

N° d'ordre : 4891



THÈSE

PRÉSENTÉE A

L'UNIVERSITÉ BORDEAUX 1

ÉCOLE DOCTORALE DES SCIENCES PHYSIQUES POUR L'INGENIERIE

Par Claudia Alejandra, VALDERRAMA ULLOA

POUR OBTENIR LE GRADE DE

DOCTEUR

SPÉCIALITÉ : Mécanique et Ingénierie

EXPLOITATION ET RÉHABILITATION DE BÂTIMENTS TERTIAIRES : UNE DÉMARCHE ÉNERGÉTIQUE D'AMÉLIORATION ENVIRONNEMENTALE

Soutenue le 13 novembre 2013

Devant le jury composé de :

M. BREYSSE, Denis	Professeur, Université Bordeaux 1	Président du jury
M. DIAB, Youssef	Professeur, Université de Marne-la-Vallée	Rapporteur
M. VEAS PEREZ, Leonardo	Professeur, Pontificia Universidad Católica de Chile	Rapporteur
M. PUIGGALI, Jean-Rodolphe	Professeur, Université Bordeaux 1	Directeur de thèse
M. LAGIÈRE, Philippe	Maître de Conférences, Université Bordeaux 1	Co-directeur de thèse
MME. Ferrari, Sylvie	Maître de conférences, Université Bordeaux IV Montesquieu	Examinatrice
M. DE HERDE, André	Professeur, Université Catholique de Louvain-la-Neuve	Invité

Université Bordeaux 1

Les Sciences et les Technologies au service de l'Homme et de l'environnement

REMERCIEMENTS

*En la mayoría de los hombres **la gratitud** es simplemente una esperanza secreta de obtener mayores favores.*

Duque de la Rochefoucauld

Primero que todo agradezco a la entidad que apoyó este proyecto de investigación desde sus inicios el programa nacional de investigación en Chile **Becas Chile de CONICYT**.

A los **miembros del jurado**, primero que todo por haber aceptado de leer mi tesis y luego por todas las críticas constructivas para poder mejorarla: los revisores Youssef DIAB (Universidad Marne-la-Vallée) y Leonardo VEAS PÉREZ (Pontificia Universidad Católica de Chile), a los examinadores: Sylvie FERRARI (Universidad de Bordeaux) y André DE HERDE (Université Catholique de Louvain) y al presidente del jurado Denis BREYSSE (Universidad de Bordeaux).

A mi **director de tesis**, mi profesor Jean-Rodolphe PUIGGALI, por su exigencia y que me hizo siempre dar aún más de mi misma, por su constante apoyo científico y personal, muchísimas gracias por todo!

A mi **co-director de tesis**, Philippe LAGIÈRE, por haber aceptado este trabajo en sus inicios y por haberme recibido en Francia con mi casi inexistente francés.

A Eric ARQUIS, director del Instituto de Mecánica de Bordeaux (I2M), a Jean-Christophe BATSALE, director del departamento TREFLE y a Henri BERTIN, mi responsable científico del colegio doctoral SPI, por su consideración a todos mis requerimientos académicos.

Un agradecimiento especial a Patrick SÉBASTIAN, por su infinita paciencia y excelente nivel pedagógico en mi objetivo de acercarme a lo funcional!

A todos los **profesionales** de las entidades contactadas durante este trabajo doctoral, los que nos permitieron acceder a diferentes informaciones y que nos entregaron parte de su tiempo en las diferentes discusiones para construir campus más sostenibles.

En la Dirección del Patrimonio Inmobiliario de la **Universidad Bordeaux 1** agradezco a: Annie COHEN, directora adjunta, Philippe BALLOFFET, ingeniero del servicio general del funcionamiento común, Bernard DUDZIAK, responsable del departamento de administración y medios comunes, Florence LASSERRE, responsable de la célula de trabajos y apoyo a los inmobiliarios. En el Departamento Universitario de Ciencias de Ajen (**DUSA**) agradezco a Vivianne DOMECH, Michel LAUGIER y Marc VALAT (así como también por toda la ayuda prestada con los instrumentos de medidas).

También agradezco a Michel BLANCHARD (EDF) quien me aportó mucha información sobre las facturas energéticas, a Corinne LE NOAN y Jean-Baptiste CAMPS por el feedback en la construcción de las encuestas y a Marie-Luce LACUBE por la armonía y buen humor durante las reuniones del grupo de Desarrollo Sostenible. En el Centro de Investigación del Instituto de Mecánica Aeronáutica (**CR-IMA**) agradezco a: El Amri ABDELHAMID y Denis MICHAUD

En la Dirección de Infraestructura y Desarrollo Físico (DIDF) de la **Pontificia Universidad Católica de Chile**: Héctor BARRIA, coordinador de Información, Francisco PALACIOS, coordinador de proyectos y Tomás PORTA subdirector de Planificación Física y Proyectos. En la Dirección del Patrimonio y Logística (DPL) de la **Universidad Bordeaux IV**: Marie-Christine MONGE, jefe de la dirección de estudios y de la vida universitaria, Pascal GUILHEM, responsable del departamento de mantención y explotación, Jorge OCAMPO, responsable del departamento de Gestión del Patrimonio y Jean-Luc BOBIS, director de la DPL.

A todos los **estudiantes** que colaboraron de una u otra forma en esta tesis: Eduardo GARCIA, Julien GUTIERREZ, Alexandre ESCUDERO, Charlotte ABADIE, Constance BRISSON, Simon DELTOMBE, François SCHOTT, Erwan LE GLOANEC, Eric BOULVARD, Cassandra NACEF, Guillaume PERE, Pauline KOULYTCHIZKY, Paul NGO SI XUYEN, Lucien CADIEU, Colombe COGORDAN, Fatma TRIGUI y Emmanuel MEZIERS.

A las **chicas del departamento** A mis primeros **colegas franceses** de Nobatek en especial a Lucie DUCLOS, Julie CRÉPIN, Grace YEPEZ, **TREFLE**, sin ellas nada Audrey BRIAND, Maria DUBROCA, Marie PAULY, se puede: Sylviane Isabelle IRATCHET, Laureline BONNET, David BOYA, Muriel EZAN-FREDERIQUE, Antoine DUGUÉ, Nicolas SALMON, BORE, Sandrine Nathalie LALANNE, Céline MANDALLENA, Stephanie DUBOIS y Audrey ARMAND, sobre todo por hacer el gran esfuerzo de DUPHIL. entender mi francés y no haber hecho distinción alguna.

A mis **colegas del labo** en especial a todas las palabras de aliento, apoyo, sonrisas, saludos y energía recibida durante la recta final de la tesis: a los ya doctores y más ancianos compañeros: Thomas QUIRANTE, Arnaud COLLIGNAN, Cécile GABORIEAU, Fouzia ACHCHAQ, Marie DUQUESNE, Alexandre GODIN, Rania MERHEB, Vladimir CANSECO y Jean-Luc DAUVERGNE; a los futuros doctores: Mehrez AGNAOU, Tom AHMAT, Xabier APAOLAZA, Ulises VALVERDE, Tan HOANG, José Luis JUAREZ, Julien TOLO, Hugo VIOT, Maïmouna MINT, Tan NGUYEN y Franck NONO, mucha suerte a todos ellos y a los profesores, investigadores y profesionales del labo: Elena PALOMO, Carlos SANZ, Alain SEMPEY, Jean-Pierre NADEAU, Fernando DE PABLO, Didier LASSEUX, Azita AHMADI, Jean-François BONNET, Denis BRUNEAU, Raphael CHERRIER, Marian ANTOS, Andrzej KUSIAK, Laurent MORA, Yan BAQUET y Yannick ANGUY.

A mis **colegas de oficina** internacional: por las numerosas discusiones sobre el trabajo y la vida en nuestras enriquecedoras pausas de café, té y chocolates calientes: Ernesto VELÁZQUEZ, Youssef BENAMA, Jackeline LEAL y Mehdi EL AMINE.

A mi **familia en Bordeaux** - A mi **familia en Chile** A mi **familia en Bretaña** –
RODRÍGUEZ-RUIZ: - **VALDERRAMA ROUAULT** por recibirme
Catalina, Gonzalo, **ULLOA**, por como sólo ellos saben
Clemente, Tomás, la sostenerme en mis hacerlo: André y Marie-
pequeña Isidora y Evaristo- ideas tan alocadas: Christine (gracias además por
el gato. Por haberme papá Luis, mamá todo el tiempo dedicado a
acogido como una más de Lilia, hermana Cory, lectura de la tesis) y a los
la familia, por su amistad, sobrina Anto y abuelos Rouault y Barbot, por
consejos y por escucharme abuelos Tata Carlos, adoptarme como otra nieta
en los momentos de Corina y Laura, tías y más y tantos abrazos
cansancio. tíos. concedidos.

A todos **mis amigos:** Ernesto Efrén VELÁZQUEZ ROMO (por sus innumerables críticas....constructivas, al final te agradezco amigo), Cécile PERCHICOT (por las relecturas y hacerme sentir una star), Julien GRIMAULT (por su tiempo para nosotros en su agenda tan agitada), Lourdes GRANADOS (por su linda amistad), Julien BODENNEC (por querer cambiar el mundo), Saber IMANZADEH (por ser mi primera amistad en Bordeaux), Antonio RODRIGUEZ (por su mirada crítica de las cosas), Estefania DEL CAMPO (por su sentido del humor), Stéphanie BONTEMPS (por su sinceridad y energía en todo lo que hace), Claudia CASTILLO (por sus palabras tan acertadas), Guillaume DESMIER (por la forma de vivir la vida), Rania MERHEB (por las palabras de aliento), Audrey BRIAND (por su amistad duradera, apoyo y confianza), Julie CRÉPIN (por ser como es! y querer un mundo mejor), Antoine DUGUÉ (por hablarme de TREFLE en Chile y ser el culpable de hacerme escribir estas líneas en esta tesis), Isabelle IRATCHET (por escucharme, mimarme y aceptarme), Grace YEPEZ (por su eterna solidaridad con los suyos) y Philippe BALLOFFET (por compartir todos sus conocimientos técnicos y sus observaciones en esta tesis).

En especial por nuestras fiestas internacionales, cursos y congresos para cumplir nuestras obligaciones doctorales y por su apoyo para esos momentos no tan buenos.

A mi **amor Fabien ROUAULT**, por su incondicional apoyo en las largas noches de escritura, por sus innumerables correcciones de todo!, por su impecable visión objetiva de las cosas, por su excelente capacidad de contención, por su amistad, su compañía y por estar conmigo, siempre!.

*Para mí la **gratitud** es el reconocimiento hacia cada una de las personas que han aportado una piedra en la construcción de esta etapa de mi vida.*

Claudia VALDERRAMA ULLOA

CONTEXTE DE LA THÈSE

Ce travail a été mené dans le cadre d'un programme national pour l'amélioration de la recherche au Chili, appelée « Becas Chile » de CONICYT (Commission Nationale de Recherche Scientifique et Technologique).

RÉSUMÉ

Le secteur du bâtiment est l'un des secteurs les plus énergivores, sa consommation énergétique importante découle d'une part de la dégradation des matériaux propre à leur vieillissement et d'autre part, au manque d'un cadre réglementaire énergétique plus strict accompagnant la conception. Enfin cette consommation énergétique est due à la présence des usagers. Ceci est d'autant plus vrai pour le secteur tertiaire au travers leurs activités, leurs comportements et leur degré d'appartenance que les usagers donnent à ces types de bâtiments. En effet, même si tout le monde les utilise, personne ne se sent responsable de leur maintenance.

Le travail présenté ici met en avant la relation entre la consommation énergétique dans les campus universitaires et le comportement des usagers. Les résultats sont analysés dans un contexte climatique comparable (paramètre clé les Degrés Jours Unifiés - DJU), avec indicateurs d'évaluation partageables (ce qui ont été judicieusement choisis à partir d'une comparaison entre différents systèmes d'évaluation) et traduit dans une méthodologie d'évaluation (basée sur les méthodes multicritères). Celle-ci tient compte de la multiplicité d'usages, d'usagers et d'attentes énergétiques, environnementales et de confort présents dans ce type de secteur tertiaire.

L'objectif principal de cette étude a été d'élaborer une démarche d'amélioration environnementale et énergétique pour l'exploitation des bâtiments tertiaires, pour aller vers la réhabilitation thermique et énergétique, en considérant d'une part, la satisfaction des usagers et d'autre part les performances énergétiques et environnementales améliorées des bâtiments analysés.

Ce mémoire de thèse est construit autour la logique suivante : une mise en situation des problématiques énergétiques internationales et nationales (France et du Chili). Un focus sur l'énergie dans le secteur tertiaire, permet de s'imprégner des différents dispositifs mis en place pour atteindre l'objectif de réduction de la consommation

d'énergie et des émissions de CO₂. Une grille de comparaison qui va nous permettre de réaliser les analyses de consommations énergétiques à différentes périodes de l'année avec un seul paramètre climatologique le DJU, est mise en avant. Ensuite les différents campus et sites universitaires sur lesquels nous appuyons la réflexion sont présentés. Dans ceux-ci, nous analysons à différentes échelles spatio-temporelles et avec différents types d'analyses qualitatives et quantitatives, les variables discriminantes qui seront essentielles pour parvenir à une amélioration énergétique au fil du temps. Par la suite, une ligne de base de critères et indicateurs qui vont nous permettre d'évaluer avec la même échelle d'évaluation, la performance énergétique et environnementale des bâtiments dans leur état actuel est créée. Pour, ensuite, les comparer dans un état optimisé lorsque les améliorations énergétiques ont été mises en place. Enfin nous proposons une méthodologie d'évaluation et d'amélioration environnementale pour l'exploitation des bâtiments tertiaires qui va mettre en relation de façon originale les besoins énergétiques, environnementaux, économiques et de confort des gestionnaires et des usagers universitaires. Une modélisation thermique de solutions de réhabilitation et un modèle économique, assez simple, sont proposés pour illustrer l'application de la méthodologie.

MOTS CLÉS

Énergie, émissions de CO₂, campus universitaire, climat, usages/usagers, ressources énergétiques, indicateurs, hiérarchisation, modèle multicritère, évaluation énergétique et thermique, rénovation

THESIS BACKGROUND

This work was conducted as part of a national program to improve the research in Chile, called "Becas Chile" of CONICYT (National Commission for Scientific and Technological Research)

ABSTRACT

The buildings sector is one of the largest energy consuming sectors, its high energy consumption stems to construction materials degradation on the one hand and to the lack of a stricter regulatory context in design step on the other hand. Finally, this energy consumption is due to the presence of users. This is especially true for the service sector through its activities, its behavior and the sense of belonging of users to this type of buildings. Even if everyone uses them, nobody feels responsible for their maintenance.

The work presented here highlights the relationship between energy consumption in university campuses and user's behavior. The results are analyzed in a comparable climatic context (the key parameter Unified Degree Days - UDD) with sharable assessment indicators (which have been carefully selected from a comparison between different assessment systems). Then, the results are translated into an evaluation methodology (based on multicriterio analysis). The methodology takes into account the multiplicity of uses, users and energy resources, environment and comfort requirements expected in this service sector.

This study aims to develop an environmental and energy improvement approach for the operation of tertiary buildings, to move towards a thermal and energy rehabilitation, considering on the one hand, user satisfaction and on the other hand the energy and environmental improved performance of the studied buildings.

This manuscript of thesis is built around the following logic: an overview of national and international energy issues (France and Chile). A specific reference to energy in the tertiary sector emphasizes the different mechanisms put in place to achieve the reduction target of energy consumption and CO₂ emissions. A comparison grid is built to analyze energy consumptions at different times of the year with a single climate parameter: the DDU (Unified Degree Days). Then, the different campuses and universities supported by the reflection are presented. In these study cases, we

analyzed at different spatio-temporal scales and with different types of qualitative and quantitative analysis, the discrimination of critical variables to achieve energy improvements over time. Subsequently, a baseline of criteria and indicators is developed to evaluate the energy and environmental performance of buildings in their current state with the same rating scale. Then energy improvements are implemented to compare them in an optimized state. Finally, we propose an evaluation methodology and environmental improvements for the operation of tertiary buildings which will bring together in an original way the energy, environmental, economic and comfort managers and users universities needs. Thermal modeling solutions and economic rehabilitation rather simple model are provided to illustrate the application of the methodology.

KEYWORDS

Energy, CO₂ emissions, campuses, climate, uses / users, energy resources, indicators, prioritization, multicriteria analysis, energy and thermal assessment and renovation.

CONTEXTO DE LA TESIS

Este trabajo se ha realizado bajo un programa nacional para mejorar la investigación en Chile, denominada "Becas Chile" de CONICYT (Comisión Nacional de Investigación Científica y Tecnológica).

RESUMEN

El sector de la construcción es uno de los sectores que más energía consume, este consumo se debe en parte a la degradación de sus materiales, propia al paso del tiempo, a la falta de un marco legal energético más estricto que regule su diseño-concepción y por otra a la presencia de sus usuarios. Este fenómeno se vuelve más recurrente en el sector terciario debido a sus actividades, sus comportamientos y el grado de pertenencia que los usuarios le dan a este tipo de edificios. De hecho, si es cierto que todo el mundo los puede utilizar, no todos se sienten responsables de su cuidado.

El trabajo que aquí se ha desarrollado presenta la relación entre el consumo energético de los campus universitarios y el comportamiento de sus usuarios. Los resultados se han analizado bajo un contexto climático comparable (parámetro clave los Grados Días Unificados - GDU), indicadores de evaluación adaptables (que han sido cuidadosamente seleccionados a partir de una comparación entre distintos sistemas de evaluación - certificaciones) y que se han traducido a través de una metodología de evaluación (basada en métodos de multicriterio). Esta metodología considera la multiplicidad de usos, de usuarios y de requerimientos energéticos, medioambientales y de confort presentes en este tipo de sector terciario.

El objetivo principal de este estudio ha sido desarrollar una metodología de mejora energética y medioambiental para la operación de edificios terciarios, que permitirá además de considerar una rehabilitación térmica y energética, teniendo en cuenta, por una parte, la satisfacción de los usuarios y por otra el desempeño energético y medioambiental mejorado de los edificios analizados.

La memoria de la tesis ha sido construida bajo la siguiente lógica: la presentación de las problemáticas energéticas internacionales y nacionales (de Francia y de Chile). Una visión de la energía en el sector terciario, permite ahondar sobre los diferentes mecanismos establecidos para lograr el objetivo de reducir el consumo energético y

las emisiones de CO₂. Un sistema de comparación nos permite analizar el consumo energético en diferentes periodos del año, a través de un único parámetro climático, el GDU. A continuación se presentan los diferentes campus y sitios universitarios en los que nos apoyamos para el análisis. En ellos, analizamos a diferentes escalas espacio-temporales y con diferentes tipos de análisis cualitativos y cuantitativos, las variables discriminantes que serán fundamentales para lograr la mejora de la eficiencia energética a través del tiempo. Posteriormente, construimos una línea de base de criterios e indicadores que nos permitirá evaluar a través de una misma escala de evaluación, el desempeño energético y medioambiental de los edificios en su estado actual, para luego compararlos en un estado óptimo cuando diferentes mejoras energéticas se han implementado. Por último, proponemos una metodología de evaluación y de mejoras energéticas para la operación de edificios terciarios, dicha metodología relaciona de manera original las necesidades energéticas, medioambientales, económicas y de confort de gestores y de usuarios universitarios. Finalmente, proponemos para ilustrar la aplicación de la metodología, un modelo térmico de soluciones de rehabilitación y un modelo económico simplificados.

PALABRAS CLAVES

Energía, emisiones de CO₂, campus universitarios, clima, usos/usuarios, recursos energéticos, indicadores, jerarquización, modelo multicriterios, evaluación energética y térmica, renovación.

TABLE DE MATIÈRES

INTRODUCTION : JUSTIFICATION DE LA THÈSE ET DE LA DÉMARCHE SUIVIE	29
.....	
Contribution de la recherche	32
La démarche de la thèse.....	32
1 LA MISE EN RELATION ENTRE ÉNERGIE, CLIMAT ET SECTEUR D'USAGE	37
.....	
1.1 Introduction.....	39
1.2 La problématique énergétique et environnementale mondiale	39
1.2.1 L'énergie	39
1.2.2 Les émissions de CO ₂	41
1.3 Le contexte énergétique des deux pays où sont implantés les campus étudiés	43
1.3.1 Les différentes politiques énergétiques et environnementales	47
1.3.2 Les dispositifs réglementaires pour le secteur résidentiel et tertiaire	49
1.4 Le secteur tertiaire.....	53
1.5 Le contexte climatique des deux pays où sont implantés les campus étudiés	57
.....	
1.5.1 Les paramètres de l'analyse climatique	57
1.5.2 Les climats des villes où sont implantés les campus universitaires de l'étude	58
1.6 L'analyse des données climatiques dans le comportement énergétique.....	61
1.6.1 Les différents paramètres climatiques des villes où sont implantés les campus étudiés	61
1.6.2 Le choix des paramètres climatologiques de base pour l'analyse énergétique des campus universitaires	63
1.7 Conclusion.....	69

2	L'ANALYSE ÉNERGÉTIQUE DES CAMPUS UNIVERSITAIRES	71
2.1	Introduction.....	73
2.2	La méthodologie.....	75
2.3	Les différents campus et sites universitaires	77
2.3.1	La présentation	77
2.3.1.1	L'Université Bordeaux 1 : campus principal des Sciences & Technologies, le Centre de ressource Ingénierie et Maintenance Aéronautique (CR-IMA) et le Département Universitaire des Sciences d'Agen (DUSA).....	77
2.3.1.2	L'Université Bordeaux IV – Montesquieu : campus principal.....	80
2.3.1.3	La Pontificia Universidad Católica de Chile : campus San Joaquín	81
2.3.2	La description des usagers et des surfaces	84
2.4	L'analyse quantitative et qualitative de la consommation dans les différents campus et sites	87
2.4.1	L'analyse quantitative	91
2.4.1.1	L'état actuel des consommations	93
2.4.1.2	L'énergie actuelle (électricité, gaz et bois) ramenée au climat	96
2.4.1.3	L'énergie actuelle ramenée à la surface et aux usagers	106
2.4.2	L'analyse qualitative.....	107
2.4.2.1	L'électricité et les usagers	107
2.4.2.2	Le gaz et le climat	110
2.4.2.3	Le bois et la gestion	112
2.5	La démarche d'évaluation et d'amélioration énergétique des bâtiments existants des campus universitaires	113
2.5.1	Les variables de l'analyse énergétique	113
2.5.1.1	Le climat.....	113
2.5.1.2	Les usages et les usagers.....	113
2.5.1.3	Les ressources	114
2.5.2	Les différentes actions d'amélioration énergétique	115

2.5.2.1	La gestion du patrimoine	115
2.5.2.2	L'éducation	116
2.5.2.3	La gestion énergétique	117
2.6	Conclusion.....	118
3	LES INDICATEURS D'ÉVALUATION : UNE APPROCHE QUANTITATIVE.	121
3.1	Introduction.....	123
3.2	Contexte	124
3.2.1	Les phases de la construction de la ligne de base des indicateurs.....	124
3.2.2	Qu'est ce qu'un indicateur ?	125
3.3	Un état de l'art de systèmes d'évaluation énergétique et environnementale et travaux scientifiques appliqués aux bâtiments	127
3.3.1	La comparaison entre divers systèmes d'évaluation internationaux ...	128
3.3.1.1	Un zoom entre les systèmes : LEED et HQE	134
3.3.2	L'état de l'art sur les critères et les intervalles des différents indicateurs retenus	139
3.3.2.1	La consommation des ressources et les impacts environnementaux.	139
3.3.2.2	L'environnement intérieur	141
3.4	La construction de la ligne de base des indicateurs d'évaluation énergétique et environnementale de bâtiments tertiaires	146
3.4.1	La définition des différents indicateurs retenus dans la méthodologie d'évaluation	147
3.5	L'évaluation des indicateurs appliquée aux bâtiments tertiaires d'un campus universitaire.....	149
3.5.1	La présentation des bâtiments évalués.....	150
3.5.2	Les résultats de la campagne de mesure	152
3.6	Conclusion.....	160

4	UNE MÉTHODOLOGIE POUR L'ÉVOLUTION DURABLE DE BÂTIMENTS EXISTANTS	163
4.1	Introduction.....	165
4.2	Contexte	166
4.2.1	Qu'est qu'un modèle d'aide à la décision ?.....	166
4.2.2	Les différents types de modèle	167
4.2.3	Les modèles d'optimisation appliqués aux bâtiments	168
4.3	La base méthodologique d'aide à la décision multicritère	170
4.3.1	La fonction de désirabilité (d'acceptabilité)	170
4.3.2	L'agrégation de multicritères	173
4.3.3	L'indice de désirabilité (acceptabilité)	174
4.3.4	Les différentes parties de la méthodologie d'aide à la décision	177
4.3.4.1	L'évaluation technique : Les modèles d'interprétation et d'agrégation	178
4.3.4.2	L'évaluation économique simplifié : la consommation énergétique et l'investissement	179
4.3.4.3	Le modèle de décision	180
4.4	L'application de la méthodologie	181
4.4.1	L'évaluation technique	181
4.4.2	L'évaluation économique (simplifiée)	189
4.4.3	Le modèle de décision	199
4.5	Pour aller plus loin.....	201
4.5.1	Les scénarios d'EnR pour l'Université Bordeaux 1	201
4.5.2	La réponse dynamique à la demande énergétique des trois bâtiments types de l'Université Bordeaux 1	202
4.6	Conclusion.....	203
	CONCLUSIONS GÉNÉRALES.....	207
	PERSPECTIVES.....	215

RÉFÉRENCES	221
Chapitre 1	223
Chapitre 2	226
Chapitre 3	231
Chapitre 4	235
ANNEXES	243
Chapitre 1	245
A.1.1 Les différentes politiques énergétiques et environnementales.....	245
A.1.2 Les paramètres climatologiques.....	251
A.1.3 La description des climats des pays de l'étude	252
Chapitre 2	254
A.2.1 L'état actuel des consommations pour l'IMA et le DUSA	254
A.2.2 L'énergie actuelle ramenée au climat.....	255
A.2.2.1 L'électricité.....	256
A.2.2.2 Le gaz.....	256
A.2.3 L'énergie actuelle ramenée à la surface et aux usagers	257
Chapitre 3	259
A.3.1 : La description des systèmes d'évaluation internationaux	259
A.3.2 : La collecte de données pour la campagne de mesures	264
A.3.3 : Les outils utilisés pour la campagne de mesures.....	265
Chapitre 4	266
A.4.1 : L'enquête pour l'élaboration de la matrice de la hiérarchisation	266
A.4.2 : Les résultats de la priorisation dans l'ECCUC et Université Bordeaux IV- Montesquieu.....	267
A.4.3 : La facturation d'électricité	267
A.4.4 : La description des hypothèses pour le calcul de la demande de chauffage.....	268

A.4.5 : Le bilan du comportement thermique pour les bâtiments d'administration (A09) et d'enseignement (C04)	271
A.4.6 : L'analyse de prix unitaire pour la réhabilitation thermique	271

LISTE DES FIGURES

Chapitre 1

Figure 1. 1 : Comparaison entre la consommation et PIB par habitant (2009)	40
Figure 1. 2 : Evolution de l'énergie primaire par unité de PIB et par habitant, pour la France et le Chili entre 2003 à 2010.....	41
Figure 1. 3 : Comparaison entre la consommation et les émissions de CO ₂ par habitant (2009)	42
Figure 1. 4 : Evolution des énergies renouvelables et des émissions de CO ₂ pour la production d'énergie, en France et au Chili	43
Figure 1. 5 : Evolution de la consommation d'énergie primaire (corrigée des variations climatiques) par énergie entre 1973-2010 et l'apport actuel de chacune dans la consommation pour la France.....	44
Figure 1. 6 : Evolution de la consommation d'énergie primaire (corrigée des variations climatiques) par énergie entre 1973-2011 et l'apport actuel de chacune dans la consommation pour le Chili.....	45
Figure 1. 7 : Evolution de la consommation d'énergie primaire par secteur d'usage entre 1973-2010 et la distribution en 2011 de chaque secteur dans la consommation française.....	46
Figure 1. 8 : Evolution de la consommation d'énergie primaire par secteur d'usage entre 1973-2011 et la distribution en 2011 de chaque secteur dans la consommation chilienne	47
Figure 1. 9 : Principaux engagements internationaux et locaux pour le développement durable et les moyens pour les atteindre	48
Figure 1. 10 : Evolution des dispositifs réglementaires / normatifs dans le secteur résidentiel et tertiaire pour la France et le Chili.....	52
Figure 1. 11 : Consommation d'EF corrigée des variations climatiques pour la France et la consommation d'EF pour l'année 2011 (68,5 Mtep)	54

Figure 1. 12 : Consommation d'EF corrigée des variations climatiques pour le Chili et consommation finale d'énergie pour l'année 2011 (7,1 Mtep)	55
Figure 1. 13 : Consommation d'énergie finale par secteur et type d'usage en France	56
Figure 1. 14 : Consommation d'énergie finale par secteur et type d'usage au Chili .	56
Figure 1. 15 : Les principaux types de climat en France métropolitaine	59
Figure 1. 16 : Les principaux types de climat dans le Chili continental.....	60
Figure 1. 17 : Comparaison climatologique des différentes villes françaises et chiliennes.....	63
Figure 1. 18 : Résultats des corrélations pour les deux sites universitaires	64
Figure 1. 19 : Répartition mensuel des températures moyennes pour les deux villes où sont implantés les sites universitaires étudiés et sa relation avec la température de confort.....	66
Figure 1. 20 : Tendances climatiques de Bordeaux	67
Figure 1. 21 : Tendances climatiques de Santiago	68

Chapitre 2

Figure 2. 1: La démarche méthodologique utilisée pour l'analyse	76
Figure 2. 2 : L'entrée du Campus principal de l'Université Bordeaux 1	78
Figure 2. 3 : Plan du campus UBx1-TPG, à partir des données cartographiques (Université de Bordeaux & Département T.C - Cellule Infographie & multimédia, 2012)	78
Figure 2. 4 : Le plan du site d'IMA	78
Figure 2. 5 : Le hangar du site d'IMA.....	79
Figure 2. 6 : Le site du DUSA.....	79
Figure 2. 7 : Les façades nord-ouest (en haut) et sud (en bas) du bâtiment du DUSA	79
Figure 2. 8 : Le plan du campus TPG de l'Université Bordeaux IV – Montesquieu – à partir des données cartographiques (Université de Bordeaux & Département TIC, 2012)	80
Figure 2. 9 : Les différents bâtiments à UBxIV – TPG : enseignement, administration, recherche et préfabriqués (salle de cours)	81

Figure 2. 10 : Le plan du Campus San Joaquín PUC – Source : Pontificia Universidad Católica de Chile & Dirección de Infraestructura, 2012b	82
Figure 2. 11 : L'entrée principale de la PUC-CSJ (décembre 2012).....	82
Figure 2. 12 : Historique de l'évolution des surfaces et nombre d'utilisateurs.....	86
Figure 2. 13 : Les réseaux d'énergie dans les différents campus et sites analysés .	87
Figure 2. 14 : Schéma du réseau primaire de chauffage – Puissances installées à l'UBx1-TPG.....	89
Figure 2. 15 : Ratios représentatives du Campus Principal d'UBx1	89
Figure 2. 16 : Le réseau énergétique du campus TPG de l'UBxIV	90
Figure 2. 17 : Historique de l'évolution de la consommation d'énergie annuelle des différents campus et sites.....	93
Figure 2. 18 : Profil de la consommation facturée en fonction du climat.....	96
Figure 2. 19 : La consommation d'électricité facturée à l'Université Bordeaux 1 – TPG	98
Figure 2. 20 : La consommation d'électricité consommée à l'Université Bordeaux 1 – TPG	99
Figure 2. 21 : Comportement de la consommation d'électricité à l'Université Bordeaux 1 - TPG.....	100
Figure 2. 22 : Comportement de la consommation mensuelle d'électricité à l'Université Bordeaux IV-TPG.....	101
Figure 2. 23 : Comportement de la consommation de gaz à l'Université Bordeaux 1 - TPG	102
Figure 2. 24 : Comportement de la consommation de gaz de la PUC-CSJ	102
Figure 2. 25 : Comportement de la consommation de bois à l'UBx1-TPG	103
Figure 2. 26 : Energies mensuelles de gaz et d'électricité en fonction au DJU mensuel, pour les sites de la PUC-CSJ et d'UBx1-TPG.....	105
Figure 2. 27 : Energies trimestrielles en fonction au DJU trimestriel, pour les sites d'UBxIV-TPG, de l'IMA et du DUSA	106
Figure 2. 28 : Energie annuelle par m ² pour les différents sites et campus	107
Figure 2. 29 : Energie annuelle par usagers pour les différents sites et campus....	107
Figure 2. 30 : Profil de la puissance électrique appelée dans un bâtiment de recherche à UBx1-TPG	109
Figure 2. 31 : Profil de la consommation et du fonctionnement de la chaudière à gaz par rapport au climat et à la connexion réseau à l'UBx1-TPG	111

Figure 2. 32 : Profil de la consommation de gaz par rapport au fonctionnement de la chaudière à gaz et à la connexion réseau à l'Ubx1-TPG.....	111
Figure 2. 33 : Profil de la production énergétique de la chaudière à bois par rapport à la qualité du bois à l'Ubx1-TPG	112
Figure 2. 34 : Démarche d'évaluation et d'amélioration énergétique des bâtiments existants dans les campus universitaires	114
Figure 2. 35 : Campagne de sensibilisation pour l'Université Bordeaux 1 – TPG, réalisée par les étudiants de licence 2 Physique et Ingénierie	116

Chapitre 3

Figure 3. 1 : Le schéma de construction de la ligne de base des indicateurs pour le système d'évaluation	125
Figure 3. 2 : Les étapes dans la construction d'un indicateur	126
Figure 3. 3 : Les fonctions de l'indicateur dans un projet de construction	126
Figure 3. 4 : Le schéma de choix des indicateurs qui constituent la ligne de base d'évaluation énergétique et environnementale	145
Figure 3. 5 : Les indicateurs avec les piliers du développement durable et les scénarios avec les acteurs	146
Figure 3. 6 : Photographies des locaux évalués dans le bâtiment de recherche (R) – A12	151
Figure 3. 7 : Photographies des locaux évalués dans le bâtiment d'administration (A) – C04.....	151
Figure 3. 8 : Photographies des locaux évalués dans le bâtiment d'enseignement (E)- A09	151
Figure 3. 9 : Résultat de la consommation énergétique et indication de l'intervalle	152
Figure 3. 10 : Résultat de la production d'énergie renouvelable et indication de l'intervalle.....	152
Figure 3. 11 : Résultat des émissions de CO ₂ et indication de l'intervalle	153
Figure 3. 12 : Résultat de la satisfaction des usagers quant au confort olfactif et indication de l'intervalle	153
Figure 3. 13 : Résultats des mesures de la quantité de vues et indication de l'intervalle.....	154

Figure 3. 14 : Résultats des mesures de la distance aux vues et indication de l'intervalle.....	155
Figure 3. 15 : Résultat des mesures de la luminance de l'éclairage naturel et indication de l'intervalle	155
Figure 3. 16 : Résultats des mesures du niveau sonore et indication de l'intervalle	156
Figure 3. 17 : Résultat des mesures de la température de l'air et indication de l'intervalle.....	156
Figure 3. 18 : Résultats des mesures de la vitesse de l'air et indication de l'intervalle	157
Figure 3. 19 : Mesures de l'humidité relative de l'air et indication de l'intervalle.....	158
Figure 3. 20 : Résultats des mesures de la satisfaction des usagers quant au confort hygrothermique et indication de l'intervalle.....	158

Chapitre 4

Figure 4. 1 : Allure des fonctions de désirabilités	171
Figure 4. 2 : Allures des fonctions d'acceptabilité.....	172
Figure 4. 3 : Etapes de la méthodologie AHP.....	175
Figure 4. 4 : Les différentes parties de la méthodologie de décision	178
Figure 4. 5 : L'évaluation technique.....	179
Figure 4. 6 : L'évaluation économique.....	180
Figure 4. 7 : Le modèle de décision énergétique.....	181
Figure 4. 8 : Les bâtiments évalués : A12 (recherche-R), C04 (administration-A) et A09 (enseignement-E).....	181
Figure 4. 9 : Les valeurs d'interprétation des indicateurs des trois bâtiments évalués	184
Figure 4. 10 : Les profils d'acceptabilité (IPA) des scénarios des trois bâtiments étudiés pour les deux types de compensation.....	188
Figure 4. 11 : Le schéma du modèle	193
Figure 4. 12 : Un chercheur non sensible, bureau Bâtiment A12 état actuel, semaine d'hiver.....	196
Figure 4. 13 : Un chercheur sensible, bureau Bâtiment A12 état actuel, semaine d'hiver.....	196
Figure 4. 14 : Les scénarios d'ENR pour satisfaire la demande d'énergie thermique actuelle, sur une année, de l'Université Bordeaux 1.....	201

Figure 4. 15 : Mix énergétique en réponse à la demande d'énergie thermique des trois bâtiments types interconnectés, de l'Université Bordeaux 1 pour une semaine d'hiver (avec stockage)..... 202

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre 1

Tableau 1. 1 : Les principales données géographiques pour les six villes	61
Tableau 1. 2 : Quelques moyennes des paramètres climatiques pour les années 2008, 2009 et 2010, pour les deux villes de l'étude.....	62

Chapitre 2

Tableau 2. 1 : Les principales caractéristiques physiques et d'occupation des sites et campus étudiés	83
Tableau 2. 2 : Synthèse des ressources et usage de l'énergie sur UBx1-TPG à octobre 2012.....	88
Tableau 2. 3 : Valeurs de la normalisation pour l'analyse des consommations de l'énergie en l'état actuel.....	94
Tableau 2. 4 : Valeurs de la normalisation pour l'analyse des consommations de l'énergie en fonction au climat	97
Tableau 2. 5 : Les valeurs utilisées pour l'analyse du comportement énergétique des différents campus et sites.....	104

Chapitre 3

Tableau 3. 1 : Comparaison des certifications internationales.....	133
Tableau 3. 2 : Le premier regroupement des indicateurs HQE et LEED selon l'étape du cycle de vie et le bâtiment	136
Tableau 3. 3 : Le deuxième regroupement des indicateurs HQE et LEED selon leurs caractéristiques	137
Tableau 3. 4 : Les indicateurs retenus dans la comparaison des certifications HQE et LEED	138
Tableau 3. 5 : Les indicateurs économiques (consommation énergétique) et environnementaux (production d'EnR et émissions de CO ₂).....	140
Tableau 3. 6 : Les indicateurs sociaux : le confort acoustique, visuel et olfactif	142
Tableau 3. 7 : Les indicateurs sociaux : le confort hygrothermique	144
Tableau 3. 8 : La définition des différents indicateurs retenus pour la méthodologie d'évaluation	149
Tableau 3. 9 : Les caractéristiques des bâtiments évalués	150

Tableau 3. 10 : Les valeurs moyennes des différents critères retenus dans la méthodologie d'évaluation	159
--	-----

Chapitre 4

Tableau 4. 1 : Les valeurs des différents critères retenus dans la méthodologie d'évaluation	182
Tableau 4. 2 : Les valeurs des différents indicateurs ($Z_{(yi)}$).....	183
Tableau 4. 3 : La matrice de hiérarchisation et le niveau d'appréciation de chaque indicateur.....	185
Tableau 4. 4 : La matrice de hiérarchisation et le niveau d'appréciation de chaque scénario.....	186
Tableau 4. 5 : Les valeurs de chaque scénario de décision (IPA).....	187
Tableau 4. 6 : Les valeurs de chaque scénario de décision (IGE).....	188
Tableau 4. 7 : Les prix de la facture d'électricité (2010)	191
Tableau 4. 8 : La consommation de l'électricité (kWh et Euros) pour le bâtiment de recherche (A12).....	192
Tableau 4. 9 : Principales valeurs de base pour le calcul du bilan thermique	195
Tableau 4. 10 : Le bilan du comportement thermique par rapport à l'état actuel et au type de comportement d'utilisateurs dans le bâtiment de recherche	197
Tableau 4. 11 : Les prix de la facture de gaz (2010)	197
Tableau 4. 12 : La consommation du gaz (kWh et Euros) pour le bâtiment de recherche (A12).....	197
Tableau 4. 13 : Les prix des différentes actions d'amélioration énergétique	198
Tableau 4. 14 : Les coûts (euros HT) associés à la réhabilitation thermique et énergétique.....	198
Tableau 4. 15 : Résumé de la valeur économique du bâtiment de recherche	199

INTRODUCTION :
JUSTIFICATION DE LA
THÈSE ET DE LA
DÉMARCHE SUIVIE

Les hausses du prix des énergies associées aux préoccupations sur les conséquences des émissions des gaz à effet de serre ont maintenant placé la problématique énergétique au premier rang des préoccupations internationales.

