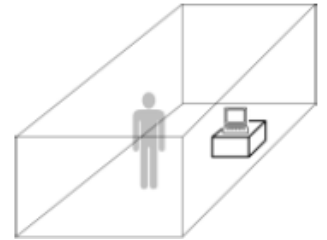




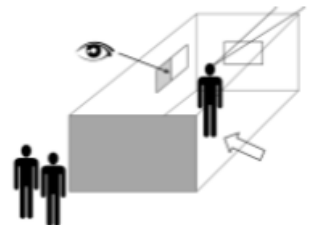
- **Fournir une protection :** Le bâtiment doit éviter à l'occupant tout incident corporel direct ou indirect (chutes ; électrocution, intoxication...), le préserver d'éventuels incidents d'origine extérieure (séisme, incendie...), et le prémunir d'actes de vandalisme (cambriolage, agression...)



- **Permettre l'usage des biens et des outils :** Le bâti doit permettre la mise à disposition d'un espace suffisant pour les équipements et le mobilier nécessaires aux activités des occupants. En plus de l'espace, le bâti doit permettre aux objets présents et futurs d'accéder aux ressources qui leur sont nécessaires.



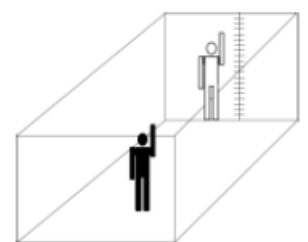
- **Maitriser les relations :** L'occupant doit être en mesure d'entrer en contact avec d'autres individus, mais aussi de s'isoler afin de protéger son intimité s'il le désire.



- **S'intégrer au site :** L'occupant doit être en mesure de bénéficier des acquis liés à la localisation du bâti. Le bâti doit aussi faire en sorte que les activités de l'occupant ne portent pas préjudice sur l'équilibre préexistant.



- **Être porteur de sens :** Le bâti doit être en mesure de susciter, chez l'occupant, une charge émotionnelle liée au sentiment d'équilibre et de bien-être. De plus, il doit être en mesure de signifier aux tiers l'expression d'une empreinte personnelle, reflet ou complément d'une personnalité



Ce découpage en 7 fonctions majeurs a permis aux chercheurs (Cluzel *et al.*, 2016) de déterminer jusqu'à 95 critères de performance fonctionnelle permettant de caractériser de manière objective la performance fonctionnelle de tout bâtiment.

Cette démarche permet non seulement de mieux identifier et évaluer les externalités environnementales, sociales et économiques du bâtiment ; mais aussi d'évaluer la valeur fournie par rapport aux ressources mobilisées dans une logique d'analyse de la valeur.

A termes, on pourrait envisager que les programme des MOA suivent une trame systématique, analytique selon des critères objectivables et basés sur un découpage fonctionnel du bâtiment. Par suite, l'ACV permettra la validation des niveaux atteints par le bâtiment sur certain des critères de performances fonctionnelles figurant dans le programme.

## 4. Conclusion

Au terme de ce bref passage en revue des verrous sectoriels qui sont autant d'obstacles à une meilleure réponse à la problématique, nous sommes en mesure de faire un certain nombre de constats.

Premièrement, la fragmentation des acteurs, visibles tout au long du processus de construction des bâtiments est aussi présente au niveau des institutions. Ce morcellement des acteurs publics et privés travaillant sur la question de l'éco-conception permet, en théorie, une diffusion locale des innovations. Cependant, au vu des faibles moyens investis dans le secteur sur les activités de R&D, ce manque de synergie entre les acteurs semble une aberration.

Ce constat, partagé par le Plan Bâtiment Grenelle, est probablement lié aux intérêts divergents et contradictoires des différents acteurs qui ont intérêt à se différencier, et à proposer des services de formation, d'expertise, de certification et de mise à disposition de plateformes techniques. À ce titre un certain flou semble peser sur la séparation entre les activités de Recherche subventionnées par l'Etat et la diffusion marchande de la connaissance auprès d'entreprises locales.

La question de la performance énergétique (tout comme la question des outils d'ACV) reflète cette fragmentation, avec l'existence de plus d'une vingtaine de labels et certifications présentes sur le marché de l'immobilier. La lecture et la comparaison des performances gagneraient à obtenir un consensus sur un référentiel unique permettant une diffusion plus efficace, quitte à décliner le référentiel en fonction des régions et de la nature du bâtiment (individuel/collectif, logements/tertiaire...). Certains travaux vont dans ce sens, et posent nécessairement la question de l'objectivation des critères de performances.

Nous avons à ce titre évoqué les travaux portant sur le découpage fonctionnel du bâtiment qui constituent un probable début de réponse. Au-delà de l'analyse fonctionnelle, les réponses aux problématiques de performance (et donc de performance environnementale) passe nécessairement par une évolution des pratiques et la rationalisation des procédures.

On ne peut en effet prétendre à traiter la problématique environnementale sans être capable *d'évaluer de manière objective la valeur fournie par rapport aux ressources mobilisées*, qui plus est dans un contexte de rigueur budgétaire et environnementale.

Cette objectivation des performances passe certes par un travail sur la rationalisation des

procédures, mais nécessitera une synergie et consensus de l'ensemble des acteurs influent du secteur. Face à ce constat, nous verrons dans la seconde partie, les principales entités de Recherche en France sur la question de l'éco-conception dans le bâtiment.

## **Chapitre 2 : Les principales entités de Recherche dans le bâtiment en France**

Ce chapitre a pour objectif d'identifier les principales entités de Recherche française (Universités, Laboratoires, UMR, LABEX, Ecoles d'architectures) affichant dans leurs activités des thématiques en lien avec l'éco-conception dans le Bâtiment. La liste des différents acteurs et de leurs activités n'a pas pour prétention d'être exhaustive, mais permet d'identifier un certain nombre d'institutions dont les activités de Recherche sont particulièrement pertinentes dans la thématique de l'écoconception dans le bâtiment.

Dans la suite, la plupart des informations sont issues des sites internet et plaquettes des différentes structures, ce qui souligne que les travaux mis en avant ne sont pas isolés mais font partie d'un projet collectif de la structure en lien avec l'éco-conception dans le Bâtiment. D'autres institutions produisent des travaux sur ces thématiques de manière ponctuelle mais dans un cadre de Recherche plus large que l'Eco-Conception dans le Bâtiment. Les structures sont classées par situation géographique.

# 1. Île de France

## 1.1. Mines PariTech

**Thématiques pertinentes** : Modélisation, mesure de la performance énergétique des bâtiments ;  
Intégration d'énergies renouvelables

Au sein des **Mines ParisTech**, le **Département Énergétique et Procédés (DEP)** aborde la question énergétique dans les bâtiments.

Ainsi l'**axe 1** de Recherche du DEP: « **Efficacité énergétique** » traite de la maîtrise des consommations énergétiques et des impacts sur l'environnement et la santé dans les secteurs du **bâtiment**, de l'industrie et du transport. Les travaux portent sur le développement **d'outils de simulation**, de **prototypes** et de **démonstrateurs**, ainsi que sur la **mesure des performances énergétiques** sur des bancs dédiés. Les activités du DEP sont essentiellement axées sur des travaux de modélisation et de simulation appliqués au comportement thermique des bâtiments et aux systèmes de production d'énergie intégrés.

*Le simulateur COMFIE permet d'évaluer les besoins de chauffage et de rafraîchissement, ainsi que le niveau de confort thermique des bâtiments. Un modèle de réseau multizones a été intégré afin d'améliorer la prise en compte des mouvements d'air. Des travaux en cours portent sur le couplage entre pompe à chaleur et système photovoltaïque et sur les stratégies de régulation par programmation dynamique.*

*La **performance des enveloppes** est abordée sous l'angle matériaux, par le développement de mortiers d'enduit à haut pouvoir isolant, l'élaboration de superisolants thermiques à base de silice nanostructurée (composites, flexibles, ...) et l'étude de murs à effet de serre translucides à base de matériaux à changement de phase et de superisolants granulaires.*

*Par ailleurs, les impacts des bâtiments et des quartiers, sur l'environnement et la santé, sont étudiés par l'analyse de cycle de vie (méthode EQUER).*

L'**axe 3** du DEP nommé « **Energies nouvelles et renouvelables** » porte sur *l'évaluation et la prévision de la ressource à l'optimisation de l'intégration des renouvelables sur les réseaux, jusqu'à l'évaluation de leurs impacts environnementaux sur leur cycle de vie.*

Des méthodes d'optimisation stochastique sont proposées pour la gestion de la production décentralisée et pour la participation des renouvelables aux marchés d'électricité.

En ce qui concerne l'évaluation des impacts environnementaux, le DEP étudie les impacts directs et indirects de filières énergétiques sur l'environnement et la santé, telles que les énergies renouvelables. Le DEP développe la formalisation des méthodologies d'évaluation des impacts, et plus

particulièrement l'approche cycle de vie. Ces recherches sont notamment conduites sur les filières photovoltaïques, solaires thermiques et éoliennes.

## 1.2. Centrale Supélec

L'école **Centrale-Supélec**, étudie au sein du **Laboratoire Génie Industriel** différentes problématiques en rapport avec l'Eco-conception dans le bâtiment :

- Etudier la consommation d'énergie liée aux comportements des occupants de bâtiments résidentiels en adoptant une approche stochastique basée sur la notion d'activité
- Etudier les limites et opportunités pour des nouveaux outils d'éco-conception dans l'industrie de la construction
- Définir les performances fonctionnelles attendues des bâtiments pour permettre une analyse des coûts et leurs répartitions au sein des fonctions d'usage du bâtiment
- Etudier l'impact des nudges sur les consommations énergétiques des étudiants

## 1.3. Université Paris-EST

**Thématiques pertinentes** : Accompagnement de l'action publique sur la rénovation énergétique ; intégration des comportements énergétiques et thermique dans l'évaluation des performances ; sciences sociales

L'Université Paris-Est semble être, en Île de France, l'acteur de la Recherche le plus dynamique sur la question urbaine, avec un son pôle Ville, Transports et Territoires au sein duquel le laboratoire d'Urbanisme (LAB'URBA) - EA 3482 semble la plus pertinente sur la question de l'éco-conception de bâtiment.

L'équipe **génie urbain** du **LAB'URBA** s'attache à observer, analyser et conceptualiser des phénomènes urbains (métropolisation, jeux d'acteurs, usages, construction des formes, pratiques d'aménagement, etc.) face à des enjeux urbains émergents ou non (résilience, économies d'énergie, systèmes intelligents, circuits courts, qualité environnementale,...). L'échelle d'étude se veut multi-scalaire et ne se limite pas au bâtiment. L'approche de Recherche est présentée comme systémique, interdisciplinaire et tournée vers l'action. La **Recherche développée a notamment pour finalité d'accompagner la décision et l'action publique métropolitaine.**

Parmi les différents champs d'études présentées, l'axe **Energie–Climat** correspond le plus à notre problématique de Recherche :

*Les enjeux concernent à la fois la rénovation énergétique du bâti, les îlots de chaleur et de fraîcheur, la production et le stockage des énergies fatales et locales, l'adaptation au changement climatique et les comportements énergétiques et thermiques. Quelques questions abordées dans ce champ :*

- *Comment **penser la mobilité et l'aménagement au regard des questions énergie et climat?***
- ***Problématique de la rénovation durable/énergétique du parc existant** (ouvrier, tertiaire, etc.) ?*
- *Comment **évaluer/mesurer la performance énergétique de projets urbains/de quartiers?***
- *Comment **produire/stocker de l'énergie en ville ?***
- *Comment **intégrer les comportements énergétiques et thermiques dans l'évaluation des performances du bâti?***

(<http://www.laburba.fr/g%C3%A9nie-urbain-et-environnement/>)

Le **Lab'Urba** associe des enseignants-chercheurs de l'**Ecole d'Urbanisme de Paris** du département de géographie de l'**Université Paris Est Créteil** (UPEC), du département de **Génie Urbain de l'Université Paris-Est Marne-la-Vallée** (UPEM) et de l'**Ecole des ingénieurs de la Ville de Paris (EIVP)**

#### **1.4. Ecole D'Ingénieurs de la Ville de Paris (EIVP)**

**Thématiques pertinentes** : Développement de solutions pour rénovation de logements, gestion urbaine de l'énergie

Une des thématiques de Recherche de l'**Ecole d'ingénieurs de la Ville de Paris (EIVP)** nommée « **énergie et climat en ville** » s'articule autour des trois problématiques que sont le **climat urbain**, l'**énergie** et le **changement climatique**.

La Recherche à l'**EIVP** sur l'énergie et le climat en ville aborde ainsi de nombreux sujets ou sous-thèmes, et porte un regard pluridisciplinaire sur les différentes problématiques qui se posent. Ainsi la question de l'écosystème urbain qui porte à la fois sur les **outils d'analyse** (écologie territoriale, métabolisme urbain, empreinte, bilan carbone territorial, etc.) ou les phénomènes physiques influents et influés (climat urbain, pollution atmosphérique, etc.).

La question de la gestion urbaine de l'énergie (enjeux énergétiques pour les milieux urbains et analyse sectorielle) est abordée, tout comme l'**amélioration énergétique des bâtiments en contexte urbain**. Enfin, la question des acteurs, des instruments et de l'évaluation est une problématique centrale de l'EIVP.

Les projets en cours de l'école illustrent ces problématiques :

« - ADAPTATIO - Intégration de l'adaptation au changement climatique dans la conception des projets d'aménagements urbains : nouveau(x) outil(s) et nouveau(x) métier(s)

- GREENOV - Green Rénovation Cluster

- IMPETUS, démarche d'intégration urbanisme/bâti et transport/mobilité pour mieux considérer les projets d'aménagement urbain dans la dynamique de transformation de la ville durable

- SAPERLO - Solutions adaptées pour la performance environnementale en rénovation des logements ouvriers

- SERVEAU - Simulation, évaluation et réduction de la vulnérabilité énergétique des aménagements urbains

- INTERNE - Innovation et territoires de la rénovation énergétique : le cas de la rénovation énergétique de l'immobilier parisien »

## **1.5. Centre International de Recherche sur l'environnement et le développement (CIRED)**

**Thématiques pertinentes** : Analyse économique des enjeux environnementaux, notamment dans le secteur du Bâtiment

Le **Centre international de recherche sur l'environnement et le développement (CIRED)** est Unité Mixte de Recherche (UMR 8568) sous tutelle principale du **CNRS** et de **l'École des Ponts ParisTech**, avec **l'École des Hautes Études en Sciences Sociales**, **AgroParisTech-ENGREF** et le **Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement**.