Ces problématiques poussent différents secteurs de l'économie à réfléchir sur la manière dont on utilise l'énergie. Dans les deux pays de l'étude (France et Chili), le secteur de la construction est responsable de 23% (en France) et 10% (au Chili) des émissions directes de gaz à effet de serre 41% (en France) et 23% (au Chili) des consommations d'énergie finale (International Energy Agency, 2013a, 2013b, Commissariat Général au Développement Durable - Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie, 2011 et Ministerio de Energía - Gobierno de Chile, 2012a). Dans le but d'obtenir une diminution de ces valeurs, il est nécessaire de procéder à une rénovation massive du parc existant (chapitre 1). De plus, les hausses du prix des énergies primaires font que l'amélioration de l'efficacité énergétique de ce secteur est l'une des priorités internationales du développement durable.

La réduction des consommations d'énergie est urgente, non seulement pour des raisons écologiques, mais aussi pour des raisons économiques, car un accroissement de la demande énergétique semble inévitable alors que l'augmentation de la disponibilité des ressources énergétiques est moins sûre.

Le secteur de la construction et spécifiquement le secteur tertiaire est un secteur caractérisé pour avoir des usages très variés et des attentes en matière d'énergie, de confort et d'impacts environnementaux moins médiatisés. Cependant ce secteur présente des solutions techniques, de réglementations thermiques, de certifications et de labels très développés, dans le but d'apporter des solutions et d'encadrer les démarches actuelles et à venir. Les outils demeurent théoriques et leur mise en place sur le terrain semble être conditionnée par la complexité du secteur ainsi que par la multiplicité des acteurs (Comme discuté dans les chapitres 2 et 3).

Considérant comme indicateurs prépondérants, la consommation énergétique et les émissions de CO₂, un des buts de la thèse est de créer une base d'indicateurs adaptée à des contextes différents (chapitre 3), en intégrant des indicateurs qui permettent l'évaluation du comportement durable du patrimoine bâti en cours d'exploitation et la satisfaction d'un profil d'utilisateur «type».

Finalement, la démarche permettra de trouver et de mettre en relation différents scénarios économiques, environnementaux et / ou sociétaux et différentes attentes des gestionnaires universitaires et des usagers, qui seront utilisés dans la création de la méthodologie d'aide à la décision (chapitre 4). Cette méthodologie guidera les décideurs dans la continuité de l'exploitation, la réalisation d'une réhabilitation légère, voire même d'une réhabilitation lourde de certains des bâtiments.

Contribution de la recherche

Au niveau technique, économique et social :

- Améliorer les standards de la construction des bâtiments tertiaires,
- Réduire la consommation énergétique en intégrant usages et pratiques vertueuses et la rénovation (matériaux et énergie)
- Améliorer la satisfaction des usagers quant à leurs attentes de qualité de vie dans ces bâtiments

Ainsi au niveau culturel, l'incorporation d'éléments d'efficacité énergétique dans ces bâtiments permettra aux usagers de participer de manière active et satisfaisante au développement des bonnes pratiques énergétiques.

La démarche de la thèse

Dans le **premier chapitre**, nous effectuons un état des lieux des problématiques énergétiques internationales, nationales de la France et du Chili, puis dans le secteur de la construction et plus particulièrement dans le secteur tertiaire. Dans cet état des lieux, nous montrons comment l'utilisation et de la production d'énergie et les émissions de CO₂ ont évoluées.

Ensuite, nous comparons les différentes politiques et dispositifs énergétiques mis en place pour atteindre l'objectif de réduction de la consommation d'énergie et des émissions de CO₂ dans le secteur résidentiel et tertiaire.

Enfin, nous faisons une analyse des différents paramètres climatiques qui seront utilisés pour créer une grille de comparaison et pouvoir comparer, à partir d'un seul paramètre : le Degré Jour Unifié, la consommation d'énergie à différentes périodes de l'année, appelées mois de comportement d'hiver, de transition et d'été.

Dans le **deuxième chapitre** basé particulièrement sur les universités, on analyse ce qui est et a été le comportement énergétique à différentes échelles d'observation et d'analyse :

- De temps : annuelle, mensuelle ou trimestrielle,
- D'espace : analyses sur 5 sites universitaires (2 campus français, 2 sites délocalisés français et un campus universitaire chilien),
- L'analyse quantitative permet d'établir l'historique des consommations, des usages et des taux d'occupation des sites universitaires étudiés et
- L'analyse qualitative permet d'identifier les variables clés que participent au comportement énergétique.

Comme nous le verrons, ces sites universitaires partagent la même problématique sur la consommation d'énergie: la capacité et la qualité de gestion, son augmentation au fil des années, ainsi que celles des factures d'énergie ; mais il ressort qu'ils sont très différents dans leurs cultures, leurs disciplines, la façon différente dont que les sites produisent et utilisent l'énergie.

Ces analyses nous permettront de discriminer les variables qui seront essentielles pour parvenir à une amélioration énergétique au fil du temps.

Dans le **troisième chapitre** se pose le problème de savoir comment évaluer avec une méthode partagée et commune, composée de différents critères qui permettent d'observer, de comparer et d'évaluer si les actions aboutiront à une amélioration énergétique réelle ?.

Donc pour pouvoir évaluer ces améliorations, nous introduisons la notion d'indicateur, ce qui nous permettra de contrôler, communiquer et aider à la décision en matière énergétique et environnemental tout au long du processus d'évaluation.

Afin de définir les indicateurs que nous utiliserons, on réalise différentes comparaisons entre différents systèmes internationaux d'évaluation énergétique et environnementale des bâtiments, entre références locales, codes européens, textes de l'Organisation Mondiale de la Santé, études de l'Union européenne et références scientifiques. A partir de cette comparaison, nous analysons en détail les thématiques à évaluer, les caractéristiques de fonctionnement, les formes de mesures, leurs échelles et les intervalles de variation.

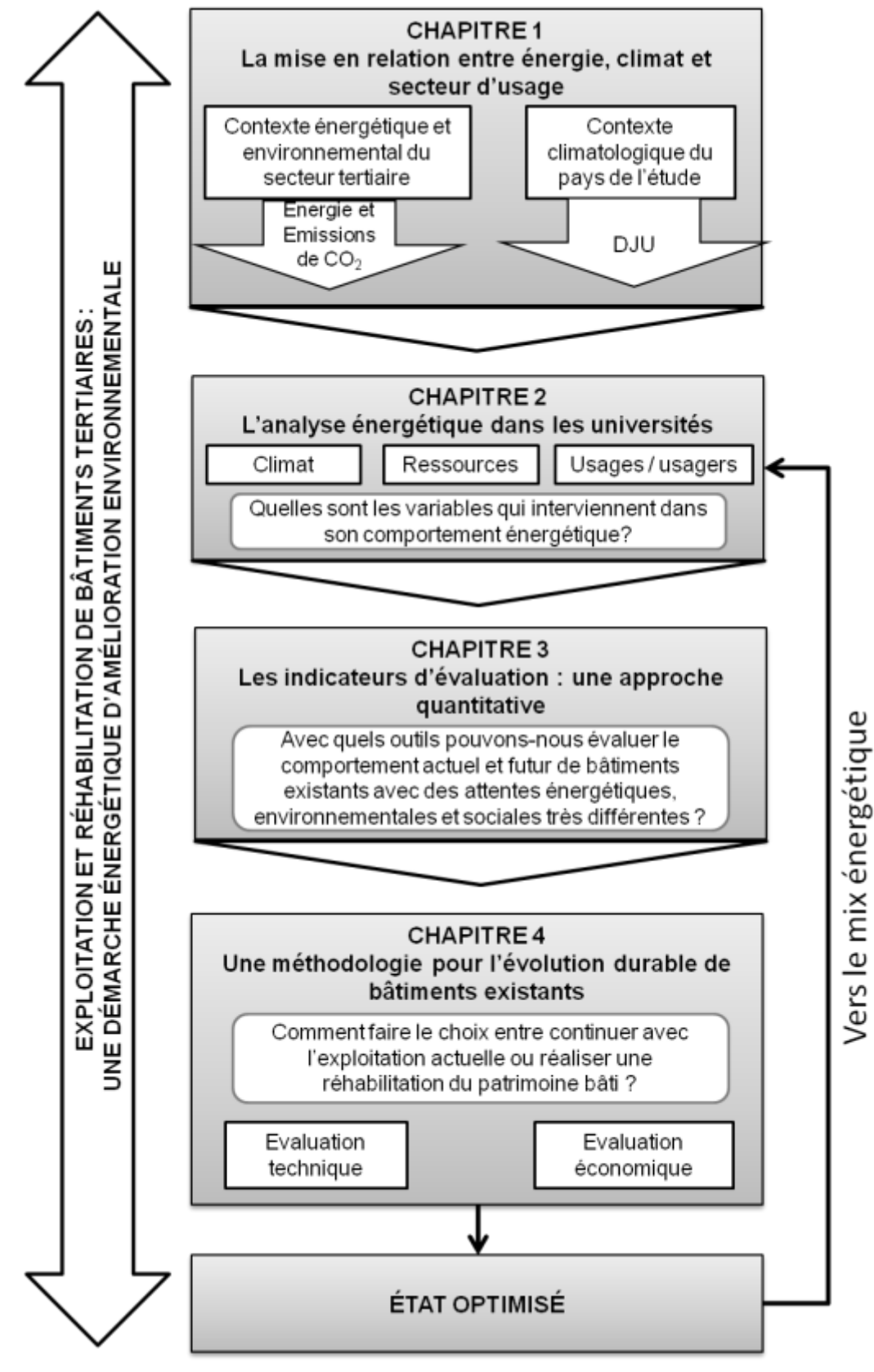
Avec ces informations, nous créons une ligne de base de critères qui vont nous permettre d'évaluer avec la même information, la performance énergétique et environnementale des bâtiments tertiaires dans leur état actuel et après de la comparer avec un état optimisé lorsque les améliorations énergétiques ont été mises en marche.

Enfin, dans le **quatrième et dernier chapitre**, en s'appuyant sur les bases théoriques des méthodes d'optimisation - multicritère, nous proposons une méthodologie d'aide à la décision qui va mettre en relation de façon astucieuse les besoins énergétiques, environnementaux, économiques et de confort des gestionnaires et des usagers universitaires.

Cette méthodologie d'une part permet d'évaluer les critères définis antérieurement avec une même échelle d'observation (une échelle d'évaluation adimensionnelle) et d'autre part, fournit une méthode objective d'évaluation du comportement énergétique et environnemental actuel des bâtiments. On peut enfin évaluer dans une approche économique, les améliorations énergétiques mises en marche.

Finalement au travers une méthode d'aide à la décision, on peut décider de poursuivre l'exploitation des bâtiments ou réaliser une réhabilitation thermique ou énergétique, décisions qui visent à améliorer la performance globale de l'ensemble universitaire. Une première application de la méthodologie est présentée à la fin du chapitre.

La figure ci-dessous montre de façon synthétique le plan de travail et les différentes questions de recherche auxquelles nous répondrons dans chaque chapitre.



Le plan et la démarche de la thèse

1 LA MISE EN RELATION ENTRE ÉNERGIE, CLIMAT ET SECTEUR D'USAGE

Sommaire

1.1 Introduction	39
1.2 La problématique énergétique et environnementale mondiale	39
1.3 Le contexte énergétique des deux pays où sont implantés les campus étudiés	40
1.4 Le secteur tertiaire	53
1.5 Le contexte climatique des deux pays où sont implantés les campus étudiés	57
1.6 L'analyse des données climatiques dans le comportement énergétique	61
1.7 Conclusion	69

1.1 Introduction

La consommation énergétique est un problème désormais incontournable et la contribution anthropique des émissions des gaz à effet de serre dans l'atmosphère est indiscutable.

La problématique énergétique liée aux hausses du prix des énergies et les conséquences des émissions des gaz à effet de serre se décline à l'international au travers du « facteur 4 » (division par 4 d'ici à 2050 des émissions de CO₂) ; une déclinaison locale avec différents dispositifs et particulièrement dans le secteur tertiaire où ces dispositifs ne sont pas assez développés.

Dans ce chapitre, les variables énergétiques, environnementales et climatiques sont mises en relation pour comprendre le comportement énergétique du secteur tertiaire. Ce secteur, comme on le verra regroupe des usages variés avec des performances en matière d'énergie, de confort et d'impacts environnementaux qui se trouvent en dehors des standards.

Finalement, on mettra en évidence le degré de dépendance de la consommation énergétique avec les paramètres du climat, pour identifier le paramètre de base qui nous permettra de faire l'analyse énergétique des campus universitaires.

1.2 La problématique énergétique et environnementale mondiale

1.2.1 L'énergie

Le terme « énergie » (force en mouvement) a différentes définitions parmi lesquelles on peut retenir celle-ci : c'est la capacité d'un système à modifier un état pour le construire, pour le transformer ou pour le mettre en mouvement. En technologie et économie, l'énergie est une ressource naturelle qui faut extraire et transformer pour lui donner une utilisation industrielle ou économique. L'énergie même si ce n'est jamais un bien de consommation finale, est un bien intermédiaire pour satisfaire d'autres nécessités dans la production de biens et de services.

Sur notre planète, les ressources d'énergies peuvent être naturelles (primaires) ou dérivées (d'usage), mais aussi être classées selon le type d'énergies exploitables technologiquement renouvelables ou fossiles.

Au travers le monde, les combustibles fossiles alimentent notamment la consommation finale d'énergie (68% dont 42% pour le seul pétrole).

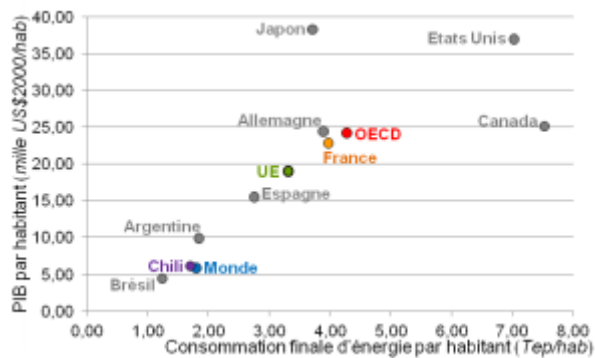
La disponibilité énergétique est un facteur fondamental pour le développement et pour la croissance économique, en revanche, l'augmentation des ressources énergétiques est moins sûre. En effet, la découverte de nouveaux gisements s'est

ralentie. Ainsi, les experts estiment que, sur la base de la consommation actuelle, les ressources de pétrole et de gaz dureront jusqu'à la fin de siècle. Si on reste sur les schémas en cours, une nouvelle crise énergétique est très probable dans les années à venir.

Pour se situer dans le contexte mondial et pouvoir comparer les contextes locaux propres aux deux pays où sont implantés les campus universitaires étudiés, la figure 1.1 montre le contexte énergétique et économique de l'année 2009, pour le Monde, pour quelques pays de l'Union Européenne et de l'Organisation de Coopération et de Développement Économiques (OCDE), pour la France et pour le Chili par rapport au nombre d'habitants et à l'unité de Produit Intérieur Brut (PIB) (International Energy Agency, 2013c).

En comparant la consommation finale d'énergie et le PIB par habitant, on observe que le Chili a un comportement similaire à celui la moyenne mondiale (noté Monde à la suite).

En revanche la France a une consommation plus élevée par rapport à son



développement économique, comme l'ensemble des pays qui forment l'OCDE ; la plupart des pays « développés » ou en voie de « développement » montre la plus forte consommation par habitant, comme les Etats Unis et le Canada.

De plus, on observe que la France est « plus efficace » dans sa consommation que le Chili ou le monde, puisqu'elle a besoin de moins d'énergie pour sa croissance économique.

Figure 1.1 : Comparaison entre la consommation et PIB par habitant (2009) – Source : élaboration propre à partir des données IEA (International Energy Agency) 2013

Sur la figure 1.2, est présente l'évolution de la consommation d'énergie primaire par unité de PIB et par UE habitant pour la France (■) et pour le Chili (●) entre 2003 - 2010.

En 2010, la facture énergétique de la France est en hausse de 20% (265,8 Mtep) par rapport au 2009, avec 46,2 milliards d'euros. Deux causes principales sont à l'origine de cette hausse : d'une part, la flambée du prix du pétrole (+60% d'augmentation pour le prix du baril de 2003 à 2010) et d'autre part, la reprise temporaire de l'activité économique causée par la décroissance économique de -2,7% en 2009. Sur la même période, la croissance démographique s'est maintenue presque constante avec un taux de 0,03% (60,3 million d'habitants en 2003 et 62,6 million d'habitants en 2010) (OCDE, 2012a).

Au début 2010, l'activité économique chilienne a montré des signes de réactivation après la crise des subprimes (prêts hypothécaires à risque aux Etats-Unis à partir de juillet 2007) en 2009, qui a provoqué une décroissance de -1,7% du PIB. Contrairement à la France, le Chili pendant cette période de sept ans a présenté une augmentation de consommation de 19% (de 25,4 Mtep en 2003 à 31,3 Mtep en 2010), liée principalement à une forte réactivation dans les secteurs économiques de l'industrie minière, la construction et le commerce après le séisme du 27 février 2010. Pendant cette période, on observe une croissance démographique stable de 1,1% (15,9 million d'habitants en 2003 et 17,1 million d'habitants 2010) (OCDE, 2012b).

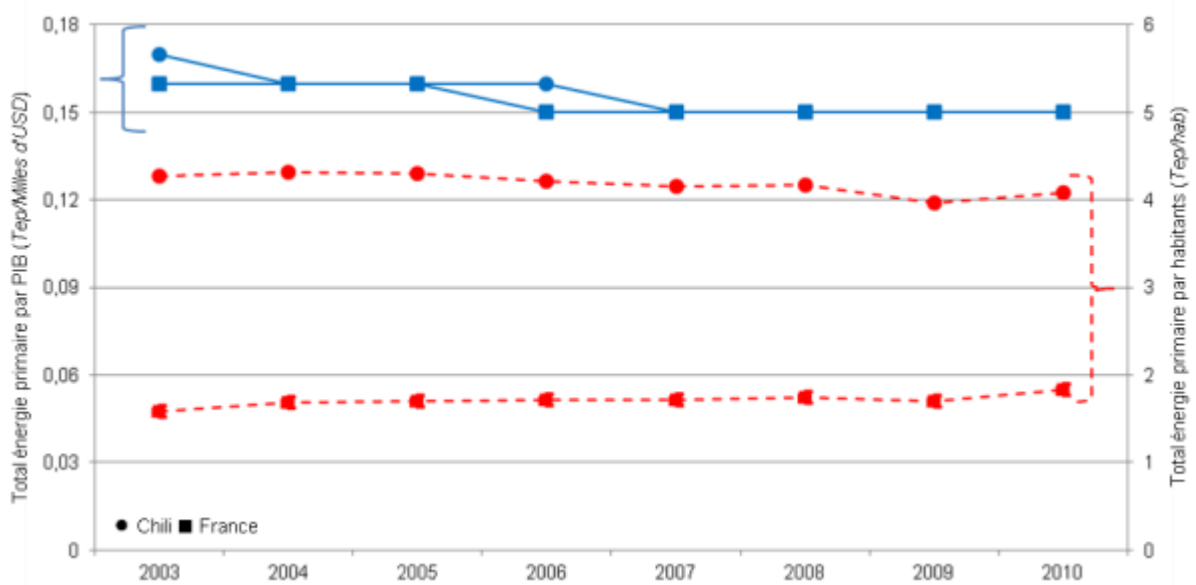


Figure 1. 2 : Evolution de l'énergie primaire par unité de PIB et par habitant, pour la France et le Chili entre 2003 à 2010 – Source : élaboration propre à partir des données OCDE (2012)

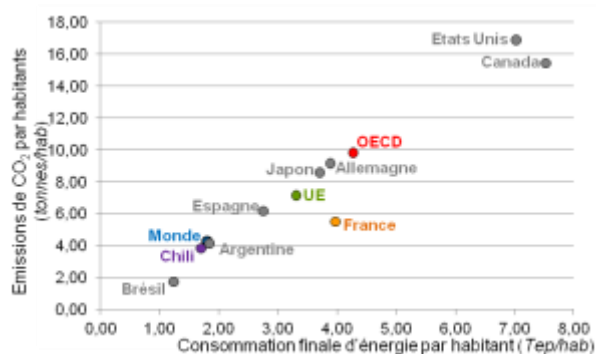
1.2.2 Les émissions de CO₂

L'effet de serre, avec un filtrage sélectif, est la capacité d'un gaz composant l'atmosphère à laisser passer dans un sens le rayonnement solaire (courtes longueur d'ondes) et dans l'autre sens à absorber et renvoyer dans toutes les directions le rayonnement infrarouge émis par la terre (longues longueur d'ondes), ce qui induit un réchauffement du sol. C'effet existe à l'état « naturel » puisque la température moyenne à la surface de la terre, qui est de 15°C, serait de -18°C sans celui-ci.

Bien que les différents gaz comme le CH₄, le N₂O, les CFC sont plus nocifs et avec un pouvoir de réchauffement global (PGR) supérieur à celui du de CO₂ (le PGR du CO₂ est égal à 1), ici on se concentrera sur l'émission de CO₂ lié à la combustion de

combustibles fossiles pour la production d'énergie (Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA), 2011).

Dans la comparaison entre la consommation et les émissions de CO₂ par habitant, (figure 1.3), du contexte mondial, de l'UE, de l'OCDE, de la France et du Chili, on voit une tendance commune dans le comportement du Chili, du « Monde » et de l'Argentine qui ont une intensité d'émissions de CO₂ quasiment égale. De plus, la consommation des 27 pays membres de l'OCDE, les Etats Unis et le Canada sont



ceux qui émettent le plus de CO₂ par habitant (International Energy Agency, 2013c).

La France est le pays qui émet le moins de CO₂, car sa matrice énergétique est composée majoritairement d'énergie nucléaire contrairement aux autres pays où la matrice énergétique est composée de combustibles fossiles (pétrole, gaz, charbon).

Figure 1.3 : Comparaison entre la consommation et les émissions de CO₂ par habitant (2009) – Source : élaboration propre à partir des données IEA (2013)

A partir d'une lecture détaillée de l'évolution de la contribution des énergies renouvelables (pour l'OCDE (2011), énergies du type hydro, géothermique, solaire, éolien, biomasse et marée) dans la matrice énergétique par rapport aux émissions de CO₂ produites pour la production énergétique (figure 1.4) pendant la période 2003-2010, on observe que :

- En France l'utilisation des énergies renouvelables commence doucement à se développer, avec une petite augmentation de 2% entre les années 2003 à 2010 (OCDE, 2012a). Cette faible pénétration des énergies renouvelables dans le marché français s'explique par le fort soutien de l'État français pour l'énergie nucléaire.
- D'autre part pour les émissions de CO₂, on voit que la France a diminué ses émissions de CO₂ de 8% entre les années 2003 et 2009 (utilisation nucléaire, abandon complet du charbon) grâce à la forte sensibilisation de l'état aux problèmes environnementaux et les différentes initiatives pour lutter contre le changement climatique (description dans le sous paragraphe 1.3.1).
- Au Chili, l'apport des énergies renouvelables dans la matrice énergétique a été constant durant ces sept dernières années avec 24% ; les principales sources de ce type d'énergie utilisées sont l'hydraulique et la biomasse.

- Finalement on observe une augmentation de 18% entre les années 2003 à 2009 des émissions de CO₂. Cette augmentation est fortement liée à la croissance économique et par conséquent à une consommation d'énergies fossiles plus importante pour satisfaire cette nouvelle demande.

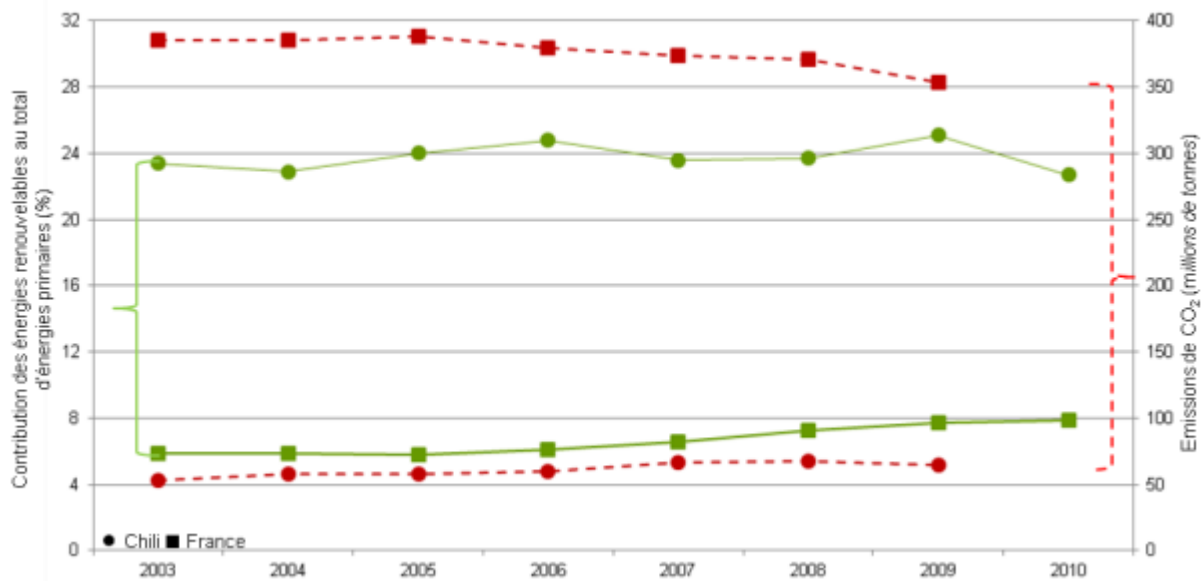


Figure 1. 4 : Evolution des énergies renouvelables et des émissions de CO₂ pour la production d'énergie, en France et au Chili – Source : élaboration propre à partir des données de l'OCDE (2012)

1.3 Le contexte énergétique des deux pays où sont implantés les campus étudiés

Entre 1973 et la fin des années 1980, la hausse des prix due aux chocs pétroliers remet en cause les choix énergétiques de la France, en incitant à maîtriser les consommations et à les orienter vers d'autres sources. Ainsi, la mise en place des programmes nucléaires permet un accroissement substantiel de la production nationale d'énergies primaires, en faisant passer la consommation d'énergie de 180 Mtep en 1973 à 265,8 Mtep en 2010, après une diminution de -1,7% en 2009. La consommation d'énergie provenant du nucléaire est passée dans cette période de 5 Mtep à 108 Mtep, alors que l'extraction d'hydrocarbures (gaz naturel, pétrole) poursuit son déclin (figure 1.5). Les énergies renouvelables ont longtemps stagné avant de connaître un essor ces dernières années.

Au cours de la période 1973- 2010, la structure de la consommation d'énergie primaire a fortement évolué. La part de charbon est passée de 15% à 4%, celle du pétrole des 67% à 31%, alors que la part du gaz était multipliée par environ deux (7% à 15%), et celle de nucléaire multipliée par 14 (3% à 41%) (International Energy Agency, 2013b, Commissariat Général au Développement Durable, 2011a et b).

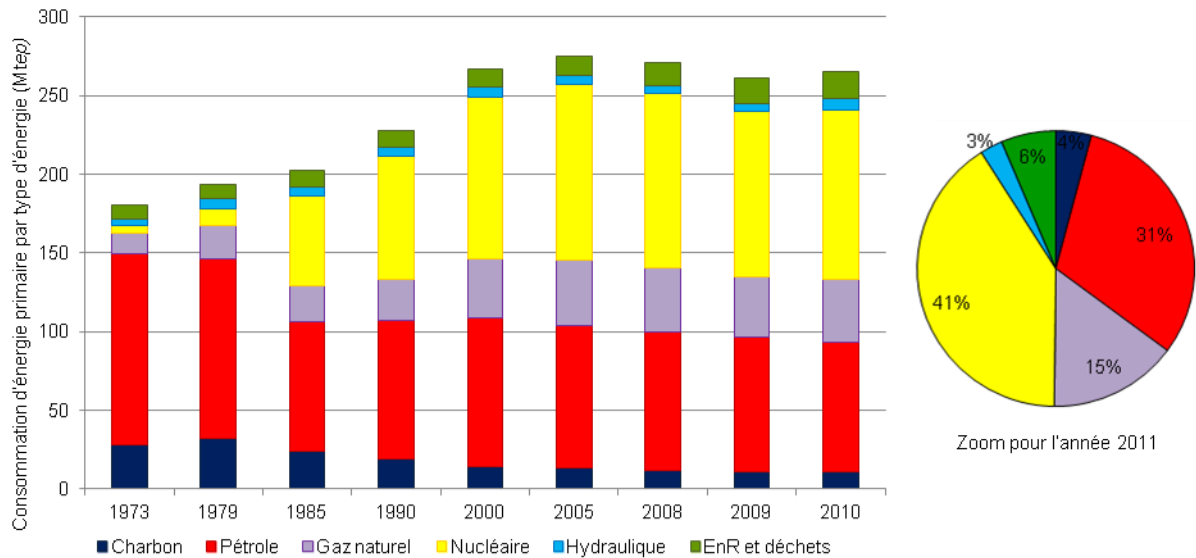


Figure 1. 5 : Evolution de la consommation d'énergie primaire (corrigée des variations climatiques¹) par énergie entre 1973-2010 et l'apport actuel de chacune dans la consommation pour la France – Source : élaboration propre à partir des données de l'IEA (2013) et CGDD (Commissariat Général au Développement Durable) (2011)

Le Chili ne produit que 14 % du total des combustibles fossiles qu'il consomme sous la forme de pétrole, de gaz ou de charbon, cela le rend dépendant à la disponibilité et à la volatilité des prix de ces ressources sur le marché international, comme par exemple le manque de gaz (provenant d'Argentine) et d'eau (dépendant des conditions climatiques).

Les prix bas du gaz naturel et les coûts plus bas d'investissement dans l'installation des centrales thermiques, concentrent les développements électriques seulement sur ce type de combustible. Cependant, la crise d'approvisionnement du gaz provenant d'Argentine devient concrète à partir de 2002.

¹ La correction climatique : est le principe qui permet de neutraliser (au travers du DJU) la

Au cours de la période 1973- 2011 (figure 1.6), la structure de la consommation d'énergie primaire a fortement évolué en faisant passer la consommation d'énergie de 8,5 Mtep en 1973 à 37,2 Mtep en 2011. La dépendance des importations d'énergie primaire (pétrole brut, dérivés, gaz naturel et charbon) a augmenté de 48% en 1990 à plus de 75% en 2011. L'énergie hydraulique est passée de 5% à 10%, et les énergies renouvelables (comme biomasse, éolien) font leur apparition doucement, de 14% à 20% (International Energy Agency, 2013c, Ministerio de Energía - Gobierno de Chile 2012a, Comisión Nacional de Energía - Gobierno de Chile 2009 et Instituto Nacional de Estadísticas - Chile, 2010).

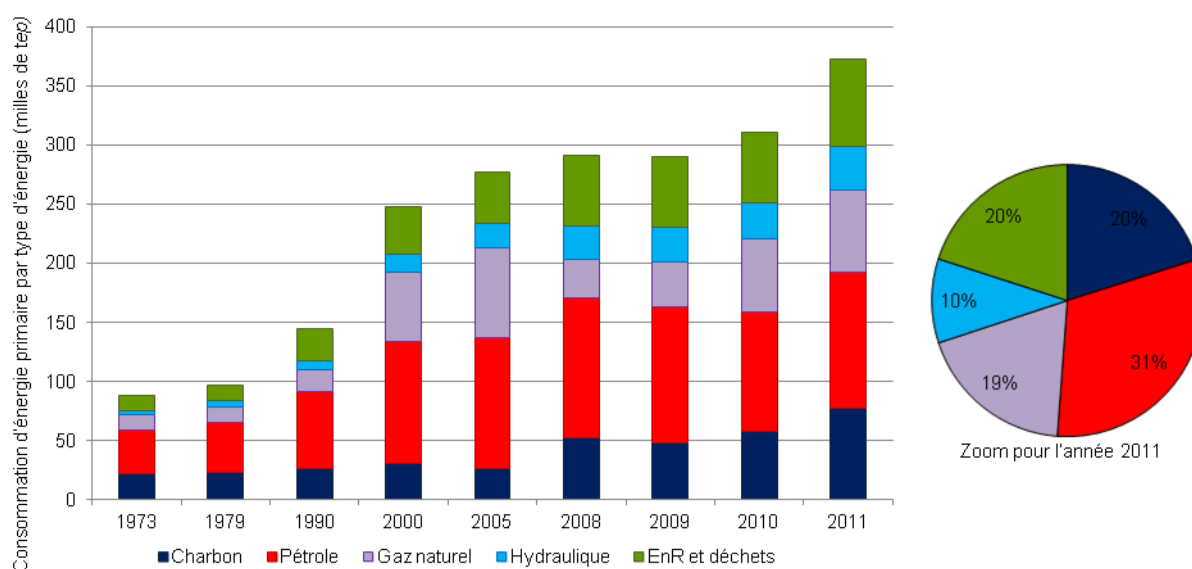


Figure 1. 6 : Evolution de la consommation d'énergie primaire (corrigée des variations climatiques) par énergie entre 1973-2011 et l'apport actuel de chacune dans la consommation pour le Chili – Source : élaboration propre à partir des données de l'IEA (2013) et du Ministerio de la energía (2013)

A partir des données sur la consommation d'énergie primaire par secteur économique (figure 1.7 et figure 1.8), on observe que :

- En France, le secteur résidentiel-tertiaire est le plus grand consommateur, 41% en 2011. On constate une consommation croissante à partir de 2000 et seul le secteur non énergétique est maintenu dans les temps. Au cours de la période 1973-2010, la part de l'industrie (y compris sidérurgie et agriculture) a diminué fortement (13%), celle du secteur résidentiel-tertiaire a augmenté de 17%, alors que le secteur des transports progresse significativement (12%) (International Energy Agency 2013d et Commissariat Général au Développement Durable 2011a).

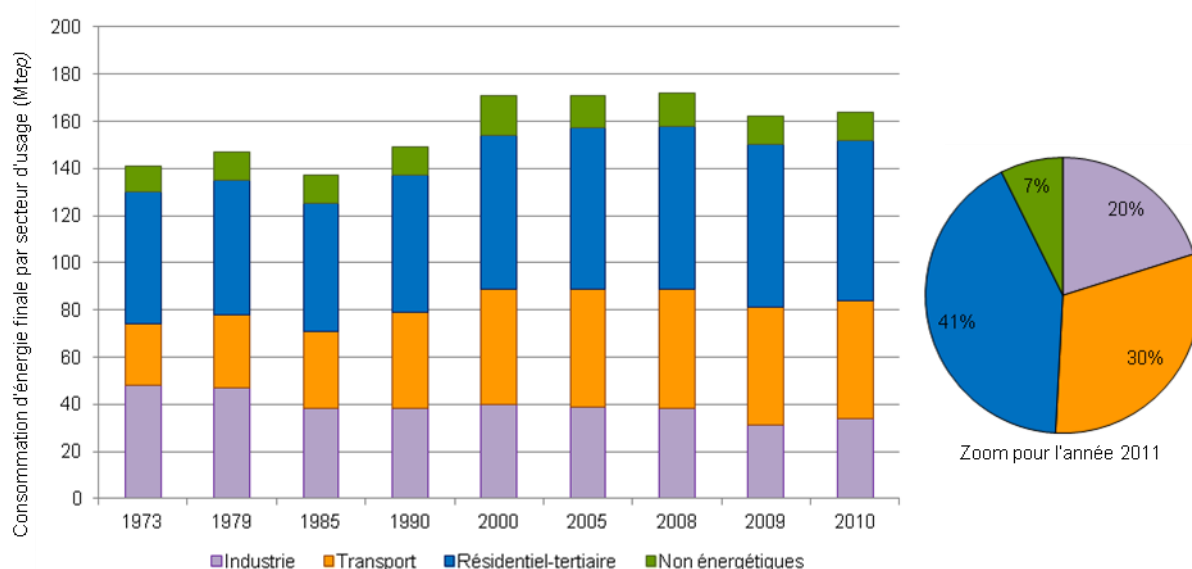


Figure 1. 7 : Evolution de la consommation d'énergie primaire par secteur d'usage entre 1973-2010 et la distribution en 2011 de chaque secteur dans la consommation française – Source : élaboration propre à partir des données de l'IEA (2013) et CGDD (2011)

- Pour le Chili : la consommation d'énergie dans tous les secteurs d'usage a augmenté de manière constante pendant la dernière décennie. Une augmentation de 66% dans l'industrie expliquée par le développement de l'industrie minière et de l'industrie manufacturière ; le transport double, grâce à la croissance du pouvoir d'achat et de la baisse des prix de l'automobile ; et le secteur résidentiel-tertiaire en 63% grâce aux politiques de constructions sociales (International Energy Agency 2013e et Ministerio de Energía - Gobierno de Chile 2012a).

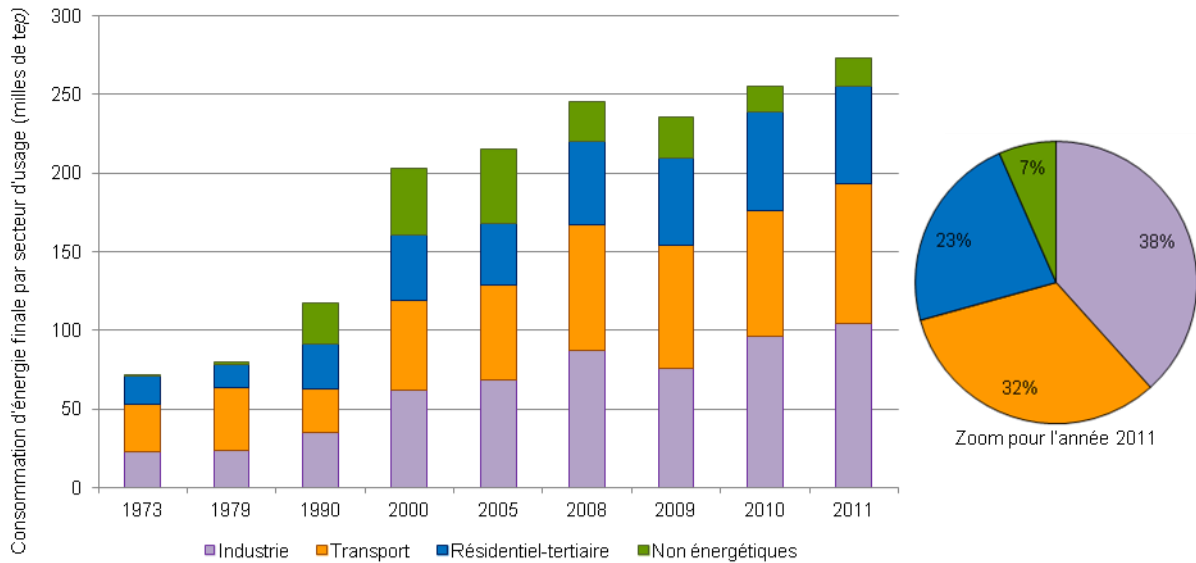


Figure 1. 8 : Evolution de la consommation d'énergie primaire par secteur d'usage entre 1973-2011 et la distribution en 2011 de chaque secteur dans la consommation chilienne – Source : élaboration propre à partir des données de l'IEA et Ministerio de la energía (2013)

1.3.1 Les différentes politiques énergétiques et environnementales

La prise de conscience de l'épuisement d'un certain nombre de ressources naturelles (notamment fossiles, comme on l'a vu dans les paragraphes antérieurs) a conduit à la notion de développement durable, issue des réflexions du Sommet de la Terre à Rio en 1992, le protocole de Kyoto en 1996 (Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA) 2011).

Depuis Rio 1992, les États se sont régulièrement engagés à mettre en œuvre cet engagement international, mais il ne pourra se concrétiser que s'il est décliné du global au local.

Dans cette partie, on décrira l'historique (figure 1. 9) des différents engagements (plus de détail de chacun dans l'annexe A.1.1) au niveau international (Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA) 2011), mais aussi dans leur déclinaison au niveau local pour la France (Chlela 2008) et le Chili (Ministerio de Energía - Gobierno de Chile 2010) dans leurs politiques énergétiques et environnementales.

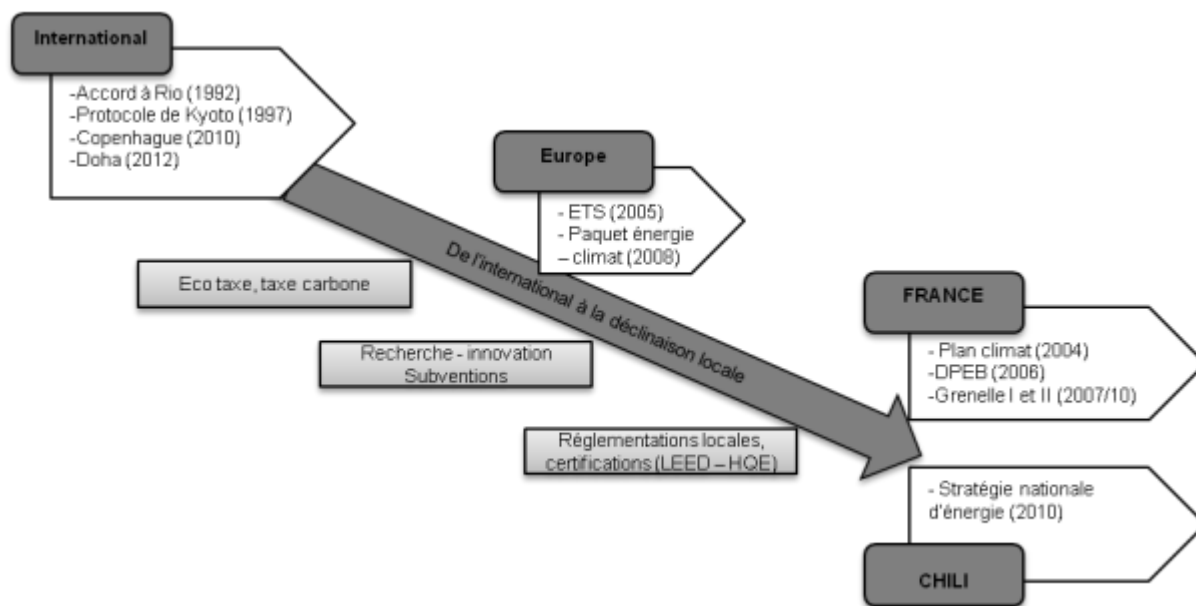


Figure 1. 9 : Principaux engagements internationaux et locaux pour le développement durable et les moyens pour les atteindre

International

- 1992 : lors de la conférence de Rio de Janeiro, adoption par les Nations Unies de la Convention cadre sur les changements climatiques (CCNUCC).
- 1997 : ratification du Protocole de Kyoto. Ce protocole vise à réduire, entre 2008 et 2012, de 5,2 % par rapport au niveau de 1990 les émissions de six gaz à effet de serre : dioxyde de carbone, méthane, protoxyde d'azote et trois substituts des chlorofluorocarbones.
- 2010 : négociations de Copenhague, annonce par certains pays d'objectifs non contraignants de réduction des émissions de gaz à effet de serre pour 2020 et par des autres des plans d'actions domestiques
- 2012 : 18^e conférence des Nations unies pour la prolongation des mesures du protocole de Kyoto jusqu'en 2020

Europe

- 2005 : entrée en vigueur du système européen d'échange des quotas d'émissions de gaz à effet de serre (EU-ETS)
- 2008 : le paquet « énergie – climat » a comme objectifs à l'horizon 2020, 20 % de réduction des émissions de gaz à effet de serre, avec une amélioration de 20 % de l'efficacité énergétique, et une part de 20% d'énergies renouvelables dans la consommation énergétique totale.

France

- 2004 : présentation du Plan Climat, plan d'action du gouvernement pour respecter, l'objectif du protocole de Kyoto. Il regroupe toutes les mesures visant à économiser 54 millions de tonnes équivalent de CO₂ par an en 2010 et définit une stratégie de recherche technologique (innovation, subvention) afin de contribuer à la division par 4 des émissions de gaz à effet de serre de 2004-2050.
- 2006 : Directive européenne sur la performance énergétique des bâtiments (DPEB) (Andaloro et al. 2010). Cette loi contient des mesures pratiques pour amorcer la réalisation des objectifs fixés Grenelle I et II.
- 2007 (resp. 2010) : adoption de la loi Grenelle I (resp. II). L'organisation du Grenelle de l'environnement a visé à créer les conditions favorables à l'émergence de la nouvelle donne en faveur de l'environnement. Il définit une feuille de route en faveur de l'écologie, du développement et de l'aménagement durables (Ministère de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de la mer 2009).

Chili

- 2010 : la stratégie nationale d'énergie présente l'importance d'intégrer l'efficacité énergétique dans le réseau électrique et la mise en œuvre du Plan d'action pour réaliser les améliorations dans les divers secteurs énergétiques au Chili, transports, industrie et mines, les bâtiments, l'électroménager et le secteur électrique (Chile Sustentable, 2010).

1.3.2 Les dispositifs réglementaires pour le secteur résidentiel et tertiaire

Dans la figure 1.10, on a résumé les principaux dispositifs réglementaires du secteur résidentiel et tertiaire qui sont utilisés pour des bâtiments plus « durables ».

Le début des années 80 marque en France le démarrage de recherches sur des bâtiment à basse consommation énergétique via l'utilisation de dispositifs solaires passifs, espaces vitrés, murs trombe, capteurs à air. Tous ces concepts sont regroupés sous le terme d'architecture bioclimatique passive et active.

Dans la période comprise entre les 2 grands chocs pétroliers de 1973 et 1979, l'accent est mis sur le développement de nouvelles techniques introduites surtout dans le résidentiel via le concours « 5 000 maisons solaires » qui donnent dès 1983, la 1^{ère} réglementation thermique prenant en compte les performances d'isolation de l'enveloppe et le calcul des apports « solaires » pour un bilan de besoin énergétiques. Ce développement conduira à la mise en place d'une vraie réglementation énergétique en plusieurs étapes et rendant obligatoire le calcul de la consommation annuelle pour le chauffage des bâtiments résidentiels à partir de 1989.

Parallèlement, le calcul du niveau d'isolation global de l'enveloppe et des critères qualitatifs sur la ventilation sont les seuls critères pris en compte pour tous les autres types de bâtiments jusqu'en 2001.

En 2001, la nouvelle réglementation RT2000 porte sur tous les bâtiments avec des contraintes de même niveau quelque soit le type de bâtiments et l'énergie utilisée.

En 2005 la RT2005 a comparé le bâtiment étudié à un de référence en considérant les exigences sur la consommation d'énergie (chauffage, ventilation, refroidissement, la production d'eau chaude sanitaire, les auxiliaires des systèmes et l'éclairage des locaux), les exigences sur la température intérieure en été et les exigences de performances minimales pour une série de composants et équipements.

En 2012 la nouvelle RT2012 est appliquée pour certains bâtiments neufs du secteur tertiaire (bureaux, bâtiments d'enseignement primaire et secondaire, établissements d'accueil de la petite enfance) et tous les bâtiments neufs à usage d'habitation (consommation maximale d'énergie primaire 50 kWh/(m².an)).

Aujourd'hui, les structures françaises publiques comme l'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie) jusqu'aux collectivités régionales ou locales encouragent le développement de bâtiments dits à Haute Qualité Environnementale.

Concernant le Chili, le pays a 20 ans de retard par rapport à la France dans l'aspect normatif. La Loi Générale d'Urbanisme et Construction livre le cadre réglementaire de la construction au Chili et l'Ordonnance Générale d'Urbanisme et de Construction (OGUC) est son instrument d'application.

La réglementation thermique chilienne (OGUC article 4.1.10 - Ministerio de Vivienda y Urbanismo - Gobierno de Chile et Instituto de la Construcción 2006) a été élaborée par le Ministère du Logement et de l'Urbanisme (MINVU) et est seulement applicable au secteur résidentiel et ne contient pas d'exigences énergétiques ni environnementales. Elle a été élaborée en trois étapes :

- 1994 : définition des exigences thermiques de la toiture,
- 2007 : définition des exigences thermiques pour les murs, les sols ventilés et la surface maximale de fenêtres
- 2012 : certification énergétique pour les logements.

D'autre part, les normes techniques sont sur la base du volontariat, sauf si celles-ci sont spécifiées dans le cahier de charge du projet de construction. La plus importante est la NCh1079 Of.2008 (Instituto Nacional de Normalización 2008) qui présente un zonage climatique pour des fins architecturales avec des recommandations thermiques, protections solaires et hydriques, mais dans la

pratique, elles ne sont pas considérées (Encinas et De Herde 2013). Le reste des normes est relatif aux aspects de calculs et à la méthode de prise d'essais dans le conditionnement thermique et acoustique. Cependant, les normes relatives aux aspects énergétiques et environnementaux sont inexistantes.

Actuellement l'Institut National de Normalisation (INN), chargé d'élaborer et de divulguer les normes travaille sur l'ensemble de normes applicables à l'amélioration environnementale des bâtiments dans les domaines de la ventilation, des infiltrations d'air et de l'illumination artificielle et naturelle.

Le manque d'exigences énergétiques et environnementales et d'un cadre plus restrictif dans les bâtiments tertiaires implique des limites dans le développement et l'application de méthodes de qualification énergétique, spécialement dans le secteur tertiaire public, puisque le marché privé résout cette contrainte avec la certification américaine LEED (Bobadilla et al., 2012). Au Chili à ce jour, on note 152 projets enregistrés, 75% nationales et 25% multinationales (Cole et Valdebenito 2013).

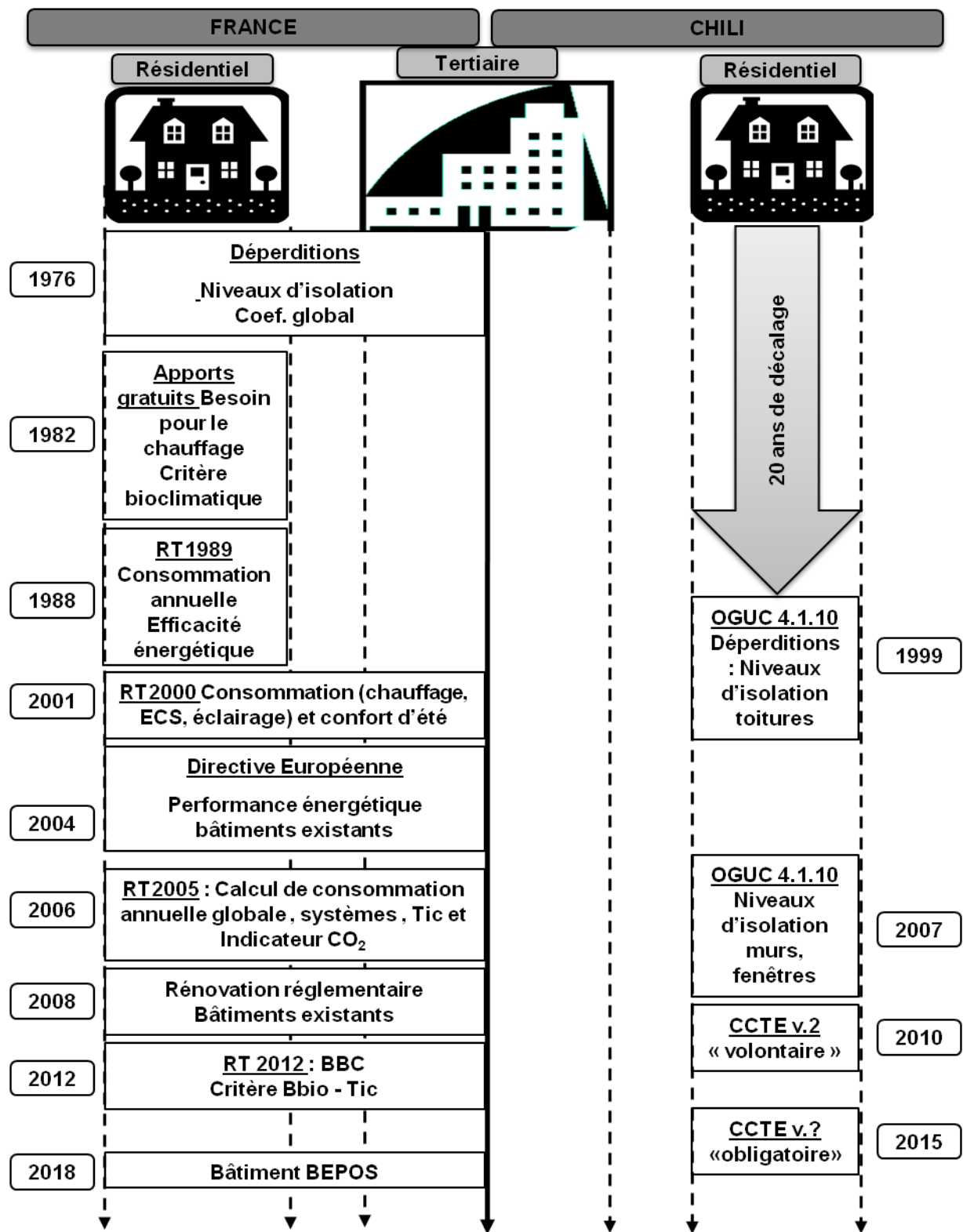


Figure 1. 10 : Evolution des dispositifs réglementaires / normatifs dans le secteur résidentiel et tertiaire pour la France et le Chili

1.4 Le secteur tertiaire

L'analyse du comportement énergétique des bâtiments est une étape incontournable dans les réflexions développées sur l'énergie et sur l'usage, permettant d'accompagner les initiatives menées pour aller vers une consommation plus intelligente.

Dans cette partie, on analysera l'évolution de la consommation d'énergie finale du secteur résidentiel-tertiaire en France et au Chili, pendant la période 2000-2011.

En France le secteur résidentiel-tertiaire est le secteur national le plus consommateur d'énergie parmi tous les secteurs économiques, soit 41% de l'énergie finale totale et producteur de 25% des émissions de CO₂ (ADEME, 2011).

Dans ces 10 dernières années, la consommation d'énergie du secteur a augmenté de 12%, du fait de l'accroissement du parc de bâtiments, de l'accroissement de la surface moyenne des logements, de l'augmentation du confort et de l'apparition de nouveaux besoins. Ces différents facteurs ont contribué à une forte augmentation de la consommation d'électricité utilisée pour l'électroménager, l'éclairage, la bureautique, le refroidissement, le renouvellement et le traitement de l'air, la cuisson et le séchage.

Dans la figure 1.11, on voit que la distribution de quelques types d'énergies dans la consommation a fortement évolué au cours de la période 2000 – 2011. La part du pétrole et de ses dérivées est passée de 24% à 17%, (substitution progressives des chaudières à fioul) et celle de l'électricité de 32% à 36%, (augmentation de l'équipement bureautique et à l'augmentation de la climatisation). Pour les énergies renouvelables, le charbon et le gaz, la consommation s'est maintenue (Commissariat Général au Développement Durable - Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie, 2011).

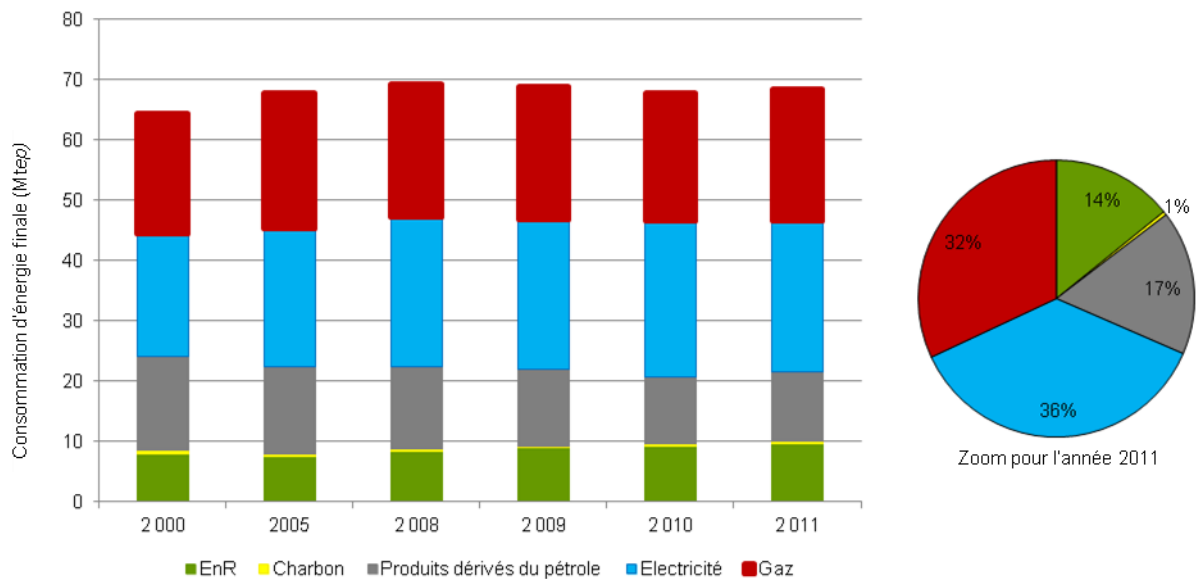


Figure 1.11 : Consommation d'EF corrigée des variations climatiques pour la France et la consommation d'EF pour l'année 2011 (68,5 Mtep) – Source : élaboration propre à partir des données du CGDD (2011)

Au Chili, le secteur résidentiel – tertiaire est le troisième secteur de consommation, après de l'industrie et le transport. Cependant c'est un des secteurs qui montre l'augmentation la plus marquée avec 24% pour la période analysée malgré le fait que les surfaces construites ont diminué de 60% dans le même période (due à l'haux taux de chômage et à la crise asiatique au début de la période 2000-2005) (28,7 millions de m² en 2000 contre 18 millions de m² en 2011) (Ministerio de Energía - Gobierno de Chile, 2012b).

La figure 1.12 montre que les principaux changements dans l'évolution de la consommation viennent en partie du bois, qui a diminué de 7% à cause d'une plus grande restriction voire interdiction du chauffage au bois, de la part des autorités des grandes villes, en réponse aux problèmes de pollution de l'air. De plus, la consommation d'électricité a augmenté de 5%, par l'augmentation d'équipement de bureautique et avec l'utilisation plus importante des systèmes de climatisation.

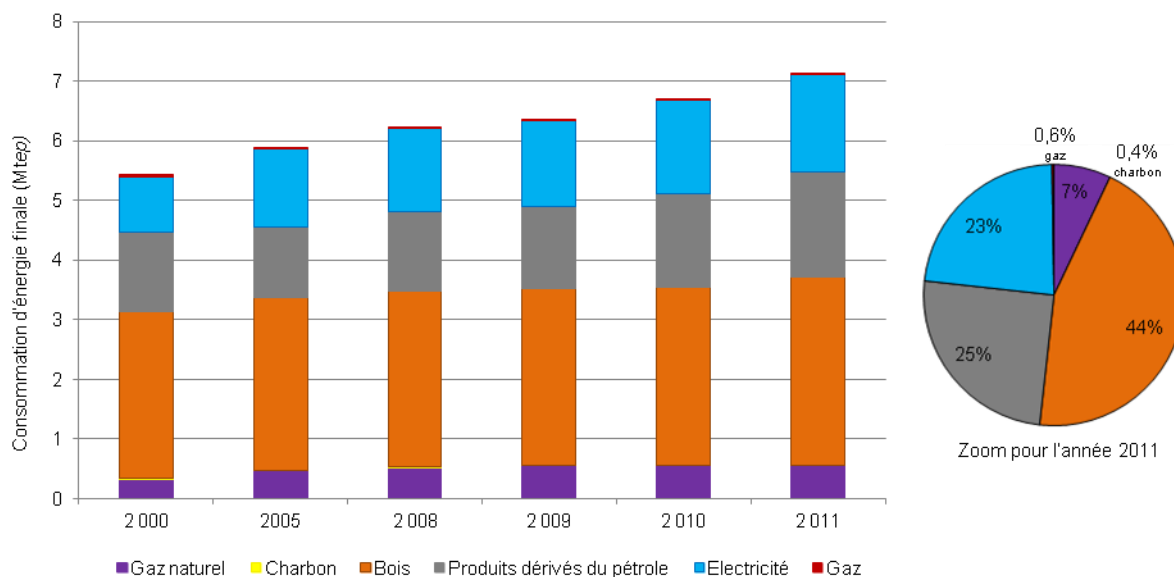


Figure 1.12 : Consommation d'EF corrigée des variations climatiques pour le Chili et consommation finale d'énergie pour l'année 2011 (7,1 Mtep) – Source : élaboration propre à partir des données del Ministerio de energía (2012)

Une comparaison de la consommation d'énergie finale dans le secteur résidentiel – tertiaire par type d'usage, pour les années 2000, 2005, 2008 et 2009 est proposée dans les figures 1.13 et 1.14.

En France, la consommation du secteur résidentiel a enregistré une baisse de 9% (de 44 Mtep à 40 Mtep), pendant que le secteur tertiaire a augmenté de 10% (de 19 Mtep à 21 Mtep) (Commissariat Général au Développement Durable - Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie, 2011).

Par type d'usage, on voit d'une part que le chauffage est le plus utilisé dans le secteur résidentiel 73%, d'autre part, l'électricité a augmenté pour les deux secteurs de 5% dans le secteur résidentiel à cause de la croissance de l'utilisation de l'électroménager et dans le secteur tertiaire l'utilisation d'équipement bureautique (un ordinateur par personne comme à la maison, en moyenne en 2009). Ce mode de fourniture de l'électricité comme énergie répond aux avantages liés au coût, à la facilité d'installation et à la gestion (Peuportier B. 2013).

Au Chili, les deux secteurs ont augmenté leur consommation : le secteur résidentiel de 8% entre 2000 et 2009 (de 4,8 Mtep à 5,2 Mtep) et le secteur tertiaire de 46% (de 6,4 Mtep à 11,8 Mtep) (Ministerio de Energía - Gobierno de Chile, 2012c).

Par type d'usage, on voit, que dans le secteur résidentiel, le chauffage est l'usage le plus important avec 77% des usages (3,9 Mtep en moyenne), pour le secteur tertiaire l'électricité est le plus important avec 58% (0,6 Mtep en moyenne). Dans le secteur résidentiel, le chauffage a été et est toujours une grande préoccupation pour le

budget familial mais aussi pour l'économie du pays, besoin qui devra s'adapter à la mise en relation avec la réglementation thermique dans les nouveaux projets. Pour le secteur tertiaire, l'électricité montre une augmentation de 2%, due à l'augmentation de l'utilisation de climatisations.

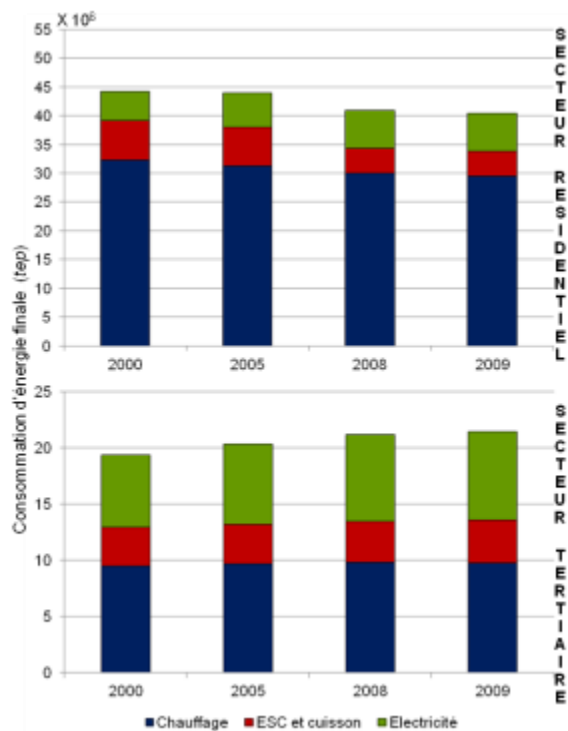


Figure 1.13 : Consommation d'énergie finale par secteur et type d'usage en France
– Source : élaboration propre à partir des données de la CGDD (2011)

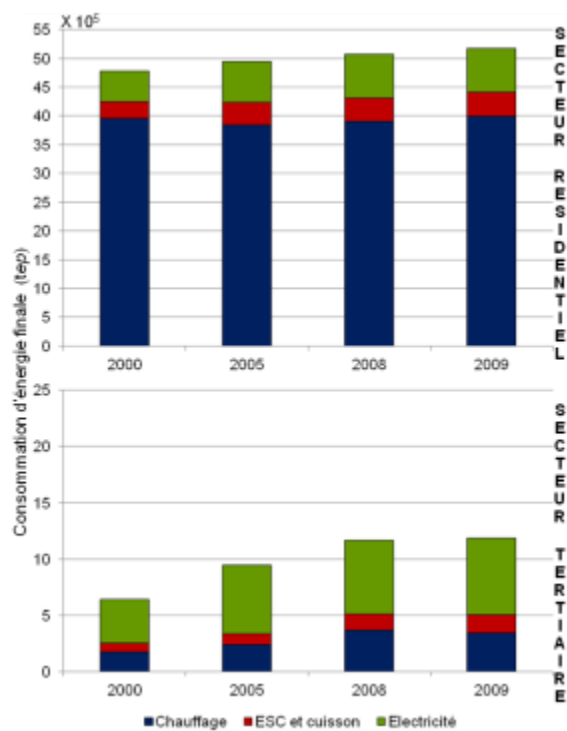


Figure 1.14 : Consommation d'énergie finale par secteur et type d'usage au Chili
– Source : élaboration propre à partir des données del Ministerio de energía (2012)

1.5 Le contexte climatique des deux pays où sont implantés les campus étudiés

La relation entre le climat et le comportement énergétique est un élément important à prendre en compte pour les mesures d'amélioration de l'enveloppe des bâtiments existants et pour le type de gestion des ressources énergétiques.

Les principaux facteurs qui dépendent du climat dans lequel se situe un bâtiment et qui touchent le bien-être (confort) des usagers sont : la température, l'humidité, la radiation solaire, le vent et la pluie.

Dans ce paragraphe on décrira ces différents facteurs pour les climats de la France et du Chili, et postérieurement, on analysera les relations de ces variables avec le comportement énergétique.

1.5.1 Les paramètres de l'analyse climatique

Pour pouvoir caractériser le climat, il est nécessaire de prendre en compte les différents paramètres qui influent sur le comportement des usagers du bâtiment. Ces facteurs nous aident à comprendre le milieu dans lequel se situe le bâtiment pour pouvoir connaître les avantages qu'on peut en retirer et de quel facteur climatique on doit se protéger (Plus détail sur la définition sont données dans l'annexe A.1.2). En effet, si l'occupant-usager juge son environnement comme insatisfaisant il va avoir des comportements plus ou moins adapté qui peuvent nuire particulièrement aux économies d'énergie. (GIE, 2011).

Les paramètres expliqués par Beltrando (2011) et AFEDES (1974) seront analysés par rapport au comportement énergétique des universités de l'étude.

- La température de l'air : la température mesurée est un indicateur de l'ensemble des échanges thermiques qui existent en un lieu et à un instant donné. Sa répartition spatiale est en grande partie tributaire des apports énergétiques et des transferts par les fluides. Elle est généralement mesurée dans une échelle en degrés Celsius (°C).
- Le Degré Jours Unifiés – *DJU* (de chauffage et de climatisation) est un indicateur qui mesure la rigueur du climat dans un lieu et à une échelle de temps donnés (journalière, mensuelle ou annuelle). Il met en relation la température d'un lieu donné avec une température de base. Son calcul est défini à partir de la méthode « Météo France » (COSTIC, 2002) à partir des relations suivantes sachant qu'à Bordeaux la température de base (T_{base}) journalière est 18°C et à Santiago 15°C et que les températures minimales

($T_{minimale}$) et maximales ($T_{maximale}$) sont les températures minimales et maximales observées à une échelle journalière, mensuelle ou annuelle :

$$DJU_{climatisation} = \left(\frac{T_{minimale} + T_{maximale}}{2} \right) - T_{base}$$

$$DJU_{chauffage} = T_{base} - \left(\frac{T_{minimale} + T_{maximale}}{2} \right)$$

- L'irradiation solaire est l'intensité d'énergie que le rayonnement émis par le Soleil apporte à la Terre en un point donné de sa surface. Sa valeur est l'intégration de l'éclairement énergétique sur une durée (en kWh.m², la plus utilisée la globale horizontale).
- L'humidité de l'air peut s'exprimer par sa masse absolue (kilogramme d'eau/kilogramme d'air sec) et est évaluée par le rapport entre la masse de vapeur d'eau contenue dans un volume d'air (grammes) et la masse d'air sec dans ce volume).
- L'humidité relative (HR) correspond à la masse de vapeur contenue dans un volume d'air donné rapportée à la masse maximale de vapeur d'eau que ce volume d'air pourrait contenir, toujours mise en rapport à la température et à la pression atmosphérique. Elle s'exprime en pourcentage.
- Le vent est le mouvement de l'air dû à des différences de pression dans l'atmosphère, de la température de l'air et de l'humidité. Ses paramètres sont la force du vent (exprimé en m/s) et sa direction (exprimé soit par rapport aux points cardinaux, soit en degrés à partir du nord géographique).
- La précipitation est l'eau qui tombe sur la terre sous toutes ses formes: la pluie, la neige, la grêle. Elle est mesurée, en millimètres, à l'aide d'un pluviomètre.

1.5.2 Les climats des villes où sont implantés les campus universitaires de l'étude

Le climat de la France métropolitaine est tempéré, influencé par l'anticyclone des Açores comme le reste de l'Europe de l'Ouest, avec des variantes régionales ou locales assez marquées.

La typologie actuelle retient six grands domaines climatiques (Joly et al., 2010) (les caractéristiques détaillées de chacun sont décrits dans l'annexe A.1.3) : le climat méditerranéen (c'est un climat très contrasté en températures et précipitations), le climat océanique (climat lié à l'Océan Atlantique avec de comportements aléatoires), le climat continental (températures contrastées au cours de l'année de -15°C à 35°C, mais avec précipitations faibles), le climat semi-océanique (ce climat est une variante du climat océanique et du climat continental, avec un hiver froid et sec et avec des moments doux et humides) et le climat montagnard (climat aux étés doux, mais des hivers froids et neigeux). Les zones géographiques des différentes zones climatiques sont détaillées dans la figure 1.15.

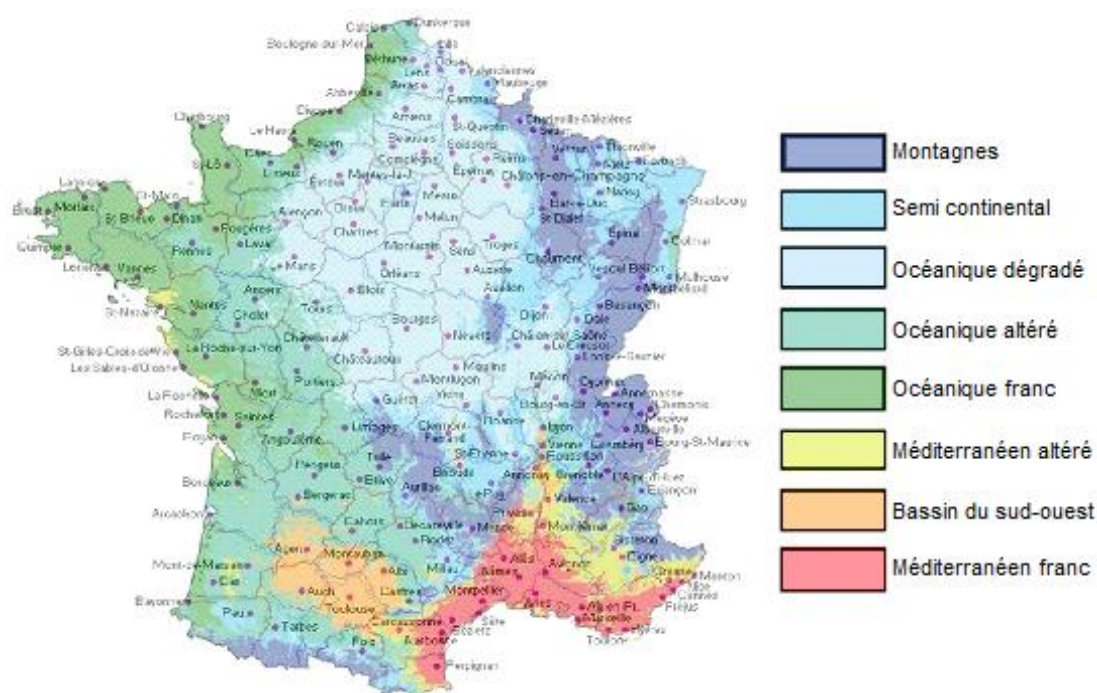


Figure 1. 15 : Les principaux types de climat en France métropolitaine



Figure 1. 16 : Les principaux types de climat dans le Chili continental

Le Chili est un pays caractérisé par sa géographie particulière, mince bande de terre courant sur plus de 4 000 km du nord au sud. Cela implique de grandes différences climatiques au travers le territoire. Les températures vont en augmentant doucement du Sud au Nord, tandis que les précipitations, très abondantes au Sud, se raréfient quand on remonte au Nord. Ainsi, le Sud du pays connaît un climat polaire océanique frais et très humide, tandis que le Nord connaît un climat désertique tempéré.

La zone centrale, autour de la capitale, bénéficie d'un climat de type méditerranéen. Rappelons que le Chili est dans l'hémisphère sud, et donc que les saisons sont inversées par rapport à l'Europe.

Le Chili comprend dans ses limites au moins sept des principaux sous-types climatiques (figure 1.16) (Rioseco R. & Tesser C., 2013): un climat de steppe (semi-aride) dans la cote nord avec une évaporation annuelle supérieure aux précipitations annuelles (BS), un climat désertique dans le nord avec de précipitations annuelles < 250 mm (BW), toundra de l'Est et du Sud avec un été très peu marquée (ET), un climat subtropical humide à l'Île de Pâques sans saison hivernale et de fortes précipitations annuelles, supérieure à l'évaporation annuelle (Afa), un climat méditerranéen, froid avec été sec dans le centre du Chili et ses saisons d'été et d'hiver sont bien définies (Cs), le climat océanique tempéré chaud sans saison sèche dans le sud (Cf) et le climat polaire dans le territoire Antarctique avec température moyenne du mois le plus chaud < 0 C (EF).

1.6 L'analyse des données climatiques dans le comportement énergétique

Dans ces paragraphes, les principaux paramètres climatologiques seront comparés dans les deux villes où sont implantés les deux campus universitaires étudiés dans le chapitre 2. Les paramètres de base qui serviront à réaliser l'analyse énergétique des campus universitaires seront ensuite décrits.

1.6.1 Les différentes paramètres climatiques des villes où sont implantés les campus étudiés

Le tableau 1.1 détaille les principales données géographiques des villes de l'étude (Bordeaux et Santiago) et quatre autres qui permettront de situer leur comportement en France (Paris et Marseille), comme au Chili (La Serena et Temuco).

Ville	Latitude	Longitude	Altitude
Bordeaux	44° 50' 16" Nord	0° 34' 46" Ouest	9 m
Santiago	33° 23' 0" Sud	70° 47' 0" Ouest	575 m
Paris	48° 51' 24" Nord	2° 21' 07" Est	33 m
Marseille	43° 17' 47" Nord	5° 22' 12" Est	20 m
La Serena	29° 54' 28" Sud	71° 15' 15" Ouest	0 m
Temuco	38° 44' 13" Sud	72° 35' 59" Ouest	120 m

Tableau 1. 1 : Les principales données géographiques pour les six villes

Le tableau 1.2 résume la moyenne annuelle du comportement climatologique des paramètres : température moyenne, irradiation solaire, humidité relative, la vitesse moyenne du vent et précipitations pour Bordeaux et Santiago. La moyenne a été calculée entre les années 2008, 2009 et 2010 (Meteociel.fr 2011, Tutiempo Network, S.L. 2013, Romero H. 2008 et European Commission 2013).

Dans le tableau 1.2, on vérifie de façon générale l'inversion de l'hiver et de l'été entre ces deux villes. D'autre part, on observe qu'à Santiago les températures sont plus hautes (Encinas et De Herde 2013) (moyennes maximales entre 28,6 à 29,4°C) avec une longue saison sèche de 7 à 8 mois et l'irradiation solaire est plus forte, l'humidité relative, le vent et les précipitations quant à eux sont plus faibles.

Paramètre	Température Moyenne(°C)		Irradiation Solaire Horizontal (kWh/m ²)		Humidité relative (%)		Vitesse moyenne du vent (km/h)		Précipitations (mm)	
	Bordeaux	Santiago	Bordeaux	Santiago	Bordeaux	Santiago	Bordeaux	Santiago	Bordeaux	Santiago
Janvier	5,8	22	39	193	85	44	12	13,5	92	0
Février	7,9	23,8	54	162	79	48	13	12,2	83	0
Mars	9,7	19,4	101	128	70	53	14	11	70	3
Avril	13	15,6	136	96	72	56	12	9	80	7
Mai	17	12	162	69	73	70	11	7,7	84	33
Juin	20	8,6	172	52	70	73	11	6	64	44
Juillet	22	7,9	187	62	67	75	10	7,3	55	19
Août	21	9,8	161	84	70	74	10	7,7	60	38
Septembre	18	11,8	123	112	71	68	9,7	9,6	90	14
Octobre	14	15	78	146	78	57	11	12,4	94	4
Novembre	10	17,8	46	181	88	52	13	13,3	107	2
Décembre	6	19,7	34	204	85	48	12	14,4	107	0
Totales ou moyennes	14	15,3	108	124	76	60	12	10,3	984	164

Tableau 1. 2 : Quelques moyennes des paramètres climatiques pour les années 2008, 2009 et 2010, pour les deux villes de l'étude

Pour avoir une vision globale du comportement climatique général de Bordeaux et de Santiago, la figure 1.17 propose la comparaison entre l'irradiation solaire, les précipitations et la température pour deux autres villes en France (Paris et Marseille) et pour deux autres villes au Chili (La Serena et Temuco).

Avec les données, on vérifie que la tendance climatologique pour Bordeaux et Santiago sont aux extrêmes dans la figure 1.17. Bordeaux a plus de précipitations et moins d'irradiation solaire avec une tendance similaire à Temuco, alors que pour Santiago les précipitations ne dépassent pas les 200 mm par an avec une irradiation moyenne plus proches de Marseille.

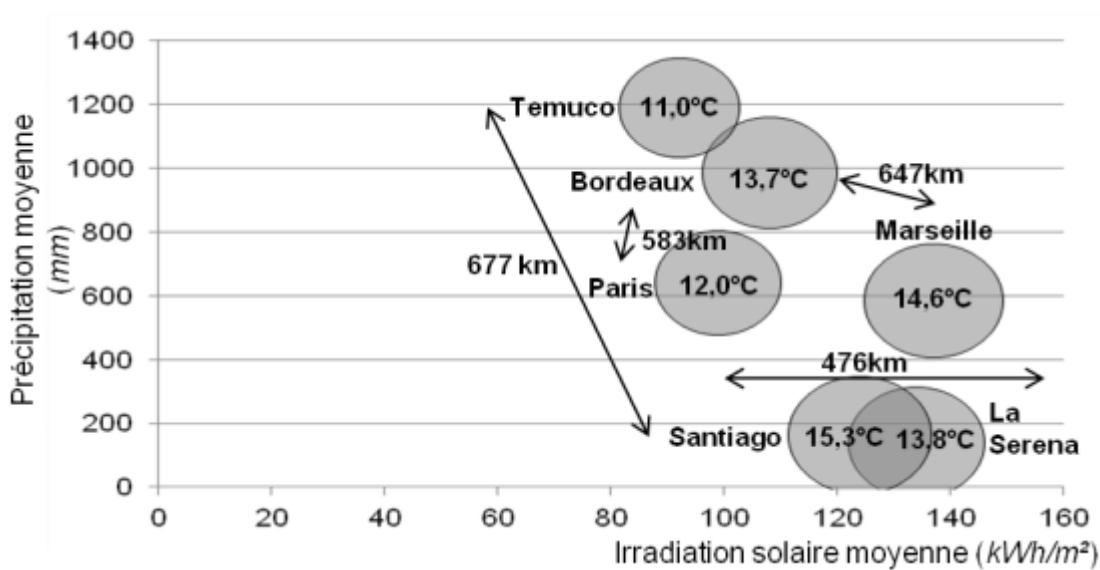


Figure 1. 17 : Comparaison climatologique des différentes villes françaises et chiliennes

1.6.2 Le choix des paramètres climatologiques de base pour l'analyse énergétique des campus universitaires

L'objectif de cette partie est de mettre en évidence le degré de dépendance de la consommation énergétique avec les paramètres du climat. Cette relation va permettre, dans le chapitre 2, de prioriser les contrôles et les commandes à réaliser dans un objectif de surveillance et de gestion de l'utilisation des ressources énergétiques.