Sa perspective d'étude est principalement l'analyse et la modélisation économique de la question environnementale à travers des échanges entre sciences sociales, sciences de la nature et sciences de l'ingénieur.

L'axe de Recherche « **Prospectives sectorielles** » aborde dans son volet **Energie**, l'efficacité énergétique des bâtiments est analysée d'un point de vue économique. En utilisant le bâtiment résidentiel comme base de travail, il s'agit de proposer une vision intégrée de l'« Energy Efficiency gap », c'est-à-dire l'écart entre le potentiel technologique d'économies d'énergie et la réalité des comportements économiques.



## 1.6. ESTP

**Thématiques pertinentes**: Caractérisation de matériaux ; modélisation et simulation du comportement des bâtiments

Sur **Cachan**, l'**ESTP** concentre ses activités de Recherche au sein de l'**Institut de Recherche en Constructibilité** (IRC). Les thématiques abordées à l'**IRC** sont regroupées au sein de 2 pôles : Constructibilité, Matériaux, Projets (**CMP**) et Constructibilité, Modélisation, Multicritères (**CMM**).

Le pôle **CMP** aborde, entre autre, la caractérisation, formulation, sélection et mises en œuvre des matériaux constitutifs des ouvrages pour optimiser les performances pour différentes exigences (tenue en service, dégradation, réparabilité ...). Cet effort porte particulièrement sur le béton.

Le pôle **CMM** aborde quant à lui les questions de modélisation et simulation numérique, de maquette 2D et 3D, et de modélisation d'optimisation multicritères (algorithmes génétiques, RNA)

L'**IRC** est équipée d'accueil de l'école doctorale Sciences, Ingénierie et Environnement - SIE de l'Université Paris Est.

## 1.7. ESITC Cachan

**Thématiques pertinentes** : Impacts environnementaux de la construction sur la qualité de l'eau

Sur **Cachan** toujours, l'**ESITC Cachan** explore l'empreinte des activités de la construction sur l'eau et l'environnement au sein de son Pavillon de l'Eau et de l'environnement. Ses efforts portent principalement sur l'évaluation des mécanismes d'impact sur l'environnement des activités de construction, sur les sols, les nappes phréatiques et les eaux de surface. Ses travaux s'intéressent aussi bien aux phases de chantiers comme à celles de l'exploitation des infrastructures de transport et des bâtiments.

## 1.8. UMR AUSser : Architecture Urbanisme Société : Savoirs Enseignement Recherche

**Thématiques pertinentes** : Prospective architecturale, urbaine

L'UMR AUSser est une structure fédératrice des **Écoles nationales supérieures d'architecture** (ENSA), lesquelles sont partenaires de l'unité, AUSser regroupe 4 équipes de recherche :

- l'Ipraus, « Institut Parisien de Recherche : Architecture Urbanistique Société », de l'ENSA Paris-

Belleville ;

- ACS, « Architecture, Culture, Société XIXe- XXIe siècles », de l'ENSA Paris-Malaquais ;
- AHTTEP, « Architecture, Histoire, Transport, Territoire, Patrimoine », de l'ENSA de Paris-La-Villette ;
- OCS, « Observatoire de la condition suburbaine » de l'École d'architecture, de la ville et des territoires de Marne-La-Vallée. L'unité se déploie sur 4 sites ; son siège administratif est situé à l'ENSA Paris-Belleville.

L'axe « **Architecture des territoires : Transports, formes urbaines, environnement - Histoire et prospective** » porte sur trois thèmes– transports, formes urbaines, environnement – avec des travaux situés au croisement de ces sujets; en effet la question environnementale et la transition énergétique représentent le socle commun de la plupart des recherches menées. La recherche interroge les stratégies futures de développement des villes vis-à-vis de la problématique environnementale, d'un point de vue architectural et sociologiques

## 2. Nantes

### 2.1. "Université de Nantes/Centrale Nantes "GeM - Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique

Thématiques pertinentes : Matériaux : propriétés, ACV.

Les axes de recherches des différentes équipes s'articulent autour des thématiques Matériaux – Procédés – Structures, visant principalement à développer et mettre en œuvre des approches intégrées couvrant les étapes de conception, fabrication et fonctionnement de composants industriels (aéronautique, automobile, énergie, génie civil, ...).

Parmi les différentes équipes de recherches présentes au sein de cet institut, **l'équipe Interactions Eau-Géomatériaux (IEG)** a pour objectif principale de contribuer à l'optimisation de la durabilité des ouvrages du génie civil (bâtiments, infrastructures et ouvrages d'art) et de limiter les impacts de ces ouvrages sur l'environnement. Les activités réalisées portent sur la caractérisation des propriétés mécaniques, physico-chimiques et de transferts (masse et chaleur) des géomatériaux, ainsi que sur l'analyse de leur cycle de vie. Les recherches reposent sur des expérimentations et la modélisation, positionnées à différentes étapes du cycle de vie des matériaux du génie civil.

### 2.2. UMR1563 Ambiances, Architectures, Urbanités

Thématiques pertinentes : Etude des phénomènes physiques, sociaux et esthétiques et leur

incidence sur les ambiances ressentis par les habitants

L'UMR AAU comprend environ 110 membres répartis entre deux équipes : le CRENAU à Nantes (Centrale Nantes et Ecole d'architecture de Nantes) et le CRESSON à Grenoble (Ecole nationale supérieure d'architecture de Grenoble).

AAU développe des recherches dans les domaines des ambiances, de l'architecture et de la ville, à l'interface entre sciences humaines et sociales, et sciences de l'ingénieur. Les champs de recherche comprennent : les phénomènes physiques (soleil, lumière, chaleur, vent, son...), les formes et matières de l'espace architectural et urbain, l'expérience sensible de l'environnement construit, et la dimension esthétique. L'objectif est de qualifier au travers la recherche sur les ambiances, les sensations éprouvées par les occupants des espaces architecturaux et urbains

### **2.3. Institut Français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux (IFSTTAR)**

**Thématiques pertinentes** : Matériaux : filières, impact sur la santé, et performances

L'axe 2 de recherche de l'IFSTTAR : Construire, déconstruire, préserver, adapter les infrastructures de manière efficace et durable entreprend des recherches dans le domaine de l'éco-conception notamment de bâtiments. Les objectifs de cet axe les plus pertinents par rapport à notre problématique sont :

- Le développement de matériaux, réseaux et structures efficaces économiquement et socialement, économes en ressources, à faible impact sur la santé et l'environnement et tenant compte des aspects déconstruction et ACV.
- L'auscultation, l'analyse des matériaux, du bâti, des réseaux et du sol pour améliorer la durabilité et la prévention des risques et évaluer leurs performances et leurs impacts.

## **3. Lyon**

### **3.1. Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat – ENTPE (Lyon)**

**Thématiques pertinentes** : Outils et connaissances sur matériaux et composants et leur performance énergétique dans le bâtiment ; caractérisation de la qualité des environnements intérieurs ; développement de solutions techniques durables optimiser pour les utilisateurs

L'ENTPE accueille le "Laboratoire de Recherche Génie Civil et Bâtiment : LGCB » qui comprend deux équipes dont l'activité est pertinente dans notre contexte :

- L'équipe « **Géomatériaux et Constructions Durables** » cherche à développer des connaissances et des outils dans les champs de l'énergétique, des phénomènes thermo-hygro-aérauliques, de la construction durable, à différentes échelles du bâtiment (matériaux, composants, occupants, bâtiments, villes). Une approche systémique est utilisée pour prendre en compte la position centrale de l'utilisateur et la complexité du bâtiment.
- L'équipe « **Physique et Perception des Environnements** » dont l'objectif est la mise au point de protocoles expérimentaux afin de caractériser la qualité des environnements intérieurs et extérieurs notamment par la détermination d'indices de gêne, de confort et d'impact sur la santé. De plus cette équipe cherche à concevoir des solutions techniques durables, optimisées pour l'utilisateur, notamment par l'étude du comportement des usagers vis-à-vis des systèmes de contrôle utilisés pour modifier les environnements.

### 3.2. Université de Lyon : LABEX « Intelligences des Mondes Urbains »

**Thématiques pertinentes** : instrumentation technique de la ville et des bâtiments, effets de l'instrumentation sur l'individu, le social, le politique

Les recherches du LABEX « **Intelligences des Mondes Urbains** » mené par l'**université de Lyon** ciblent à la fois les contraintes objectives des milieux urbains (données environnementales, écotecnologies), et la façon spécifique qu'ont les acteurs impliqués de vivre et de ressentir ces contraintes (imaginaire urbain, styles de vie). Parmi les différents thèmes étudiés deux thèmes apparaissent pertinent dans la problématique de l'éco-conception dans le bâtiment :

- le thème 3 – « **Ingénieries, savoirs, créations** » traite de l'influence des nouvelles technologies numériques dans les transformations urbaines contemporaines. L'objectif est d'explorer les effets du déploiement des techniques numériques dans le champ individuel, social et politique pour identifier les différentes applications possibles ; et concevoir des modèles numériques intégrant les usages, les demandes sociales, les modes d'interaction, les liens sociaux, et les aspirations de l'utilisateur citoyen.
- Le thème 5 – « **Environnements, natures, écotecnologies** » aborde les questions de

l'instrumentation de la ville, des rapports entre les systèmes techniques et spatiaux et des comportements individuels et collectifs dans un contexte de révolution technologique.

### 3.3. Université Claude Bernard Lyon 1 – INSA Lyon

**Thématiques pertinentes** : Traitement des pollutions urbaines ; analyse performantielle et environnementale des bâtiments ; Matériaux et écomatériaux pour le génie civil

Le Laboratoire de Génie Civil et d'Ingénierie Environnementale (LGCIÉ) est porté par l'Université Claude Bernard Lyon 1 et l'INSA Lyon. L'objectif est de coupler des recherches en Génie Civil, Chimie et Génie des Procédés pour améliorer la prise en compte des questions environnementales dans l'aménagement et la gestion des espaces construits.

Les deux pôles de recherches sont:

- Emission, transfert et traitement des pollutions d'origines urbaine et industrielle
  - Eaux urbaines
  - Déchets solides, sédiments et sols pollués
  - Analyse performantielle et environnementale
- Sols Matériaux et Structures, intégrité et durabilité (SMS - ID)
  - Matériaux composites et éco-matériaux pour le Génie Civil
  - Comportement à jeune âge des matériaux à matrice cimentaire
  - Intégrité et durabilité des structures dans leur environnement
  - Couplage dans les géomatériaux
  - Interactions sols-structures

## 4. Grenoble

### 4.1. INP Grenoble G-SCOP

**Thématiques pertinentes** : Modélisation des comportements de l'occupant ; systèmes de contrôle de la consommation énergétique ; Valorisation des énergies renouvelables produites au sein des bâtiments

Le laboratoire **G SCOP** issu de l'**INP Grenoble**, particulièrement au sein de l'équipe **Conception Produit-Process (CPP)**. Au sein de cette équipe les deux axes de recherche sont :

- L'axe **intégration de la dimension environnementale en conception** qui aborde l'évolution des modes de consommation en lien avec les exigences du développement durable. L'objectif est de mieux comprendre les usages afin de mieux les intégrer à la conception.
- L'axe **Conception Fabrication** a pour objectif une meilleure prise en compte des impacts environnementaux de la fabrication. Les travaux actuels sont focalisés sur l'efficacité énergétique en usage des systèmes de production / des procédés. L'ambition est d'aboutir à des choix de moyens de production « efficaces » lors de la conception de produits

Le bâtiment n'est pas l'unique domaine d'application de ses recherches, néanmoins, un certain nombre de travaux du G-SCOP se concentrent sur ce secteur. Les travaux portent entre autre sur :

- La simulation des comportements des habitants pour obtenir une meilleure gestion des systèmes de contrôle énergétiques et le retour d'informations vers les habitants
- La modélisation de ces comportements par des relations probabilistiques de causes à effets.
- Les architectures des systèmes de contrôle de l'énergie dans le secteur résidentiel
- La valorisation des énergies renouvelables susceptibles d'être produites dans des bâtiments résidentiels

## 4.2. "LABEX - Centre d'Excellence en Matériaux Architecturés Multifonctionnels :

**Thématiques pertinentes** : propriétés thermiques des matériaux ; comportement thermique des structures

Le laboratoire d'excellence « Centre d'Excellence en Matériaux Architecturés Multifonctionnels » concentre sa recherche sur la conception, réalisation et caractérisation de ""matériaux multifonctionnels architecturés "" pour améliorer les performances des technologies futures de la santé, l'environnement, l'habitat et l'énergie.

Parmi les domaines d'application variés liés à l'énergie, l'isolation thermique et le stockage de l'énergie dans les bâtiments est la composante principale du *Projet de Recherche Interdisciplinaire n°4 (PRI n°4) : Thermal functionalisation of buildings*. Les défis scientifiques abordés dans ce PRI sont:

- i) Le comportement thermos-mécanique des structures fibreuses ou poreuses
- ii) Optimisation des formes de structures hybrides pour des problèmes non linéaires comme la conduction thermique transitoire incluant des changements de phase, les conditions limites de convection etc...

- iii) Dégradation des propriétés thermiques de structures multicouches fibreuses ou poreuses.

### 4.3. Université Savoie Mont Blanc

**Thématiques pertinentes** : Transferts de flux, qualité de l'air dans les bâtiments ; modélisation énergétique des bâtiments

Le **Laboratoire d'Optimisation de la Conception et Ingénierie de l'Environnement (LOCIE)** est une unité mixte de recherche Université Savoie Mont Blanc – CNRS travaillant dans les sciences de l'ingénierie et des systèmes. Ses activités sont orientées vers des domaines d'application à forts enjeux scientifiques, technologiques et sociétaux : bâtiment et énergie durables.

Parmi les travaux de recherche du LOCIE deux pôles sont particulièrement pertinents dans la problématique de l'éco-conception :

- Le pôle « **Maîtrise des flux pour la qualité des ambiances** » qui étudie les phénomènes de transferts couplés dans les enveloppes du bâtiment ainsi que les procédés d'épuration de l'air pour la qualité de l'air intérieur.
- Et le pôle « **Caractérisation du bâtiment, évaluation et amélioration des performances** » qui aborde la mécanique des structures et la modélisation énergétique des bâtiments

### 4.4. Ecole nationale supérieure d'architecture de Grenoble

**Thématiques pertinentes** : Matériaux de construction et circuits courts.

L'**Ecole nationale d'architecture de Grenoble** porte le LABEX **Valorisation des cultures constructives pour le développement durable**. Le projet est focalisé sur les études relatives à l'habitat, au patrimoine bâti et aux matériaux de construction dans un environnement durable. La contribution à la réflexion sur l'habitat et l'environnement durable, focalisée sur l'usage des matériaux locaux.

## 5. Autres entités

## 5.1. Lille - Université d'Artois, Université de Lille 1, Ecole des Mines de Douai

### "Laboratoire Génie Civil et géo-environnement (LGCE)

**Thématiques pertinentes :** Matériaux innovants pour le développement durable ; maîtrise technique des performances énergétiques des bâtiments ; nouvelles technologies dans la gestion des systèmes urbains

Parmi les thématiques de recherche du LGCE, deux axes de Recherche sont particulièrement pertinents:

- L'axe **géomatériaux** regroupe les activités de recherche sur le comportement des matériaux de génie civil (sols, bétons et roches) et leur utilisation dans les ouvrages. La priorité est donnée à l'amélioration de la performance des ouvrages, l'accroissement de la sécurité, l'amélioration des propriétés des matériaux existants, la recherche des matériaux nouveaux ou de nouvelles applications pour des matériaux existants. Les recherches traitent de la modélisation à différentes échelles : nanométrique (comprendre les interactions à l'échelle atomique), macroscopique (modèle pour le comportement des géomatériaux et des interfaces) et de l'ouvrage (comportement des ouvrages dans leurs environnements).
- Les travaux de l'axe **Habitat et Ville Intelligente** sont orientés d'une part, vers l'étude des composants et techniques contribuant à la maîtrise des performances énergétiques des bâtiments, le confort et à la qualité des ambiances intérieures et d'autre part vers l'application des nouvelles technologies dans la gestion des systèmes urbains (de l'infrastructure à la ville, en passant par le réseau d'eau et d'énergie, le bâtiment et le quartier urbain).

## 5.2. Université de Valenciennes – Laboratoire en Design Visuel et Urbain

**Thématiques pertinentes :** instrumentalisation des bâtiments pour réduire consommation énergétique

Les thématiques de recherche du Laboratoire en Design Visuel et Urbain de l'Université de Valenciennes concernent :

- les systèmes d'informations et d'aide à la décision,
- la mobilité et le transport des personnes et des biens,
- l'aménagement, le développement et à la gestion des zones urbaines et périurbaines.



Dans un objectif de développement durable, il s'agit de mettre en cohérence un ensemble diversifié de technologies et d'outils pour offrir de nouvelles fonctionnalités, améliorer la durabilité des structures et ouvrages, abaisser les dépenses énergétiques, maîtriser la qualité de l'air et les nuisances acoustiques, gérer les ressources en eau, recycler des déchets, gérer les risques naturels et industriels.

Cet objectif fait l'objet des travaux de recherche menés dans le cadre du PRVIUH (Pôle de recherche et de Valorisation en Ingénierie Urbaine et Habitat) qui regroupe l'ensemble des laboratoires de recherche régionaux dans la spécialité.

### **5.3. Nancy - UMR 3495 Modèles et simulations pour l'architecture et le patrimoine (MAP) du Centre de Recherche en Architecture et Ingénierie de Nancy (CRAI)**

**Thématiques pertinentes** : Outils numérique pour conception adaptés à l'usage des professionnels ; outils support à l'idéation pour faciliter l'approche environnementale en architecture ;

Un des axes de Recherche de l'UMR « Modèles et simulations pour l'architecture et le patrimoine (MAP) » du CRAI, l'axe **Modèles et environnements numériques pour la conception en architecture** aborde 3 thèmes de recherche pertinents dans notre problématique :

- L'assistance aux activités collectives de la conception à la réalisation est étudiée en questionnant à la fois les modèles et les processus à mettre en œuvre pour assurer un continuum numérique entre la conception, la fabrication et la construction, mais aussi les méthodes de conception de services de visualisation et de multi-visualisation pour proposer à chacun des acteurs la forme de visualisation la plus adaptée à son usage.
- L'assistance aux activités cognitives de la conception est abordée sous trois aspects: l'esquisse architecturale assistée par ordinateur, les processus génératifs pour l'aide à la conception et à la décision et l'appropriation des outils numériques par les architectes et ses conséquences sur l'activité cognitive de la conception.
- L'aide à l'approche environnementale en architecture par des outils supports à l'idéation, la simulation et l'évaluation de la conception

### **5.4. Caen - Ecole Supérieure d'Ingénieurs des Travaux publics de Caen (ESITC)**

**Thématiques pertinentes** : Matériaux innovants pour le développement durable ; écomatériaux issus de filières agricoles

L'ESITC de Caen dispose d'un laboratoire Matériaux Pour L'efficacité Énergétique des Bâtiments. L'objectif de ce laboratoire est le développement et la mise en œuvre de matériaux et écomatériaux visant à améliorer la consommation énergétique des bâtiments tant par l'optimisation des flux (ex : thermiques, hygrométriques) que par la réduction des émissions de carbone liées à leur construction. Les thématiques de Recherche incluent l'Ingénierie des matériaux et écoconstruction : développement d'écomatériaux à partir de co-produits agricoles tels que les fibres végétales (ex : lin), de co-produits marins (ex : coquillages) ou de déchets de la construction (ex : granulats de démolition).

### **5.5. Sceaux – Troyes – Montpellier – Ecole Polytechnique Féminine**

**Thématiques pertinentes** : matériaux pour l'éco-construction ; efficacité énergétique

L'axe de Recherche n°3 de l'**Ecole Polytechnique Féminine** traite, entre autres de **l'Efficacité énergétique dans les bâtiments, les thématiques abordées sont :**

- La caractérisation des propriétés des matériaux utilisés dans l'éco-construction et la modélisation dynamique multi-échelles du comportement énergétique du bâtiment.
- La conception et réalisation de capteurs pour la mesure de l'efficacité énergétique et l'étude du confort thermique

### **5.6. Montpellier - Université de Montpellier 2 – Laboratoire Mécanique et Génie Civil (LMGC)**

**Thématiques pertinentes** : Confort thermique ; domotique ; construction écologique à base de terre

L'équipe 6 du LGMGC nommée « **Structures Innovantes, Géomatériaux, Ecoconstruction** » dispose d'un axe **Eco-Construction** qui s'intéresse aux transferts technologiques via la Recherche et l'Innovation afin de répondre notamment aux enjeux des collectivités territoriales dans la construction durable. Les projets de recherches appliquées s'orientent, entre autres, vers :

- le **confort thermique**: une plateforme technique "Bâtiment Basse Consommation" soumise à l'environnement extérieur équipée d'une multitude de capteurs pour mesurer les transferts.
- le **confort d'usage**: une plateforme technique "Accessibilité et Longévité" permettant d'étudier la notion de contraste visuel et d'apporter des solutions viables pour le maintien à

domicile des personnes à mobilité réduite via la domotique.

- **les constructions d'autrefois:** une application prenant en compte les transferts de matière et l'axe les transferts thermiques dans les constructions écologiques de type parois en terre (en pisé ou en bauge).

## **5.7. Toulouse - Université Toulouse III - Paul Sabatier – Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions de Toulouse**

**Thématiques pertinentes** : Matériaux innovants pour le développement durable ; étude de la dégradation des matériaux ; diagnostic et solutions pour la réhabilitation des bâtiments

Le Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions de Toulouse est structuré en 3 pôles de Recherche :

- Le Pôle 1 : « Matériaux innovants pour le génie civil » a pour objectif d'élaborer et caractériser de nouveaux matériaux pour la construction (ouvrages, bâtiments, traitement de sols) en intégrant les démarches de multifonctionnalités et de développement durable.
- Le Pôle 2 : « **Durabilité des matériaux et des ouvrages** » a pour objectif d'améliorer la connaissance des mécanismes de dégradation des matériaux de construction en se basant sur des essais accélérés pour comprendre les phénomènes, et développer des modélisations capables de prendre en compte la durée de vie et de service de constructions selon les conditions environnementales.
- Pôle 3 : « **Requalification, diagnostic et maintenance** » a pour objectif de développer des outils pour l'aide à la conception d'éléments structurants, proposer des solutions éprouvées permettant un diagnostic fiable et proposer des solutions scientifiques et technologiques permettant la réhabilitation durable des bâtiments et des ouvrages.

## **5.8. Corse - Université De Corse Pascal Paoli – UMR6134, Laboratoire sciences pour l'Environnement (SPE)**

**Thématiques pertinentes** : Capteurs solaires pour l'habitat, condensateur radiatif pour récupération d'eau pour l'habitat

"UMR6134, Laboratoire sciences pour l'Environnement (SPE) aborde un axe « **Énergies**

**renouvelables** » dont l'une des composantes est la **maîtrise de l'énergie dans l'habitat (MDE)** à travers :

- le développement de capteurs solaires innovants (thermique et/ou photovoltaïque) en matériau composite. Des capteurs solaires thermiques à « haute intégration dans l'habitat » et l'étude de capteurs hybrides de production simultanée de chaleur et d'électricité.
- l'étude d'un condenseur radiatif pour la récupération d'eau de vapeur atmosphérique et la climatisation passive

## **5.9. Travaux ponctuels sur la thématique d'éco-conception**

Nous pouvons citer d'autres structures abordant ponctuellement la thématique de l'éco-conception dans le bâtiment, notamment :

- **L'Université de Compiègne** étudie notamment l'optimisation des formes urbaines pour une meilleure réponse énergétique
- **L'Université du Maine**, étudie, entre autre, l'aide aux choix de conception de bâtiments économiques en énergie
- **L'Université Blaise Pascal Clermont-Ferrand** étudie le développement d'isolants thermiques à base de produits issus de l'agriculture.
- **L'Université de la Rochelle** étudie, entre autre, le développement d'une méthodologie de conception de bâtiments à basse consommation d'énergie
- **L'Université de Bordeaux** étudie notamment le cycle de vie des matériaux, et l'utilisation de matériaux à changement de phases.

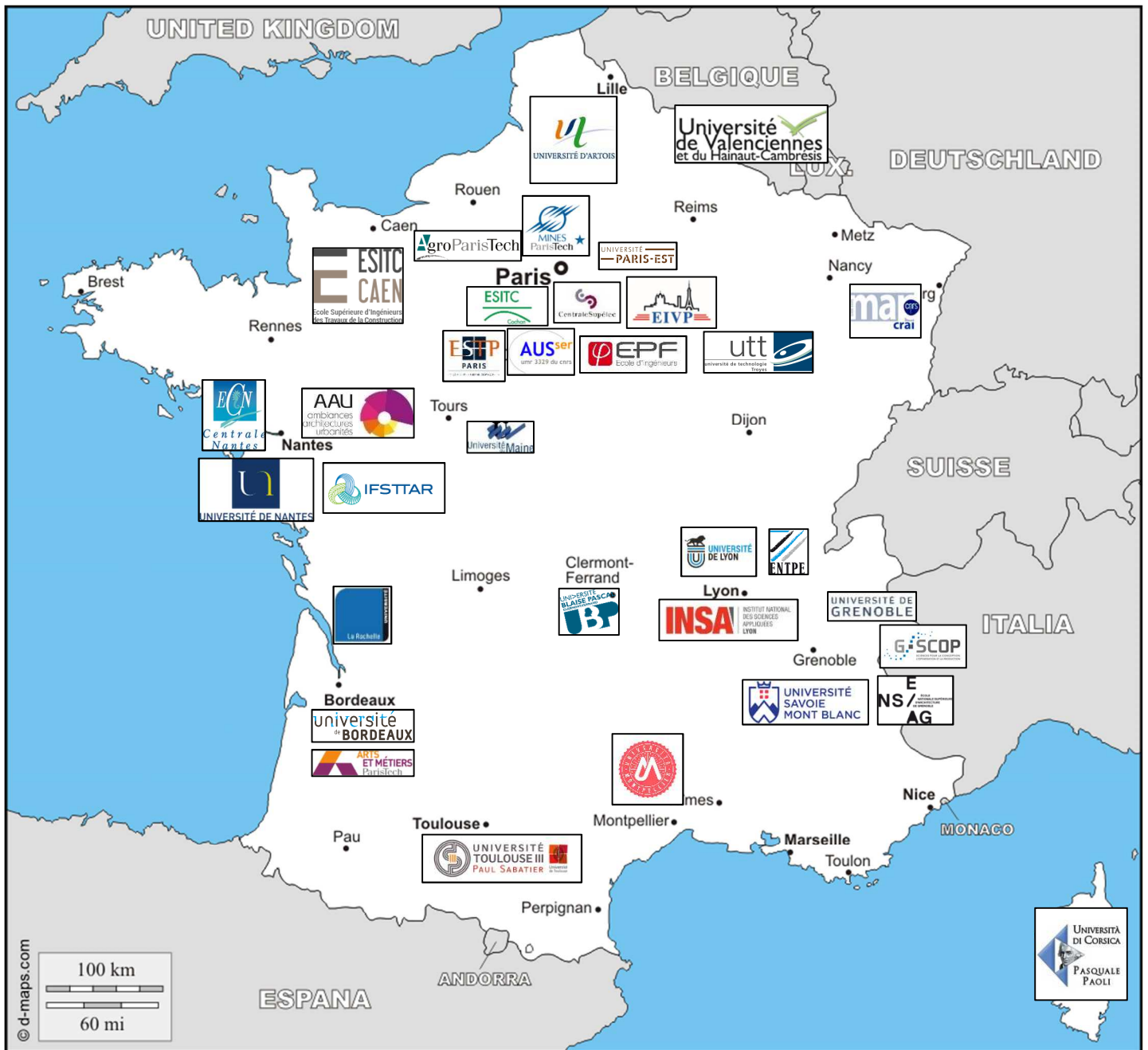


Figure 9: Répartition des acteurs sur le territoire

# Chapitre 3 : Principales thématiques de Recherche sur la problématique environnementale dans le Bâtiment.

Afin d'avoir une meilleure vision de la Recherche en France sur la problématique de l'éco-conception dans le bâtiment, il semble pertinent d'analyser les axes de recherche présents sur le territoire Français.