Pour l'analyse, on a utilisé la relation proposée par l'Equation 1.1 qui permet de corréler les données de consommations, en anticipant sur les données toujours dans cette logique « énergie-climat », et les données de température moyenne, de l'humidité relative, de vitesse moyenne du vent, de l'irradiation solaire et des précipitations.

$$\rho(x, y) = \frac{Cov(X, Y)}{\sigma_x \sigma_y}$$

$$\text{où : } -1 \leq \rho(x, y) \leq 1 \quad (1.1)$$

$$\text{et } Cov(X, Y) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu_x)(y_i - \mu_y)$$

Dans ces relations notons que $\rho(x, y)$ est la valeur recherchée, σ_x, σ_y sont les écarts types pour les variables x, y , enfin μ_x, μ_y les valeurs moyennes de ces variables.

On met donc en relation les bases de données X et Y associées aux deux variables, indépendantes « x » (les données météorologiques) et dépendantes « y » (la consommation énergétique).

Pour chacune des données analysées, il est nécessaire de préciser que :

- l'humidité relative est la moyenne mensuelle des moyennes quotidiennes (jour et nuit);
- la température moyenne mensuelle (°C) est la moyenne entre la température minimale et de la température maximale ;

L'analyse des données météorologiques associée à celles de la consommation énergétique conduit aux résultats suivants (figure 1.18) :

Pour les ressources (gaz et électricité facturés des sites universitaires qui seront analysés dans le chapitre 2), on observe que les allures de corrélation de la température et de l'irradiation sont identiques et que seules les intensités de corrélation varient. Pour ces deux ressources la base de données s'est appuyée sur la moyenne des années 2008, 2009 et 2010.

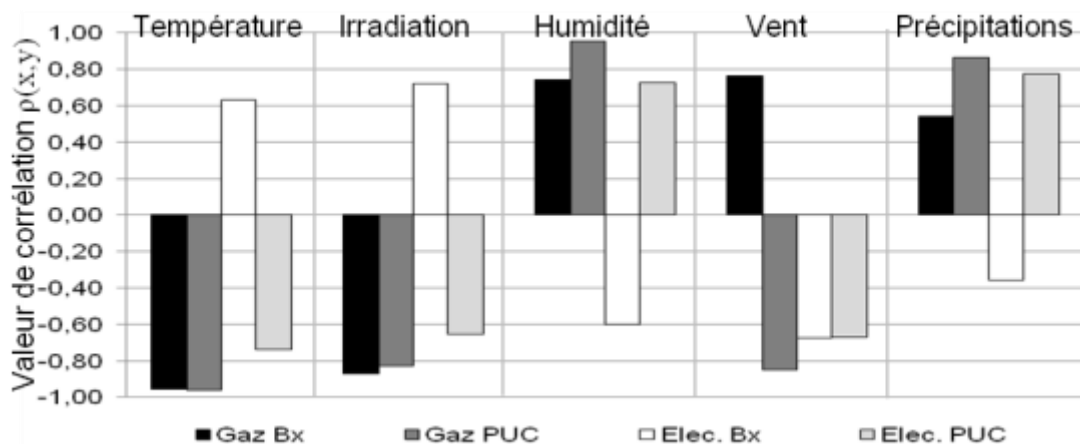


Figure 1. 18 : Résultats des corrélations pour les deux sites universitaires

La température moyenne et l'irradiation

Il existe un lien fort entre la température et l'irradiation. Nous devons donc observer les mêmes relations en intensité pour le gaz et l'électricité. Pour le gaz, les deux sites montrent un comportement semblable, alors que l'électricité pour la PUC a le même comportement que le gaz mais avec des valeurs légèrement plus basses. Dans ces cinq corrélations, on voit qu'à moindre température, la consommation est plus importante. En revanche pour l'électricité du site de Bordeaux, on voit qu'à températures plus élevées la consommation d'électricité augmente. La raison de cette augmentation sera discutée dans le chapitre suivant.

Pour ces deux paramètres, on voit que la température présente des valeurs absolues de corrélations plus élevées, pour le gaz de 96%, pour l'électricité une valeur moyenne de 72%. En ce qui concerne l'irradiation, le gaz a une corrélation de 86% et pour l'électricité de 67%.

L'humidité relative, la vitesse du vent et les précipitations

Pour le cas de l'humidité relative, l'intensité de corrélation est plus faible que pour les deux facteurs précédents. De plus, elle a un comportement inverse, puisque la relation avec les consommations est liée à un comportement de perception d'une sensation de confort (c'est du ressenti).

Pour le cas de la vitesse du vent, on observe les variations dans les valeurs de corrélation des ressources et dans les différents sites. Pour le site de Bordeaux, on voit que la vitesse du vent a le même comportement que l'humidité, car une humidité relative élevée associée à une vitesse de vent importante va contribuer à baisser la température ressentie et donc contribuer à augmenter la consommation d'énergie. Pour la ville de Santiago, site de la PUC, on observe qu'une vitesse du vent plus élevée implique une consommation plus petite de gaz et d'électricité, situation qui s'explique par la situation de Santiago dans l'hémisphère sud où le vent est plus important en été.

Et finalement pour la corrélation des précipitations, on observe que le comportement est similaire à celui de l'humidité, la seule différence est la valeur de la corrélation, la plus importante pour la consommation du site de la PUC.

A partir des analyses de corrélation, on a observé que le paramètre le plus important, dans le comportement de la consommation, est la température, puis l'humidité ou la vitesse du vent qui sont des paramètres de « sensation » de confort. Selon ce résultat, on a choisi d'évaluer plus en détail la consommation en fonction de la température et après en fonction du DJU, puisqu'il ne tient pas compte des fluctuations quotidiennes de température et de la différence de température entre l'hiver et l'été. Les autres paramètres climatiques ne seront pas pris en considération.

Les paramètres de base : la température et le degré jour unifié

La figure 1.19 montre la répartition annuelle des températures moyennes mensuelles, obtenue à partir de la moyenne des données des années 2008, 2009 et 2010 (Meteociel.fr 2011 et Tutiempo Network, S.L. 2013) et sa relation avec la température de confort, 18°C pour Bordeaux et de 15°C pour Santiago.

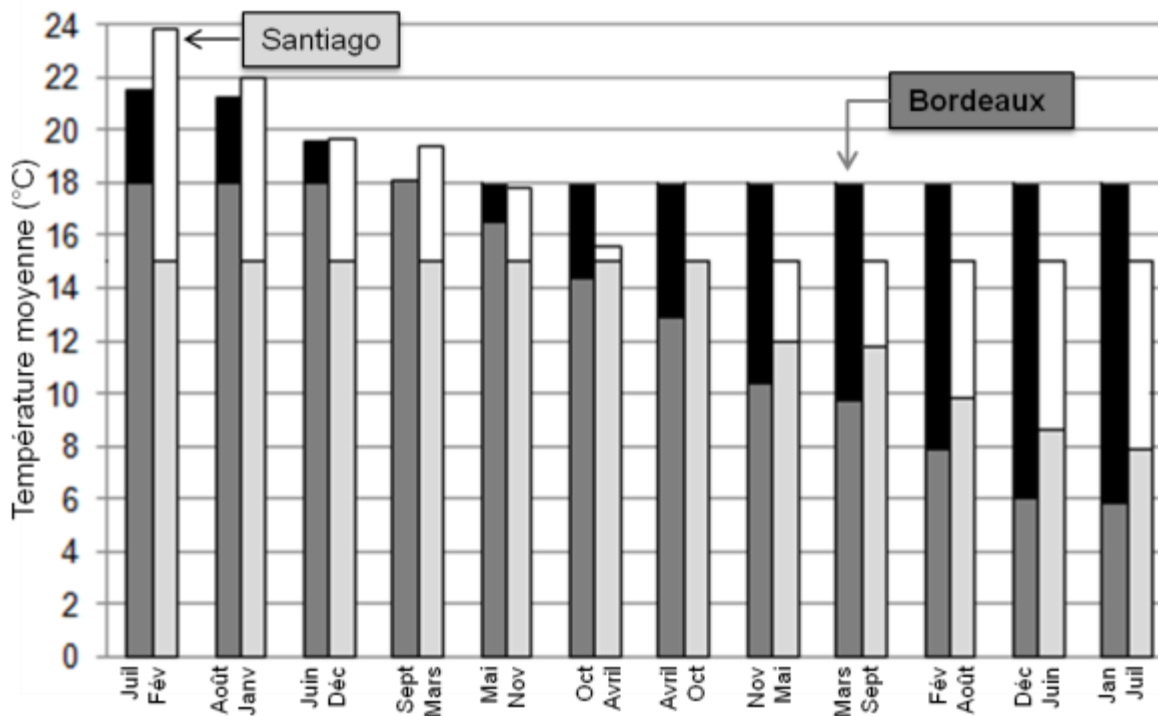


Figure 1. 19 : Répartition mensuel des températures moyennes pour les deux villes où sont implantés les sites universitaires étudiés et sa relation avec la température de confort

Pour pouvoir simplifier la compréhension de la consommation (Fracastoro et Serraino 2011) (analysée dans le chapitre suivant) et pour pouvoir supprimer les variables temporelles (mois) dans les analyses de tendance, la base de données climatiques a été traduite en termes de degrés jours unifiés.

Pour comprendre le comportement climatique des deux villes, quatre étapes ont été prises en compte :

- d'abord on a calculé les DJU_j d'hiver et d'été, pour les années 2008, 2009 et 2010,
- puis les valeurs à utiliser pour tracer les courbes de tendance ont été déterminées en considérant la valeur journalière minimale et maximale de chaque mois des trois années, c'est-à-dire la valeur minimale de janvier est la valeur journalière minimale trouvée parmi les valeurs des trois mois de janvier
- après pour tracer la courbe du DJU moyenne de la période d'hiver et d'été on a calculé la moyenne mensuelle de chaque mois et ensuite la moyenne des trois années

- enfin, les valeurs minimales, maximales et moyennes ont été normalisées par la valeur absolue maximale du DJU_j trouvé pour les trois années et les deux villes, valeur qui est de -21.5°C pour le 7 janvier 2009 à Bordeaux.

Pour tracer les courbes de tendance annuelle, les données sont regroupées dans l'ordre croissant. Les figures 1.20 et 1.21 montrent les valeurs normalisées moyennes (minimum, maximum et moyenne) pour l'année des deux villes de l'étude.

Deux périodes peuvent être identifiées à partir des points d'inflexion des courbes de moyennes, la première période — située entre mai-septembre (pour Bordeaux) et novembre-mars (pour Santiago) pour les mois d'été appelé «période de climatisation» et la seconde période situé -.-.-. entre mars et novembre (pour Bordeaux) et entre septembre et mai (pour Santiago) pour les mois d'hiver, appelée «période de chauffage».

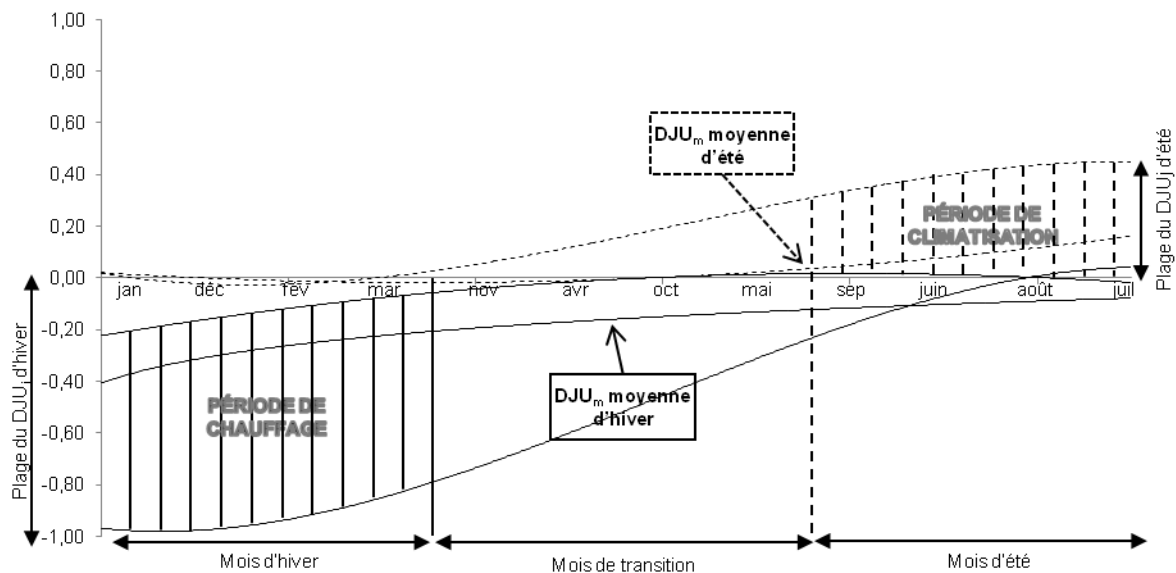


Figure 1. 20 : Tendence climatique de Bordeaux

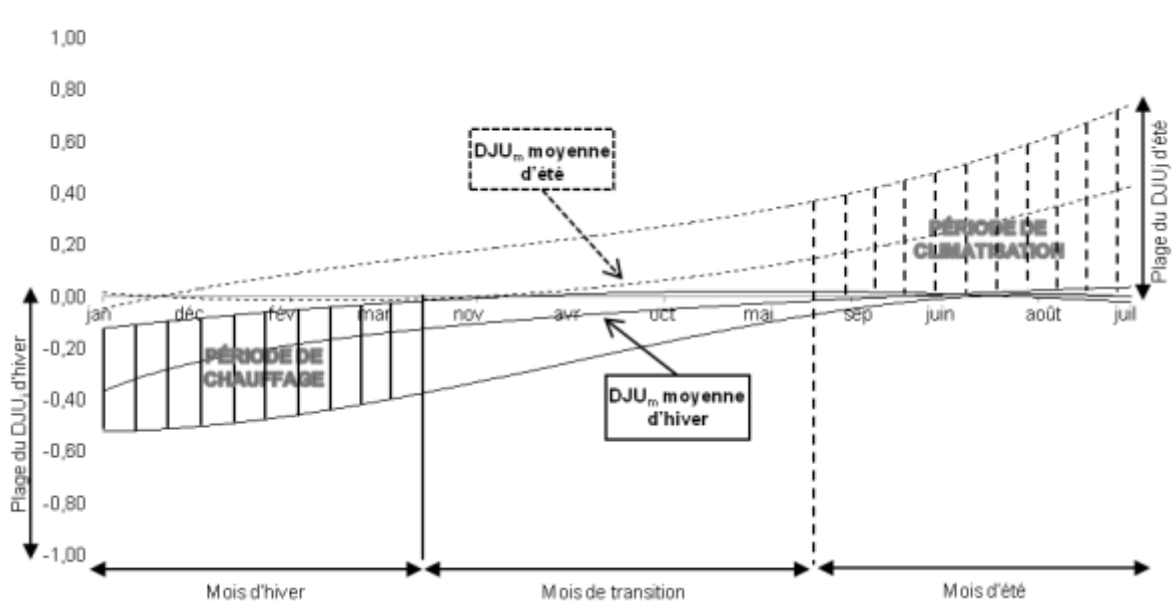


Figure 1. 21 : Tendence climatique de Santiago

Ces deux périodes peuvent être regroupés en trois types de mois: hiver, transition et été.

Parallèlement à cette définition des mois, comme nous le verrons dans le chapitre suivant, les mois limites de la période de transition correspondent également aux mois « singuliers » d'occupation des campus évalués : début de l'année universitaire ou de mois avec une forte demande énergétique (par exemple pendant la période d'examens).

C'est ainsi que ces groupes de mois non seulement décriront les types de comportement climatique, mais aussi donneront les informations sur le type d'usages et d'occupation d'un campus universitaire.

1.7 Conclusion

Au travers l'analyse énergétique et environnemental du Chili et de la France, nous avons observé pour, les deux, la forte dépendance avec le développement économique du pays.

Après avoir normalisé l'énergie primaire de chaque pays par le produit intérieur brut, on observe que celle-ci s'est maintenue constante entre la période 2007-2010 et la normalisation par habitant a présenté une légère augmentation à la fin de la période. Dans les deux cas nous avons observé que les comportements sont similaires.

Par rapport aux émissions de CO₂ rapportées à l'énergie primaire, la différence entre la France et le Chili, est principalement due à la dépendance énergétique du Chili aux énergies fossiles, contrairement à la France qui utilise l'énergie nucléaire comme principale ressource d'approvisionnement.

Concernant les politiques énergétiques, une différence importante est à noter : la France présente un fort engagement politique pour diminuer les effets de sa consommation énergétique, alors le Chili est un pays émergeant sur le sujet et présente un retard.

Cette différence s'accroît encore plus dans le secteur tertiaire, où le Chili a dû combler l'absence de standard par des certifications internationales, alors que la France a un grand chemin parcouru dans la matière de plus de 20 ans avec ses propres standards (RT, HQE...).

Par rapport aux types d'énergies utilisés dans le secteur résidentiel-tertiaire, on trouve de grandes différences dans leurs matrices énergétiques. Alors que la France répond à la demande énergétique principalement avec l'électricité (36%), le Chili y répond au travers le charbon (44%). Le principal type d'usage du secteur résidentiel pour les deux pays c'est le chauffage, alors que pour le secteur tertiaire en France c'est aussi le chauffage et pour le Chili c'est la climatisation (électricité).

Finalement dans la dernière partie, nous avons identifié les facteurs climatiques pertinents au travers une analyse des corrélations entre des paramètres climatologiques de base et de confort. Les paramètres d'humidité, irradiation, vent et précipitations n'influent pas directement sur la consommation énergétique sinon sur le confort des usagers. Les paramètres de base (température moyenne et spécifiquement les DJU) donnent une information sur le type de comportement énergétique (appel de puissance, plus consommation, pics de demande, pertes, etc.) en fonction du comportement climatologique. Ce paramètre nous a permis de définir trois périodes climatologiques (d'hiver, de transition et d'été) qui serviront aux prochaines analyses énergétiques.

2 L'ANALYSE ÉNERGÉTIQUE DES CAMPUS UNIVERSITAIRES

Sommaire

2.1 Introduction	73
2.2 La méthodologie	75
2.3 Les différents campus et sites universitaires	77
2.4 L'analyse quantitative et qualitative de la consommation dans les différents campus et sites	87
2.5 La démarche d'évaluation et d'amélioration énergétique des bâtiments existants des campus universitaires	113
2.6 Conclusion	118

2.1 Introduction

Le secteur tertiaire, auquel les campus universitaires appartiennent, est en expansion continue depuis dix ans sans que cette expansion soit accompagnée d'investissements importants pour l'amélioration et l'entretien des bâtiments.

Particulièrement en France le parc universitaire existant est évalué à près de 13 millions de m² SHON (de Surface Hors d'Œuvre Nette) et avec une consommation annuelle de 3 905 500 MWh d'Énergie Primaire (EP) (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME), 2011). Une enquête menée par la fondation Fondaterra (Caisse des Dépôts et Consignations et Conférence des Présidents d'Université 2009) a permis d'établir les ratios moyens de la performance énergétique régionale, qui oscillent entre 208 et 371kWhEP/m².an et qui est égale à 325 kWhEP/m².an pour la région Aquitaine dont la capitale est Bordeaux (ville où quatre des cinq sites universitaires étudiés sont installés).

Dans ce contexte énergétique des bâtiments des campus universitaires (nombre de bâtiments, qualité de la maintenance, taux de renouvellement), il est nécessaire d'avoir un éclairage extérieur permettant d'accompagner les opérateurs dans leurs réflexions quant aux pratiques énergétiques de l'établissement (Altan (2010), Cantalapiedra, Bosch, López (2006), Bonnet et al. (2002) ou Comissionat de Sostenibilitat, Cooperació i Desenvolupament (2011), Barelli et Bidini (2004) McClelland et Cook (1983), Desideri et Proietti (2002), Zélem M.-C. (2008), Leite Frandoloso M., Londero Brandli L., et Pedroso Dias F. (2012) ou Rodriguez-Barreiro (2013). Ces pratiques et ces comportements se traduisent de façon simple par des consommations importantes et des facturations élevées qui interrogent en particulier sur les comportements des usagers, le patrimoine bâti (usage) et les attentes d'usagers.

En parallèle à cet éclairage il est bon d'établir une base de connaissance au regard de futurs travaux d'amélioration énergétique (ici en France pour l'Opération campus (Université de Bordeaux, 2008) et au Chili pour les « Campus Sustentables » (Pontificia Universidad Católica de Chile & Oficina de Sustentabilidad UC, 2012)) qui feront évoluer les bâtiments en matière de qualité énergétique, mais ceci nécessite ensuite d'une part une approche éducative auprès des occupants pour pouvoir faire disparaître des comportements obsolètes et d'autre part des outils permettant une homogénéisation des données de consommation pour assurer une bonne lisibilité.

Ce constat de comportement hétérogène et de données est lié à un contexte global par rapport à la géographique, le climat, la culture du pays et le contexte local lié à différents types d'usages des bâtiments (enseignement, recherche, administration, entre autres) (Ó Gallachóir, Keane, Morrissey, & O'Donnell, 2007), différents niveaux de regroupement (individuel, collectif) (Alshuwaikhat et Abubakar 2008), différents types de données physiques (taille, surface, nombre d'occupants) (Davis III & Nutter,

2010) et enfin des facteurs psychologiques et physiologiques de confort, de comportement ou d'adaptation au climat (Hwang, Lin, Kuo (2006), Deval (1984), Cao et al. (2011), Lück (2012), Santin Guerra (2011), Kennedy et Basu (2013), Molina et Veas (2012), Weber et Perrels (2000) ou Leaman et Bordass (2007).

Ce chapitre vise donc à caractériser le comportement énergétique de différents campus universitaires, principalement dans le contexte politique français : le campus principal de l'Université Bordeaux 1 « Sciences et Technologies », ses sites délocalisés de l'IMA et d'Agen, le campus principal de l'Université Bordeaux IV « Montesquieu » et élargir les analyses à un campus étranger « San Joaquín » de la Pontificia Universidad Católica de Chile.

A partir d'une vision globale de consommation, dans les différentes entités une analyse quantitative des données rassemblées et consolidées est faite, en tenant compte du contexte hétérogène des scénarios d'occupation, des différentes fonctionnalités auxquelles les campus doivent répondre, du contexte géographique et climatique dans lequel ils s'inscrivent.

En suite on analysera les différentes visions d'ensemble (campus) et d'unités (bâtiments) (échelle d'espace), qui doivent être prises en compte pour le contrôle et le suivi adéquat des ressources énergétiques (comme le gaz et l'électricité, par exemple) à différentes échelles temporelles. Echelle de temps qui sera analysée à partir du paramètre climatologique clé « DJU » (Degré Jour Unifiés, décrit dans le chapitre 1).

Afin de proposer une démarche d'évaluation et d'amélioration énergétique des bâtiments dans le campus universitaire. Appuyée sur les différentes dimensions d'un système de gestion énergétique comme cela a été discuté par (Herremans et Allwright (2000), Ferrer-Balas, Buckland, De Mingo (2009), Clarke, Kouri (2009), Savely, Carson, et Delclos (2007), Koester, Eflin, et Vann (2006), Viebahn (2002), Yuan et Zuo (2012) ou Lozano (2011)), nous avons choisi de mettre en évidence l'éducation, la gestion énergétique et la gestion immobilière du campus.

Les résultats de notre analyse permettent d'aborder différents volets :

- la compréhension du comportement énergétique au regard des différentes variables qui participent à la réflexion (climat/ ressources/ usagers et usages)
- analyser de façon cohérente et dans une même grille de comparaison comment les usagers-usages influencent le comportement énergétique d'un campus universitaire
- la réflexion sur la manière de sensibiliser les usagers et les gestionnaires - décideurs quant aux problèmes énergétiques et de confort.

2.2 La méthodologie

Pour comprendre le comportement énergétique des différents sites / campus étudiés, on utilise une méthodologie d'évaluation basée sur trois étapes :

Première étape : Description du périmètre d'étude, des installations et des usagers

Cette partie est la collecte, la construction de la base des données énergétiques et la description des différents sites et campus. En parallèle à cette construction on établit une autre base de données des surfaces, types d'usages et d'occupation (nombre d'usagers).

Cette deuxième base de données nous servira pour pouvoir comparer dans une même grille d'évaluation, cohérente et partagée les sites et les campus avec différents types de disciplines, d'usage et d'attentes d'usagers.

Deuxième étape : Analyses quantitatives et qualitatives des consommations

Construction de la base de données à partir de la consommation annuelle, trimestrielle ou mensuelle des différentes ressources (factures d'électricité, de gaz ou de bois, pour différentes années ici 2008, 2009 et 2010).

La variable qui soutient l'analyse est le DJU associée au climat et au confort, variable choisie à partir de l'analyse des variables climatologiques expliquée au paragraphe 1.6.2.

Cette étape se divise en différentes échelles spatio-temporelles et en deux analyses : l'une dont le but est de montrer, à une échelle globale, quantitativement le problème de la consommation et une deuxième partie qualitative dont l'objectif est d'identifier à une échelle plus locale, les variables impliquées dans l'évolution du « comportement énergétique » de chaque ressource.

A partir de l'analyse des consommations d'énergie, de l'analyse du taux d'occupation du campus et des sites, de l'intersection avec les DJU on pourra identifier les principaux aspects dans les comportements énergétiques en l'état actuel (selon les données pendant la période 2008-2010) (Valderrama Ulloa, Cohen, Lagièrre, & Puiggali, 2011).

Troisième étape : description de la démarche d'évaluation et d'amélioration énergétique des bâtiments existants dans les campus et les sites universitaires étudiés

En se basant sur les variables identifiées dans la partie précédente, on propose une démarche d'évaluation et d'amélioration énergétique qui prend en compte les différents degrés de liberté qu'on peut gérer pour aller vers des campus « plus durables » (appelé dans le chapitre 4 un « état optimisé » (rénové + usager éduqué).)

La figure 2.1 résume les variables retenues (usagers-usages, climat et ressources) pour décrire le problème énergétique et les différentes étapes de l'analyse (la compilation des données, les analyses quantitatives et qualitatives) et pour arriver enfin à la proposition de la démarche d'évaluation et d'amélioration énergétique des bâtiments existants.

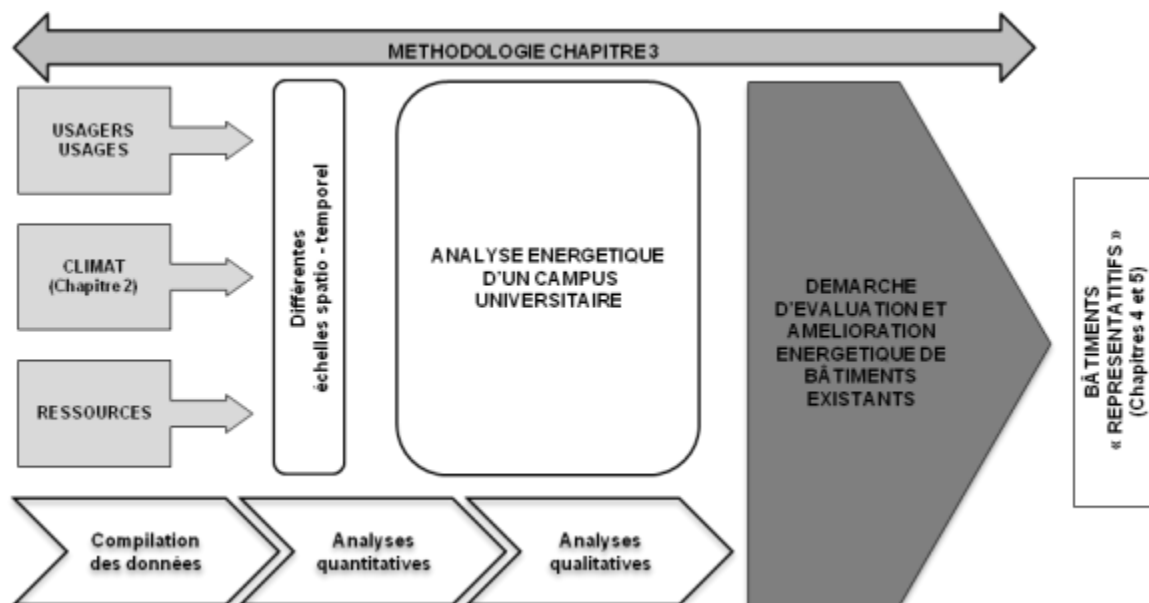


Figure 2. 1: La démarche méthodologique utilisée pour l'analyse

2.3 Les différents campus et sites universitaires

2.3.1 La présentation

2.3.1.1 L'Université Bordeaux 1 : campus principal des Sciences & Technologies, le Centre de ressource Ingénierie et Maintenance Aéronautique (CR-IMA) et le Département Universitaire des Sciences d'Agen (DUSA)

L'Université Bordeaux 1 Sciences et Technologies est basée dans la banlieue de Bordeaux (Gironde), plus exactement sur le domaine universitaire de Talence Pessac Gradignan (TPG). C'est l'une des quatre universités de Bordeaux et des cinq universités d'Aquitaine.

L'université Bordeaux 1 a été créée en 1971 suite à la division en trois de l'université de Bordeaux. Elle regroupait alors les Sciences, les Technologies, le Droit et les Sciences sociales et politiques. Les secteurs « sciences » et « droit » ayant tout de même un fonctionnement séparé. En 1995, l'université Bordeaux IV est créée et Bordeaux 1 ne garde que les Sciences et les Technologies

Le Campus Principal (TPG) de l'université Bordeaux 1 (figure 2.2) se trouve à Talence, sur un domaine universitaire regroupant les principales universités bordelaises (figure 2.3) (Université de Bordeaux & Direction du Patrimoine Immobilier - Université Bordeaux 1, 2010)

L'université Bordeaux 1 dispose également de sites délocalisées à Agen (Département Universitaire des Sciences d'Agen - DUSA), à Mérignac (Institut de Maintenance Aéronautique – CR-IMA), à Arcachon (station marine, Pôle Océanographique d'Arcachon-POA), à Floirac (observatoire aquitain des sciences de l'univers) et aux Eyzies (centre d'anthropologie et de préhistoire).



Figure 2. 2 : L'entrée du Campus principal de l'Université Bordeaux 1



Figure 2. 3 : Plan du campus UBx1-TPG, à partir des données cartographiques (Université de Bordeaux & Département T.C - Cellule Infographie & multimédia, 2012)

Le CR-IMA est un centre de formation créé en octobre 1992, il est axé sur la maintenance des aéronefs et permet de former les étudiants aux procédures de la maintenance aéronautique (Licence, Master).

Le centre est divisé en 4 parties telles que l'indique la figure 2.4 :

- une partie dédiée à l'administration, en rouge, incluant 2 amphithéâtres de 150 places ;
- une partie allouée aux salles de TD ;
- une aile comprenant de nombreux laboratoires pédagogiques (avionique, composites) ;
- et enfin, un hangar de 1 000 m² abritant de nombreux avions (figure 2.5).



Figure 2. 4 : Le plan du site d'IMA



Figure 2. 5 : Le hangar du site d'IMA

Le DUSA a déménagé en 1998 et se trouve actuellement sur le campus Michel SERRES dans le sud d'Agen. Le DUSA a un unique bâtiment (figure 2.6).

L'ensemble des activités est réparti sur trois étages : le rez-de-chaussée où se trouvent l'administration, la cafétéria et la bibliothèque, et les deux autres étages où sont dispensés les cours et les TP avec quelques salles inoccupées (figure 2.7).

Les enseignements qui y sont dispensés sont principalement dédiés à la biologie et à l'agro-alimentaire au niveau licence et master.



Figure 2. 6 : Le site du DUSA



Figure 2. 7 : Les façades nord-ouest (en haut) et sud (en bas) du bâtiment du DUSA

2.3.1.2 L'Université Bordeaux IV – Montesquieu : campus principal

L'Université Bordeaux 1 était composée avant 1995 de deux entités : Sciences et Technologies et Droit – Economie – Gestion. La séparation de ces deux entités a conduit à la création de l'Université Bordeaux IV. L'assemblée constitutive provisoire de la même année a souhaité rendre hommage à Montesquieu en adoptant son nom.

Elle possède des sites délocalisés à Bordeaux Caudéran, Mérignac, Agen, Périgueux et Mont-de-Marsan et le plus gros site « Le Campus Principal » est basé, comme le Campus Principal de Bordeaux 1, sur le domaine universitaire TPG (figure 2.8) (Université de Bordeaux & Direction du Patrimoine et de la Logistique - Université Bordeaux IV, 2011).

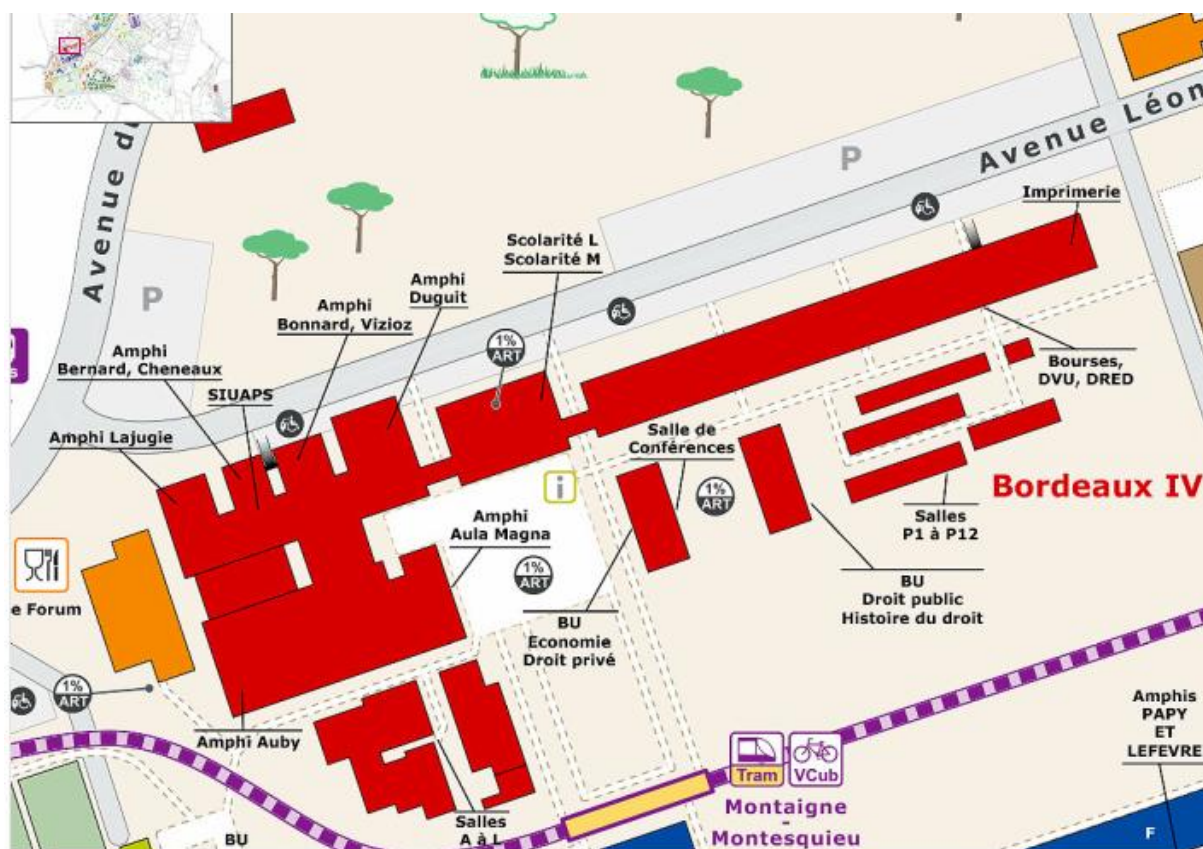


Figure 2. 8 : Le plan du campus TPG de l'Université Bordeaux IV – Montesquieu – à partir des données cartographiques (Université de Bordeaux & Département TIC, 2012)

Le campus est dédié à trois principaux usages que sont l'enseignement, la recherche (droit et économie) et l'administration (figure 2.9).



Figure 2. 9 : Les différents bâtiments à UBxIV – TPG : enseignement, administration, recherche et préfabriqués (salle de cours)

2.3.1.3 La Pontificia Universidad Católica de Chile : campus San Joaquín

L'université Pontificia Universidad Católica de Chile (PUC) est une des trois universités pontificales, et l'une des six universités catholiques du Chili. Fondée le 21 juin 1888 par décret de l'archevêque de Santiago du Chili et en 1931 elle devient autonome par rapport au gouvernement chilien.

L'université compte quatre grands campus dans la région métropolitaine de Santiago du Chili. Le Campus San Joaquín a été donné en 1891 à l'Université. Depuis 1961, s'y sont installées la plupart des formations.

Le Campus San Joaquín (figures 2.10 et 2.11) est le campus le plus grand de tous. Il est situé dans la commune de Macul, dans le sud de Santiago. Il dispose également d'une grande étendue de jardins et de terrains de sports, ainsi que plusieurs bibliothèques, restaurants universitaires, et enfin un centre médical (Pontificia Universidad Católica de Chile & Dirección de Infraestructura, 2012a).

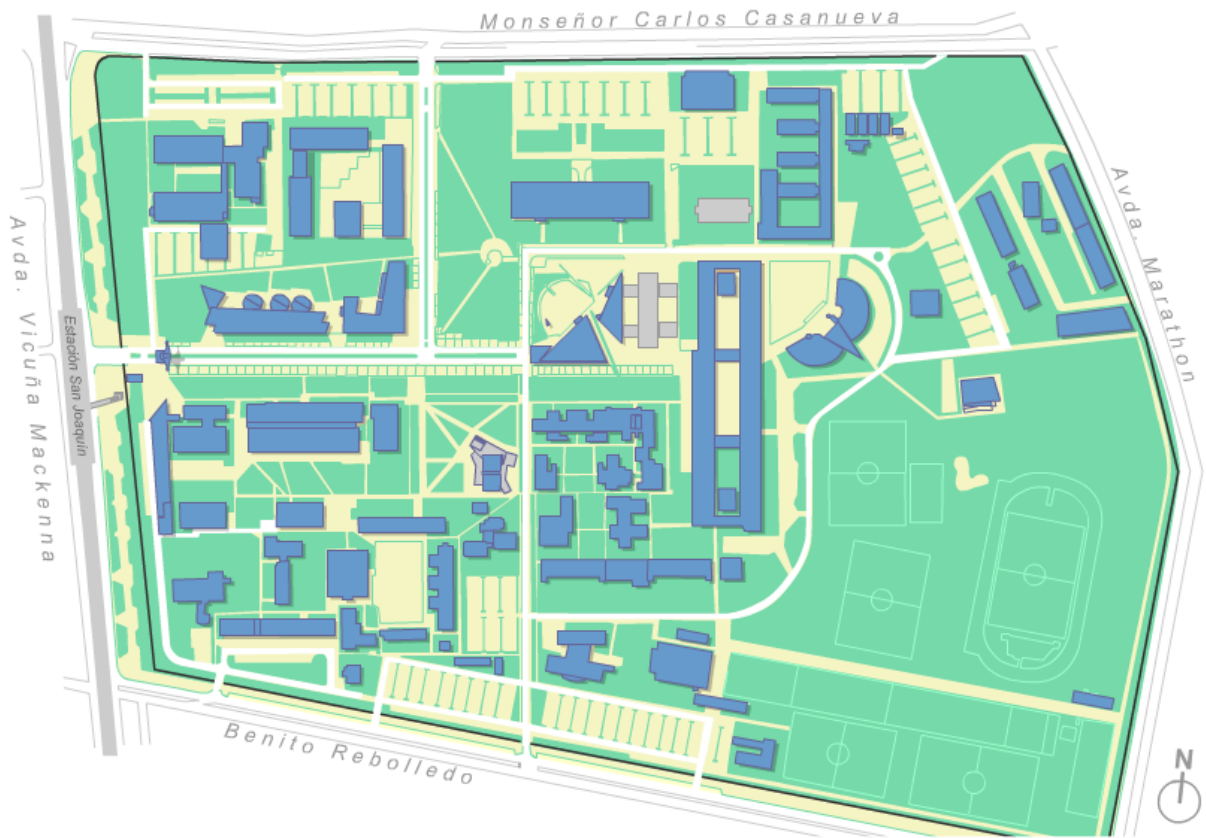


Figure 2. 10 : Le plan du Campus San Joaquín PUC – Source : Pontificia Universidad Católica de Chile & Dirección de Infraestructura, 2012b



Figure 2. 11 : L'entrée principale de la PUC-CSJ (décembre 2012)

Le tableau 2.1, propose une synthèse des principales disciplines, superficies, m² SHON, usagers et bâtiments des différents sites et campus qui seront analysés dans les paragraphes suivantes.

Site/Campus	Année	Discipline	Superficie (hectares)	m ² SHON	Usagers	Bâtiments
Université Bordeaux 1 – TPG	1971	Sciences et Technologies	120	165 000	9 500 (2010)	45
Université Bordeaux 1 – IMA	1992	Maintenance des aéronefs	---	6 235	388 (2012)	1
Université Bordeaux 1 – DUSA	1998	Biologie et agro-alimentaire	----	4 417	152 (2012)	1
Université Bordeaux IV – TPG	1995	Droit et sciences politiques, économiques, sociales, de gestion et management	60	26 724	11 317 (2011)	14
Pontificia Universidad Católica de Chile - CSJ	1961	Pluridisciplinaire (les principales en usagers : ingénierie, éducation)	51	155 000	19 000 (2011)	63

Tableau 2. 1 : Les principales caractéristiques physiques et d'occupation des sites et campus étudiés

2.3.2 La description des usagers et des surfaces

La figure 2.12 montre la variation du nombre d'usagers et des surfaces des différents campus et sites au cours des années jusqu'à l'état actuel (2010, 2011 ou 2012, selon le cas) défini dans le tableau 2.1.

Dans le **campus principal de l'Université Bordeaux 1 (UBx1-TPG)** :

Les bâtiments sont très hétérogènes : 65% de ses bâtiments ont été construits il y a plus de 40 ans : 6 bâtiments historiques ont été construits entre les années 1870 et 1950, et 27 bâtiments (environ 109 000 m²) entre 1950 et 1980. On peut les diviser en trois groupes : la recherche (43%), l'enseignement (35%) et l'administration (20%). En 2010 elle comptait environ 9 500 usagers (Université de Bordeaux & Direction du Patrimoine Immobilier - Université Bordeaux 1, 2010).

La surface SHON a eu une croissance de l'ordre de 22% pendant la période 1997-2010. Cette variation s'explique principalement par la construction de bâtiments de recherche, dans les années 2003 et 2005. Alors que le nombre d'usagers est resté presque constant.

CR-IMA et DUSA :

Pour le CR-IMA, on note que le nombre d'usagers a globalement augmenté entre 2007 et 2012, passant de 86 à 388 étudiants, la plus forte augmentation correspondant aux années 2005-2008 avec la mise en place de nouvelles formations.

Pour le DUSA, on observe que le nombre d'usagers a diminué progressivement entre 2006 et 2012, passant de 285 à 152 étudiants, due à la disparition de formations.

Pour l'Université Bordeaux IV (UBxIV – TPG) :

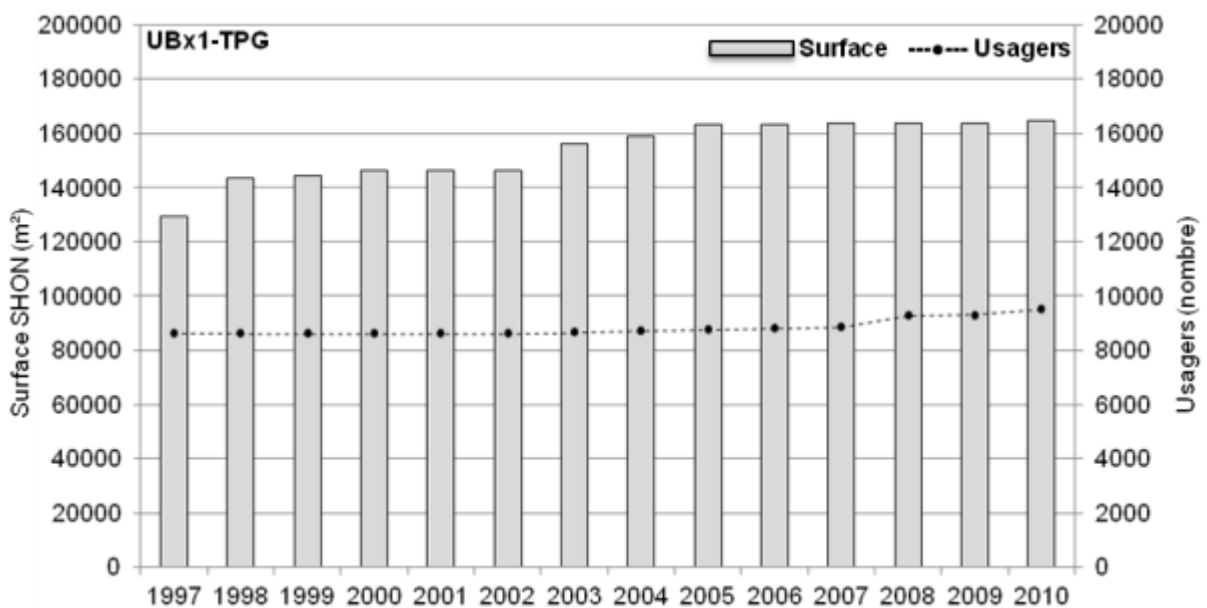
On note qu'entre 2002 et 2010 les surfaces ont augmentés de presque 2000m², soit 5,5% : la première variation entre 2002-2003 avec la construction de préfabriqués à coté d'Aula Magna, la deuxième entre 2007-2008 avec la construction d'une deuxième tranche de préfabriqués. Il faut préciser que certaines parties du campus TPG ont été réhabilitées, comme la réhabilitation du pôle numérique en 2004 et donc il y a des modifications des usages des espaces existants qui ne sont pas visibles sur la figure 2.12. Aussi on note que le nombre d'usagers a augmenté progressivement entre 2002 et 2010 de 2100 (surtout les étudiants), soit une variation de 19,0%. Il a eu une seule diminution entre 2007 et 2008

Enfin, pour la **Pontificia Universidad Católica de Chile (PUC-CSJ)** :

La croissance de la surface (32%) au fil des années correspond à des nouvelles constructions pour cette période, à la modification (extension) ou à la restructuration des différents bâtiments. Les plus significatifs sont :

- 2002 construction du bâtiment « San Agustín », de la faculté d'ingénierie et du bâtiment d'infirmerie.
- 2006 construction de la faculté de chimie,
- 2009, construction du bâtiment du cycle préparatoire et plusieurs extensions : Institute de Sociologie, salles de cours et la faculté de chimie et pharmacie.

D'autre part l'augmentation des usagers (18%) répond alors à l'ouverture de nouvelles formations ou des nouveaux services : l'arrivée au campus des Sciences Sociales (2004) ou de la faculté de théologie (2007), des différentes disciplines du cycle préparatoire (2009) et d'odontologie (2010), ainsi que les services : le Consortium du vin (2007) et de « Mide UC » (2008).



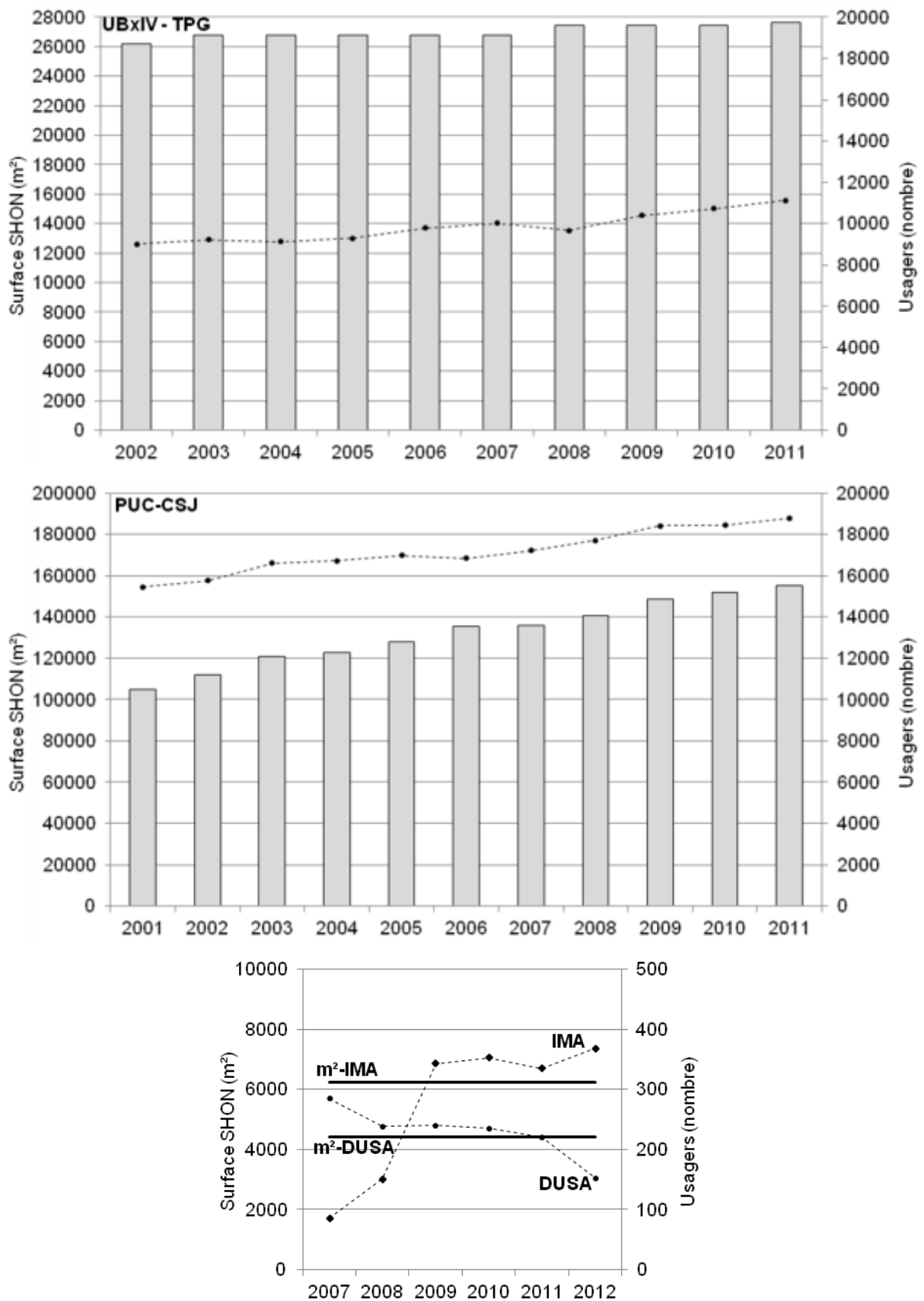


Figure 2. 12 : Historique de l'évolution des surfaces et nombre d'usagers

2.4 L'analyse quantitative et qualitative de la consommation dans les différents campus et sites

Avant de réaliser l'analyse quantitative de l'énergie dans les différents campus et sites, nous nous arrêterons sur une représentation synthétique (figure 2.13) du réseau d'énergie des campus et sites due à la complexité et à l'hétérogénéité dans leurs connexions et leur type de distribution d'énergie. Ensuite on décrit en détail les réseaux d'énergie des campus principaux d'UBx1 et UBxIV.

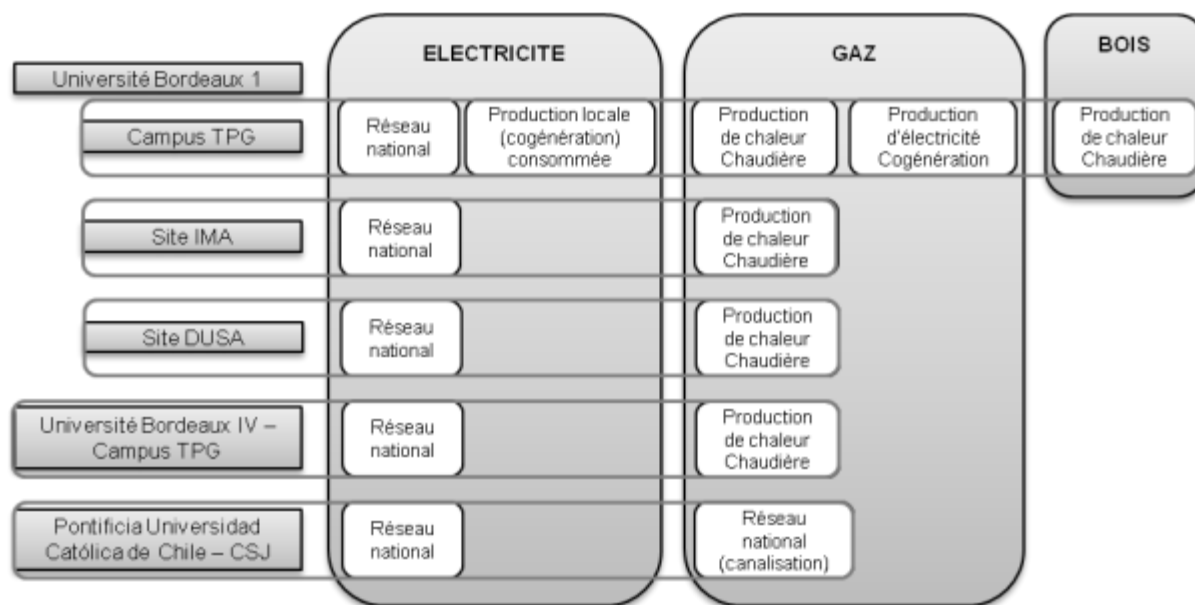


Figure 2. 13 : Les réseaux d'énergie dans les différents campus et sites analysés

Particulièrement sur le **campus d'UBx1-TPG** le système centralisé de chauffage (tableau 2.2) est composé d'une chaufferie principale, avec trois chaudières à gaz, dont une est mixte (fuel et gaz). Des trois chaudières à gaz, deux avec une cascade de fonctionnement et la dernière, conçue initialement pour un fonctionnement alterné, n'a jamais été activée, à la date de ce travail.

En 1999, une cogénération à gaz située dans les locaux de la chaufferie (moteur thermique dont on récupère une partie de la chaleur mise en jeu et qui entraîne un alternateur) a été ajoutée. Elle est permet, avec la modification du réseau Moyenne Tension 15 kV, de réduire le niveau d'abonnement à EDF (Électricité de France) de 2300 kW² à 1900 kW (en hiver sous réserve de respect du contrat de fourniture) et aussi de fournir de la chaleur sur le réseau primaire de chauffage (Balloffet P., 2006).

² 2300 kW puissance souscrite hiver 2010

En février 2006 l'installation a été complétée par le démarrage d'une chaufferie bois d'une puissance de 1300 kW, elle alimente préférentiellement les bâtiments situés après la bibliothèque (tranche 3 – cote ouest, figure 2.3).

Pendant l'hiver, le campus a deux ressources complémentaires de production d'énergie : la chaufferie bois (à mettre en rapport avec la consommation de gaz) et la cogénération (à mettre en rapport avec la consommation d'électricité et de gaz). Les ressources, la durée d'usage et les quantités d'énergie consommées et facturées sont résumées dans le tableau 2.2.

Ce tableau précise également la différence entre les saisons d'été et d'hiver, entre l'énergie facturée et la consommée et entre l'énergie totale et partielle :

- Saison d'hiver : période que limite le type de facturation et la période de chauffage. Il s'étend à peu près du 15 octobre au 15 mars
- Saison d'été : cette période regroupe aussi une partie des mois de transition et la période d'été : avril, mai, juin, juillet, août, septembre.
- Electricité facturée : fournie par EDF (16 GWh)
- Electricité consommée : la somme de l'électricité facturée et l'électricité produite par la cogénération (19,6 GWh)
- Gaz total : facturée et consommée (27 GWh)
- Gaz partiel : utilisée pour la production de chaleur – chauffage (20,5 GWh)
- Bois total : facturé et consommé (5 GWh)

SAISON	RESSOURCES ÉNERGETIQUES			GWh	GWh _{TOTAL}	Durée d'usage
Eté	Electricité facturée			5	16	7 mois
	Electricité facturée			11		5 mois
Hiver	Gaz facturé et consommé	Cogénération	Production d'électricité	3.6	11	5 mois
			Pertes	2.9		
			Production de chaleur	4.5		
		Production de chaleur	16	27		
	Bois facturé et consommé			5	7 mois + 1 en fonction de la météo	
Bois facturé et consommé			5	7 mois + 1 en fonction de la météo		

Tableau 2. 2 : Synthèse des ressources et usage de l'énergie sur UBx1-TPG à octobre 2012

Ce système centralisé de chauffage alimente en eau chaude, au moyen d'un réseau primaire de 7 km de conduites en gaines techniques ou enterrées, un ensemble de bâtiments représentant environ 90% des 165 000 m², le reste des bâtiments est autonome (figure 2.14).

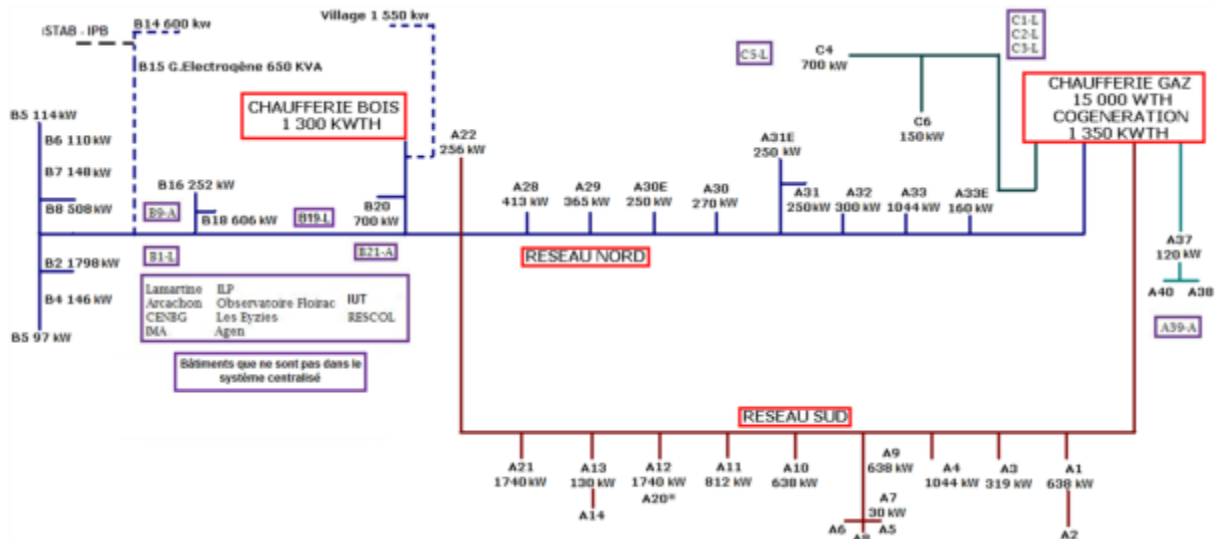
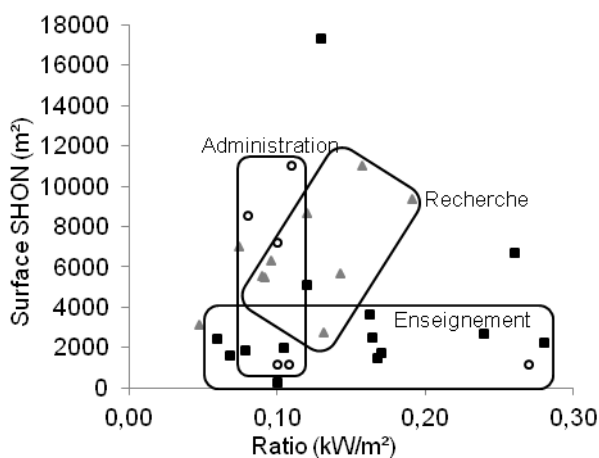


Figure 2. 14 : Schéma du réseau primaire de chauffage – Puissances installées à l'UBx1-TPG – source : (Direction du Patrimoine Immobilier - Université Bordeaux 1, 2010a)



Les ratios d'approvisionnement représentatifs vont de 0,06 à 0,28 kW/m² pour un bâtiment d'enseignement (■) de 0,08 à 0,11 kW/m² pour un bâtiment d'administration (o) et de façon dispersée pour les bâtiments de recherche (▲) (figure 2.15).

Figure 2. 15 : Ratios représentatifs du Campus Principal d'UBx1

A **Bordeaux IV - TPG**, le réseau d'énergie est alimenté par deux chaudières à gaz et l'apport d'électricité du réseau national (EdF) (figure 2.16). Le réseau de chaleur se décompose en quatre réseaux principaux qui sont :

- l'enseignement : amphithéâtres de 400 et 600 places,
- l'enseignement : pôle numérique et salles de cours,
- l'administration,
- la recherche.

Les deux chaudières ont une puissance de 1.5 MW chacune et ont été mises en place en 1985. Généralement les chaudières fonctionnent en régime neutre, c'est-à-dire qu'une seule est en fonctionnement et l'autre sécurise le réseau. La deuxième chaudière s'active sous certaines conditions qui dépendent de la température de consigne, de la puissance appelée, des conditions climatiques et du temps d'utilisation. Par exemple la deuxième s'active lorsque la première est à 100% pendant 15 minutes. Les chaudières changent de rôle tous les deux mois.

Le réseau électrique est dédié principalement à trois fonctions :

- fonctionnement du réseau de chaleur (chaudières et Centrale de Traitement d'Air - CTA),
- fonctionnement général : la vie de l'université (ordinateurs, éclairage, climatisation,...),
- apport de chaleur : convecteurs électriques dans les préfabriqués.

La puissance souscrite à EDF est pour l'ensemble des périodes de pointes, heures creuses et pleines, été et hiver de 458 kW.

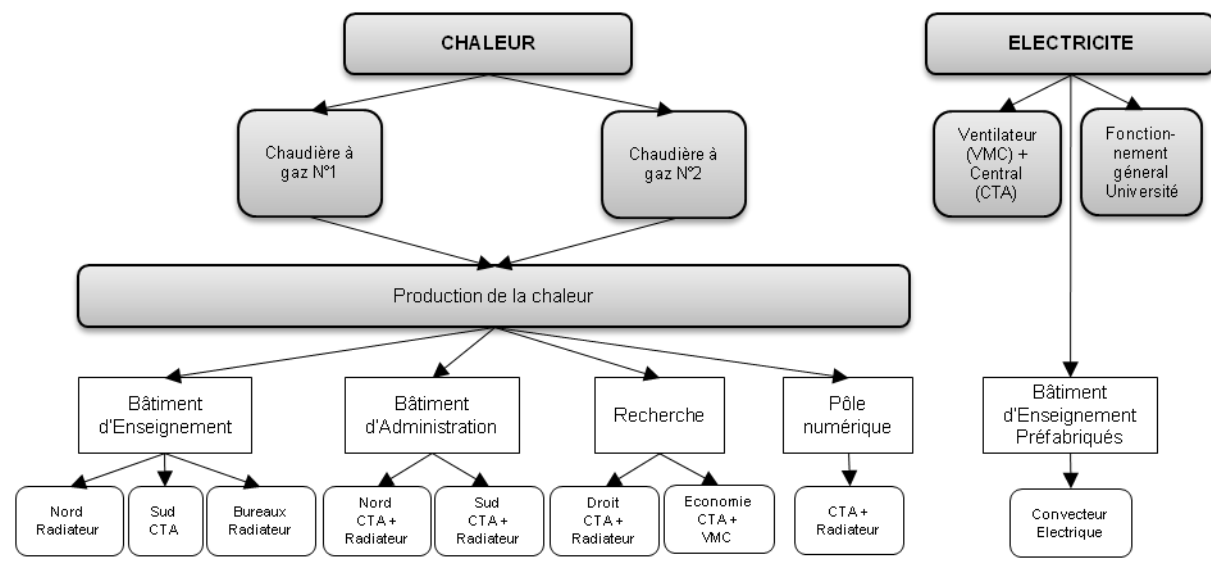


Figure 2. 16 : Le réseau énergétique du campus TPG de l'UBxIV

2.4.1 L'analyse quantitative

Les historiques de consommation d'énergie des différents sites et campus sont présentés dans la figure 2.17. Les changements dans la consommation sont étroitement liés aux variations dans l'organisation de l'université, variations de surfaces et du nombre d'utilisateurs, comme on pourra vérifier dans les paragraphes suivants.

A Bordeaux 1 - TPG :

L'énergie est initialement fournie par l'électricité et le fioul (Direction du Patrimoine Immobilier - Université Bordeaux 1, 2010b). Entre 1998 et 1999, les trois chaudières au fuel lourd n°2 (3x 3 525 kW) ont été remplacées par 3 chaudières à gaz (3x 5 000kW) ainsi que la centrale de cogénération. En 2006, une chaudière à bois a commencé à fonctionner. Début 2013 la production locale de l'électricité n'est plus utilisée sur le site mais revendue à EDF par un prestataire extérieur, la chaleur est récupérée sur le réseau primaire.

On peut aussi observer une augmentation significative de la consommation d'énergie thermique en 2000 liée à la mise en œuvre d'équipements et de machines pour de nouvelles recherches, et entre 2002 et 2005, lorsque les nouveaux bâtiments ont été intégrés dans le réseau.

En général, on observe que la consommation totale d'électricité n'a pas augmenté. Cette consommation correspond à la somme de l'électricité fournie par EDF et produite par cogénération. La consommation totale de gaz a augmenté 58%, tandis que l'augmentation de la surface des bâtiments a augmenté seulement 22%.

La consommation de fuel ne sera pas abordée dans l'analyse, car il a été remplacé par la chaudière à bois.

Sites IMA et DUSA

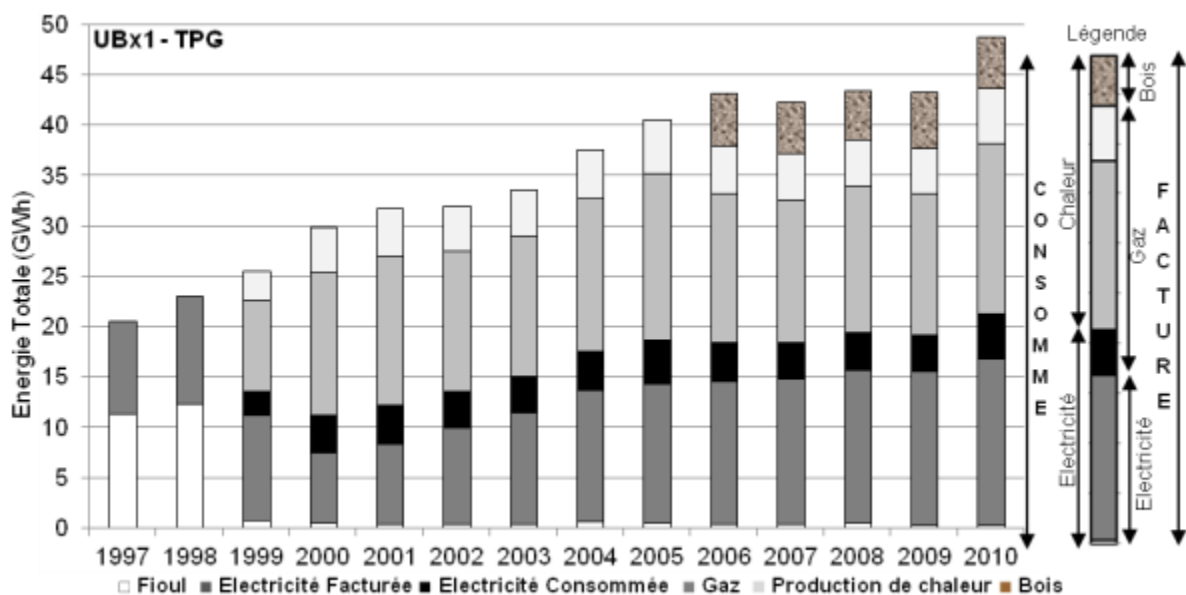
Le suivi de l'évolution de la consommation annuelle d'énergie pour les deux sites permet de noter, sur la période d'observation, que la consommation globale de l'électricité de l'IMA a augmenté et que celle du DUSA a diminué. L'augmentation des années 2008-2010 à l'IMA peut s'expliquer par l'achat de matériel scientifique et de travaux pratiques en accord avec de nouvelles formations et activités, de même les diminutions pour le DUSA peuvent s'expliquer par les diminutions successives du nombre d'utilisateurs et des activités liées à la formation et à la recherche.

Campus UBxIV-TPG

Pour le comportement historique de la consommation annuelle d'énergie (sans les données sur le gaz) (Direction du Patrimoine et de la Logistique - Université Bordeaux IV, 2011) on voit que la consommation d'électricité ne suit pas un comportement bien défini : variations entre 2002-2003, un pic en 2006 et une diminution entre 2006-2009. L'augmentation des années 2005-2006 est consécutive à la construction du pôle numérique (2004), de même que la diminution en 2008 peut s'expliquer par la diminution du nombre d'utilisateurs.

PUC-CSJ

Près de 70% du total de l'énergie consommée dans le Campus (Dirección de Infraestructura, 2012), sont électriques, ce niveau d'utilisation est lié aux divers usages : chauffage individuel, éclairage, ordinateurs et fonctionnement d'équipement de laboratoires. La forte augmentation pendant l'année 2007, s'explique par la construction de la faculté de chimie en 2006, et l'arrivée d'équipements et appareils de laboratoires.



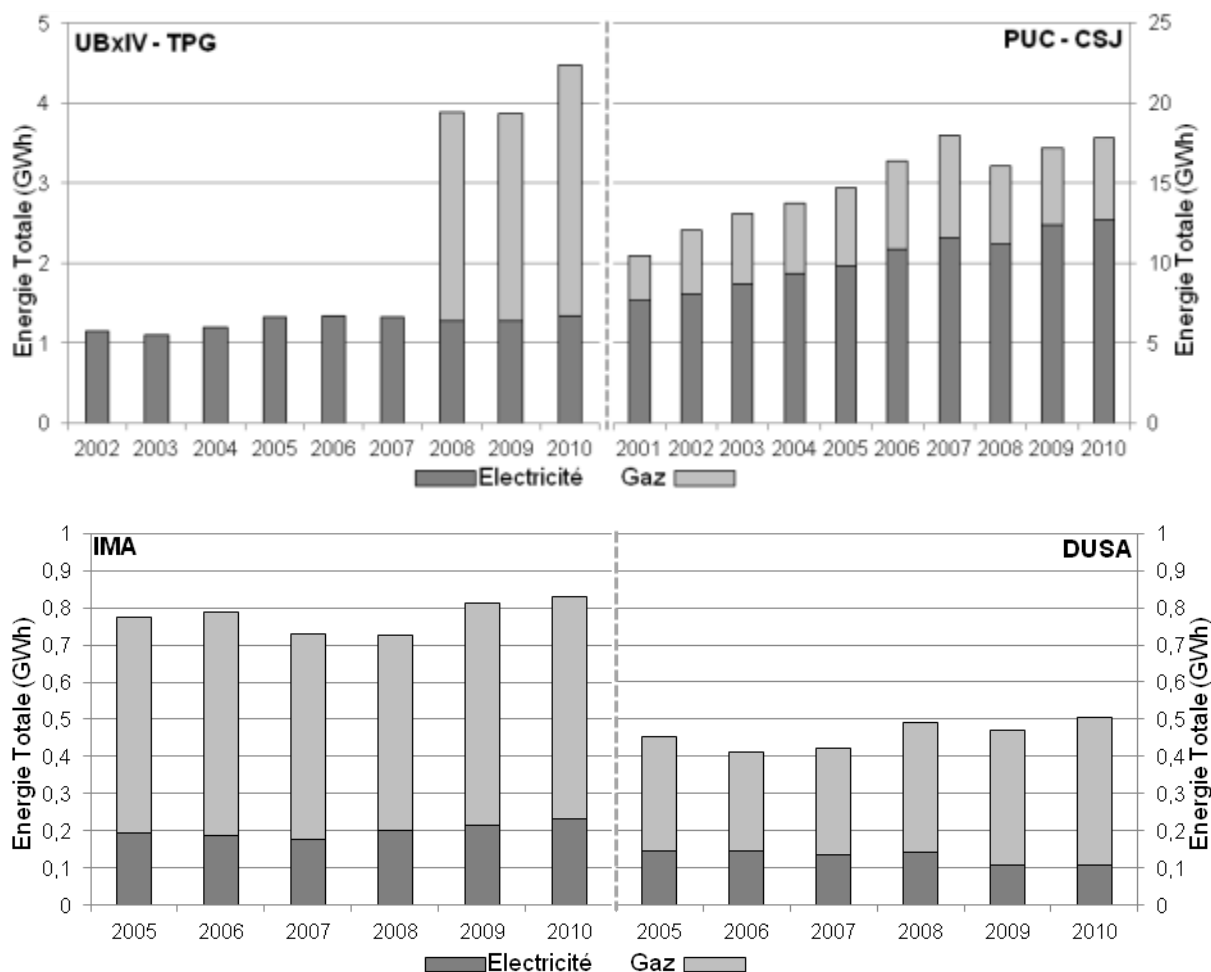


Figure 2.17 : Historique de l'évolution de la consommation d'énergie annuelle des différents campus et sites

2.4.1.1 L'état actuel des consommations

Comme nous l'avons expliqué dans la partie méthodologie, l'analyse quantitative comporte différentes échelles de temps qui peuvent être trimestrielles (t), mensuelle (m) ou journalières (j). Ceci sera précisé pour chaque analyse.

Le fil directeur de l'analyse se basera sur les données du campus principal d'UBX1 pendant la période 2008-2010. Si la comparaison des données est pertinente celles des autres sites seront analysées. Les informations pour les différents sites, qui ne sont pas présentées ici, seront détaillées dans les annexes.

La figure 2.18 donne les consommations mensuelles ou trimestrielles de gaz, de bois ou d'électricité pour les années 2008, 2009 et 2010 et ce pour les trois campus principaux (les données relatives aux sites de l'IMA et DUSA sont décrits dans l'annexe A.2.1). Pour rendre plus lisible les graphiques les valeurs sont normalisées, par rapport aux valeurs du tableau 2.3 et regroupées par ordre croissant en fonction de la consommation mensuelle ou trimestrielle maximale des trois années et en

fonction des différents mois de comportement (mois déterminés à partir de l'analyse climatique dans le chapitre 1.6).

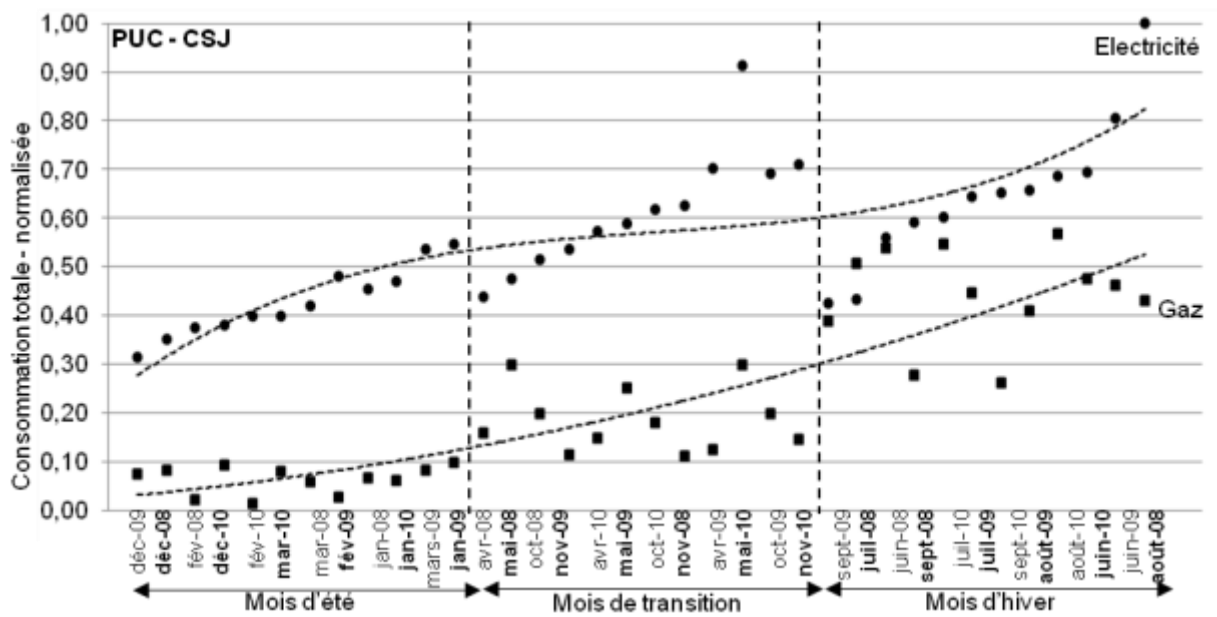
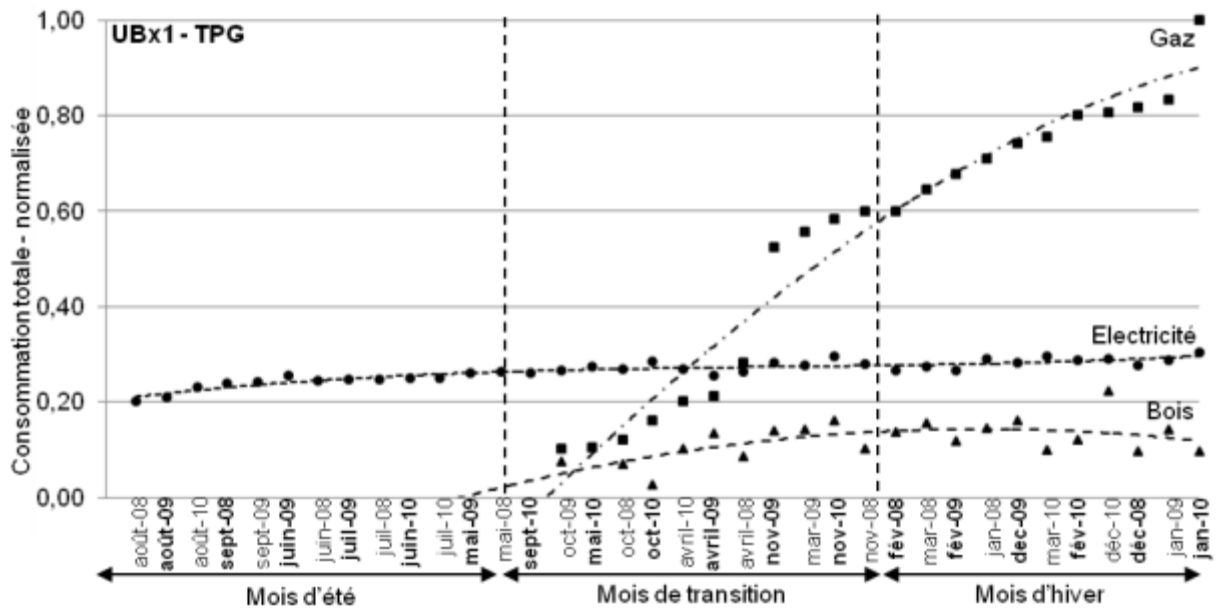
Site	Ressource	Valeur de normalisation
Université Bordeaux 1 - TPG	Gaz _m Janvier 2010	6 070 MWh
PUC - CSJ	Electricité _m août 2008	1 789 MWh
Université Bordeaux IV - TPG	Gaz _t 1 ^{er} trimestre 2010	1 765 MWh

Tableau 2. 3 : Valeurs de la normalisation pour l'analyse des consommations de l'énergie en l'état actuel

Lorsque les bases de données du comportement climatique et de la consommation d'énergie sont transposées, nous constatons qu'il y a une grande similitude entre le climat et le comportement de l'énergie. Le climat est donc la variable clé pour l'analyse du profil de consommation d'énergie en fonction des groupes de mois précédemment définis.