L'étude suivante n'est, certes, pas exhaustive mais permet d'observer que la question est traitée sur tout le territoire à travers sur un nombre limité d'axes. Au terme de cette étude le choix s'est limité à certaines thématiques que nous présenterons dans la suite et qui illustrent globalement les principales tendances de Recherches des entités évoquées dans la partie précédente.

Ainsi, dans un premier temps nous évoquerons ainsi les Recherches effectués sur les matériaux : les écomatériaux ainsi que la production et le recyclage des matériaux traditionnels.

Par la suite nous reviendrons sur l'application de théories mathématiques et physiques au domaine du bâtiment. Il s'agit de travaux sur des questions très précises, souvent en rapport avec la ventilation et la température des bâtiments. Les approches sont variées et très différentes les unes des autres mais ont en commun d'utiliser les problématiques du bâtiment comme un cas d'application de théories mathématiques ou physiques plus générales.

La question des difficultés liées à l'analyse du cycle de vie des bâtiments sera abordée dans la partie suivante, notamment à travers la problématique des bases de données et des différents obstacles à la comparaison des performances des projets.

Nous nous intéresserons ensuite à la manière dont la Recherche aborde le traitement et l'impact de la question environnementale dans les processus de conception de bâtiment.

Par la suite nous soulignerons l'importance de la prise en compte des usages des occupants mais aussi des professionnels dans le développement d'outils et méthodes pour réduire la consommation énergétique des bâtiments.

Enfin nous aborderons certaines questions de Recherche encore peu abordées en France mais qui présentent un réel potentiel à nos yeux dans le défi de la réduction de la consommation des bâtiments.

# 1. Matériaux

L'étude du traitement de la thématique environnementale à travers le spectre des matériaux fait apparaître deux principales directions de Recherche : les écomatériaux d'une part, et d'autre part la production et le recyclage des matériaux de construction traditionnels.

## 1.1. Les écomatériaux

Il n'existe pas de définition unique des écomatériaux, néanmoins différents travaux s'accordent sur un certain nombre de principes (Halada and Yamamoto, 2001 ; Conteville et den Hartigh, 2009) :

- L'aptitude des matériaux à satisfaire les exigences techniques des matériaux traditionnels
- La faible empreinte environnementale nécessaire à son utilisation, et ce tout au long de son cycle de vie : extraction, transformation, transport, chantier, occupation et son recyclage ou sa réutilisation.
- La préservation de la santé et du confort des professionnels comme des habitants
- Enfin, dans la cohérence géographique entre la provenance du matériau et son utilisation

Dans le contexte du bâtiment, les travaux mettent en avant les propriétés d'isolation thermique et acoustique de certains matériaux végétaux. Parmi les matériaux et filières envisagées dans les différentes études on retrouve fréquemment des fibres ou autres produits dérivés du lin (dont la France est le premier producteur), du tournesol ou du chanvre (Glé, 2013 ; Andrianandraina, 2015 ; Mati-Baouche, 2015).

Les travaux portent non seulement sur la caractérisation des propriétés de ces matériaux, mais aussi sur les conditions de production, de transformation et d'association à d'autres matériaux pour obtenir des propriétés optimales. Si ces travaux semblent à première vue anecdotiques, l'utilisation de matériaux naturels, renouvelables pourraient permettre de dynamiser localement des « filières vertes » et réduire l'empreinte carbonée du bâtiment. A condition qu'elle soit satisfaisante dans des conditions réelles de chantier et dans le temps, l'utilisation de ces matériaux par les professionnels pourrait d'un point de vue marketing être un moyen facile de mettre en avant la dimension environnementale des projets de construction.

## 1.2. Améliorer la production et le recyclage des matériaux traditionnels

Une seconde direction de Recherche sur les matériaux dans la Construction concerne l'amélioration production et du recyclage des matériaux traditionnels comme par exemple le ciment ou le béton. Afin de diminuer l'empreinte carbone, les recherche reposent principalement sur :

- L'optimisation de la production des matériaux afin de réduire les émissions et déchets liés à la

production de matériau

- L'optimisation dans la composition des matériaux afin de produire des matériaux plus performants pour un impact environnemental moins élevé
- L'association avec des matériaux renouvelables afin de réduire l'empreinte carbone
- Le recyclage des matériaux lors de la déconstruction

A titre d'exemple, la préparation du ciment et du béton est une source importante d'émission de CO<sub>2</sub>. On estime ainsi que la production d'une tonne de ciment produit entre 0.6 et 0.9 tonne de CO<sub>2</sub> (Escadeillas, 2006). On estime par ailleurs, que le béton est le deuxième produit le plus consommé au monde après l'eau (WBSD, 2009). Les travaux sur le béton sont donc d'une importance majeure dans la problématique environnementale de la construction, et du bâtiment.



## 2. Théorie mathématique/physique appliquée à la performance environnementale des bâtiments

Ici l'expression « théorie mathématiques/physique appliquée » décrits les travaux de recherches dont l'ambition est d'améliorer les outils et méthodes existantes grâce à des théories physiques et/ou mathématiques pour contribuer à construire des bâtiments plus performants.

Les travaux décrits ici sont très expérimentaux et très différents entre eux, néanmoins le choix a été fait de les regrouper dans une même partie car il s'agit de propositions portant sur des problématiques très précises rencontrées dans des activités portant principalement sur la conception ou le pilotage de projet. Ils portent principalement sur l'optimisation de méthodes et dispositifs techniques manipulés par les ingénieurs des différents bureaux d'études.

Ces travaux portent par exemple sur :

- La simulation d'écoulement d'air à partir de modèles mécanique numérique pour développement de la ventilation naturelle dans les bâtiments. (Sébastien Wullens, 2006. Université de Grenoble)
- Le développement de modèle de simulation aéraulique multizone pour l'évaluation des débits d'air dans le bâtiment pour la mise au point d'un outil d'aide à la conception thermique. (Maxime Trocmé, 2009. Université du Maine)
- la modélisation de l'incertitude pour l'amélioration de l'évaluation de la qualité environnementale (Hussam Alhamwi, 2012)
- l'optimisation d'outils de simulation numérique pour le développement d'outils d'aide à la décision pour le chauffage et la ventilation des bâtiments (Fadi Chlela, 2008. Université de La Rochelle)
- Le calcul d'indicateurs de performance bioclimatique issus de simulations numériques de bâtiments dans diverses conditions climatiques pour l'aide à la conception (Lou Chesné, 2012. INSA Lyon)
- Le développement d'outils d'aide à la conception permettant le dimensionnement de systèmes de rafraîchissement d'air utilisant des matériaux à changement de phases dès le stade de la conception préliminaire. (Fabien Rouault, 2014. ENSAM Bordeaux)
- La mise au point d'algorithmes d'optimisation pour la mise au point d'outil de commande prédictive de la température des bâtiments. (Nils Artiges, 2006. Université de Grenoble)

Parallèlement, on note aussi l'existence de travaux portant sur la compatibilité entre forme architectural et qualité environnementale. Ils analysent la compatibilité entre formes et matériau de l'enveloppe avec les contraintes climatiques. Ces travaux sont fortement ancrés sur le travail de

l'architecte, et le rapport du bâtiment à son quartier. Parmi les objectifs poursuivis on peut citer l'optimisation des formes architecturales pour une réponse optimale au rayonnement solaire (Thibaut Vermeulen, 2014. Université de Compiègne) ou le développement de concepts architecturaux spécifiques aux climats locaux (Gonzalo Rodriguez, 2013. Université de Bordeaux).

Ces travaux sont pour beaucoup très expérimentaux et menés dans des conditions très différentes des projets réels, mais permettent néanmoins de démontrer le potentiel d'évolution des outils et méthodes manipulées. Les résultats sont encourageants mais on constate dans certains travaux un décalage avec les pratiques des professionnels au niveau des théories abordées, et de la mise en œuvre des outils et méthodes. Les auteurs de ces travaux constatent ainsi les difficultés à obtenir certaines informations techniques réelles, ou l'évolution des lois et réglementation, et les freins à des déploiements à grande échelles de ces outils. L'idéal serait de pouvoir confronter les résultats de ces travaux à des conditions de projets réelles et envisager les mécanismes d'adoption de ses outils par les professionnels.

### 3. L'Analyse du Cycle de Vie (ACV)

Un grand nombre de travaux portent sur la pratique actuelle de l'ACV et ses limites. Les travaux mettent en évidence un certain nombre de difficultés (Guinée, 2002 ; Peuportier *et al.*, 2005 ; Millet *et al.*, 2007 ; Lasvaux, 2010 ; Andrianandraina, 2014) :

- Au niveau de l'accès aux informations portant sur les produits analysés et plus généralement les bases de données utilisées par les logiciels d'ACV,
- Au niveau de l'utilisation même des outils d'ACV, impliquant une difficulté à comparer et à interpréter les résultats des analyses,
- En ce qui concerne le caractère statique ou dynamique de l'analyse du cycle de vie

#### 3.1.1. Le problème des bases de données

L'ACV se base sur l'utilisation de données permettant de caractériser et de quantifier avec précision les caractéristiques environnementales des produits. Cette caractérisation du produit implique que le produit analysé soit suffisamment connu et étudié, afin d'avoir accès aux données environnementales. Cependant l'accès aux données peut être difficile pour certains produits, notamment lorsqu'ils sont nouveaux ou peu répandus.

Au-delà du problème d'accès aux données environnementales des produits, les principaux outils d'ACV pour le Bâtiment utilisés en France (Elodie, Izuba, Teambatiment...) utilisent pour leurs calculs des bases de données différentes. Les bases principalement utilisées sont Ecoinvent et INIES, mais ces bases de données sont construites selon des méthodologies différentes.

Ecoinvent est issue de recherches suisses, et constitue une base de donnée dites « générique multisectorielle » (i.e. qui ne se limite pas au secteur du Bâtiment). Ecoinvent regroupe des données provenant de 4000 procédés industriels, et pour chaque module sont disponibles près de 1000 flux élémentaires d'émissions dans l'air, l'eau et le sol mais aussi la consommation de ressources énergétiques, non énergétiques et d'usage du sol (Lasvaux, 2010 ; Frischknecht *et al.*, 2007).

La base de données INIES est française et se base sur des « fiches de déclaration environnementale et sanitaire » (FDES). Il s'agit d'une base spécifique au Bâtiment dont les données se basent sur des informations déclaratives, des fabricants des syndicats professionnels. Les données ont été calculées sur les cinq phases du cycle de vie. Les hypothèses de calculs sont propres à la base de données et fonction des catégories de produits. La base INIES prend en compte une centaine de flux différents.

Ces deux bases de données sont différentes par leur origine, par leur spectre, par la source des données, par les hypothèses de calculs et par le nombre de flux intégrés. Ces bases de données sont intégrées dans des logiciels différents qui les traitent en suivant des hypothèses de modélisation et de

calculs propres. Cette dernière problématique est nommée « la boîte noire », et reflète la difficulté à connaître les hypothèses retenues par les différents logiciels.

### 3.2. Les obstacles à la comparaison

La manipulation des outils et l'effet « boîte noire » sont des obstacles à la comparaison des résultats. Mener une ACV nécessite de définir le système étudié, notamment ses frontières. Définir de manière exhaustive le système est difficile, et induit nécessairement une part de simplification et de partie pris subjectif de la part des analystes. L'implication de différents acteurs économiques et experts est nécessaire pour construire des scénarios pertinents permettant de conduire l'ACV.

Il s'agit d'un processus long et difficile et l'interprétation des résultats nécessite une connaissance poussée des différentes catégories d'impacts afin de choisir les impacts prioritaires (Guinée, 2002 ; Andrianandraina, 2014). La part de subjectivité et d'interprétation est grande dans la conduite de l'ACV et participe à l'incertitude qui pèse sur les résultats.

Cette incertitude est d'autant plus prégnante que l'utilisation même des logiciels est soumise à un effet « boîte noire ». En effet, les calculs issus des différents logiciels sont non seulement dépendants de la base de données utilisée, du logiciel manipulé et de l'usage même des fonctionnalités du logiciel. On constate ainsi une difficulté à obtenir des données comparables. La figure suivante (Lasvaux, 2010 ; Peuportier et al, 2005) illustre la problématique dite de la « boîte noire », et présente les différents résultats obtenus sur des calculs portant sur 1 kg d'acier. On constate que sur un même objet final, en fonction du logiciel utilisé, les résultats varient fortement.

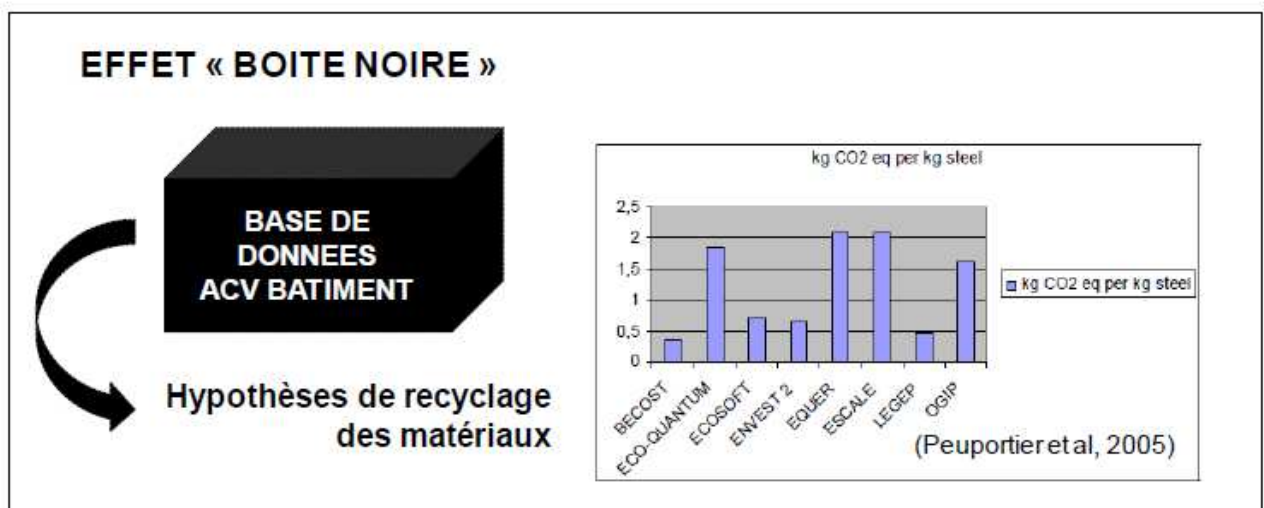


Figure 10: Effet boîte noire des logiciels d'ACV (Lasvaux, 2010 ; Peuportier et al, 2005)

Les performances de différents bâtiments calculées par des acteurs et des outils différents ne sont donc pas comparables. Pour les professionnels, l'impossibilité de comparer les performances de

projets différents pose le problème du positionnement des projets les uns par rapport aux autres.