- Pour **UBX1-TPG** nous voyons que la consommation consommée d'électricité est presque constante pendant les trois périodes de l'année, avec une moyenne de 1 500 MWh, ce qui représente 26% de la consommation totale d'énergie de l'université. D'autre part, la consommation de gaz augmente progressivement et est directement liée à la demande, avec des températures plus basses dans la période hivernale menant à une consommation plus élevée. Enfin, on constate que la consommation de bois commence en octobre et ne présente que 12% de la consommation totale d'énergie de l'université, avec une moyenne de 400 MWh par mois. Cette ressource, conçue pour compléter et / ou remplacer l'utilisation du gaz, n'a jamais atteint (à la date dans ce travail) sa pleine production et est assez constante, sauf au début et à la fin de la période d'utilisation (analyse dans le paragraphe 2.4.2.3).
- Pour la **PUC-CSJ** on observe que la consommation de l'électricité suit un comportement cyclique en fonction de chaque période de l'année, avec une variation pour chaque période de 20%. Par contre le comportement de la consommation de gaz est aléatoire pendant les périodes de transition et pendant l'hiver. Ce comportement se justifie par le partage entre l'électricité et le gaz pour le chauffage du campus.
- Enfin, concernant le profil d'énergie d'**UBXIV-TPG** on observe que la consommation d'électricité est composée d'une ligne de base correspondant au trimestre 3 et liée aux usages directs et permanents de l'électricité puis au

trimestre 2 s'ajoute une contribution au confort thermique et enfin pour les trimestres 1 et 4, l'électricité est aussi utilisée comme vecteur de chauffage.



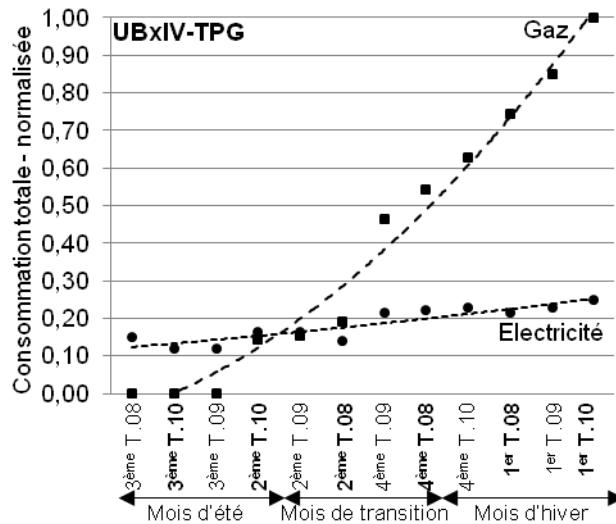


Figure 2. 18 : Profil de la consommation facturée en fonction du climat

2.4.1.2 L'énergie actuelle (électricité, gaz et bois) ramenée au climat

Lorsque la base de données des tendances climatiques (chapitre 1.6) et la consommation de gaz, de bois ou d'électricité, sont transposées nous pouvons dégager, à une échelle temporelle d'observation plus fine, un comportement particulier dans la consommation des différentes ressources en les mettant en relation avec les données climatiques. Pour cela, chaque consommation a été normalisée à la valeur maximale de chaque année, valeurs détaillées dans le tableau 2.4. (Les autres sites sont décrits dans l'annexe A.2.2)

Ressources	Site	Valeurs de normalisation		
		2008	2009	2010
Electricité	Université Bordeaux 1 - TPG (journalière) en kWh facturée	Octobre 61 724	Octobre 62 491	Octobre 66 888
	Université Bordeaux 1 - TPG (journalière) en kWh consommée	Décembre 76 986	Décembre 71 107	Novembre 78 868
	Université Bordeaux IV – TPG (mensuelle) en kWh	Novembre 138 154	Janvier 155 247	Janvier 163 097
Gaz	Université Bordeaux 1 - TPG (journalière) en kWh	Décembre 183 695	Décembre 212 000	Janvier 252 789
	PUC - CSJ (mensuelle) en kWh	juin 964 408	juin 827 065	août 1 016 138
Bois	Université Bordeaux 1 - TPG (journalière) en kWh	Janvier 95 611	Novembre 104 422	Janvier 95 704

Tableau 2. 4 : Valeurs de la normalisation pour l'analyse des consommations de l'énergie en fonction au climat

La consommation d'électricité facturée et consommée

Avant d'aborder les analyses liant l'énergie (facturée) ramenée au climat, on se concentre sur l'analyse de la différence entre la consommation d'électricité facturée et celle consommée, pour le campus principal de l'UBx1.

Les deux graphiques suivants (2.19 et 2.20) illustrant la consommation d'électricité journalière normalisée par rapport aux valeurs du tableau 2.4 pendant les années de l'étude avec l'apport de la production d'électricité lié au fonctionnement de la cogénération (consommée) et sans cet apport (facturée).

On observe clairement à partir de ces graphiques la discontinuité dans le comportement de l'électricité entre fin mars et début novembre, période qui correspond aux 5 mois de fonctionnement de la cogénération.

Le premier graphique 2.19, comportement de l'électricité facturée, permet d'observer les plus hautes (valeurs entre 60% à 100%) consommations pendant les périodes de transition et d'été, avec une légère diminution durant le mois d'août qui correspond aux vacances d'été. C'est pendant l'hiver qu'ils existent les plus basses consommations avec des valeurs autour de 40%. De plus pour toutes les consommations on observe deux comportement en parallèles et qui représentent la

séparation entre fin de semaine (les plus basses consommations) et les jours ouvrables (les plus hautes consommations).

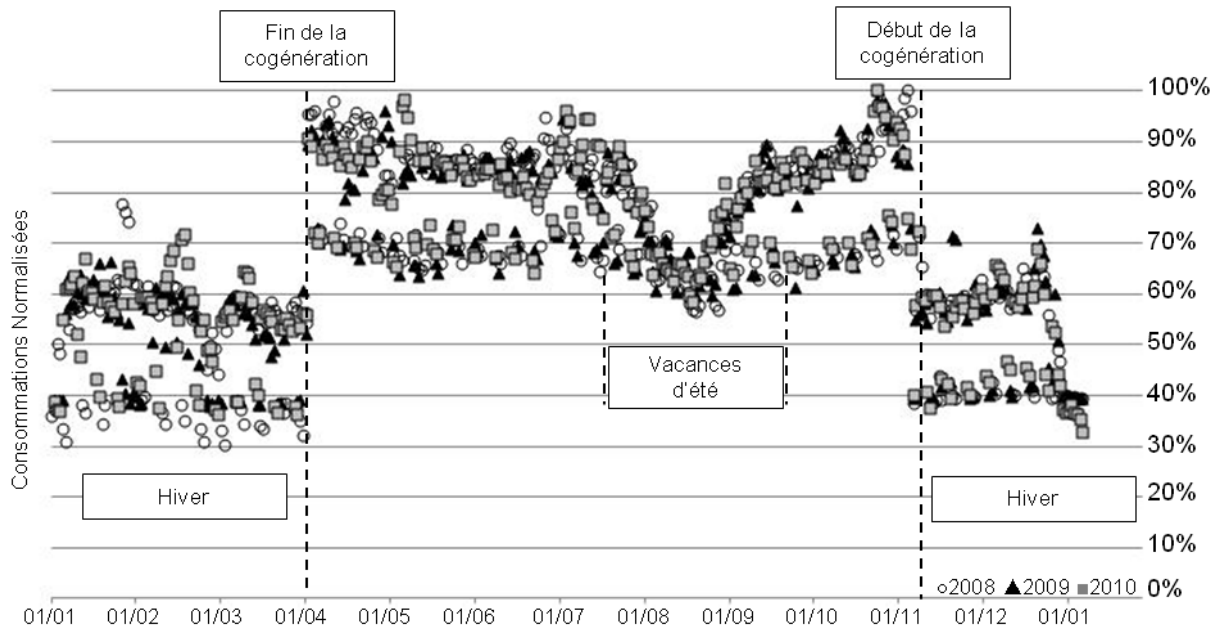


Figure 2. 19 : La consommation d'électricité facturée à l'Université Bordeaux 1 – TPG

Le second graphique 2.20, comportement de l'électricité consommée, on note l'inversion du comportement avec une augmentation de la consommation moyenne avec des valeurs au-dessus de 50% et de plus une augmentation de consommation pendant la période d'hiver. Cette variation montre que pendant la période d'hiver la production de chauffage sur le campus n'arrive pas à répondre elle seule à la demande en chauffage et c'est l'électricité qui complète cette demande.

Les points singuliers correspondent à des périodes d'arrêt du fonctionnement de la cogénération. Enfin on note toujours le comportement de fin de semaine et les jours ouvrables.

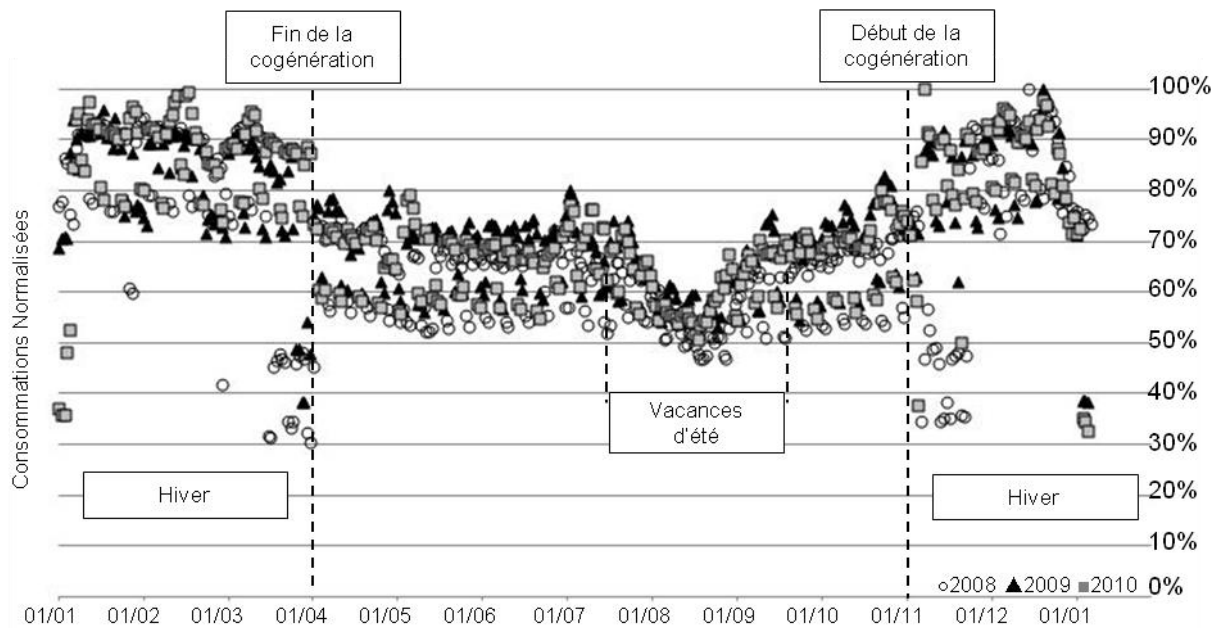


Figure 2. 20 : La consommation d'électricité consommée à l'Université Bordeaux 1 – TPG

Les graphiques suivants (2.21, 2.22 et 2.23) montrent la relation entre le climat (DJU en abscisse) et l'énergie (valeurs de la ressource normalisée en ordonnée) pour différentes échelles de temps (journalière, mensuelle). Finalement, après avoir fait un zoom dans la figure 2.21, sur chaque valeur nous pouvons identifier à quelle période d'occupation, du jour ou du mois nous nous trouvons et en déduire à quel type d'usage répond la ressource énergétique, comme nous le verrons ensuite.

La première analyse proposée est celle lié à l'électricité facturée. Cette ressource est présente dans les trois groupes de mois, ce qui facilite la compréhension. Nous pouvons identifier la relation directe entre la consommation d'électricité et les différents besoins des usagers.

La figure 2.21 lie la consommation et le contexte climatique ; on peut alors dégager six comportements énergétiques pour UBx1-TPG.

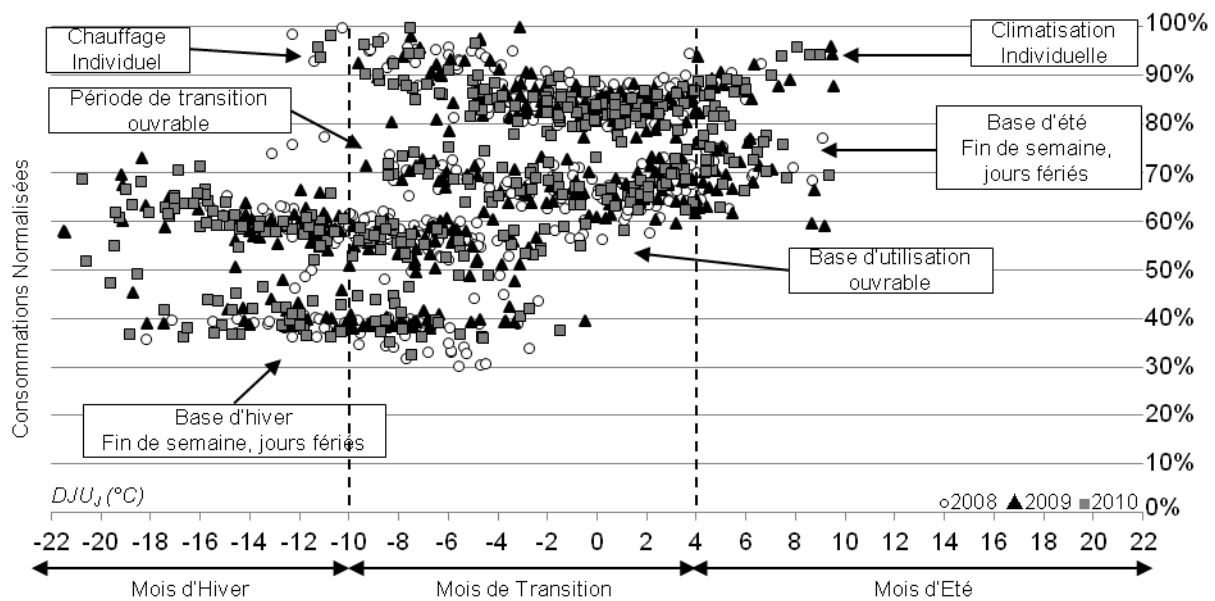


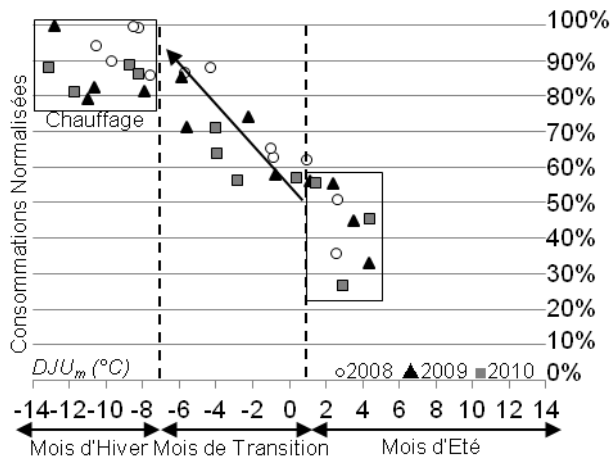
Figure 2. 21 : Comportement de la consommation d'électricité à l'Université Bordeaux 1 - TPG

- La **base d'hiver** représente une moyenne de 36% de la consommation facturée totale d'électricité, ce qui est cohérent avec l'utilisation constante dans le campus des ressources informatiques (ordinateurs et serveurs) qui fonctionnent toute l'année : hiver, été, semaine, week-end, jour et nuit.
- La **base d'utilisation** : des valeurs allant de 50 à 60%, correspondant aux jours du lundi au vendredi, en période scolaire et de travail dans les bâtiments de recherche, d'administration et d'enseignement.
- La **période de transition** annuelle correspond à des valeurs comprises entre 55% et 70% et est principalement concentrée dans la période de transition (entre -10 à +4 °C.j DJU_j). Ces jours-ci correspondent au début de la période de chauffage et de jours à la fin de cette période (fin mars), les jours de semaines et week-ends. On observe également une légère augmentation des valeurs (jusqu'à 70%) à la fin de la période. Les valeurs sont cumulées dans la période estivale et correspondent aux jours où il y a des examens à l'université. Cette phase est une adaptation progressive à l'augmentation de la température extérieure.
- La **base d'été** (valeurs égales à 70%) correspond aux jours d'août, qui est un mois atypique, car le personnel administratif, les chercheurs et les étudiants sont en vacances. Il y a donc deux raisons pour expliquer cette valeur. Tout d'abord, la consommation d'électricité de base due aux systèmes de refroidissement des ordinateurs pour les serveurs de recherche et des universités nécessitent plus de consommation en été en raison de la hausse des températures et d'autre part, certains dispositifs expérimentaux liés aux activités de recherche continuent de fonctionner.

- **Chauffage individuel**, période dont les valeurs coïncident avec les jours où les températures sont les plus faibles et quand le système universitaire de chauffage centralisé ne parvient pas à répondre aux besoins de chauffage des usagers, et ainsi, différents systèmes sont mis en place localement.

- Enfin, la **climatisation individuelle** correspond à des valeurs coïncidant avec les jours où les températures sont les plus élevées, complètement hors de la plage de température de confort, alors les systèmes individuels sont utilisés.

Sur la figure 2.22, on voit que pour les trois années, la consommation annuelle de Bordeaux IV est du même ordre de grandeur, sans grandes variations entre les trois années. Pour les mois d'hiver, on observe que la consommation est quasi constante avec des valeurs au-dessus de 80%.



Ce niveau représente un apport de chauffage à la différence d'UBX1 où ce type de besoin répond à un dysfonctionnement du chauffage centralisé. Pendant la période de transition, on observe une relation directe avec les variations de températures (plus de consommation, DJU_m plus petit) et finalement pendant les mois d'été, une variation plus dispersée entre les années et entre la consommation (de 30% à 60% de variation).

Figure 2. 22 : Comportement de la consommation mensuelle d'électricité à l'Université Bordeaux IV-TPG

Pour la consommation de gaz de l'UBX1-TPG, on constate qu'elle augmente (figure 2.23) proportionnellement aux valeurs DJU_j . De plus, les limites de début et de fin de la saison de chauffage sont établies par une valeur DJU_j égale à 0, ces jours correspondant à la fin mai et début octobre.

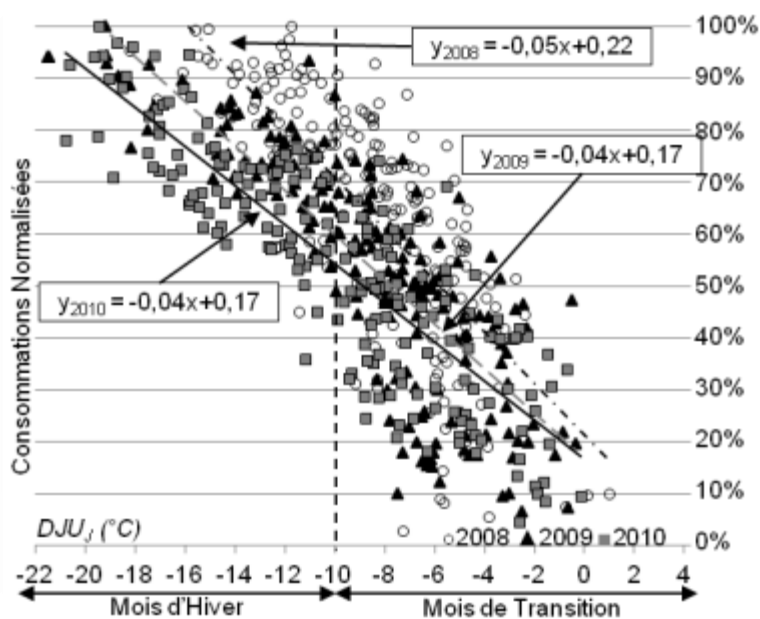


Figure 2. 23 : Comportement de la consommation de gaz à l'Université Bordeaux 1 - TPG

Les courbes de tendance de la consommation d'énergie par rapport aux DJU_j montrent que la pente est presque la même pour les courbes ce qui signifie que le comportement des usagers est fortement lié au climat. Une valeur initiale progressive pour les courbes (0,17 ou 0,22) signifie également que le départ et le démarrage de la chaudière se fait en fonction du climat. Le point d'intersection plus bas correspond à l'année la plus froide des trois (2010).

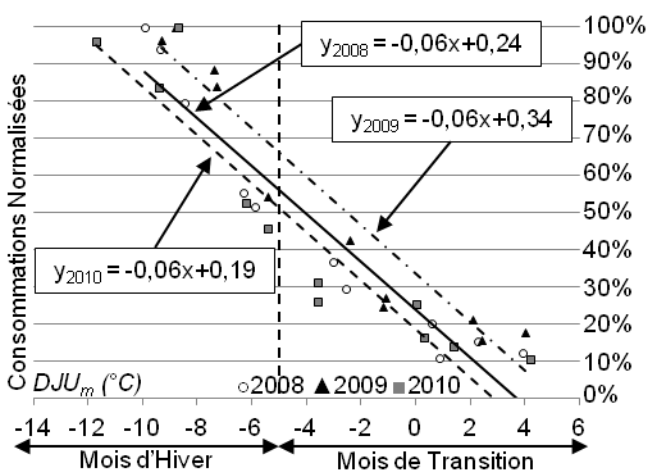
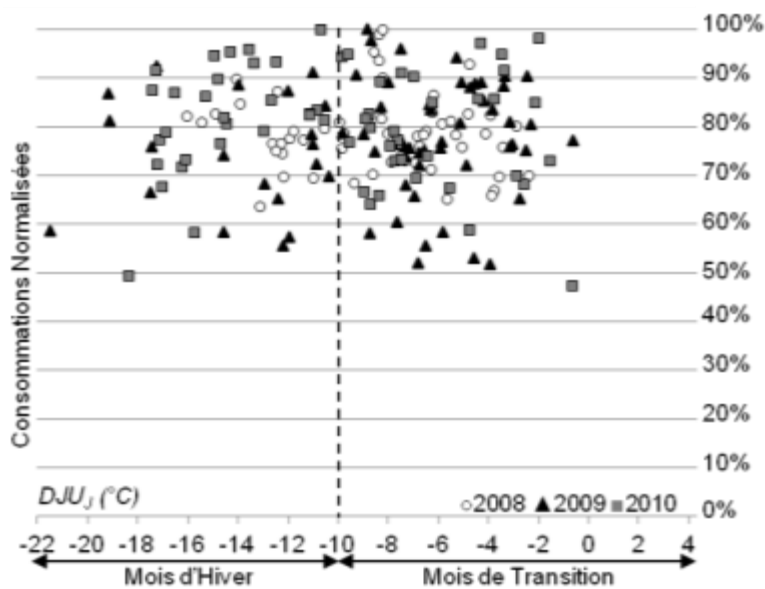


Figure 2. 24 : Comportement de la consommation de gaz de la PUC-CSJ

Pour le campus San Joaquín de la PUC, figure 2.24, on peut voir que la tendance du comportement a des pentes similaires à celle d'UBx1-TPG et que la consommation a été plus importante pour l'année 2009, que 2008.

Le campus principal de l'Université Bordeaux 1, est le seul campus qui utilise aussi le bois en complément du gaz pour la production de chaleur, une analyse de son comportement est proposée ici. La figure 2.25 montre clairement la production de chaleur due à la chaudière à bois (à l'époque où l'étude a été menée) n'a aucun lien avec le DJU ou avec le taux d'occupation.

Elle est étroitement liée à sa gestion (prestataire extérieur), à l'équipe technique chargée de son fonctionnement (mise en route et son arrêt), à une gestion technique propre de la chaudière (qui est plus ou moins accessible et modifiable), à la



fiabilité de l'installation (fonctionnement aléatoire) et à la qualité du combustible et sa disponibilité (humidité du bois, quantités d'achats).

Pendant l'année 2009 on voit que son fonctionnement est assez aléatoire, à différence des années 2008 et 2010, où on observe que la production est constante (55%) pendant toute la période hivernale sans changements importants entre les mois de transition et d'hiver.

Figure 2. 25 : Comportement de la consommation de bois à l'UBx1-TPG

Pour résumer l'analyse de la relation énergie-climat et comparer l'ensemble des campus et sites, les figures 2.26 et 2.27 sont proposées. L'axe horizontal représente la consommation de gaz normalisée, l'axe vertical est la consommation de l'électricité et le diamètre de chaque boule est la valeur du DJU normalisé.

Les données de consommation ont été normalisées à la valeur maximale de consommation repérée durant la période d'analyse (d'énergie thermique, de gaz ou d'électricité; mensuel ou trimestriel) en fonction au DJU (mensuel ou trimestriel) aussi normalisé, en accord avec les valeurs présentées dans le tableau 2.5.

Par exemple pour les données du campus TPG d'UBx1, la valeur de normalisation pour l'énergie thermique et l'électricité ont été normalisées à celle de l'énergie thermique. Et le diamètre de chaque cercle pour les données climatiques mensuelles a été fixé à 14,2 °C et pour les trimestrielles à 34,7°C.

Valeurs de normalisation		
Université Bordeaux 1 - TPG	DJU _m janvier 2010	14,2 °C
	Energie thermique janvier 2010	6 651 262 kWh
Université Bordeaux IV - TPG	DJU _t 1er trimestre 2010	34,7°C
	Energie thermique 1er trimestre 2010	1 765 100 kWh
PUC – CSJ	DJU _m février 2008	12,1 °C
	Electricité août 2008	1 789 073 kWh
Bordeaux 1 Site de l'IMA	DJU _t 1er trimestre 2006	32,3 °C
	Gaz 1er trimestre 2006	380 698 kWh
Bordeaux 1 Site du DUSA	DJU _t 1er trimestre 2009	33,9 °C
	Gaz 1er trimestre 2009	206 188 kWh

Tableau 2. 5 : Les valeurs utilisées pour l'analyse du comportement énergétique des différents campus et sites

Pour les deux campus avec des données mensuelles, PUC et UBx1, on observe dans la figure 2.26, de grandes différences de tendances, par rapport à l'évolution du DJU et par rapport à la façon de consommer.

- Dans le campus de la PUC, on observe que l'électricité est la ressource la plus utilisée autant en hiver (entre 80% à 100%) qu'été (entre 30% à 50%) et que le gaz sert seulement comme complément avec des valeurs maximales qui atteignent 60%. D'autre part, on voit qu'il n'existe pas de relation directe entre la consommation et le DJU, parce que dans ce campus ce sont principalement les usagers et les usages qui déterminent la consommation, en fonction du taux d'occupation et des types d'équipements numériques ou de recherche.

- Dans le campus d'UBx1, on observe au contraire que l'énergie thermique est la ressource la plus consommée, l'électricité est utilisée comme ligne de base pour le fonctionnement de tous les jours. Cette ligne de base autour de 30% correspond à l'utilisation permanente des serveurs de l'université, de grands ordinateurs, des systèmes de refroidissement d'ordinateur, à la recherche et aux ordinateurs individuels.

Ces informations ont été vérifiées lors d'une enquête conduite à la fin de 2010 (Bernet J., Lamerre L., & Monnier A., 2011) qui a déterminé que la ligne de base correspond à environ 36% de la consommation d'énergie électrique facturée totale du campus. Finalement, en fonction du climat on observe les trois types de périodes marquées, l'été avec seulement la consommation de l'électricité (0 pour le gaz sur l'axe des abscisses), puis la période de transition (entre 0,10 à 0,40) et finalement l'hiver avec les consommations les plus importantes d'énergie thermique et électrique (après de 0,60).

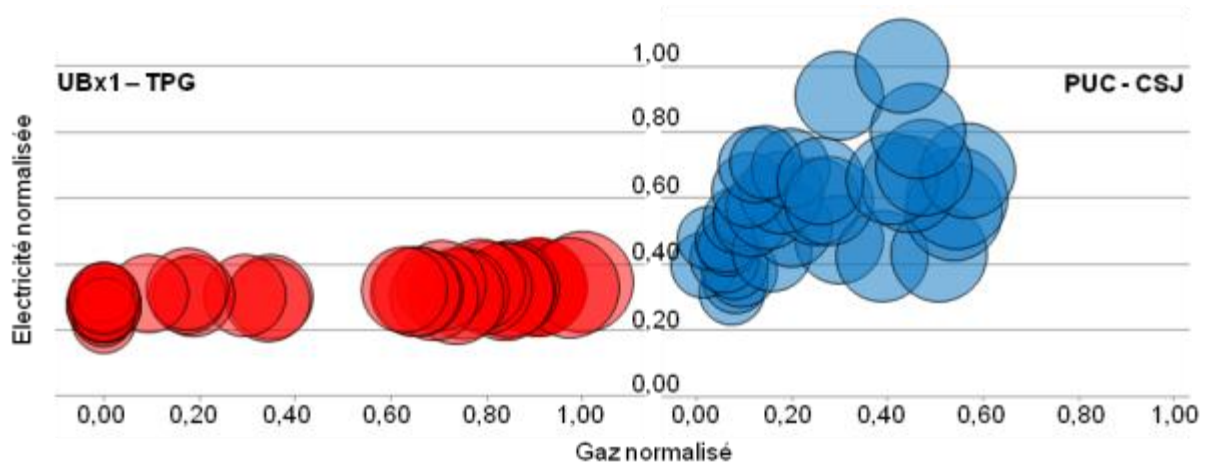


Figure 2. 26 : Energies mensuelles de gaz et d'électricité en fonction au DJU mensuel, pour les sites de la PUC-CSJ et d'UBx1-TPG



Pour UBxIV-TPG et les deux sites, cette fois avec les données trimestrielles, on observe dans la figure 2.27, des tendances similaires dans la façon de consommer et dans la délimitation des périodes climatiques.

- Pour le campus TPG d'UBxIV, on voit que la consommation du gaz répond de manière progressive au climat (en moyenne 16% pour la période de transition et entre 50% à 100% pour la période d'hiver), pendant que l'électricité a une consommation constante de 18% dans les trois périodes.

- La tendance de consommation pour le site IMA montre une consommation de base d'électricité autour de 6%-8%, une augmentation de la consommation d'électricité pendant la période chauffage (valeur entre 12% et 18%), une variation pendant la période de transition pour l'électricité de 8% à 14% et pour le gaz de 20% et montre une relation directe climat-gaz, DJU plus élevés, consommation de gaz proche de 100%.

- Pour ce qui est du site du DUSA on note que la consommation d'électricité est presque constante sans une grande différence entre mois d'été (13%), de transition (16%) ou d'hiver (18%). Mais pour la consommation de gaz le climat est le facteur décisif du comportement.

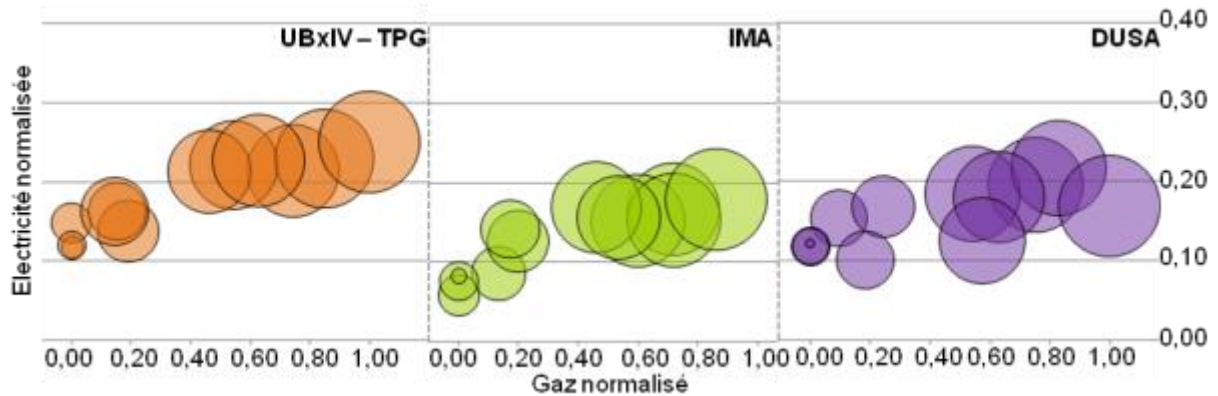


Figure 2. 27 : Energies trimestrielles en fonction au DJU trimestriel, pour les sites d'UBxIV-TPG, de l'IMA et du DUSA

Echelle
DJU,
normalisé
34,7°C

2.4.1.3 L'énergie actuelle ramenée à la surface et aux usagers

Finalement pour ce qui est de l'analyse à partir des variables surfaces et usagers pour l'ensemble des consommations énergétiques (gaz et électricité, et bois pour UBx1) les principales tendances que l'on peut décrire sont :

- Les bâtiments du campus principal de l'UBx1 sont presque deux fois plus énergivores par m² que les bâtiments des autres campus et sites (figure 2.28). Cela pourrait s'expliquer par leur ancienneté car les bâtiments du UBx1 sont antérieurs aux bâtiments de l'IMA et du DUSA, par le type et la longueur du réseau de chaleur qui les alimente et aussi par le type d'usages pour lesquels ils sont utilisés (recherche, outils pédagogiques, travaux pratiques,), dans les sites français on est bien loin des valeurs souhaitées par les présents réglementations (RT2012 50kWh/m².an). Et finalement on voit aussi que pour tous les campus et sites, la consommation par surface augmente d'année en année.
- En fonction des usagers et donc des usages (figure 2.29) le campus principal de l'UBx1 est encore presque deux fois plus consommateur que les sites de l'IMA et du DUSA, six fois plus que Bordeaux IV, et presque deux fois plus que le campus de la PUC. Cela est une conséquence de différents usages (recherche) des bâtiments du campus principal avec des installations expérimentales tandis que Bordeaux IV possède plus de bâtiments pour

l'enseignement et pas d'installation expérimentale pour ses activités de recherche.

Et dans le cas de l'IMA, du DUSA et d'UBx1 ils sont un taux d'occupation peu optimisé au regard des autres sites (une analyse plus détaillée est proposé dans l'annexe A.2.3).

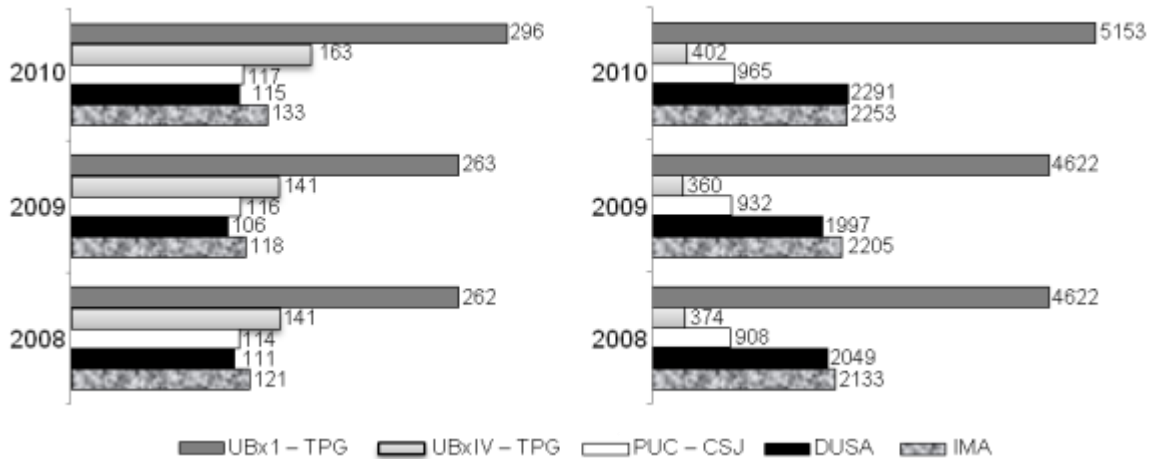


Figure 2. 28 : Energie annuelle par m² pour les différents sites et campus

Figure 2. 29 : Energie annuelle par usagers pour les différents sites et campus

2.4.2 L'analyse qualitative

Dans les paragraphes précédents, on a mis en évidence la variable qui affecte de façon discriminante, la consommation d'énergie. Ces informations aideront à comprendre que les actions d'amélioration énergétique sont nécessaires pour avoir un campus « plus durable ».

2.4.2.1 L'électricité et les usagers

Afin d'illustrer la relation entre la consommation d'électricité et le comportement des usagers, l'analyse a été faite sur un bâtiment de recherche (A12). Des différents bâtiments (enseignement, recherche et administration) sur le campus, ce bâtiment est le plus grand en superficie ; dans ses locaux il y a différents usages (chimie, expérimentation, bureaux) et il a le plus de types de taux d'occupation pendant la journée et la semaine.

La puissance appelée journalière pour 2008 est tracée (figure 2.30) pour une semaine d'un mois type de chaque groupe de mois comme cela a été défini pour le contexte climatique.

On peut noter que les valeurs les plus élevées se trouvent pendant les mois d'hiver (les systèmes de chauffage individuel sont en fonctionnement constant), puis pendant la période de transition il y a aussi des valeurs élevées. Ces deux périodes présentent une puissance appelée journalière constante de 150 kW de base.

A cette échelle plus fine d'observation, on a une bonne illustration sur le comportement d'occupation du bâtiment. Pendant la période d'hiver et de transition les courbes donnent des informations sur la différence d'usage entre une semaine de travail et le week-end, ainsi que la différence d'usage pendant une journée. Cette information permet de déterminer les profils de temps d'occupation du bâtiment, puis de déduire sur la présence active dans le lieu. Les courbes livrent également le profil particulier «12h-14h» et la durée maximale de travail.

De plus, on peut identifier deux périodes spécifiques des attentes de confort : les premières heures pendant l'hiver et les premières heures de l'après-midi pendant un mois de transition. Cela montre qu'en hiver les usagers essaient de se chauffer rapidement le matin et qu'en été ils essaient de se rafraîchir l'après-midi vers 15h00.

Pendant les vacances d'été on observe une diminution de la demande, mais avec une base constante de 36% (la même base identifiée dans l'analyse globale sur l'énergie figure 2.21) égale à 100 kW de puissance appelée.

La comparaison entre les périodes d'hiver, de transition et d'été montre le profil d'usage du bâtiment entre les différentes saisons de l'année et entre les types d'occupation du bâtiment : périodes de travail (recherche), cours à l'extérieur du bâtiment, vacances, ainsi que le fonctionnement permanent des centres de calcul et des serveurs informatiques.

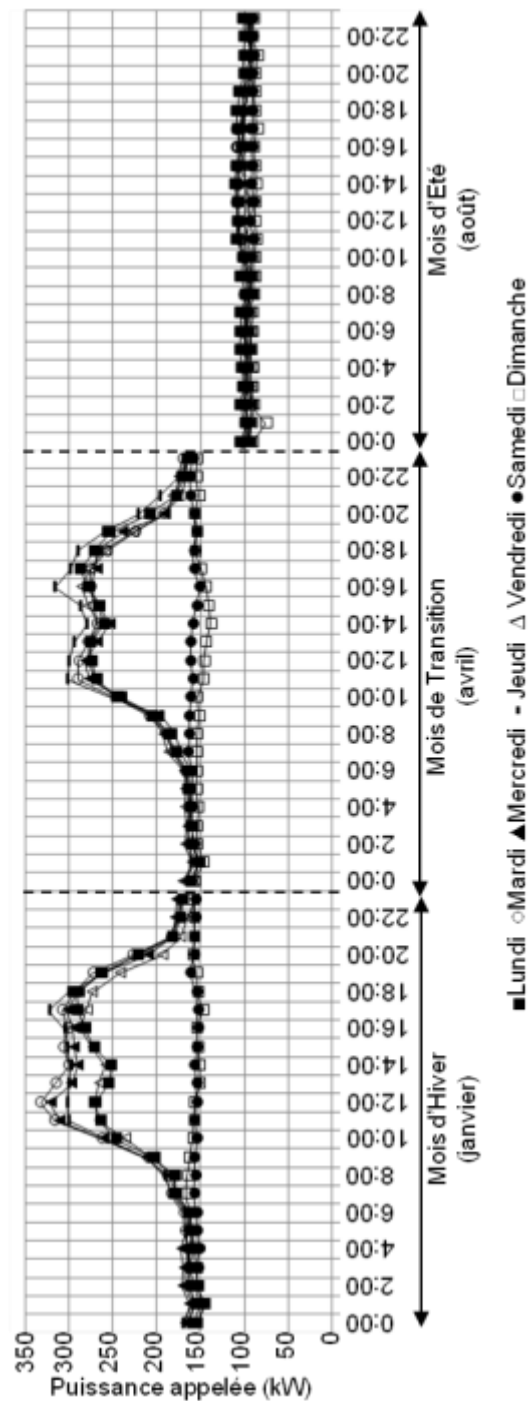


Figure 2. 30 : Profil de la puissance électrique appelée dans un bâtiment de recherche à UBx1-TPG

Cette figure souligne l'importance de bien définir le profil d'usages des bâtiments afin d'adapter et optimiser le fonctionnement des différents postes énergétiques (éclairage, climatisation) aux besoins réels des usagers et de leur type d'usage, comme aussi a été décrit dans le travail d'Escrivá-Escrivá, Alvarez-Bel, et Peñalvo-López (2010).