Cette difficulté à comparer va de pair avec l'interprétation des résultats et impacte donc directement la faculté à décider. En conséquence, il apparaît nécessaire de procéder à une harmonisation dans les bases de données et dans les logiciels utilisés, tout comme dans la manière de traiter les données des logiciels.

### **3.2.1. ACV attributionnelle et ACV Conséquentielle diachronique.**

Au-delà de la question des bases de données, et des différences entre les résultats obtenus en fonction des logiciels, se pose la question de la véracité des résultats dans le temps.

La littérature remet en question la pertinence de l'ACV *attributionnelle* (l'ACV traditionnellement effectuée, ACV-A) réalisée dans un état statique où l'on ne prend pas en compte les évolutions du cycle de vie du produit dans le temps ; et l'ACV *conséquentielle* (ACV-C) qui a pour objectif de *modéliser l'ensemble des impacts environnementaux consécutifs à un changement survenant dans le cycle de vie d'un produit* (Dandres, 2012). L'ACV-C aborde ainsi les conséquences causées par un changement dans le cycle de vie de d'un produit dans le temps.

Thomas Dandres (2012) effectue une comparaison des ACV-A et ACV-C. Sa conclusion est que « *les ACV conséquentielle et attributionnelle ne répondent pas aux mêmes besoins et doivent être considérées comme complémentaires. Elles ne sont pas équivalentes, c'est pourquoi il convient de bien choisir laquelle doit être utilisée selon le type d'étude envisagée. (...) L'ACV-C est mieux adaptée pour évaluer les impacts environnementaux associés à un changement dans le cycle de vie d'un produit alors que l'ACV-A paraît plus efficace pour dresser le portrait des impacts sur l'environnement d'un produit déjà existant (Ekvall et al., 2005; Lesage et al., 2006a, 2006b)* ».

Le bâti fait partie intégrante d'un quartier soumis à des évolutions et des transformations au cours du temps. L'ACV-C cherche à prendre en compte les conséquences de l'intégration du bâti dans un système : le quartier. Charlotte Roux (2013) revient sur l'intérêt d'une analyse conséquentielle : « *En ACV attributionnelle classique, nous sélectionnons une partie de ce système comme un bâtiment, un quartier et nous lui allouons des impacts environnementaux. Pour cela, nous utilisons des données moyennes. Si nous voulons travailler en ACV conséquentielle, nous modifions notre point de vue. Nous plaçons l'élément étudié à la marge du système, nous considérons qu'il s'ajoute au système et nous regardons comment les impacts vont varier quand je rajoute cet élément au système. Cela est particulièrement adapté au domaine de la construction, car nous ajoutons un nouveau bâtiment, un nouveau quartier, nous rénovons et nous obtenons des conséquences environnementales.*»

Dans sa « *Note d'approfondissement sur l'évaluation des territoires d'innovation urbaine* ».

Le Pôle de Compétitivité ADVANCITY revient sur cette hypothèse à laquelle il rajoute la notion de *diachronie* (évolution du conséquentiel dans le temps). « *Les outils d'« ACV quartier » permettent*

*d'évaluer l'impact d'un scénario aux différentes échelles concernées qui vont du bâtiment au territoire. On peut ensuite modéliser l'évolution dans le temps des usages de ce même quartier(...) de façon à apprécier ces différents impacts dans le temps et ainsi bâtir une « ACV conséquentielle diachronique ». (ADVANCITY, 2015) »*

Si l'ACV apparaît comme une méthode multicritères incontournable dans l'éco-conception, forcer de constater qu'une uniformisation des outils, des bases de données, et des pratiques est indispensable. Cette uniformisation dans la pratique de l'ACV est nécessaire pour permettre la comparaison des performances de bâtiments différents, et constituer un outil d'aide à la décision de premier ordre pour les décideurs. Par ailleurs, et afin de renforcer la pertinence des résultats obtenus, de nombreux experts militent pour un changement de paradigme dans l'ACV en passant d'une analyse attributionnelle statique, à une analyse conséquentielle diachronique qui permettent d'envisager une échelle plus large que le seul bâtiment. L'objectif est d'intégrer les évolutions urbanistiques successives à l'analyse des performances du bâtiment afin de mieux envisager la problématique énergétique et environnementale.

## 4. La question environnementale dans le processus de conception

La question environnementale ayant pris un poids sans précédent dans les projets de construction, les acteurs sont contraints d'adapter leurs pratiques. L'identification des verrous associés à la prise en compte de la question environnementale dans le processus de conception des bâtiments constitue donc une problématique de recherche cruciale. Parmi les différents travaux de Recherche, on peut distinguer deux grands axes complémentaires :

- Un axe portant sur la mise au point et l'étude méthodes d'assistance et d'aide à la décision pour la conception et rénovation des bâtiments
- Un axe portant sur la gestion de l'information et Intégration des données énergétiques dans le processus de conception

Ainsi Nazila Kahina Hannachi-Belkadi (2008) de l'Université de Paris-Est propose une méthodologie globale d'assistance à la conception des bâtiments à faible consommation d'énergie, qui intègre l'aide à la décision et la gestion de l'information. L'auteur insiste notamment sur l'importance de définir des plans de commissionnement pour assurer la conception, l'installation et les tests des différents systèmes garantissant les performances énergétiques du bâtiment.

Dans un esprit similaire Vida Gholipour (2011) de l'INP Lorraine, propose une méthode fondée sur l'usage de patrons de conception orientés environnement, nommés éco-modèles. Ces éco-modèles (*patterns*) sont construits à partir de bonnes pratiques architecturales et manipulés par les concepteurs dans les phases préliminaires, où *« il est aisé et peu coûteux, de changer fortement et même radicalement de parti pris. Par ailleurs une bonne solution architecturale envisagée dans le stade amont de la conception peut éviter ou limiter l'usage de solutions techniques complexes. »* (Gjolipour, 2011). La méthode développée contribue à réduire le temps de génération d'idées dans les phases préliminaires de conception tout en s'assurant de la pertinence environnementale des concepts développés.

De son côté, Laetitia Arantes (2013) de l'université de Grenoble, aborde ces thématiques à travers la décomposition fonctionnelle du bâti, l'étude de l'incidence de la morphologie du bâti sur la performance énergétique, et la prise en compte de l'influence du contexte urbain sur les performances énergétiques des bâtis.

Ces différents travaux font écho à des travaux plus larges, non limités au secteur du bâtiment et portant sur l'intégration de la question environnementale dans les processus d'éco-conception dans des secteurs plus « manufacturiers », notamment dans les différents travaux de Maud Rio (2013) et Lucie Domingo (2013), de l'Université de Grenoble. Ces recherches portent notamment sur l'intégration de l'écoconception dans le processus de conception dans des contextes collaboratifs, mais

aussi la prise en compte des comportements des utilisateurs dans la démarche d'écoconception des produits.

L'analogie entre le secteur manufacturier et le secteur du bâtiment se retrouve dans des travaux visant à « industrialiser » les pratiques du secteur du bâtiment en se basant sur les méthodes employées dans l'industrie manufacturière. Ces recherches mettent en évidence le décalage méthodologique visible entre le secteur du Bâtiment et le reste des industries.

On peut citer à titre d'exemple les travaux de Cyril Mauger (2015) de l'Université du Maine propose ainsi une méthode de conception de produit intégrant ses services dans les phases programmatique et conceptuelle des projets de construction. La méthode se base sur les pratiques observées dans le génie industriel, le génie mécanique et l'industrie logicielle. Manuel Bazzana (2006) propose pour sa part, le développement et la mise en application d'un cadre de modélisation pour l'analyse des risques appliquée aux systèmes constructifs, en s'inspirant notamment des méthodes de type AMDEC utilisées dans l'industrie manufacturière.

Les différents travaux portant sur de l'intégration de la question environnementale dans le processus de conception des bâtiments mettent en évidence le décalage et les analogies entre le secteur manufacturier et le secteur du Bâtiment. Les différents travaux font apparaître le besoin de montée en compétence du secteur du BTP notamment en ce qui concerne les méthodologies de programmation et de conception, afin de pouvoir relever le défi de l'écoconception.



## 5. La question des usages

Afin de concevoir des outils et méthodes d'éco-conception des bâtiments, il est nécessaire d'être en mesure de modéliser les comportements des occupants des bâtiments mais aussi de s'assurer de l'adoption des outils développés par les professionnels. Le terme usage renvoie aussi bien aux pratiques des professionnels de la maîtrise d'ouvrage et de la maîtrise d'œuvre qu'aux habitudes, modes de vie, comportements des occupants des bâtiments.

### 5.1. Les comportements des usagers

#### 5.1.1. Quels usagers pour quels usages ?

Chevalier (1989) définit l'utilisateur comme celui qui, par son usage du produit, satisfait son besoin fondamental et donc, celui qu'il faut considérer lors de la conception du produit. D'autres auteurs en proposent une définition bien plus large. Delafolie (2001) considère pour sa part que toute personne ou entité qui exploite au moins une des fonctions du produit au cours de son cycle de vie en est un utilisateur. Dans un contexte informatique (bien qu'applicable à un contexte plus large), Eason (1987) différencie les utilisateurs *primaires*, *secondaires* et *tertiaires*. Les utilisateurs primaires sont ceux qui utilisent directement l'artefact, les utilisateurs secondaires n'utilisent l'artefact qu'occasionnellement ou à travers un intermédiaire, et enfin les utilisateurs tertiaires sont les individus affectés par l'utilisation de l'artefact ou en mesure d'influencer l'achat du produit. Les définitions d'Eason (1987) et Delafolie (2001) sont compatibles. Dans le contexte du Bâtiment, le terme utilisateur (et donc usager) désignera non seulement les habitants occupant les logements, mais aussi les différents individus en charge de l'entretien et de la maintenance du bâtiment (gardiens, plombiers, électricien etc.).

Le comportement et les activités menées par les utilisateurs : leurs *usages*, sont un des facteurs principaux de consommation énergétique des bâtiments. L'énergie consommée dans les bâtiments peut être décomposée en deux principales catégories (Zaraket, 2014):

- La consommation liée à *l'ajustement du niveau de confort* : il s'agit des dispositifs contrôlant l'éclairage, le chauffage, la ventilation et l'air conditionné
- La consommation liée à *réalisation d'activité quotidiennes* : la préparation des aliments, le lavage, le travail, le divertissement etc.

La consommation des ménages est non seulement liée aux caractéristiques de leurs équipements mais aussi au nombre d'occupants, aux revenus des ménages, à leurs catégories socio-professionnelles etc... (McLoughlin et al. 2012; Guerin et al. 2000; Yun & Steemers 2011 ; Zaraket, 2014). Chenailler (2012) explique ainsi que « *chaque habitant peut avoir et imposer sa propre notion de confort ainsi*

*qu'utiliser les charges électriques à sa convenance en fonction de son vécu, des liens sociaux avec les autres membres du foyer, sa perception de l'objet,... (Desjeux, 1996).*

Naturellement, les usages varient fortement en fonction de la nature du bâtiment. Ainsi les comportements des occupants des bâtiments tertiaires diffèrent de ceux des bâtiments résidentiels. Au-delà des activités effectuées, l'occupant des bâtiments tertiaires n'est pas le payeur de la facture énergétique, ce qui implique des phénomènes de déresponsabilisation de l'utilisateur, qui aura tendance à moins surveiller sa consommation, que l'occupant d'un bâtiment résidentiel, directement impacté financièrement en fonction de sa consommation.

### **5.1.2. Modéliser les usages**

Nous l'avons vu, les comportements des occupants des bâtiments sont très variables et fonctionnent de nombreux paramètres. Afin d'apporter la réponse la plus adaptée aux différents usages des habitants, les professionnels et les chercheurs cherchent à modéliser les usages des habitants. Parmi les différentes approches, l'approche *stochastique* utilisée dans le Bâtiment fait intervenir des variables aléatoires et consiste en la détermination de lois de probabilité de comportements en fonction de paramètres liés aux individus et aux équipements étudiés. Cette approche est utilisée dans de nombreux travaux, à titre d'exemples :

- L'utilisation des systèmes d'éclairages par les occupants pour déterminer les profils temporels d'usages des systèmes (Lindelöf and Morel, 2006).
- Des modèles stochastiques décrivant les actions des usagers sur les portes et fenêtres selon des paramètres tels que les caractéristiques du bâtiment, la température, et la météo (Page and Robinson, 2008).
- L'estimation de la consommation d'énergie dans les bâtiments résidentiels liés à deux activités : regarder la télévision et laver le linge ; en fonction de paramètres sociaux démographiques, les caractéristiques des ménages, et leur possession d'équipements domestiques (Zaraket, 2014).

Chenailler (2012) estime qu'un des inconvénients des approches stochastiques *«est la robustesse du modèle vis-à-vis d'autres usages car il est difficile et présomptueux de définir un modèle unique et final de l'usage d'un bâtiment ou d'un équipement. »*

Une autre approche adoptée est basée sur des modèles déterministes basés sur des scénarios d'usage prédéfinis. L'objectif est de *«trouver des règles générales du comportement de l'humain afin de pouvoir le modéliser dans un bâtiment donné.»* (Chenailler, 2012).

Bourgeois et Reinhart (2006) proposent ainsi de définir différentes dynamiques de consommation d'énergie liée à l'éclairage en fonction de profils types d'utilisateurs.

Quel que soit l'approche adoptée par les chercheurs, l'ambition poursuivie est de mieux comprendre et anticiper les comportements des individus dans différents contextes d'utilisation du bâtiment. En plus des exemples précédemment cités on peut évoquer les travaux suivant :

- Modéliser le concept de confort dans un habitat intelligent : du multi sensoriel au comportement (Mathieu Gallissot, 2012. Université de Grenoble)
- "L'efficacité d'usage énergétique : pour une meilleure gestion de l'énergie électrique intégrant les occupants dans les bâtiments (Hervé Chenailler, 2012. Université de Grenoble)

Deux dimensions sont envisagées :

- la notion de confort (Thermique, visuel, olfactif et acoustique) des habitants ;
- l'optimisation technique, technologique et ergonomique des équipements et système constructifs.