2.4.2.2 Le gaz et le climat

La période de transition pour le gaz et le bois-énergie d'UBX1-TPG justifie une revue détaillée. Il y a trois périodes d'adaptation du réseau de chaleur et trois types de fonctionnement des chaudières pendant la transition :

Périodes d'adaptation

- 1) lors du début de la période de chauffage, les chaudières commencent à fonctionner, le système n'est pas encore bien adapté et exige des apports externes (par exemple l'électricité individuelle pour le chauffage).

- 2) lors du début ou de la fin de la période de transition avec le début des augmentations, des diminutions progressives des températures et des demandes d'énergie, plus hautes/basses. Il y a une réponse progressive adaptée au climat.

- 3) lors de la période de grande variation dans les profils d'occupation, jours fériés en mai et novembre, des classes « régulières », mais aussi des périodes des vacances, moments où il existe les pertes plus hautes dans l'inertie des bâtiments due à l'intermittence du chauffage.

Pour répondre à ces types de périodes d'adaptation, la connexion du réseau de chaleur a trois types de fonctionnement.

Types de fonctionnement

- I) pendant la période hivernale, la chaufferie bois doit compléter la production d'eau chaude de la chaufferie principale à gaz (les deux chaufferies fonctionnent en même temps)

- II) pendant la période de transition, la production des chaufferies est alternée (selon l'appel de puissance seulement une des deux chaufferies est allumée et fournit l'eau chaude à tout le campus)

- III) fonctionnement indépendant des chaufferies gaz et bois, la demande en eau chaude est séparée dans les deux tranches (est – ouest)

Dans l'analyse de la consommation de gaz (pour deux mois de l'année 2010), deux réflexions parallèles ont été effectuées en rapport avec l'explication précédente :

- (1) l'influence du climat (DJU) sur le profil de consommation de gaz (○) et la variation des températures d'entrée et sortie de l'eau chaude du réseau de distribution (■) de la chaudière à gaz (figure 2.31) et

(2) l'analyse de la relation (\blacktriangle) entre la consommation et les températures d'entrée et de sortie d'eau chaude du réseau de distribution (figure 2.32).

A partir des données de la figure 2.31, on vérifie que la consommation (\circ) est plus importante pendant les mois d'hiver et qu'elle diminue pendant les mois de transition. Il est possible d'identifier la relation directe entre les augmentations et les diminutions de la consommation en terme de climat par les augmentations ou les diminutions des DJU_j (zones 1 et 2). De plus, on voit qu'une petite demande de consommation des usagers correspond à une variation plus petite des températures d'eau chaude du réseau de distribution (\blacksquare). Ce comportement confirme qu'outre la variable « climat », les usagers participent aussi au comportement de la consommation de gaz.

Cette participation des usagers est plus ou moins traduite dans la demande d'eau chaude par des pertes de chaleur dans le parcours de l'eau (temps de séjour de l'eau dans un réseau de 7 km) et par conséquent des différences de températures plus ou moins grandes entre l'entrée et la sortie du réseau d'eau chaude (zone 3).

Enfin, la figure 2.32 montre que la relation (\blacktriangle) entre la consommation et le fonctionnement de la chaudière est directement proportionnelle : pour la période de transition, il y a une diminution de la consommation, due à une diminution de la demande pour la chaudière à gaz (demande en eau chaude partagée avec la chaudière à bois, zone II), pour la période d'hiver, la consommation de gaz est plus importante, la différence de températures d'entrée et de sortie est donc plus importante (zone I). Et finalement dans la zone III on observe le comportement normal de la chaufferie à gaz pour le chauffage que de la tranche 1 (ouest).

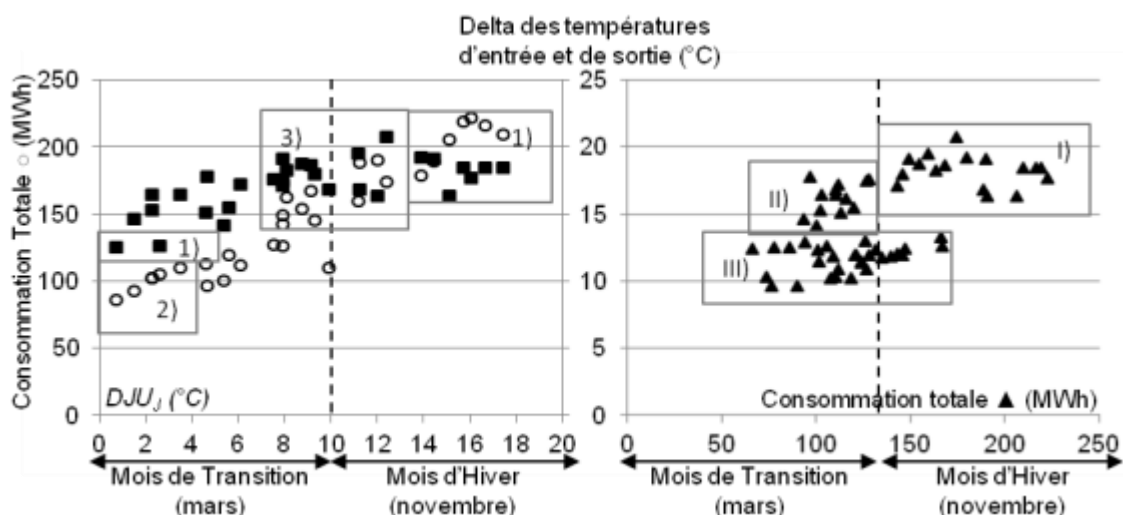


Figure 2. 31 : Profil de la consommation et du fonctionnement de la chaudière à gaz par rapport au climat et à la connexion réseau à l'Ubx1-TPG

Figure 2. 32 : Profil de la consommation de gaz par rapport au fonctionnement de la chaudière à gaz et à la connexion réseau à l'Ubx1-TPG

2.4.2.3 Le bois et la gestion

A partir du comportement analysé dans la figure 2.25 on examine ici à autre échelle d'observation, le comportement de la production de chaleur à partir de bois, afin de déterminer quelles autres variables sont impliquées dans le fonctionnement de la chaudière à bois et, par conséquent, dans la qualité de ce type de ressource énergétique.

L'énergie totale produite est mise en relation avec la qualité du matériel utilisé, mesuré par son taux d'humidité pour les années 2008, 2009 et 2010 dans la figure 2.33. On note qu'avec un niveau plus élevé d'humidité dans le bois il y a moins production d'énergie et que au-dessus de 30% d'humidité du bois (Point de Saturation des Fibres - PSF) il y a moins rendement énergétique. Cette courbe montre l'importance d'une analyse détaillée de la qualité de la matière bois qui arrivent à la chaudière. Une humidité élevée augmente le coût énergétique de la production, car une quantité considérable d'énergie est utilisée pour éliminer l'eau du bois avant de le brûler.

Ce fonctionnement assez aléatoire (figure 2.25) de la chaudière à bois répond aux contraintes suivantes:

- La chaudière a trois types de fonctionnement (sous paragraphe 2.4.1.2)
- L'exploitation de la chaudière est liée aux types de fonctionnement, aux changements de régime de marche et aux arrêts. Ces variations induisent une grande quantité de perte d'énergie pour changer le type d'opération il y a une perte d'énergie.
- Enfin démarrer, arrêter ou redémarrer sont des opérations contrôlées par les personnels, ils n'ont aucune information sur le taux d'occupation des bâtiments sur le campus. Le comportement ne pourra pas être efficient.

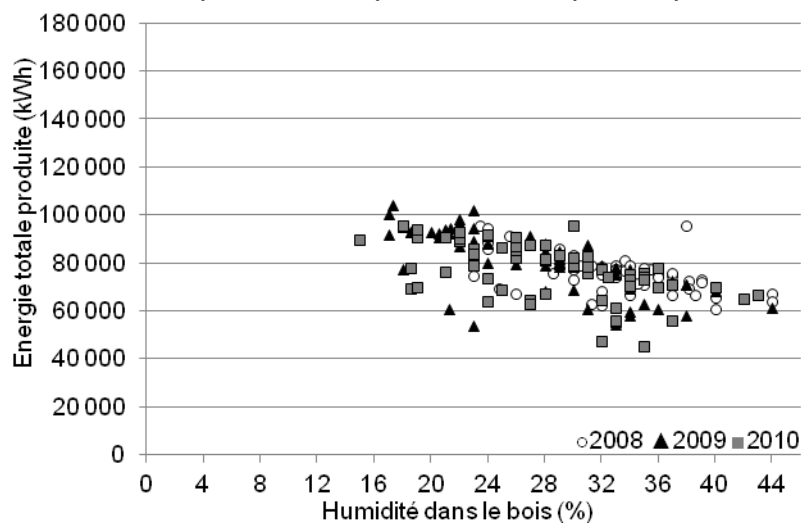


Figure 2.33 : Profil de la production énergétique de la chaudière à bois par rapport à la qualité du bois à l'Ubx1-TPG

2.5 La démarche d'évaluation et d'amélioration énergétique des bâtiments existants des campus universitaires

Tout d'abord, les analyses de la situation énergétique d'une université doivent considérer la demande par rapport aux caractéristiques des bâtiments, le fonctionnement du système de production et la distribution pour le réseau, l'utilisation et le contrôle. Tout ceci doit être intégré dans une zone climatique (dans les différents sites et campus, lié au DJU, base 18°C pour Bordeaux et 15°C pour Santiago) et doit satisfaire aux différentes exigences des usagers.

Ainsi il est nécessaire de souligner l'importance de la compréhension puis de l'intégration des différentes variables jugées pertinentes pour répondre aux exigences des usagers, des décideurs/gestionnaires, au travers une gestion responsable des ressources et des systèmes énergétiques.

2.5.1 Les variables de l'analyse énergétique

2.5.1.1 Le climat

Les facteurs climatiques sont parmi ceux qui influencent directement la variabilité de la consommation d'énergie et donc la réponse au fil du temps doit permettre de mieux adapter l'offre et la demande.

Le résultat des demandes d'électricité montre que leur comportement est lié au climat comme une réponse adaptative dans la période de transition et comme une réponse individuelle à la perception de confort. Le résultat des consommations de gaz montre que la performance est liée au climat comme un activateur du système énergétique dans les sites d'UBx1-TPG et PUC-CSJ.

S'il est possible de prévoir les réponses aux changements climatiques (Mohareb, Kennedy, Harvey, & Pressnail, 2011) en connaissant les demandes de confort individuels des usagers, alors il serait possible d'optimiser le système avec les différents types d'approvisionnement en énergie et en utilisant localement des stockages.

2.5.1.2 Les usages et les usagers

Le comportement de la consommation électrique est fortement lié aux besoins d'usagers individuels (Wong, Fellows, et Liu 2006), besoins qui sont liés à la perception de confort. L'utilisation du chauffage et de la climatisation est liée aux périodes de températures extrêmes. Ainsi pour Bordeaux 1 et Bordeaux IV, la production de chauffage en hiver a été complétée avec le chauffage électrique et la climatisation d'été est utilisée pendant les périodes de températures élevées (surtout à Santiago PUC-CSJ).

Avec le contrôle en temps réel des profils d'occupation (pendant la journée comme dans la semaine) et aussi dans la différenciation des comportements d'utilisateurs (types d'activités), l'intervention peut être opportune dans la livraison des ressources énergétiques et dans la détection des défaillances du système (Ó Gallachóir *et al.*, 2007).

2.5.1.3 Les ressources

Finalement, un autre facteur analysé concerne l'utilisation de ressources énergétiques et particulièrement à Bordeaux 1 les chaudières à gaz et à bois.

L'optimisation de la gestion technique permet :

- l'adaptation de la production selon les variations climatiques (les pentes de la courbe de consommation de gaz)
- la variation dans l'approvisionnement selon le profil d'occupation des bâtiments et types d'usage (types de connexions détaillés dans le sous paragraphe 2.4.2.2)
- le suivi de la qualité de la matière première utilisée pour la production de chaleur (humidité du bois) et l'amélioration de contrats d'approvisionnement.

Compte tenu des variables considérées comme principales dans une amélioration des consommations énergétiques (usagers, usages, climat et ressources) on propose la démarche suivante figure 2.34.

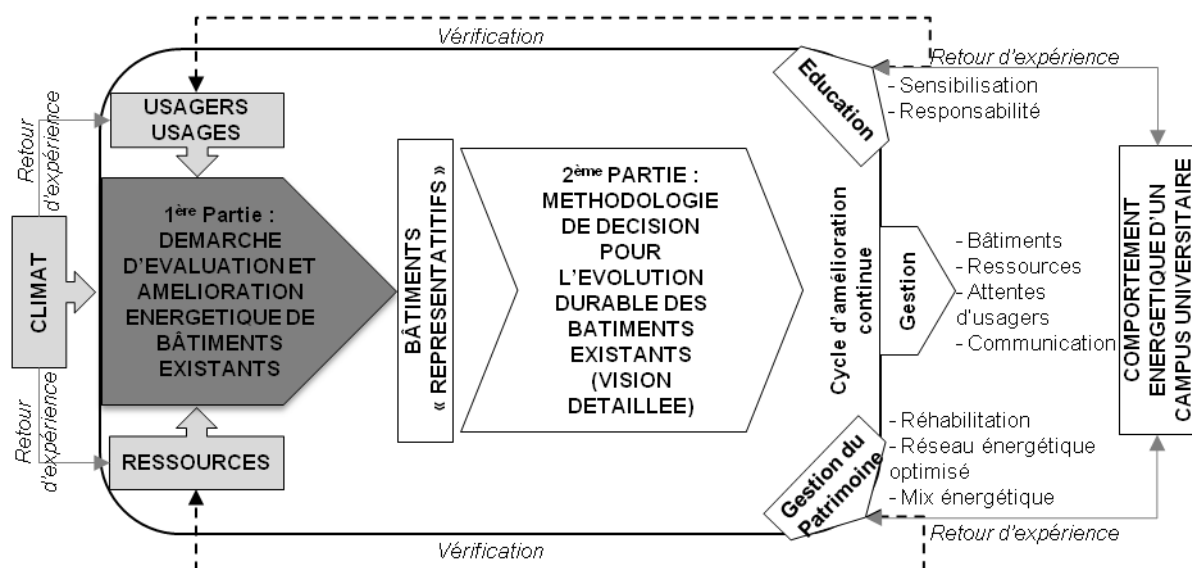


Figure 2. 34 : Démarche d'évaluation et d'amélioration énergétique des bâtiments existants dans les campus universitaires

2.5.2 Les différentes actions d'amélioration énergétique

Connaissant de façon détaillée, d'une part les variables qui sont partie prenante du "problème énergétique" (figure 2.1), c'est-à-dire : le climat, les usagers et les ressources, et d'autre part la façon dont chacune est impliquée dans le système, ainsi que leurs interrelations, nous pouvons trouver les outils nécessaires pour l'évaluation et l'amélioration du comportement énergétique d'un campus universitaire qui vise à être « durable ».

2.5.2.1 La gestion du patrimoine

Cette dimension est la plus fréquemment analysée dans le cadre du développement durable dans l'enseignement supérieur (Wright, T., S. A. (2002), Van Weenen (2000) et Mikulik et Babina (2009)).

Dans le campus universitaire, cette dimension permet d'améliorer le patrimoine bâti au travers de la rénovation ou de la réhabilitation, en contribuant à une meilleure performance du comportement thermique et en faisant diminuer la consommation énergétique avec l'identification des demandes et des réponses dans un système énergétique plus assertif.

La rénovation du campus augmentera la performance énergétique des bâtiments existants et réduira ainsi la consommation d'énergie. Cependant l'implication des usagers est nécessaire pour réduire la consommation d'énergie au fil du temps (Manzanal Fernández, Rodríguez-Barreiro, et Carrasquer 2007), parce qu'un usager sensible aux thèmes énergétiques et environnementaux fera un effort pour réduire sa consommation, contrairement à un usager non sensibilisé ou ne s'étant pas approprié la problématique.

Finalement, si le système de chauffage marche correctement (en limitant les pertes, en adaptant les livraisons) alors la ligne base de consommation et le niveau maximal de demande peuvent être identifiés. Ces différences peuvent être complétées par l'utilisation d'un mix énergétique basé sur les énergies renouvelables énergie géothermique et solaire, pour les campus de Bordeaux (le bois-énergie étant déjà présent) ou solaire pour le campus du Chili. L'identification de périodes de demande différentes et leurs quantités dans une smart-grid locale, peuvent réduire les factures énergétiques.

2.5.2.2 L'éducation

En parallèle au travail de gestion du patrimoine, il est important que les étudiants, le personnel et tous les usagers du campus soient éduqués autour des thèmes énergétiques et environnementaux. Quelques exemples d'initiatives de formation, d'accompagnement et de sensibilisation des acteurs universitaires dans le travail MDE-Campus 2003-2004 sur la maîtrise de la demande d'électricité en relation avec usages et usagers sur 5 campus françaises (ADEME, EDF et Ecocampus 2003), d'initiatives Campus Verts dans les universités durables en France, Europe et Amérique du Nord (Nobatek-Ecocampus, Université de Bordeaux et EDF (2010)), de l'appropriation des étudiants dans le travail de Gómez-Amo et al. (2004) ou de la participation de professeurs ou administratifs dans le travail de Derahim et al. (2012).

Une campagne de sensibilisation (figure 2.35) aux préoccupations énergétiques est aussi nécessaire pour encourager les usagers à prendre conscience et à se responsabiliser sur leur comportement, puisque ce comportement est une partie du « problème énergétique » et les changements de comportement persistent au fil du temps (Nejati et Nejati (2012) et Rodríguez-Barreiro et al. (2013)), comme McMillan et Dyball (2009) décrivent°:

“....la participation (engagement) dans les initiatives de développement durable du campus aide les étudiants non seulement à reconnaître qu'ils sont une partie d'une institution avec un impact écologique, mais aussi que leurs choix individuels et actions font vraiment une différence dans les résultats.....”



Figure 2. 35 : Campagne de sensibilisation pour l'Université Bordeaux 1 – TPG, réalisée par les étudiants de licence 2 Physique et Ingénierie

2.5.2.3 La gestion énergétique

Pour le cas concret du système énergétique dans les campus universitaires, le décideur doit connaître, comprendre et utiliser toutes les variables du problème (Valderrama Ulloa et Schott 2012), s'il veut livrer des solutions appropriées. Il doit :

- Comprendre les comportements des usagers et connaître leurs exigences (enquête énergie et satisfaction qui sera analysée dans le chapitre 4).
- Connaître les ressources, pour améliorer leur mise en œuvre (dans ce chapitre on a analysé le fonctionnement des ressources présentes dans les différents campus et sites) (Pereira et al. 2013)
- Connaître le contexte climatique, pour prévoir et optimiser la performance des ressources (détaillé dans le chapitre 1)

De plus comme suggèrent Levy et Dilwali (2000) ou Matarazzo-Neuberger et Manzione Filho (2010) pour qu'un système d'évaluation et amélioration énergétique soit de qualité, il doit : distribuer les informations qui sont utiles pour chaque entité du système qui peut donc réagir de façon opportune ; évaluer les changements pour détecter et empêcher des anomalies (Costa et al. 2013); prendre en compte tous les acteurs universitaires dans les décisions énergétiques (Méry 2008, Fondaterra 2010); fournir les informations sur les avantages à agir avec des pratiques durables.

Toutes ces relations et types de réponses devraient être vérifiés périodiquement avec un travail constant sur le retour d'expériences pour modifier et prendre des décisions à temps, et de plus vérifier que ces décisions ont été correctes et bien appliquées.

Pour cela, il est nécessaire de créer une base de données d'indicateurs (chapitre 3) qui peuvent livrer des valeurs objectives de cette gestion améliorée et dans le temps assurer que toutes les décisions qui ont été prises sont en rapport avec les stratégies énergétiques du campus (Lozano (2006) et Lozano García, Kevany, Huisingh (2006)).

Les actions d'amélioration énergétique de la méthodologie sont indiquées dans la sortie de la figure 2.33, actions qui seront expliquées dans le chapitre 4 :

- Travail de sensibilisation et de communication aux usagers
- Caractériser des bâtiments et maîtrise de leurs usages
- Maîtriser et encadrer les attentes d'usagers
- Travaux de réhabilitation

2.6 Conclusion

De façon générale la problématique énergétique d'un campus universitaire doit considérer la demande liée aux caractéristiques des bâtiments, aux performances du système de production et du réseau de distribution, aux types d'usage et de suivi. Tout cela doit être intégré relié aux conditions climatiques (une relation avec le DJU, la base de 18°C pour la France ou 15°C pour le Chili) et doit répondre aux besoins particuliers de confort traduits par les perceptions et les opinions des usagers.

Par conséquent, il est nécessaire de souligner l'importance de considérer différentes visions dans une gestion efficace des ressources qui soit capable de répondre aux différentes attentes des usagers, en considérant différents facteurs qui interviennent dans le comportement énergétique.

Comme on indiqué en préambule, ce chapitre a eu pour objectif principal de réaliser une description globale du comportement énergétique d'un campus universitaire, en cherchant puis en analysant les principales variables intervenant dans ce comportement. Les principales conclusions sont alors les suivantes :

- L'homme a toujours cherché à améliorer sa condition de vie par des adaptations de son environnement immédiat. La perception de son « bien être » se traduit par des jugements thermiques exprimés en termes de sensation, de préférence ou de confort (Peuportier B. 2013). Donc, le paramètre influençant directement la variabilité de la consommation énergétique est le facteur climatique et par conséquent la sensation de « bien – être » que les usagers percevront.
- Un autre facteur qui doit être considéré dans la gestion, est le profil d'occupation, puisqu' en analysant d'une manière générale et à une échelle de temps et d'espace de réflexion plus petite, on a pu identifier le même profil de comportement pour la consommation, ce qui permet à cette variable de donner un poids plus important dans la réflexion de la gestion. En effet, avec un suivi en temps réel de ces profils d'occupation on peut faire la différenciation opportune dans la production et distribution des ressources énergétiques et optimisation de postes énergétiques.
- Finalement l'efficacité du fonctionnement des systèmes énergétiques a été analysée de façon qualitative (chauffage à gaz et à bois et réseau électrique), puisqu'elle est liée au facteur climatique et aux profils d'occupation. Ces systèmes doivent donc être conçus pour répondre à la demande, pour avoir une gestion technique adéquate au suivi d'usage, et pour l'optimisation de son fonctionnement (distinction des périodes, quantités d'approvisionnement et pic de consommation).

- Enfin, il est important de souligner que, en plus d'améliorer la manière de gérer l'énergie, il est important de donner une formation plus appropriée aux étudiants, personnels et à tous les usagers du campus, sur les questions énergétiques et environnementales et ceux-ci doivent être considérés dans les décisions politiques de l'Université. Cela implique de promouvoir des approches globales plus intégrées, de mettre en place de nouvelles formations à toutes échelles (licence, master et doctorat) en disciplines sur la conception de la performance énergétique et le développement durable. Et cela implique également de remettre les usagers au « *cœur des systèmes sociotechniques, de les considérer comme acteurs de la performance énergétique, dotés d'outils de contrôle et pilotage simples et performants* », (Peuportier B., 2013), puisqu'en fin de compte c'est au travers eux que les Universités existent (Probert 1995).

3 LES INDICATEURS D'ÉVALUATION : UNE APPROCHE QUANTITATIVE

Sommaire

3.1 Introduction	123
3.2 Contexte	124
3.3 Un état de l'art de systèmes d'évaluation énergétique et environnementale et travaux scientifiques appliqués aux bâtiments	127
3.4 La construction de la ligne de base des indicateurs d'évaluation énergétique et environnementale de bâtiments tertiaires	146
3.5 L'évaluation des indicateurs appliquée aux bâtiments tertiaires d'un campus universitaire	149
3.6 Conclusion	160

3.1 Introduction

Les conséquences climatiques liées à nos émissions de gaz à effet de serre, la pollution des différents milieux de notre planète, le tarissement des ressources énergétiques et non énergétiques viennent étayer et justifier la nécessité de disposer, puis de mettre en œuvre une évaluation environnementale qui permettra d'agir et de mesurer ces problématiques environnementales. Dans le secteur de la construction ces évaluations sont les certifications.

Dans la construction il y a, à peu près 150 certifications (Cooperación de Desarrollo Tecnológico & Cámara Chilena de la Construcción, 2010a) d'évaluation du développement durable dans les bâtiments. Cela peut être du type obligatoire ou volontaire, local, régional ou international. Ces certifications sont appliquées dans l'industrie, le secteur commercial ou résidentiel, dans la phase de la conception, la construction, l'exploitation ou la réhabilitation. On peut y trouver des systèmes de notation (telles que LEED), des notes (comme CASBEE), des niveaux de performance (HQE)... Leurs indicateurs sont de type descriptif, comparatif, structural, autres (Patlitzianas, Doukas, Kagiannas, & Psarras, 2008). En outre, ces systèmes peuvent évaluer chaque thématique environnementale des bâtiments (consommation d'eau, consommation d'énergie, confort, déchets, impacts environnementaux, etc.) séparément ou inclus dans une vue unique au travers des indicateurs d'évaluation. Avec tous ces types de certifications le langage devient alors difficile (Sustainable Building Alliance, 2012) ou (Haapio & Viitaniemi, 2008).

En plus, comme les exigences économiques, géographiques, environnementales ou sociales changent pour chaque lieu (Weissenstein & Bignon, 2010) et que les types d'utilisateurs (propriétaires, gestionnaires, décideurs, exploitants) aussi ont différentes exigences (Mitchell, 1996), sera-t-il possible d'utiliser une certification suffisamment partageable en tout lieu et pour chacun ?

Les premiers indicateurs d'évaluation pour le développement durable ont été proposés au début des années 90 (OCDE, Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico, 1993) ou (EPA - Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos, 1995) et aujourd'hui nous pouvons trouver plus de 800 entrées enregistrées dans la base de données des initiatives, recueil d'indicateurs de développement durable (International Institute for Sustainable development (IISD), 2010). Cette hausse reflète la popularité qu'ont atteint ces types d'indicateurs, popularité qui malheureusement, a été accompagnée par une augmentation de l'ambiguïté de l'évaluation et de la confusion dans la caractérisation de chacun et donc dans les méthodes et mesures évaluation (Parris & Kates, 2003 et Kajikawa, Inoue, & Goh, 2011).

Un indicateur est un descripteur, une mesure (quantitative ou qualitative) qui décrit un phénomène. L'utilisateur choisit un indicateur pour avoir un retour d'expérience sur l'état global d'un problème (Bauler, 2012 et Heink & Kowarik, 2010). Celui-ci est dépendant du contexte d'utilisation, s'il est "retiré" du contexte dans lequel il a été créé, il n'aura ni le même sens et ni la même valeur. Alors il n'existe pas de bons ou mauvais indicateurs, mais plutôt des indicateurs appropriés à un contexte particulier.

A partir de cette définition d'un indicateur d'évaluation pour le développement durable l'objectif de ce chapitre est de contribuer à construire une ligne de base d'indicateurs qui constitue une méthodologie d'évaluation des bâtiments tertiaires dans la phase d'exploitation et qui soit partagé dans différents contextes.

Pour cela on homogénéise et on va mettre en cohérence les indicateurs récurrents, qui sont dans la plupart des cas considérés comme les plus importants dans les différentes certifications analysées (CASBEE, LEED, HQE, BREEAM, DGNB et LBC), puis analyser en détail les unités, les caractéristiques des mesures et des types d'intervalle adoptés dans ces références.

Enfin, dans ce chapitre on évalue trois bâtiments représentant les différents critères qui font partie de la ligne de base des indicateurs d'évaluation.

3.2 Contexte

La méthodologie d'évaluation consiste en la construction d'une fourchette de critères « partagés » que l'on traduira en exigences des gestionnaires ou des usagers relatives aux grandes thématiques du développement durable et ce dans le cadre de bâtiments tertiaires

Les activités spécifiques développées dans les bâtiments tertiaires sont considérées. En particulier dans cette étude dédiée à de activités réalisées dans les campus universitaires les critères seront appliqués aux bâtiments administratifs, de recherche ou d'enseignement.

3.2.1 Les phases de la construction de la ligne de base des indicateurs

La méthodologie est divisée en trois étapes, dont le schéma est présenté dans la figure 4.1:

- La première est la construction de la définition d'un indicateur qui nous précise le cadre de travail de recherche sur les systèmes d'évaluation internationaux
- La deuxième est la comparaison des principaux systèmes d'évaluation et travaux scientifiques qui nous permettront de définir les indicateurs, les intervalles et les mesures à utiliser dans notre système d'évaluation

- Enfin la troisième est l'évaluation des indicateurs appliqués aux bâtiments tertiaires d'un campus universitaire en phase d'exploitation

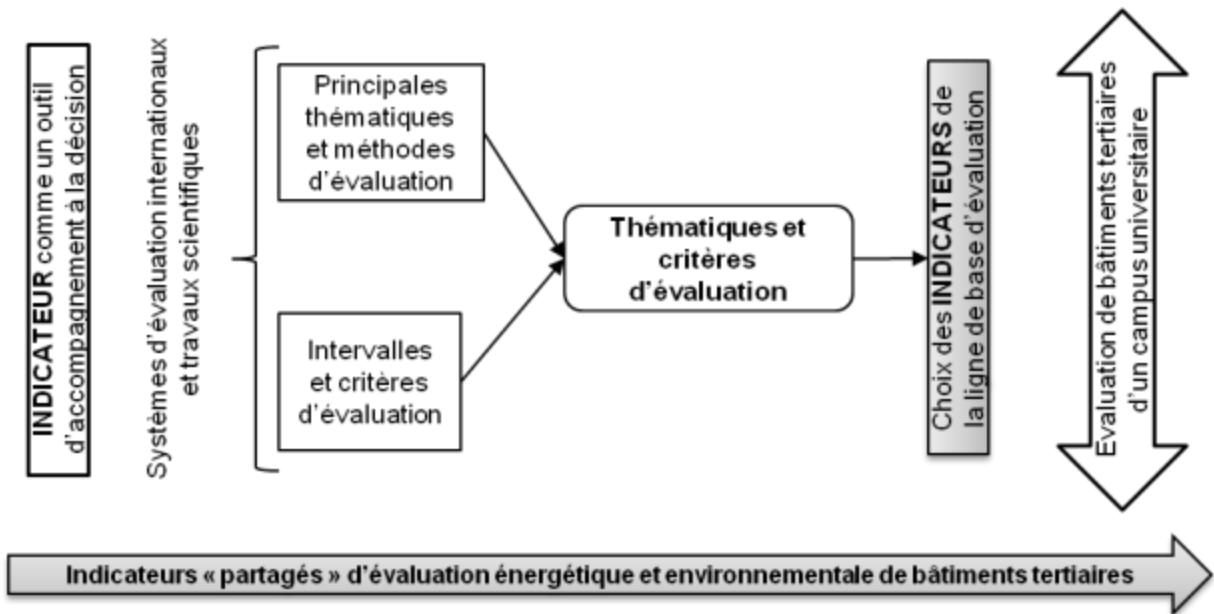


Figure 3. 1 : Le schéma de construction de la ligne de base des indicateurs pour le système d'évaluation

3.2.2 Qu'est ce qu'un indicateur ?

Selon la définition proposée par l'Organisation pour la Coopération et le Développement Economique (OCDE, 1993) « l'indicateur est un paramètre ou une valeur dérivée de paramètres, qui donne une information d'un phénomène, sa principale fonction est de réduire le nombre de mesures et paramètres pour donner une présentation « exacte » de la situation et simplifier le processus de communication »

L'indicateur est un outil qui permet de mesurer l'état ou l'évolution d'une caractéristique dans le temps. Dans notre modèle, il a été défini pour évaluer la qualité d'une variable ou d'une réponse en fonction de l'objectif fixé par le décideur, en livrant une vision synthétique (analyse de données compilées) et simple du système (bâtiments tertiaires), en facilitant la gestion et l'accompagnement à la prise de décision (type de réhabilitation).

Un indicateur, à partir de la définition de Yopez-Salmon, (2011), peut être une variable (quantité de consommation d'électricité), ou une fonction de variables (consommation par mètres carrés de surface). Les plus utilisés sont quantitatifs qui ont besoin de la définition d'une échelle et de limites d'évaluation (intervalles) mais il

existe aussi des indicateurs qualitatifs (degré de satisfaction de l'utilisateur par rapport à la qualité de l'air intérieur, par exemple) (Boulangier P.-M., 2004).

La méthode de construction d'un indicateur commence par la compilation des données primaires au travers d'enquêtes ou de campagne de mesures, d'informations objectives qui nous permettent de les quantifier de façon quantitative ou qualitative. Ces données sont analysées et sont regroupées pour obtenir un ordre de grandeur et finalement on obtient un indicateur comme instrument de mesure de l'évolution de la prise de décision, comme on l'observe dans la figure 3.2.

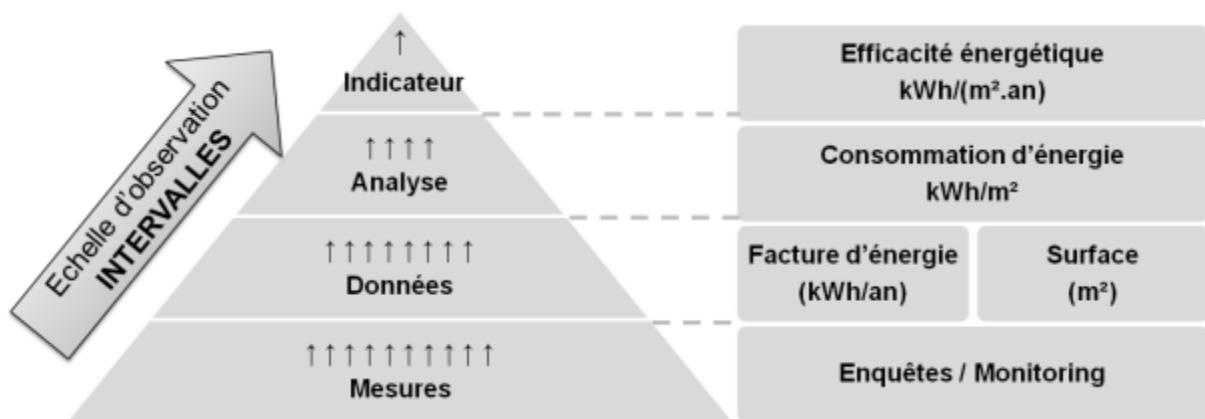


Figure 3. 2 : Les étapes dans la construction d'un indicateur

Dans le domaine de la construction un système d'évaluation est la somme de beaucoup d'indicateurs : environnementaux ou énergétiques, locaux, régionaux ou internationaux, pour la conception, la construction ou l'exploitation, ou pour les industries, les logements ou les bâtiments tertiaires. Leurs principales fonctions peuvent être divisées en trois phases, comme résumé dans la figure 3.3.



Figure 3. 3 : Les fonctions de l'indicateur dans un projet de construction

Les principales caractéristiques d'un indicateur sont alors :

- de parfaitement décrire le phénomène à étudier,
- d'obtenir facilement information pour le construire,
- de varier de façon monotone par rapport au phénomène étudié,

- d'être précis avec une marge d'erreur acceptable en fonction des grandeurs observées (types de mesures).

Dans un projet de construction et en particulier ici pour l'évaluation de l'amélioration énergétique et environnementale de bâtiments tertiaires, les indicateurs seront utilisés comme un outil :

- de diagnostic : ils représentent l'état actuel de la problématique énergétique et environnementale,
- de suivi : ils doivent détecter les défauts, les problèmes, les irrégularités afin de prévoir les impacts potentiels futurs,
- de communication : pour ses utilisateurs, ses concepteurs, et tous les acteurs impliqués et
- d'accompagnement à la décision : ils permettent d'évaluer l'efficacité des actions mises en place, de réorienter les stratégies choisies, enfin d'évaluer les progrès réalisés et ceux qui restent à faire.

Finalement dans la méthodologie, la manière d'« évaluer » la réalisation des objectifs se fera au travers d'intervalles, ce qui nous permettra de déterminer la réalisation et/ou la performance de l'indicateur. Chacun des intervalles adoptés dans la méthode d'évaluation a été défini à partir de la comparaison de différents systèmes d'évaluations : certifications environnementales, valeurs recommandées par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS), enquêtes d'experts et dans quelques cas par des valeurs proposées dans les réglementations locales (comme c'est le cas de la consommation de ressources et des impacts environnementaux) et des valeurs du contexte local (Réglementation Française ou codes de certification de qualité) valeurs qui devraient être adaptées à chaque contexte spécifique.

3.3 Un état de l'art de systèmes d'évaluation énergétique et environnementale et travaux scientifiques appliqués aux bâtiments

Les principales raisons de l'utilisation d'un système d'évaluation (à partir d'ici appelé indistinctement « système » ou « certification ») sont du point de vue du maître d'ouvrage le fait que les certifications lui permettent de réduire le coût de la conception, augmentent la vitesse de vente (marketing), pour le propriétaire d'avoir une diminution de l'amortissement, augmentations d'occupation et diminution des coûts d'exploitation. Et il est indiscutable que pour les usagers ils donnent un argument de garantie de la performance de la construction pour le bien-être et leur productivité (World Green Building Council, 2013).

Les systèmes d'évaluation environnementale des bâtiments permettent :

- d'inciter les propriétaires à améliorer les performances des bâtiments,
- d'informer les décideurs pendant la conception,

- de fournir des mesures objectives de l'incidence du bâtiment sur les systèmes naturels (Cole, 1999) et
- d'évaluer la performance environnementale d'un bâtiment.

Dans le processus des critères explicites se dégagent trois éléments (Cole, 2003).

- la structure : un ensemble de critères de performance environnementale organisé de façon logique,
- le score : l'affectation d'un certain nombre de points ou de crédits pour chaque thématique environnementale qui peuvent être gagnés en répondant à niveau de performance donné et
- l'évaluation : un moyen de montrer la note globale de la performance environnementale d'un bâtiment

Dans cet état de l'art, nous nous concentrons principalement sur les thématiques qui sont en rapport avec la satisfaction des usagers et du bien-être de l'environnement.

La comparaison sera faite entre les six systèmes d'évaluation reconnus internationalement :

- LEED (Canada Green Building Council - Conseil du Bâtiment Durable du Canada, 2009),
- CASBEE (Japan Sustainable Building Consortium, 2006), HQE (Certivéa, 2009),
- BREEAM (Building Research Establishment Ltd., 2008),
- DGNB (German Sustainable Building Council, 2009) et
- LBC™ (International Living Building Institute (ILBI), 2010).

La description générale de chacun est proposée par la suite et le détail (Air Quality Sciences, 2009) est décrit dans l'annexe A.3.1.

3.3.1 La comparaison entre divers systèmes d'évaluation internationaux

La comparaison des différents systèmes d'évaluation environnementaux peut être faite ou être classée en considérant les aspects suivants.

- le type d'applicabilité : selon les types de construction (logement, bâtiment de bureaux, industrie, etc.) et selon la phase du projet (conception, construction ou exploitation),
- la maturation : le temps d'utilisation, la stabilité dans le temps, la représentativité (à niveau local, ou à l'international) et l'évolution dans les versions du système,
- le contenu technique : en fonction des types de thématiques environnementales, les destinataires (maître d'œuvre, gestionnaires) et l'objectif du système,

- la mesure : le type de ponctuation (notes, niveau de performance), d'échelles, de pondérations et les types de présentation des résultats (profil d'évaluation, notation finale),
- l'accessibilité : la disponibilité de l'information, le soutien pendant son utilisation et le prix du système d'évaluation et
- l'évaluation : les documents, les phases de vérification, le processus, la durée d'évaluation, le rapport final et l'évaluation finale.