Cette compréhension des utilisateurs contribue à une meilleure conception des bâtiments comme des systèmes de contrôle du bâtiment, mais de manière plus globale à mieux gérer la consommation et donc production énergétique en fonction de différents paramètres (calendrier, localisation, météorologie, typologie des occupants).

## **5.2. L'adoption des outils et méthodes d'éco-conception par les professionnels**

L'adoption par les professionnels d'outils et méthodes d'éco-conception nécessitent que ces derniers correspondent à leurs pratiques et à leurs intérêts. Il est donc nécessaire de comprendre aussi les usages des professionnels et les verrous associés à la diffusion de nouvelles méthodes.

### **5.2.1. Des freins techniques**

L'évolution de la réglementation et des exigences énergétiques comme la RT 2012 et la RT 2020 encouragent une progression dans l'utilisation de logiciels d'ACV.

Cependant, les outils d'ACV ne permettent que des résultats *ex post facto* (Lamé et al. 2015 ; Soebarto and Williamson, 2001), une fois que la conception du bâtiment est achevée et que les modifications deviendraient trop coûteuses. Qui plus est, l'utilisation de ces outils nécessite un niveau d'information exhaustif sur les matériaux et leur provenance. Enfin, la compatibilité entre les logiciels et les certifications n'est pas optimales et la consistance au niveau des résultats obtenus sur des logiciels différents est faible. Ball (1988), estime par ailleurs, que dans le secteur du Bâtiment, ce qui est faisable techniquement, n'est pas forcément utilisé. En effet, l'adoption de l'innovation est donc aussi fortement liée à la volonté des acteurs qui voient ou non un intérêt économique dans leur adoption.

### **5.2.2. Des freins économiques**

Kubicki (2006) explique que l'estimation de la rentabilité de l'adoption de nouveaux outils pourrait être un argument auprès des acteurs du secteur, mais [cette estimation] est impossible en amont. Le coût est relativement important alors que la valeur ajoutée perçue auprès des clients reste faible. En effet, l'investissement dans des équipements et la formation des acteurs dans des structures généralement petites, n'est pas justifiée ni par rapport aux bénéfices qu'ils apportent, ni par rapport à une demande anecdotique de la part des clients, ni vis-à-vis d'obligations réglementaires ou contractuelles (Lamé et al., 2015 ; Kubicki, 2006).

On constate donc un certain retard du bâtiment au niveau du développement des méthodes et outils néanmoins, les outils d'éco-conception et plus largement les TIC sont donc potentiellement une voie de progrès dans le secteur du bâtiment, mais leur déploiement global implique des changements profonds au sein des organisations. A ce titre, il apparaît nécessaire d'évaluer l'intérêt propre des acteurs concernés et de comprendre les mécanismes d'adoption, que ce soit concernant des critères économiques mais aussi des critères d'adoption techniques.

La problématique de l'éco-conception dans les bâtiments est donc particulièrement liée à celles des usages des habitants d'une part, mais aussi des professionnels dans leur adoption des méthodes et outils développés.

## 6. Des thématiques encore peu abordées dans la Recherche en France

La question de l'écoconception et de la réduction de la consommation énergétique du bâtiment tout au long du cycle de vie est indiscutablement traitée par la Recherche française. Néanmoins il semble que certaines thématiques prometteuses ne soient pour l'instant que peu abordées en France. Parmi ces thématiques, nous avons choisie de revenir sur :

- Les espoirs du Building Information Model (BIM)
- Les stratégies de sensibilisation des occupants
- La question de la gestion de la rénovation énergétique dans les logements collectifs

En effet, il apparait que ces thématiques soulèvent des interrogations et des pistes de progrès particulièrement pertinentes dans le contexte français.

### 6.1. La promesse du BIM

En Europe, le Royaume-Uni, les Pays-Bas, le Danemark, la Finlande et la Norvège imposent d'ores et déjà l'utilisation de la maquette numérique BIM (Building Information Modelling) aux marchés publics dans le Bâtiment. Dans un contexte de rigueur budgétaire et de préoccupation environnementale, le BIM est perçu par les gouvernements comme un moyen d'assurer la qualité environnemental et le coût des investissements publics dans les infrastructures (National BIM Report, 2016).

La commission européenne finance ainsi un groupe de travail (EU BIM Task Group) afin de construire un guide de l'utilisation du BIM afin de diffuser l'utilisation de cette technologie dans l'ensemble de L'union Européenne.

#### 6.1.1. Qu'est-ce que la technologie BIM ?

La technologie BIM (Building Information Modelling) est une approche de travail collaboratif basée sur l'utilisation de maquettes numériques 3D qui contiennent des informations non seulement géométriques (plans, coupes etc...) mais aussi techniques (matériaux, composants, comportements physiques des différents composants, etc...).

Cette maquette 3D est construite initialement par l'architecte puis alimentée par les différents bureaux d'études intervenants dans la conception des bâtiments. Les informations de la maquette sont actualisées en fonction des évolutions du bâti. Cette maquette permet aux différents acteurs de la construction de partager des données à jour et homogènes entre les différents intervenants.

Un des objectifs est que le *«maitre d'ouvrage dispose ainsi d'un véritable avatar virtuel de l'ouvrage, puissant outil de gestion et d'optimisation tout au long de la vie du bâtiment »* (Rapport Mission

*Numérique Bâtiment, Bertrand Delcambre, 2014).*

L'objectif d'un tel outil est de faciliter et de renforcer la collaboration entre les acteurs de la conception et de la construction à travers une plateforme d'échange. Il existe trois principaux niveaux de maturité de la technologie BIM :

- Le BIM niveau 1 correspond à la modélisation du bâtiment en 3D par CAO, mais avec la production de documents techniques de référence en 2D. Les échanges sont unilatéraux (des architectes vers les autres acteurs) et il n'y a pas de synchronisation des informations.
- Le BIM niveau 2 correspond à une maturité supérieure, où les échanges de fichiers CAO et informations techniques sont produites par les différents acteurs dans un format commun sont échangées bilatéralement entre les différents acteurs à mesure de l'évolution du projet.
- Le BIM niveau 3 correspond à la mise en place d'une plateforme en ligne accueillant la maquette 3D accessible et modifiable à tout moment par les différents acteurs. Les informations sont partagées instantanément et permettent une mise à jour rapide des informations liées à la maquette. Néanmoins le risque de conflits entre les différentes modifications et version constitue un des enjeux majeurs de ce niveau de maturité.

-

### **6.1.2. L'intérêt du BIM**

Les objectifs du BIM sont l'amélioration de la collaboration, de la coordination et de la prise de décision entre les différents acteurs des projets de construction. Bertrand Delcambre (2014) met en avant un certain nombre de promesses véhiculées par le BIM :

- Le gain de temps :
  - L'ensemble des données sont accessibles sur la maquette numérique, ce qui évite les ressaisies.
  - Les échanges entre les différents corps de métiers sont facilités par des informations accessibles et à jour à tout moment.
- Une meilleure coordination entre acteurs :
  - *« Le chantier hérite de données plus précises et mieux partagées en amont. Incompatibilités et incohérences ont été résolues autant que faire se peut.*
  - *Sur le chantier, la communication est facilitée par des visualisations plus précises (...).*
  - *(...)La visualisation en 3D évite les problèmes d'interprétation.*
  - *La synthèse globale est facilitée en phase étude. »*
- Un gain de qualité :
  - *« Le temps épargné en ressaisie peut être mis à profit par les équipes pour se concentrer*

*sur les aspects à valeur ajoutée de vérification, conception, contrôle.*

- *Les risques d'erreurs, liés notamment à de mauvaises ressaisies, sont diminués.*
- *Les interférences (clashes, collisions) peuvent être décelées plus simplement et rapidement, en amont du chantier, au stade de la représentation virtuelle. » (Rapport Mission Numérique Bâtiment, Bertrand Delcambre, 2014).*

### **6.1.3. L'intérêt du BIM pour l'éco-Conception**

D'un point de vue environnemental, l'augmentation de la qualité des ouvrages et la diminution des déchets d'un projet témoignent de l'intérêt du BIM. Ainsi « *En Finlande, pays précurseur du BIM, la marge des entreprises a augmenté de 45%, les déchets, réduits de 45% et les accidents de chantier ont diminué de 5% » (Delcambre, 2014).*

En ce qui concerne l'éco-conception à proprement dit, le BIM peut constituer un outil permettant d'aider à mieux concevoir et mieux analyser (McGraw Hill Construction, 2010):

- La performance énergétique des bâtiments
- L'ensoleillement et de la luminosité des ouvrages
- La conception des systèmes d'air conditionnés
- La vérification de la conformité aux normes
- L'estimation des coûts

L'objectif à moyen terme est d'intégrer l'ensemble des outils de simulation au sein d'une unique interface BIM afin de simuler divers scénarios de comportement du bâtiment en fonction de tel ou tel paramètre, environnemental ou énergétique. Néanmoins la question de l'interopérabilité des différents outils est un enjeu crucial pour l'avenir de cette technologie.

La situation sectorielle et législative des pays précurseurs diffère de celle de la France, il semble pertinent de s'interroger sur la compatibilité de cet outil vis-à-vis de la maturité du secteur particulièrement en ce qui concerne la fragmentation des professionnels du bâtiment.

De plus, dans un secteur français où l'on observe une grande disparité quant aux utilisations des outils technologiques entre les grands groupes et les PME/TPE, il est nécessaire de réfléchir aux stratégies de diffusion de cette technologie et d'accompagnement au changement des structures les moins équipées.

## 6.2. Les stratégies d'intervention sur les occupants

Nous l'avons vu, une grande partie des travaux et des problématiques abordés portent sur la résolution de problèmes des pratiques d'écoconception (base de données, modèles de simulation des comportements, décalage entre outil et pratiques) en phase amont des projets (programmation, conception, construction etc...). Ces travaux contribuent à limiter l'impact environnemental du bâtiment dans sa construction, lors de la phase d'occupation par les habitants et en fin de vie du bâtiment.

Néanmoins, la littérature précise que des différences de comportements peuvent engendrés jusqu'à 100% de différence dans les consommations (Zaraket, 2014 ; Swan et Ugursal, 2009). De même, des informations et du feedback peuvent contribuer à réduire la consommation énergétique des habitant entre 15% et 25% (Vassileva et Campillo, 2014 ; Vassileva et al., 2012 ; Faruqui et al., 2010). Sur un même bâtiment, en phase d'occupation, le comportement des habitants est donc un élément clé de la consommation énergétique. Il convient donc de se questionner sur d'éventuels moyens d'interventions sur le comportement des habitants en phase d'occupation. Dans son étude des stratégies d'interventions sur les habitants pour réduire leur consommation énergétique Han et al., (2013) proposent 54 stratégies d'interventions (Figure 3). Ces stratégies d'interventions sont réparties en 3 catégories :

- **Antecedent:** L'objectif de ce type d'intervention est d'augmenter le niveau de connaissance des habitants pour encourager des comportements appropriés. Les principales stratégies d'interventions portent sur :
  - des campagnes d'information de masses, interpersonnel (en face à face) ou personnalisée ;
  - sur de la pédagogie par des exemples proches de l'habitant
  - de la distribution gratuite de produit pour mesurer la consommation et
  - sur l'engagement des habitants à réduire une consommation donnée à une échéance précise
- **Consequence:** Cette stratégie d'intervention consiste à impliquer l'habitant en le confrontant à des conséquences positives ou négatives de son comportement par du feedback et par des récompenses symboliques (awards) ou économiques (déduction fiscales etc...).
- **Structural:** Ce type de stratégie cherche à agir sur les conditions contextuelles des habitants. Il est alors nécessaire d'agir très en amont sur la législation, la fiscalité, et les investissements dans des aides et subventions publiques.



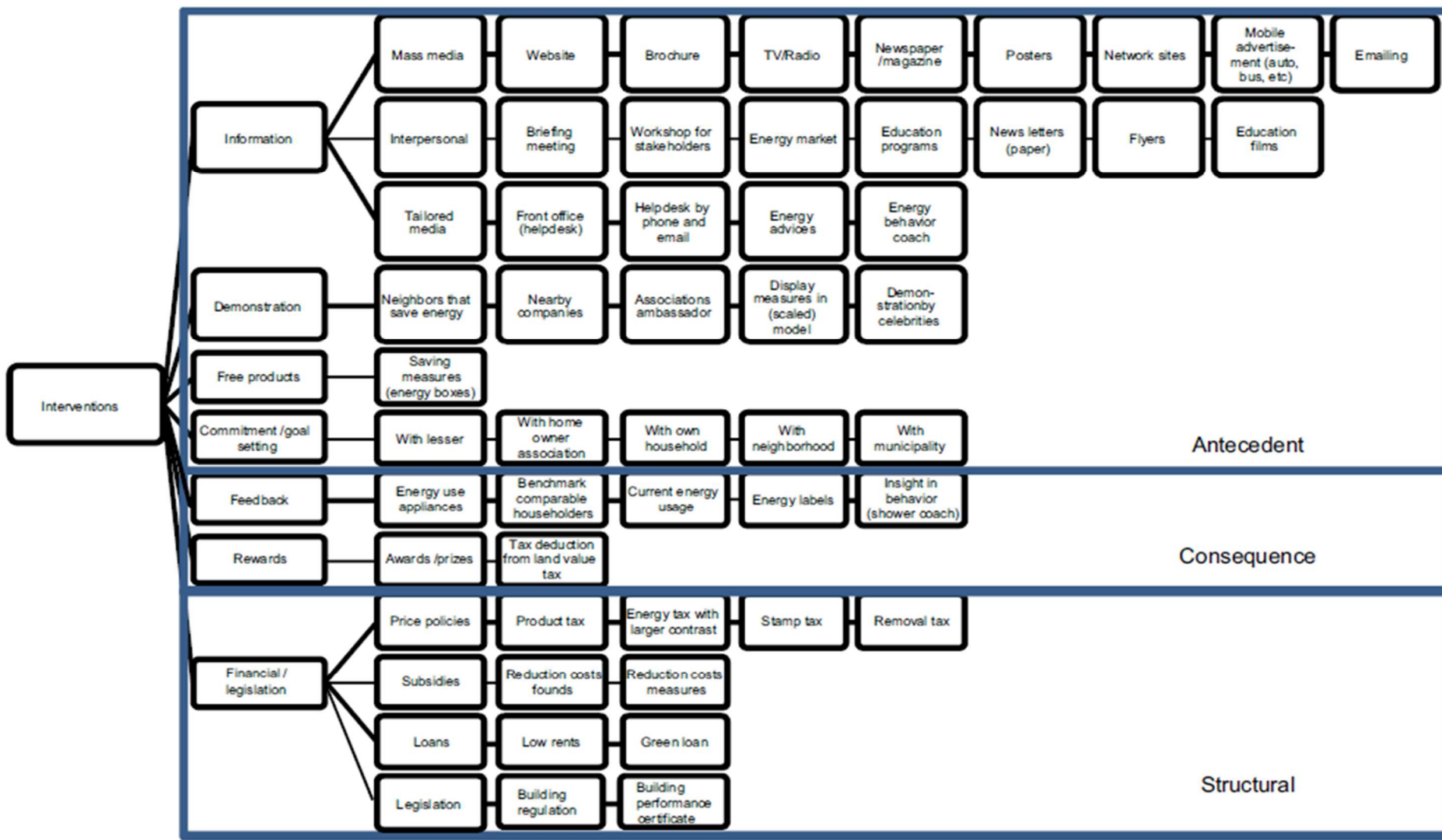


Figure 11: Stratégies d'intervention sur les habitants afin de réduire leur consommation énergétique (Han et al., 2013)

En complément de ces actions, la littérature met avant l'intérêt des **nudges**. Hansen (2014) propose la définition suivante: « A nudge is...any attempt at influencing people's judgment, choice or behavior in a predictable way (i) made possible because of cognitive biases in individual and social decision-making posing barriers for people to perform rationally in their own interest, and (ii) working by making use of those biases as an integral part of such attempts. ». Momsen et Stoerk (2014) et Lehner et al. (2015) proposent des applications de ce concept dans le cadre de réduction de consommation énergétique dans le bâtiment (voir tableau ci-dessous).

<b>Momsen and Stoerk (2014).</b> Utilisation de nudges pour orienter le choix vers des contrats énergétiques plus écologiques	<b>Lehner et al. (2015).</b> Utilisation de nudges pour favoriser une consommation plus soutenable (logement et alimentation)	<b>Cass R. Sunstein (2014).</b> Analyse d'utilisation des nudges.
<b>Priming (amorçage):</b> Amorcer des intentions en suggérant, en faisant réfléchir les habitants sur des thèmes environnementaux/d'économies d'énergies.	NC	(équivalent à) <b>Eliciting implementation intentions</b>
<b>Mental accounting:</b> Comptabilité éthique	NC	NC
<b>Framing:</b> Orienter le discours (ex : plutôt que de parler d'économies, parler de pertes potentielles)	<b>Simplification and framing of information:</b> 1-20% d'économie sur des expériences à petite échelle/sur mesure 2% sur des tests à grande échelle,	(équivalent à) <b>Simplification / Increases in ease and convenience / disclosure:</b> Faciliter et simplifier les démarches/règlementation et l'information (réduire l'ambiguïté dans l'information)
<b>Decoy (leurre):</b> proposition d'alternatives "leurre" qui mettent sur un piédestal l'alternative « plus écologique »	NC	
<b>Social norms:</b> Comparer la consommation ou les pratiques des individus à celle d'un groupe plus grand.	<b>Use of social norms :</b> 11% d'économies moyennes sur des tests à faible échelle 2% sur des tests à grande échelle	<b>Uses of Social norms</b>
<b>Default:</b> faire que les choix énergétiques les plus écologiques soient les choix par défauts.	<b>Changes to the default policy:</b> 95-99% des habitants acceptent l'option proposée par défaut 20% des gens refusent le contrôle (par défaut) de leur consommation	<b>Default Rule</b>
NC	<b>Changes to physical Environment :</b> Modifier l'environnement pour susciter des comportements plus écologiques (Assiettes plus petites, mettre à disposition des vélos etc...)	NC
NC	NC	<b>Precommitment strategies :</b> engagement des parties prenantes sur des résultats définis à un horizon temporel précis
NC	NC	<b>Warnings, graphic or otherwise :</b> panneaux/ logo d'avertissement explicite
NC	NC	<b>Reminders :</b> Rappel d'informations
NC	NC	<b>Informing people of the nature and consequences of their own past:</b> Informer les individus sur leurs pratiques/décisions/consommation passées

Les principales conclusions mettent en avant une meilleure efficacité des interventions sur mesure et de l'utilisation du nudge *default*. Le nudge *default* consiste à faire du choix par défaut le

choix le plus éthique/bénéfique pour l'environnement, tout en laissant aux utilisateurs la possibilité de choisir une autre alternative.

L'intervention sur les habitants est compatible avec l'intervention sur le bâtiment. Un ciblage précis et sur mesure augmente l'efficacité des interventions sur les habitants. Il semble donc pertinent de mettre en relation la programmation, et la conception du bâti avec une forme « d'accompagnement énergétique » des habitants à leur entrée dans le bâtiment.

Cet accompagnement n'est pas nécessairement limité aux interventions présentées, et il pourrait être intéressant d'envisager des solutions en rapport avec l'internet des objets. Cependant les résultats de la littérature posent des questions sur l'impact à moyen et long terme des interventions sur les habitants. L'efficacité des interventions sur les comportements dans le temps, et l'identification des facteurs permettant un changement durable des comportements des occupants des bâtiments, est une question de Recherche cruciale qui mériterait d'être abordée.

Se pose de plus, la question des acteurs de l'accompagnement : Qui doit concevoir puis mettre en place les interventions, et quelle cohérence à apporter entre la conception du bâtiment et celle des interventions? La MOA ? la MOE ? Les habitants (ex : un délégué type président de la copropriété mais sur les questions énergétiques) ? Les mairies/acteurs publiques ? Ou un acteur dédié indépendant ou de type AMO ?

Etant donné l'influence actuelle des comportements des habitants sur les consommations énergétiques des bâtiments, la thématique de l'intervention sur les occupants mérite donc d'être traitée dans les années à venir.

## **6.3. La question de la gestion de la rénovation énergétique dans le contexte collectif**

### **6.3.1. Dans le logement privé**

La gestion de la rénovation énergétique dans des logements collectifs pose de nombreuses questions. Ainsi le Plan Urbanisme Construction et Architecture (PUCA) estime qu'au sein du parc immobilier nécessitant une rénovation près de 300 000 logements situés dans des copropriétés sont à l'heure actuelle en très mauvais état. Afin d'étudier la problématique de la rénovation énergétique en copropriétés, le PUCA et l'Agence Nationale pour l'Habitat (Anah) ont lancés en 2011 le programme « *Amélioration énergétique en copropriétés* ». L'objectif du programme est de comprendre les blocages actuelles et de proposer des pistes de solutions.

Parmi les différents freins à la rénovation énergétique dans les copropriétés, l'étude met en avant les obstacles suivants (PUCA, 2011):

- Une connaissance du marché insuffisante et un manque d'une offre ciblée de la part des professionnels ;
- Des particuliers et professionnels de la copropriété mal informés
- Des difficultés dans la prise de décision collective au sein des copropriétés ;
- Des manques en termes d'ingénierie financière et de garanties des performances, etc.

Afin d'étudier les stratégies opérées par les copropriétés dans leur effort énergétique, 14 projets de recherches-actions sont menés au sein de différentes copropriétés qui désirent mener des travaux de rénovation énergétiques. Quatre axes de progrès ont été identifiés :

« - *faciliter l'élaboration des programmes de travaux et le choix de solutions techniques dédiées ;*  
- *mobiliser des moyens de financement adaptés ;*  
- *faire adhérer les copropriétaires aux processus de décision et garantir les performances*  
- *proposer des outils d'assistance, de mesure, de gestion et de contrôle de l'amont à l'aval des projets* » (PUCA, 2011)

Etant donné l'état du parc français et la conjoncture économique actuelle, le défi énergétique devra inclure la rénovation des logements et ne pourra miser exclusivement sur le neuf.

### **6.3.2. Dans le logement social**

La question de la rénovation énergétique se pose aussi dans le contexte des logements sociaux qui comptent près de 82% de logements collectifs, et dont plus de 50% a été construit avant 1975. La Caisse des Dépôts (Caisse des Dépôts, 2014) estime que près d'un million de logements sociaux sont énergivores et nécessiteraient être rénovés. L'état de ces logements implique des charges élevées pour

des occupants qui par définition disposent de revenus modestes.

La rénovation du parc des logements sociaux nécessite un investissement de la part des bailleurs, qui ne peut être totalement porté par les locataires. Non seulement une éventuelle augmentation des loyers seraient difficilement supportables par les foyers concernés mais celle-ci est strictement encadrée par la loi (l'augmentation est limitée à la variation de l'indice de référence des loyers publié trimestriellement par l'Insee).

Comme le résume la Caisse des Dépôts : « *La réalisation de ces objectifs nécessite des investissements conséquents sur les prochaines années avec un retour sur investissement faible et qui ne sera effectif qu'à moyen terme. Il est rare que l'augmentation éventuelle de loyer décidée par un bailleur (et actée par ses locataires) suite à la réalisation de travaux permette d'équilibrer l'opération (de rénovation ndlr) (...) Dans un contexte où un effort important est également demandé aux bailleurs sociaux sur le plan de la construction, l'enjeu pour ces derniers est de gérer en même temps ces deux volets d'investissement.* » (Caisse des Dépôts, 2014). Afin d'impulser cet effort de rénovation et de construction, l'état, par l'intermédiaire de la Caisse des Dépôts, a débloqué 3 milliards d'euros en 2016 sous forme de prêts à taux zéro pour les bailleurs sociaux.

Que ce soit dans le contexte du privé ou du social, la question se pose de l'intérêt de la rénovation par rapport à la démolition et la construction de logements neufs. En effet, le retour sur investissement de la rénovation énergétique est long et difficile à mener dans des contextes collectifs. Cependant, l'énergie grise nécessaire à la construction d'un bâtiment neuf est estimée à l'énergie consommée pendant 40 ans par un bâtiment rénové. Qui plus est, chaque année, la construction neuve représente autour de 1% du parc immobilier existant alors que la démolition ne représente qu'environ 0,03 % (Peuportier, 2008). Le renouvellement du parc immobilier français est un processus long, et il est donc indispensable de considérer la réhabilitation dans les efforts énergétiques liés au bâtiment. Quelle soit portée collectivement ou par un bailleur, la décision de rénover un bâtiment reste une question complexe en attente de réponses.

## 7. Des thématiques et interrogations transversales

A l'issue du passage en revue des différentes entités de Recherche en France, et des thématiques qu'elles abordent, on constate en France à l'émergence de différentes problématiques transversales à l'ensemble des axes de recherche.

Une de ces problématiques transversales émergentes est la question de l'objectivation des performances des bâtiments, plus particulièrement permettre l'évaluation de la valeur fournie par rapport aux ressources mobilisées. Dans un contexte d'urgence environnementale et de rigueur budgétaire, il est crucial de pouvoir évaluer et comparer des solutions. Si cette question va au-delà de la problématique de l'éco-conception, elle n'en reste pas moins capitale pour la question environnementale.

Que ce soit sur les travaux étudiant les outils d'ACV ou les travaux cherchant à « industrialiser » les pratiques du secteur du bâtiment en se basant sur les méthodes de l'industrie manufacturière ; il devient nécessaire de rationaliser les procédures et les méthodes employées par les acteurs du bâtiment. A ce titre, il semble indispensable de fixer des objectifs d'impacts environnementaux et sociaux dès le programme, et de transformer peu à peu le programme en un cahier des charges contractuel et performantiel. L'ACV étant actuellement la seule méthode multicritère permettant d'objectiver et de servir de support de réflexion pour les différents intervenants, elle permettra de se confronter aux objectifs initiaux du projet. Cependant le débat doit dépasser la question des outils à manipuler et se centrer sur l'adoption d'une réflexion et d'une approche conceptuelle qui intègre dans ses choix l'ensemble des étapes du cycle de vie.

Cette évolution des pratiques nécessite entre autres :

- Une montée en compétence des différents acteurs, notamment de la MOA
- Disposer d'un référentiel permettant de comparer les résultats issus des différents outils d'ACV et permettre ainsi la comparaison d'analyses effectuées par des professionnels et des outils différents.
- Le développement d'un référentiel de performance des bâtiments unifié et adopté par l'ensemble des acteurs du bâtiment permettant un affichage, une lecture, et une comparaison simple des performances des bâtiments par l'ensembles des parties prenantes.

Par ailleurs, et face aux défis que représente le B-POS, on constate que le périmètre du bâtiment restreint la capacité d'action sur la question environnementale. Il semble que la tendance future soit d'élargir la question à l'îlot voir au quartier.

Cette tendance est une opportunité de développement et de synergies pour les promoteurs; et oblige les concepteurs et les chercheurs à adopter d'adopter une vision multi-échelle. Les questions posées à l'échelle du bâti se multiplient et se complexifient à l'échelle du quartier, et leur réponse passe par l'adoption d'une approche systémique. Il est nécessaire d'envisager le bâtiment dans son environnement présent mais aussi vis-à-vis de l'évolution de son quartier dans les décennies futures. De même la question de la performance doit être traitée au travers un spectre multi-échelle et vis-à-vis des potentielles mutations futures du quartier.

D'un point de vue opérationnelle le sujet des synergies entre les concepteurs des différentes composantes d'un quartier pose la question de la cohérence des choix, de l'interopérabilité et plus généralement de nouvelles questions de collaboration multi-projets, multi-échelles et asynchrones ; et donc de leur instrumentation.

La question du changement d'échelle doit impérativement prendre en compte la question des habitants, au cœur du système et au cœur de la consommation énergétique. L'enveloppe et les équipements doivent répondre à des objectifs de performance environnementale tout en étant compatibles avec les usages des occupants présents et futurs. La performance doit donc être envisagée en amont lors de la conception mais aussi en aval lors de son utilisation.

Il est donc indispensable de mieux modéliser les futurs occupants notamment en développant des scénarios d'usages représentatifs de la multiplicité des comportements et des caractéristiques des occupants. Parallèlement, les professionnels doivent répondre à cette question en associant l'occupant à l'étape de programmation et en l'accompagnant dans son utilisation. Cette dernière question nécessite le développement de méthodes et de l'instrumentation de l'accompagnement et de participation des futurs habitants.

L'objectivation des performances des bâtiments, l'adoption d'une perspective qui dépasse le bâti pour envisager le quartier, et l'implication des habitants dans les projets sont des clés d'une meilleure maîtrise des impacts environnementaux des bâtiments mais plus globalement de la vie collective de la cité.

# Références

- Ademe.fr (2016). <http://www.ademe.fr/expertises/batiment/passer-a-laction/outils-services/garantie-performance-energetique>
- Advancity (2015). Innovation et villes durables : repères pour l'action. Note d'approfondissement sur l'évaluation des territoires d'innovation urbaine. Annexe 2 au vademecum.
- Alhamwi, H. (2012). La prise en compte des incertitudes dans l'évaluation de la qualité environnementale des bâtiments tertiaires: démarche HQE® (Doctoral dissertation, Université Paris-Est).
- Andrianandraina, A. (2014). Approche d'éco-conception basée sur la combinaison de l'Analyse de Cycle de Vie et de l'Analyse de Sensibilité (Doctoral dissertation, Ecole Centrale de Nantes).
- Arantes, L. (2013). L'intégration des données énergétiques dans la conception architecturale située (Doctoral dissertation, Grenoble).
- Artiges, N. (2006). De l'instrumentation au contrôle optimal prédictif pour la performance énergétique du bâtiment (Doctoral dissertation, Université Grenoble Alpes).
- Ball, M. 1988, Rebuilding Construction: Economic Change in the British Construction Industry, Routledge, London.
- Bazzana, M. (2011). Développement et mise en application d'un cadre de modélisation pour l'analyse des risques appliqués aux systèmes constructifs (Doctoral dissertation, Grenoble).
- Bougrain F., et Carassus J., (2003) Bâtiment: De l'innovation de produit à l'innovation de service. Plan Urbanisme Construction Architecture, Innover Ensemble.
- Bourgeois, D., Reinhart, C., & Macdonald, I. (2006). Adding advanced behavioural models in whole building energy simulation: a study on the total energy impact of manual and automated lighting control. *Energy and buildings*, 38(7), 814-823.
- Caisse des Dépôts (2014). Logement social et transition énergétique : Étude sur la performance énergétique du secteur HLM. Eclairages. Juillet 2014. Groupe Caisse des Dépôts.
- Chesné, L. (2012). Vers une nouvelle méthodologie de conception des bâtiments, basée sur leurs performances bioclimatiques (Doctoral dissertation, Lyon, INSA).
- Chevallier, J. (1989). Produits et Analyse de la Valeur. Cepadues.



- Chlela, F. (2008). Développement d'une méthodologie de conception de bâtiments à basse consommation d'énergie (Doctoral dissertation, Université de La Rochelle).
- Cluzel, F., Yannou, B., Da Costa, P. and Gobin, C. (2016). Extending usage and value creation perspectives of a building by value and externalities management: The DECADIESE methodology.
- Comet, C. (2004). Réseaux et chantiers: Performance et capital social des entrepreneurs du bâtiment (Doctoral dissertation, Lille 1).
- Commissariat Général au Développement Durable (2012). Le point sur Le réseau « Bâtiment durable ». 18 pôles de compétitivité porteurs d'innovation. N° 154 Février 2012.
- Conteville, L., & den Hartigh, C. (2009). Les écomatériaux en France. État des lieux et enjeux dans la rénovation thermique des logements. Les Amis de la Terre, 14.
- Dandres, T. (2012). Développement d'une méthode d'analyse du cycle de vie conséquente prospective macroscopique: évaluation d'une politique de bioénergie dans l'union européenne à l'horizon 2025 (Doctoral dissertation, École Polytechnique de Montréal).
- Delafolie, G. (1991). Analyse de la valeur. Paris.
- Delcambre, B. (2014). Mission numérique bâtiment. Online [http://www.territoires.gouv.fr/IMG/pdf/rapport\\_mission\\_numerique\\_batiment.pdf](http://www.territoires.gouv.fr/IMG/pdf/rapport_mission_numerique_batiment.pdf) (Accessed April 2016).
- Desjeux, D. (1996). Anthropologie de l'électricité: les objets électriques dans la vie quotidienne en France. Editions L'Harmattan., 220 p., ISBN: 978-2738441089
- DGNB <http://www.dgnb-system.de/en/system/criteria/core14/>
- Domingo, L. (2013). Méthodologie d'éco-conception orientée utilisation (Doctoral dissertation, Université de Grenoble).
- Eason, K. (1987) Information technology and organizational change. London: Taylor and Francis.
- Egan, J. (1998). Rethinking construction. Report of the Construction Task Force on the Scope for Improving the Quality and Efficiency of UK Construction. Department of the Environment, Transport and the Regions, London, 1998.
- Ekvall, T., Tillman, A.-M., & Molander, S. (2005). Normative ethics and methodology for life cycle assessment. Journal of Cleaner Production, 13, 10.
- Escadeillas, G. (2006). Les éco-matériaux dans la construction: Enjeux et perspectives. Septième édition des Journées scientifiques du Regroupement francophone pour la recherche et la formation

sur le béton (RF) B, 2.

Faruqi, A., Sergici, S., & Sharif, A. (2010). The impact of informational feedback on energy consumption—A survey of the experimental evidence. *Energy*, 35(4), 1598-1608.

Fournier, S. (1985). « Concepts et pratiques actuelles de mesure de la productivité dans le bâtiment : Analyse pratique et réflexion théorique » in *Le Travail en chantier*, Paris, Plan construction et Habitat

Frischknecht, R., Althaus, H.-J., Bauer, C., Doka, G., Heck, T., Jungbluth, N., et al. (2007). The environmental relevance of capital goods in life cycle assessments of products and services. *International Journal of Life Cycle Assessment (Online first)*, 11.

Gallissot, M. (2012). *Modéliser le concept de confort dans un habitat intelligent: du multisensoriel au comportement* (Doctoral dissertation, Grenoble).

Gholipour, V. (2011). *Éco-conception collaborative de bâtiments durables*. Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy.

Glé, P. (2013). *Acoustique des Matériaux du Bâtiment à base de Fibres et Particules Végétales-Outils de Caractérisation, Modélisation et Optimisation* (Doctoral dissertation, INSA de Lyon).

Gobin, C. (2006). *Développement durable en BTP - Fonctions d'usage*. Tech. Ing.

Gobin, C. (2009). *Construction et coûts associés: vers une économie des coûts ignorés*. Techniques de l'Ingénieur.

Gruneberg, S. L. (1997). *Construction economics: an introduction* (pp. 21-36). London: Macmillan.

Guerin, D.A., Yust, B.L., Coopet, J.G., 2000. Occupant predictors of household energy behavior and consumption change as found in energy studies since 1975. *Fam. Consum. Sci. Res. J.* 48–80.

Guinée, J. B. (2002). Handbook on life cycle assessment operational guide to the ISO standards. *The international journal of life cycle assessment*, 7(5), 311-313.

Hainaut, H., Morel, R. and Cochran, I. (2015) *Panorama des financements climat en France*. Édition 2015 - Rapport intégral. 4CE – Institute for Climate Economics. Novembre 2015.

Halada, K., & Yamamoto, R. (2001). The current status of research and development on ecomaterials around the world. *MRS bulletin*, 26(11), 871-879.

Han, Q., Nieuwenhijzen, I., de Vries, B., Blokhuis, E., & Schaefer, W. (2013). Intervention strategy to stimulate energy-saving behavior of local residents. *Energy Policy*, 52, 706-715.

Hannachi-Belkadi, N. K. (2008). *Développement d'une méthodologie d'assistance au*

- commissionnement des bâtiments à faible consommation d'énergie (Doctoral dissertation, Université Paris-Est).
- Hansen, P. G., & Jespersen, A. M. (2013). Nudge and the manipulation of choice: A framework for the responsible use of the nudge approach to behaviour change in public policy. *Eur. J. Risk Reg.*, 3.  
<http://www.wbcds.org/Pages/EDocument/EDocumentDetails.aspx?ID=11133&NoSearchContextKey=true>
- Interclusters. <http://www.interclusters.fr/index.php/presentation-du-reseau>
- Lahdenperä, P. (1998). The inevitable change: why and how to modify the operational modes of the construction industry for the common good. Finnish Building Centre Ltd..
- Lamé, G., Leroy, Y., & Lasvaux, S. (2015, July). Identifying needs for new ecodesign tools with the DSM value bucket tool-an example in the construction industry. In *International Conference on Engineering Design 2015* (Vol. 1).
- Lasvaux, S. (2010). Étude d'un modèle simplifié pour l'analyse de cycle de vie des bâtiments (Doctoral dissertation, École Nationale Supérieure des Mines de Paris).
- Lehner, M., Mont, O., & Heiskanen, E. (2015). Nudging—A promising tool for sustainable consumption behaviour? *Journal of Cleaner Production*.
- Lesage, P., Ekvall, T., Deschenes, L., & Samson, R. (2006a). Environmental assessment of brownfield rehabilitation using two different life cycle inventory models. Part 1: methodological approach. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 12(6), 8.
- Lesage, P., Ekvall, T., Deschenes, L., & Samson, R. (2006b). Environmental assessment of brownfield rehabilitation using two different life cycle inventory models. Part 2: case study. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 12(7), 17.
- Lindelöf, D., & Morel, N. (2006). A field investigation of the intermediate light switching by users. *Energy and Buildings*, 38(7), 790-801.
- Mati-Baouche, N. (2015). Conception d'isolants thermiques à base de broyats de tiges de tournesol et de liants polysaccharidiques (Doctoral dissertation, Université Blaise Pascal-Clermont-Ferrand II).
- Mauger, C. (2012). Method for the conceptual phase of an Integrated Product and Service Design applied to Construction Project. In *REFSQ* (Vol. 2, pp. 365-372).
- McGraw Hill Construction (2010). Green BIM – How Building Information Modeling is Contributing to Green Design and Construction. SmartMarket Report.

McLoughlin, F., Duffy, A., Conlon, M., 2012. Characterising domestic electricity consumption patterns by dwelling and occupant socio-economic variables: An Irish case study. *Energy Build.* 48, 240–248.

Millet, D., Bistagnino, L., Lanzavecchia, C., Camous, R., Poldma, T., 2007. Does the potential of the use of LCA match the design team needs? *Journal of Cleaner Production*, 15(4), p.335-346.

Momsen, K., & Stoerk, T. (2014). From intention to action: Can nudges help consumers to choose renewable energy?. *Energy Policy*, 74, 376-382.

Page, J., Robinson, D., & Scartezzini, J. L. (2007). Stochastic simulation of occupant presence and behaviour in buildings. In Proc. Tenth Int. IBPSA Conf: Building Simulation.

PCA (1996), L'innovation en chantier, (références multiples : Campinos-Dubernet, Coriat, du Tertre, Guilhon, Veltz)

Peuportier B, et Putzeys K. (2005) Inter-comparison and benchmarking of LCA-based environmental assessment and design tools. Final Report. PRESCO European Thematic Network, 74 p.

Peuportier, B. (2008). Les éco-technologies dans la construction. In *Annales des Mines-Réalités industrielles* (No. 4, pp. 15-21). Eska.

Plan Bâtiment Grenelle (2011a). Groupe de travail « Innovation & Recherche ». Leviers à l'innovation dans le secteur du bâtiment. Rapport intermédiaire – Janvier 2011

Plan Bâtiment Grenelle (2011b). Leviers à l'innovation dans le secteur du bâtiment. Rapport final - septembre 2011

Plan Bâtiment Grenelle (2012). La garantie de performance énergétique. Rapport. Avril 2012

PUCA (Plan Urbanisme Construction Architecture) (2011). Amélioration énergétique en copropriétés. Appel à propositions de recherche action. Mars 2011

Rio, M. (2012). A l'interface de l'ingénierie et de l'analyse environnementale, fédération pour une éco-conception proactive (Doctoral dissertation, Université de Technologie de Troyes).

Rodriguez, G. (2013). Modélisation de la réponse de l'architecture au climat local (Doctoral dissertation, Université Sciences et Technologies-Bordeaux I).

Rouault, F. (2014). Système intégré de rafraîchissement d'air pour le bâtiment à base de matériaux à changement de phase (Doctoral dissertation, Paris, ENSAM).

Roux, C. (2013). Les nouveaux outils d'éco-conception (ACV dynamique et approche conséquentielle) et leur application à la Cité Descartes. Conférence « Analyse de Cycle de Vie : vers un nouveau modèle économique ». 20 juin 2013. Chaire ParisTech Eco-conception des ensembles bâtis et des

infrastructures.

- Soebarto, V.I., Williamson, T.J., 2001. Multi-criteria assessment of building performance: theory and implementation. *Building and Environment* 36, 681–690.
- Sunstein, C. R. (2014). Nudging: a very short guide. *Journal of Consumer Policy*, 37(4), 583-588.
- Swan, L. G., & Ugursal, V. I. (2009). Modeling of end-use energy consumption in the residential sector: A review of modeling techniques. *Renewable and sustainable energy reviews*, 13(8), 1819-1835.
- Trocmé, M. (2009). Aide aux choix de conception de bâtiments économes en énergie (Doctoral dissertation, École Nationale Supérieure des Mines de Paris).
- Vassileva, I., & Campillo, J. (2014). Increasing energy efficiency in low-income households through targeting awareness and behavioral change. *Renewable energy*, 67, 59-63.
- Vassileva, I., Odlare, M., Wallin, F., & Dahlquist, E. (2012). The impact of consumers' feedback preferences on domestic electricity consumption. *Applied Energy*, 93, 575-582.
- Veltz P. (1996), « Les processus moteurs de l'innovation », in PUCA
- Vermeulen, T. (2014). Optimisation de formes urbaines soumises au rayonnement solaire (Doctoral dissertation, Compiègne).
- Vincent L. A. (1968). La mesure de la productivité, Paris, Dunod
- WBSD (World Business Council for Sustainable Development) (2009). The Cement Sustainability Initiative. Recycling concrete. Full Report. Accessible le 01/06/2016 sur
- Wullens, S. (2015). Étude numérique de la ventilation naturelle, mise en oeuvre d'un modèle fin dans une simulation de thermique du bâtiment (Doctoral dissertation, Université Grenoble Alpes).
- Yun, G.Y., Steemers, K., 2011b. Behavioural, physical and socio-economic factors in household cooling energy consumption. *Appl. Energy* 88, 2191–2200.
- Zaraket, T. (2014). Stochastic activity-based approach of occupant-related energy consumption in residential buildings (Doctoral dissertation, Ecole Centrale Paris).