Pour la construction de la ligne de base des indicateurs, à partir de la comparaison des systèmes internationaux, nous avons considéré dans le *type d'applicabilité* les bâtiments tertiaires en phase d'exploitation, dans la *maturation* les systèmes reconnus internationalement, pour le *contenu technique* les thématiques résumées dans le tableau 3.1 et pour la *mesure* les aspects décrits dans les tableaux 3.5, 3.6 et 3.7.



LEED, 1998 (Leadership in Energy and Environmental Design) C'est une initiative privée du USGBC (United States Green Building Council). Toutefois, sa création était à la charge du Département d'Énergie américain, pour tous les bâtiments

construits grâce aux fonds fédéraux.

C'est une des initiatives qui a gagné le plus de terrain (elle est présente dans plus de 80 pays), avec plus de 36 000 projets déclarés, parmi lesquels 7 203 sont certifiés et comprenant plus de 20 000 membres, incluant fabricants de matériaux, architectes et associations de commerce. Elle possède sept thématiques auxquelles sont octroyées une série de pré-requis et de crédits (des différents procédés à suivre et à justifier pour l'obtention des points).



CASBEE, 2002 (Comprehensive Assessment System for Built Environment Efficiency), fait partie du consortium pour la Construction Durable au Japon et a été développée en trois étapes.

La première étape visait à améliorer la qualité de l'air intérieur pour les occupants. La deuxième, datant des années 60, concernait la pollution de l'air à Tokyo. Enfin la troisième, l'actuelle version de la certification, se soucie de l'impact d'un bâtiment sur son environnement intérieur et extérieur. Cette certification est basée sur les expériences de LEED et BREEAM et se concentre sur l'impact des bâtiments au-delà du cadre des caractéristiques du site et du cycle de vie. Elle a sept thématiques, celles-ci sont observées depuis l'impact qu'elles génèrent.



HQE, 2005 (Haut Qualité Environnementale), cette démarche est focalisée et conçue pour évaluer la performance des bâtiments dans le contexte spécifique de la France. Elle partage et améliore un certain nombre d'aspects appartenant à d'autres certifications

Elle évalue la qualité environnementale des opérations de construction ou de rénovation, et a pour but de contrôler les impacts des bâtiments sur l'environnement extérieur et créer un environnement intérieur sain et de bien être. Au total elle a 14 thématiques, regroupées dans deux objectifs principaux et en sous-catégories. L'objectif de chaque indicateur est déterminé par le concepteur, aucune solution architecturale ou technique n'est imposée; le choix est justifié et approprié au contexte.

The logo for BREEAM, featuring the word "breeam" in a lowercase, sans-serif font. The letters "b", "r", "e", and "a" are in a light green color, while "e", "e", "a", and "m" are in a darker green. A thick horizontal line is positioned below the text.

BREEAM, 1990 (Building Research Establishment Environmental Assessment Methodology), est une méthode d'évaluation et de certification conçue pour mesurer la durabilité des nouveaux

bâtiments non résidentiels au Royaume-Uni.

Elle est régulièrement mise à jour et adaptée au reste de l'Europe. Cette méthode calcule un grade environnemental, en accordant des points, pour satisfaire les nécessités d'une série de critères, se traduisant par une réduction de l'impact environnemental négatif du bâtiment, et l'augmentation de ses bénéfices à l'environnement. Elle évalue l'impact de 10 thématiques : chacune de celles-ci est pondérée conformément à l'importance perçue des problèmes environnementaux que la section a pour objectif d'aborder.



DGNB, 2007 (German Sustainable Building Certificate – German Sustainable Building Council).

Ses principaux objectifs sont : développer et promouvoir des matériaux, des solutions de planification, la construction ou les opérations sur des bâtiments selon des critères durables, concevoir un label sur la qualité de la construction durable, considérer les aspects de santé, de confort et de performance des utilisateurs. Tous les critères ont un poids différent, selon qu'ils sont considérés comme significatifs ou non. Elle possède 6 thématiques et 49 critères, à chaque critère on peut assigner un maximum de 10 points, dépendant de la qualité documentée ou calculée. Cette certification se base sur le concept de la planification qui permet de définir le plus tôt possible les objectifs durables et d'y joindre les technologies récentes.



LBC, 2006 (Living Building Challenge™, International Living Building Institute (ILBI)).

Son concept a émergé dans les années 90, durant l'établissement du projet EpiCenter, qui était sponsorisé par le National Institute of Standards and Technology. En 2005, son auteur McLennan a commencé à traduire l'idée d'un bâtiment "vivant" dans des standards codés. La certification a 7 thématiques de performance, subdivisées en 20 critères, chacun se concentra sur une sphère d'influence spécifique. Cette compilation de critères est applicable à presque tous les types de projets concevables, mais chaque impératif de chaque thématique est obligatoire.

Les méthodes d'évaluation les plus complètes au niveau des thématiques étudiées (Lee & Burnett, 2008) et les deux systèmes avec une utilisation de plus en plus forte à l'international (R. J. Cole & Valdebenito, 2013) sont les deux leaders mondiaux BREEAM et LEED, CASBEE, la certification environnementale japonaise s'en rapprochant. Ces méthodes prennent en compte un grand nombre de problématiques durables, et proposent des objectifs et des critères d'évaluation concrets, spécifiques et chiffrés.

On peut trouver beaucoup de points communs entre BREEAM et LEED (objectif, approche et structure) (Sustain, 2008) mais il y a aussi différences dans la façon de mesurer les objectifs et le niveau de la performance attendu. (Inbuilt, 2010 et Sleeuw Martin, 2011).

Mais bien qu'elles répondent aux mêmes thématiques, il existera toujours des différences fondamentales entre ces certifications, illustrations de la culture des pays dans lesquels elles ont été développées. CASBEE, notamment, propose un lien plus symbiotique avec l'environnement comparé aux certifications occidentales (Macías & Garcia Navarro, 2010). Par exemple, CASBEE encourage le développement et le management des espaces verts (attrait de la faune et plantation de flore locale), les espaces intérieurs fortement connectés à l'extérieur (terrasses, pergolas...), et la prise en compte des personnes et de la culture (insertion historique et esthétique, aménagements pour les usagers...) (Blaviesciunaite, A. & Cole R.J., 2012).

De même, l'échelle d'application des certifications occidentales se limite souvent aux environnements immédiats du bâtiment, voir au bâtiment lui-même. Celles-ci sont plus axées sur l'évaluation du « produit-bâtiment » et sur ses performances environnementales, économiques et sociales.

Les systèmes de notation sont également différents. La notation occidentale se base sur des pré-requis et des buts fixes, et la note globale se calcule par addition de crédits attribués à chaque critère rempli. La notation CASBEE est plus évolutive: elle considère les efforts réalisés pour répondre aux problématiques et les notes se font par niveau (« level »). Les crédits ne sont pas seulement additionnés, mais pondérés par les avis des différentes parties prenantes du bâtiment et l'évaluation se fait sous la forme d'une présentation graphique de la réponse aux différentes thématiques. C'est une méthode de notation qui laisse plus de liberté que les méthodes par la somme de crédits.

La certification LBC ne remplit pas beaucoup de critères à cause de son statut particulier. C'est une méthode d'évaluation très philosophique et évasive qui donne très peu d'indications techniques mais place la barre de ses exigences très haute : par exemple, elle requiert que 100% de l'énergie utilisée soit renouvelable et produite sur le site. C'est une définition générale qui laisse la place aux particularités locales et qui pousse les équipes de conception à adopter des solutions adaptées à ces

particularités. Elle introduit cependant des notions intéressantes comme la « Biophilie », c'est-à-dire les bénéfices du contact avec la nature (Alençar & Cole, 2012).

La certification DGNB se base essentiellement sur des normes allemandes et européennes : EnEV 2007 et DIN EN ISO 14040 et 14044. C'est une certification qui englobe les principales thématiques du développement durable : écologie, économie, socio-culturel et qualité fonctionnelle, techniques, processus et qualité du site ; d'où sa polyvalence.

La démarche HQE est un guide d'analyse environnemental et de pilotage de projets. Elle couvre toutes les thématiques nous intéressant, mais en tant que solution de management, elle répond de manière qualitative aux problématiques rencontrées. En effet, elle laisse au maître d'ouvrage la liberté de choisir les cibles qu'il veut privilégier, et aux concepteurs le choix des techniques pour atteindre les objectifs fixés, n'imposant pas de décisions techniques particulières.

Alors les différentes thématiques apparaissant dans les certifications ont été groupées en différentes parties : la gestion, le site (emplacement), environnement intérieur, consommation des ressources, impacts environnementaux, dimension sociale et économique, innovation et conception, comme on résumé dans le tableau 3.1.

La première ligne de base d'indicateurs, qu'on observe dans la dernière colonne du tableau 3.1, qui ressort de cette comparaison est composée par les thématiques :

- environnement intérieur en confort acoustique, visuel, hygrothermique et olfactif,
- la consommation de ressources en énergie et mix énergétique,
- les impacts environnementaux en émissions de CO₂,
- la gestion sera intrinsèquement considérée au travers de l'évaluation constante de ces indicateurs,
- le site n'a pas été pris en compte,
- l'innovation dans cette étape n'est pas considérée et finalement
- la dimension socio-économique sera appréciée dans l'étape finale du point de vue des scénarios sociaux, environnementaux et économiques.

CERTIFICACION	CASBEE	LEED	HQE	BREEAM	DGNB	LBC	CE TRAVAIL
Pays	Japon	Etats Unis	France	Angleterre	Allemagne	Etats Unis	Local adaptable
Année de création	2002	1998	2005	1990	2007	2006	2012
Type de note	BEE (environnement / efficacité)	Certifié – argent – or - platine	Base – performante – très performante	Passé – bien – très bien – excellent - remarquable	Bronze – argent - or	Quantité de pétales	Echelle de 0,01 à 0,99 (fonction de désirabilité) Chapitre 4

THEMATIQUES							
Gestion	Q2 Qualité de service	Distribuées en IEQ – W - MR	SME Cible 3 – Chantier - Cible 7 – Gestion	M : Gestion	Qualité des processus		Vision gestionnaire
Site	Q3 environnement extérieur	SS – Sites durables	Cible 1 – Environnement immédiate	LE usage de sols et écologie et T – Transport	Qualité de l'emplacement	Site	Pas ici – phase d'exploitation
Environnement intérieur	Q1 – environnement intérieur	IEQ Qualité environnement intérieur	Cibles 8-9-10-11 : Confort Cibles 12, 13 : Santé	HW : Santé et bien être	Performance, santé, confort et satisfaction	Santé	Confort: olfactif - visuel - acoustique - hygrothermique
Consommation de ressources	LR1 – énergie LR2 – ressources et matériaux	EA – énergie et atmosphère W – Eau MR – Matériaux et ressources	Cible 4: énergie, Cible 5 et 14: eau, Cible 2: Produits Cible 6: Déchets	E – Énergie W – Eau MW – Matériaux et déchets	Utilisation et ressources	Eau - Énergie - Matériaux	Consommation d'énergie finale – Energies renouvelables
Impacts environnementaux	LR3 – environnement externe		Cible 4 : Energie	Pollution, usage de sols et écologie	Impact environnemental global et local		Emissions de CO ₂
Dimension sociale et économique	Q3 – bien être et dimension social				Fonctionnalité - Qualité économique	Equité	Scénarios: Social – Environnemental - Economique
Innovation et conception		Innovation et crédit régional		Innovation	Qualité fonctionnel (conception et architecture) – Techniques	Beauté	Pas dans cette version

Tableau 3.1 : Comparaison des certifications internationales

3.3.1.1 Un zoom entre les systèmes : LEED et HQE

Pour compléter cette première comparaison, on a décidé de faire un zoom sur les deux certifications très éloignées et avec des contextes d'évaluation très différents : LEED et HQE. La comparaison a deux objectifs, d'abord montrer les faiblesses et les forces de chacune et ensuite, de compléter la ligne de base d'indicateurs.

Forces LEED :

- Bien que son schéma soit spécifique aux Etats-Unis, ses critères sont utilisés dans le monde entier, sans considérer le contexte local
- Le professionnel accrédité LEED (LEED AP) fournit l'appui pendant l'évaluation et donne des conseils à l'équipe de conception
- L'accréditation est faite indépendamment du processus entier
- À moins que l'indicateur soit obligatoire, tout indicateur peut donner des points et il y a donc des indicateurs optionnels qui peuvent être valorisés.

Forces HQE :

- Il y a des points supplémentaires à toute nouvelle amélioration et à la maintenance du système de certification
- Pour l'obtention de « points », la certification donne plusieurs possibilités
- HQE donne une grande importance au confort et à la santé des occupants (Valderrama Ulloa et al. 2012)
- Les AMO (Assistance à Maîtrise d'Ouvrage) HQE créent un changement important dans le management des projets (Abrial S. et al. 2008)

Faiblesses LEED :

- Due au type de distribution des crédits, la vraie économie d'énergie des bâtiments LEED est hautement discutée (dans moyenne 28% à 35% des bâtiments LEED, elle utilise plus d'énergie que les bâtiments conventionnels (Newsham, Mancini, & Birt, 2009),
- La vraie amélioration de la qualité de l'air est discutée (6% d'amélioration par rapport à une non LEED (Altomonte & Schiavon, 2013)
- Le pourcentage d'amélioration dépend du jugement de l'assesseur LEED
- Les coûts impliqués dans l'obtention de la certification sont élevés et l'investissement est récupéré à très long terme
- Le haut coût de maintenance de l'équipement proposé n'est pas considéré (Scofield, 2009)
- La vision d'impacts est de « l'unité » de ce qui est certifié, dans un temps spécifique
- Comme tous les points sont égaux, la tendance est de choisir les moins chers sans envisager le bénéfice sur l'impact environnemental ou sur l'économie qu'ils génèrent dans le long terme, puisque la réalité locale où le bâtiment est placé n'est pas analysée (Cooperación de Desarrollo Tecnológico & Cámara Chilena de la Construcción, 2010b).

- Les études doivent être traduites dans les normes américaines et donc dans les unités associées (surface en pieds, consommations en gallons de pétrole), ces exigences supplémentaires ont un coût loin d'être négligeable.

Faiblesses HQE :

- Malgré une identification européenne, c'est seulement à partir de 2010, qu'elle est utilisée en Belgique, Luxembourg et en l'Algérie
- Parmi les 14 cibles, les professionnels s'engagent à accomplir uniquement 3 cibles de niveau Très Performant (TP) et 5 cibles de niveau Performante (P)
- Comme c'est une initiative privée elle est utilisée comme argument commercial (Boonstra C. & Dyrstad Pettersen T., 2003)
- Son utilisation commence dans les premières phases du projet et exige la participation de tous les professionnels; une faiblesse notable est la manque de travail multidisciplinaire (Kosmopoulos & Frigidou, 2005)
- C'est une méthodologie imposée : on doit regarder plus la méthode que les résultats (Le Moniteur, 2012)

De l'analyse des faiblesses et des forces de HQE et LEED, cette méthodologie développe ici met l'accent et vise à améliorer deux points : l'adaptabilité du modèle et le niveau de score. Dans notre cas, l'adaptation dépend des priorités de chaque utilisateur. Cette méthode ne donne pas de score, mais le degré de conformité des critères [0,01 – 0,99], comme on verra dans le chapitre 4.

A partir de la comparaison des certifications (tableau 3.1.), on a regroupé les 14 cibles avec 125 indicateurs HQE et les 7 thématiques avec 61 indicateurs LEED en fonction de deux critères.

- 1^{er} critère : Etape du cycle de vie (ici seulement exploitation) et l'élément d'étude (bâtiment comme unité et ses usagers). Le résultat est donné dans le tableau 3.2.
- 2^{ème} critère - Caractéristiques de l'indicateur : les indicateurs qui ont la même thématique (indicateurs LEED avec le même objectif est le même que celui des indicateurs HQE); les indicateurs qui sont complémentaires (indicateurs LEED dont la forme est un complément d'un indicateur HQE) et / ou ceux qui sont très semblables (indicateurs LEED que si bien ils sont très semblables à ceux de la HQE, mais dont la manière de le mesurer varie). Le tableau 3.3. résume les résultats.

Thématique	HQE - France		LEED - Canada	
Environnement Intérieur	Cible 8 - Hygrothermique	8 indicateurs	QAI	1 indicateur
	Cible 9 - Acoustique	6 indicateurs		
	Cible 10 - Visuel	8 indicateurs	QAI	2 indicateurs
	Cible 11 - Olfactif	4 indicateurs	QAI	4 indicateurs
	Cible 12 - Qualité sanitaire des espaces	6 indicateurs	QAI	5 indicateurs
	Cible 13 - Sanitaire de l'air	10 indicateurs	QAI	3 indicateurs
Impacts environnementaux	Cible 4 - Energie	1 indicateur	EA	1 indicateur
Dimension sociale et économique	Cible 9 - Acoustique	2 indicateurs	QAI	1 indicateur
			EA	1 indicateur
	Cible 11 – Olfactif	1 indicateur	ID	2 indicateurs
	Cible 10 - Visuel	1 indicateur		
Consommation de ressources	Cible 4 - Energie	6 indicateurs	EA	7 indicateurs
TOTALES	7 cibles	53 indicateurs	3 thématiques	27 indicateurs

Tableau 3. 2 : Le premier regroupement des indicateurs HQE et LEED selon l'étape du cycle de vie et le bâtiment

Thématique	HQE - France		LEED - Canada	
Environnement Intérieur	Cible 8 - Hygrothermique	4 indicateurs	QAI	1 indicateur
	Cible 9 - Acoustique	1 indicateur		
	Cible 10 - Visuel	4 indicateurs	QAI	2 indicateurs
	Cible 11 - Olfactif	1 indicateur	QAI	1 indicateur
Impacts environnementaux	Cible 4 - Energie	1 indicateur	EA	1 indicateur
Dimension sociale et économique	Cible 9 - Acoustique	2 indicateurs	QAI	1 indicateur
			EA	1 indicateur
	Cible 11 – Olfactif	1 indicateur		
Consommation de ressources	Cible 10 - Visuel	1 indicateur		
	Cible 4 - Energie	6 indicateurs	EA	7 indicateurs
TOTALES	5 cibles	21 indicateurs	2 thématiques	14 indicateurs

Tableau 3. 3 : Le deuxième regroupement des indicateurs HQE et LEED selon leurs caractéristiques

Enfin, le tableau 3.4 résume les critères d'évaluation et indicateurs retenus à l'issue de cette comparaison. La définition des intervalles et du type de mesures sera décrit dans les paragraphes suivants.

Thématique	Critères	HQE - France	LEED - Canada
Environnement Intérieur	Lumière naturel	Par rapport au FLJ	Avoir accès
	Accès au vues	Avoir accès	Avoir accès
	Quantité de lumière	Contrôlées	Valeurs limites
	Confort olfactif	Par rapport à la ventilation	Valeur limites de rénovation
	Température intérieure	Valeurs limites	Suivi et contrôle
	Vitesse de l'air	Valeurs limites	
	Humidité relative	Par rapport aux dispositifs	
Impacts environnementaux	Emissions de CO ₂	Réaliser un DPE	Déterminer les paramètres de rendement du bâtiment et les quantifier
Consommation de ressources	Energie	Consommation conventionnelle d'énergie primaire	Réduction du coût d'énergie en fonction au type de bâtiment
	Energie renouvelables	Existence de production d'énergie locale	Production in situ ou achats de certificats

Tableau 3. 4 : Les indicateurs retenus dans la comparaison des certifications HQE et LEED

3.3.2 L'état de l'art sur les critères et les intervalles des différents indicateurs retenus

Dans cette partie, on fait une comparaison détaillée des différentes définitions, des unités, des caractéristiques de mesures et des types d'intervalles adoptés dans les certifications décrites précédemment, en codes et réglementations européennes (Le Moniteur, 2007) par exemple PASSIVHAUS (un label de qualité allemand qui mesure la performance énergétique des bâtiments), MINERGIE – P (label de qualité suède) ou BBC – EFFINERGIE (label de qualité français), de quelques travaux scientifiques (Mandallena *et al.* (2008) [1], Ganslandt R. & Hofmann H., (1992) [2], Cadiergues, R., (s.f.) [3], (Huang, Zhu, Ouyang, & Cao, 2012) [4] et Caisse des Dépôts et Consignations & Conférence des présidents d'université, (2009) [5]) ou information de la OMS (Perdrix, A., *et al.*, 2005 [6] et World Health Organization, 2002 [7]) ou de codes réglementaires (The American Society of Heating, Refrigeration and Air-conditioning Engineers, 2004 [8], de la Commission de la Santé et de la sécurité du travail du Québec (CSST), 2004 [9], CIBSE [10]) (Association Française de Normalisation (AFNOR), 2010) [11] et (Association Française de Normalisation (AFNOR), 2008) [12] pour chacun des 7 indicateurs mis en évidence dans notre méthode d'évaluation.

3.3.2.1 La consommation des ressources et les impacts environnementaux

Dans le tableau 3.5 nous comparons les intervalles, les méthodes d'évaluation de la consommation de ressources (l'indicateur économique) et des impacts environnementaux (l'indicateur environnemental).

THEMATIQUE REFERENCE	ENERGIE	PRODUCTION D'ENERGIES RENOUVELABLES	EMISSIONS DE CO ₂
CASBEE	Stratégie énergétique	0 – 15 MJ/(m ² .an)	Contrôlées
LEED	3,5 – 35% (réduction du coût d'énergie selon les moyennes nationales dans ce type de bâtiment)	3-12% (production in situ) ou 25%-100% achats de certificats de distributeurs certifiés	Déterminer les paramètres de rendement du bâtiment et les quantifier
HQE	C.EP = 40% - 100% de C.EP = consommation conventionnelle d'énergie primaire (kWh _{EP} /an). (chauffage, climatisation, ventilation, auxiliaires, production ECS et éclairage)	Existence de production d'énergie locale + > 30% (couverture pour l'ECS et chauffage) et > 10% pour la climatisation Ou *25kWh _{EP} /(m ² SHON.an) d'électricité	Réaliser un DPE pour les émissions en fonction de la consommation énergétique (sans valeurs limites)
BREEAM	Stratégie énergétique	Etudier et installer l'électricité provenant à 100% d'un producteur externe accrédité	0 – 100 CO ₂ index (EPC Rating) ou réduction de 10% à 20% (utilisation d'EnR)
DGNB	Stratégie énergétique	15% de la demande thermique avec énergie solaire	Contrôlées
LBC		100% de la consommation totale	
PASSIVHAUS	120 kWh _{EP} /(m ² .an) de chauffage, eau chaude, éclairage, ventilation, équipements, électroménagers et auxiliaires Rapport EP/EF électricité de 2,70	La production locale d'électricité n'est pas déduite des consommations	
MINERGIE – P	25 kWh _{EP} /(m ² .an) De chauffage, eau chaude et ventilation Rapport EP/EF électricité de 2,58	L'énergie photovoltaïque est déduite en lui appliquant un rapport EP/EF de 2	
BBC – EFFINERGIE	40% de réduction de chauffage, eau chaude, éclairage, ventilation, climatisation et auxiliaires. Rapport EP/EF électricité de 2.0	La production locale d'électricité est déduite des consommations d'énergie jusqu'à 25 kWh _{EP} (m ² .an).	
TRAVAUX SCIENTIFIQUES	50-301 o 30-210 kWh _{EP} /(m ² .an) [1] 50 - 750 kWh _{EP} /(m ² .an) consommation totale [5]		11–31 ou 10-60 kg eq CO ₂ /(m ² .an) [1] 5 – 145 kg eq CO ₂ /(m ² .an) [5]

Tableau 3. 5 : Les indicateurs économiques (consommation énergétique) et environnementaux (production d'EnR et émissions de CO₂)

Dans notre méthode d'évaluation, la consommation d'énergie est séparée en deux critères : gaz et électricité. Cependant la majorité des méthodes d'évaluation existantes ne les différencient pas de cette façon. Elles séparent les postes de consommation, c'est-à-dire le chauffage, les équipements, d'éclairage ou de climatisation. Et elles ne sont spécifiées que pour les valeurs globales de la consommation d'énergie primaire (EP).

En général, les certifications internationales et nationales ne spécifient pas d'intervalle de consommation d'énergie car elles raisonnent en termes de stratégie (et d'économie) énergétique. Leur évaluation de la consommation d'énergie se fait donc en prenant en compte la particularité de chaque bâtiment et évalue la qualité de la réponse apportée à cette problématique.

En revanche, certaines certifications comme PASSIVHAUS ou MINERGIE-P fixent des intervalles à respecter et n'évaluent pas la façon dont les objectifs énergétiques ont été atteints.

Les énergies renouvelables, sont bien sûr l'une des exigences principales dans toutes les méthodes d'évaluation, mais la façon de les évaluer est différente, par exemple évaluer seulement leur existence sans valeurs spécifiques, ou avec des valeurs recommandées ou exprimées en pourcentage des apports en énergie du bâtiment sont requises ou dans des cas extrêmes en achetant des bons aux producteurs locaux.

Enfin les émissions de CO₂, est la problématique la plus évaluée dans les certifications internationales et c'est une évaluation plus qualitative.

3.3.2.2 L'environnement intérieur

De la même façon que pour la consommation des ressources et les impacts environnementaux. Nous comparons les intervalles et les types de mesures du confort acoustique, visuel et olfactif dans le tableau 3.6 et celui du confort hygrothermique (indicateurs sociaux) dans le tableau 3.7.

THEMATIQUE REFERENCE	CONFORT ACOUSTIQUE	CONFORT VISUEL			CONFORT OLFACTIF
		Lumière naturel	Vues	Quantité de lumière	
CASBEE	35-50dBA (bureau) et 30-60 dB(A) salles de cours	1-2,5 % FLJ	Accès à tous les occupants (bureau)	300 – 1000 lux	Ventilation 7 – 10 l/s
LEED		>50% (accès)	45% (accès)	250 -5400 lux (naturel)	> 5 l/s/personne
HQE	Isolément de bruits aériens >32dBA	> 2% FLJ	Disposer de vues sur l'extérieur	Contrôlées	Ventilation naturelle + mécanique si besoin + justification des débits d'air neuf + dispositifs de contrôle et de qualité de l'air
BREEAM	<50dB ou entre 35-50dB	2-4% FLJ	Vue sur le ciel depuis le bureau (0,7m) surface fenêtre >20% surf. murs	Installation de systèmes qui permettent le contrôle de la lumière	12 l/s/personne
DGNB	Contrôlées	Accès dans tout le bâtiment	Visibilité vers l'extérieur		
LBC		Toute espace occupé doit posséder des fenêtres donnant accès à la lumière du jour			Tout espace occupé doit posséder des fenêtres donnant accès à l'air neuf + les salles à usages spécifiques différents doivent être ventilées séparément + système de filtrage de l'air + renouvellement de l'air >2 fois par heure
OMS					Ventilation : 3.5 a 10 l/s/personne (T°int<23°C) [6] 1-3 volume/h
TRAVAUX SCIENTIFIQUES	25-40 dBA [1] <50 dBA [4]	0,6 – 6% FLJ [1]		300-750 lux [2] >300 lux [4] 300-100 lux [3] 200-500 lux [12]	

Tableau 3. 6 : Les indicateurs sociaux : le confort acoustique, visuel et olfactif

Le confort acoustique est surveillé dans quasiment toutes les certifications internationales et nationales. Le niveau sonore acceptable varie entre 30 dB(A) (seuil d'endormissement) et 60 dB(A) (conversation animée / bureau).

Le confort visuel est largement intégré à l'évaluation de la qualité d'un bâtiment pour les certifications nationales et internationales, dans la description de ses critères il ressort que :

- La lumière naturelle est très souvent privilégiée par rapport à la lumière artificielle, pour des raisons de confort, de santé et de performance des usagers et dans presque tous les documents étudiés ce confort est évalué par le Facteur de Lumière de Jour (FLJ)
- La vue est également importante, mais plus difficile à évaluer, c'est pourquoi elle est généralement considérée de manière qualitative. Elle peut aussi s'exprimer en pourcentage d'accès.
- La quantité de lumière (naturelle ou artificielle) est essentielle à de bonnes conditions de travail. Elle sera assimilée à sa luminance (lux) avec des rangs très variés qui vont de 250 à 5 400 lux.

Pour le confort olfactif la problématique de la régulation des odeurs est moins traitée car plus difficile à évaluer compte tenu du caractère subjectif de la mesure d'une odeur. Le critère évalué est la ventilation comme une caractéristique de bien-être et de santé, en général si elle est traduite dans des valeurs le confort olfactif s'exprime en litres par secondes et par personne et dans le cas d'une valeur qualitative, il est exprimé par rapport à l'installation et à la description des systèmes de ventilation (manuel ou mécanique).

THEMATIQUE REFERENCE	CONFORT HYGROTHERMIQUE		
	Température intérieure	Vitesse de l'air	Humidité relative
CASBEE	20 - 24 °C (bureaux en hiver) 24 - 28°C (bureaux en été) 24 °C température optimale en toute saison		40% (bureaux en hiver) 50% (bureaux en été) 45 - 55% humidité optimale toute en saison
LEED	Suivi et contrôle continue en intervalles régulé		
HQE	Température opérative < 28°C	0,15 à 0,25 m/s	Garantir un taux d'humidité adapté aux activités et en cohérence avec la température de consigne
BREEAM	Calcul de PMV et PPD index d'accord à EN ISO 7730:2005	Air frais donné pour les stratégies de ventilation naturelle	Calcul de PMV et PPD index d'accord à EN ISO 7730:2005
DGNB	Contrôlées		
LBC	Installation de l'équipement nécessaire pour le monitoring des niveaux de CO ₂ , la température et l'humidité		
OMS	16-33°C températures extrêmes de travail <22°C limite pour développement d'organismes malins [6]	<0,5 m/s (laboratoires) [6]	30-65% [6]
PASSIVHAUS	20°C		
MINERGIE – P	20°C		
BBC – EFFINERGIE	19°C		
TRAVAUX SCIENTIFIQUES	23 à 26°C (été) et 20 à 23,5°C (hiver) avec 50% HR [9] ; 17 à 31°C [8] - 20,9 à 30,4 [3] – 17-24°C [10] 22-24,5°C [11]	<0.5 m/s [8] 0,15-0,20 m/s [9] 0,10-012 m/s [11]	4 – 17 g d'eau / kg d'air sec (en hiver) 40-70% [8]

Tableau 3. 7 : Les indicateurs sociaux : le confort hygrothermique

Le confort thermique est considéré comme l'une des nécessités premières à de bonnes conditions de travail et de vie, c'est pourquoi il est présent dans toutes les méthodes d'évaluation.

Les intervalles de confort varient en fonction des pays : la culture et le climat étant des facteurs très influents sur les normes (par exemple, la température opérative ou de consigne entre été ou hiver). Les températures de confort se situent généralement entre 17 et 28°C. On remarque des tendances différentes selon les pays : aux Etats-Unis avec la norme ASHRAE, la gamme de température (17 – 31 °C) est plus large qu'en Europe (CIBSE : 19 – 24°C), ce qui traduit une plus grande consommation d'énergie aux Etats-Unis pour le chauffage et la ventilation.

La vitesse de l'air standard doit être inférieure à 0,5 m/s mais pour un meilleur confort, elle peut être abaissée à 0,15 m/s.

Le taux d'humidité est généralement compris entre 30 et 70%. Le taux d'humidité optimal est défini autour des 50%.

Finalement le processus qui a été utilisé pour le choix des indicateurs (énergie, énergies renouvelables, émissions de CO₂, confort acoustique, visuel, olfactif et thermique), les intervalles d'évaluation, les méthodes de mesures qui évalueront un bâtiment tertiaire dans la phase d'exploitation est résumé dans la figure 3.4 :

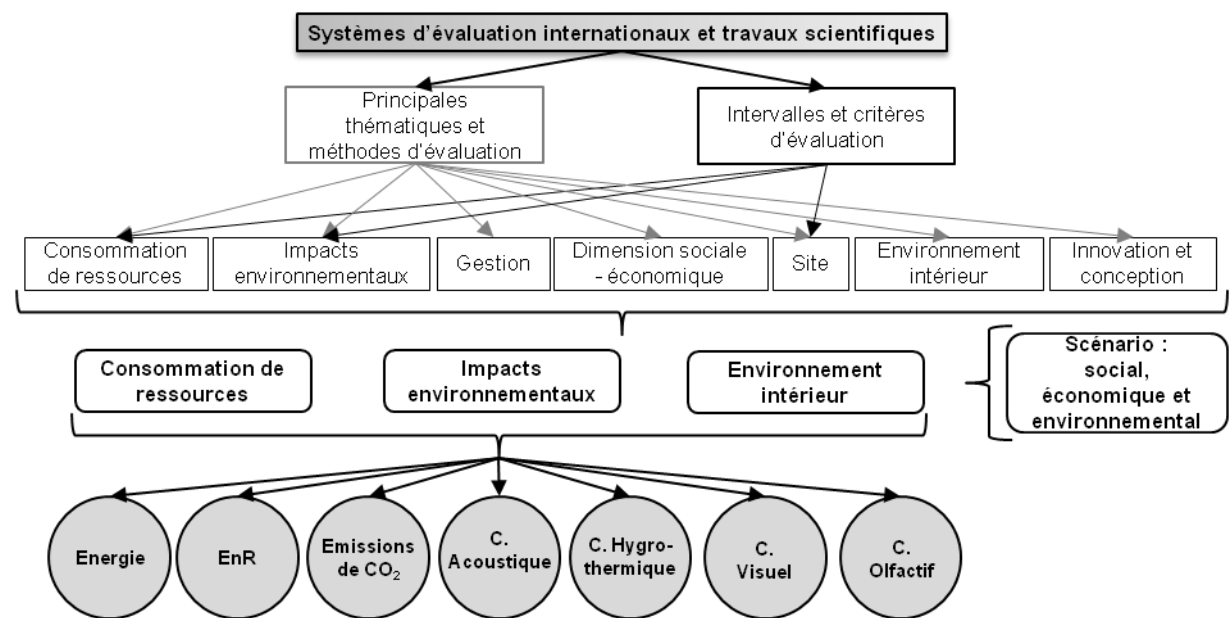


Figure 3. 4 : Le schéma de choix des indicateurs qui constitue la ligne de base d'évaluation énergétique et environnementale

3.4 La construction de la ligne de base des indicateurs d'évaluation énergétique et environnementale de bâtiments tertiaires

Pour notre étude au regard des comparaisons qui précèdent on a choisi les plus représentatifs et les indicateurs les plus utilisés dans les différents systèmes d'évaluation : la consommation énergétique, la production d'énergies renouvelables, les émissions de CO₂, le confort acoustique, visuel, hygrothermique et olfactif.

Avec l'intention de livrer des scénarios de décision dans les différentes thématiques, ces indicateurs ont été groupés en trois piliers du développement durable : la consommation de ressources, pilier économique ; les impacts environnementaux, pilier environnemental et la qualité de l'environnement intérieur, pilier social (figure 3.5).

Par ailleurs les différents acteurs (les gestionnaires, les bâtiments – les usages et les usagers) d'un campus universitaire, ont été groupés donnant naissance aux trois scénarios de décision qui seront utilisés dans la méthodologie de décision du chapitre 4.

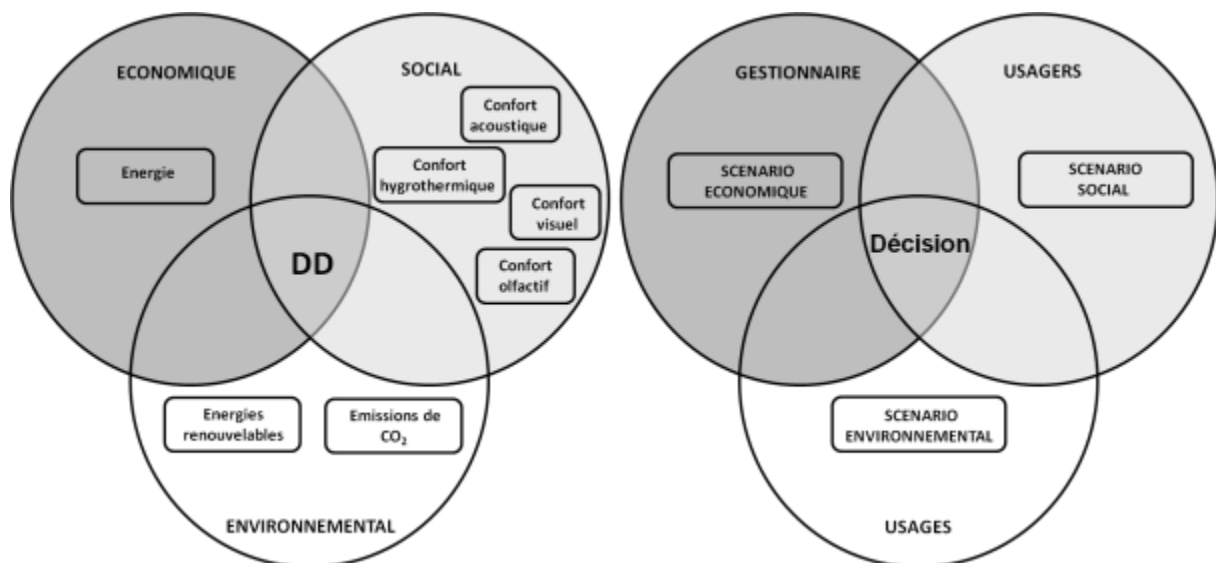


Figure 3. 5 : Les indicateurs avec les piliers du développement durable et les scénarios avec les acteurs

3.4.1 La définition des différents indicateurs retenus dans la méthodologie d'évaluation

Dans cette partie, on décrit et on définit concrètement les indicateurs qui seront utilisés dans la méthodologie d'évaluation. Dans le tableau 3.8 ces indicateurs sont résumés avec leurs différents critères, unités et leurs intervalles.

L'**énergie** est la somme des kWh_{EF} annuels par surface SHON obtenue à partir des factures énergétiques d'électricité et de gaz. Ici on a décidé d'utiliser l'énergie finale, puisque la méthode sera utilisée dans différents contextes par la facture on peut faire une rapide lecture de la consommation et faire plus facilement la comparaison entre les économies réalisées dans le cas d'une réhabilitation. Ici l'intervalle a été choisi en fonction de la moyenne nationale française de la consommation d'énergie issue de l'étude de la Caisse des Dépôts et Consignations & de la Conférence des Présidents d'Université (2009) et des limites de la nouvelle réglementation thermique (Ministère de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de la mer, en charge des technologies vertes et des négociations sur le climat - MEEDDM, 2010).

Les **énergies renouvelables** sont la quantité d'énergie renouvelable produit in situ (comme par exemple par les chaudières à bois, géothermique, éolien, solaire) que l'on utilisera pour remplacer le gaz de chauffage ou l'électricité. Elles sont mesurées en kWh_{EF} annuels par surface SHON. La limite supérieure de l'intervalle a été choisie en fonction de la consommation minimale d'énergie du bâtiment 50 kWh/m²

Les **émissions de CO₂** sont la quantité en kilogrammes d'équivalent de la production de CO₂ par surface, déterminée à partir des factures énergétiques de gaz (kWhx0,063) et d'électricité totale (kWh x 0,089). Les limites de l'intervalle ont été choisies en fonction des limites de l'indicateur de consommation d'énergie.

Emissions de CO₂ = (C_{EFgaz}x 0,063)+(C_{EFélec} x 0,089) * (44/12) [kg eq CO₂ d'EF]

Le **confort olfactif** est mesurée de façon qualitative dans une première étape, en fonction de la satisfaction des occupants dans une échelle de 1 à 5, la note 1 correspond à une satisfaction très mauvaise, le 3 à une situation indifférente et le 5 correspond à une excellente satisfaction par rapport à ce confort.

Le **confort visuel** est un indicateur quantitatif construit à partir de trois critères :

- Quantité de vues naturelles : l'intervalle de mesure choisi consiste en un pourcentage de l'accès aux vues naturelles, mesuré par rapport à la relation entre la surface de fenêtres (m²) qui donnent vers l'extérieur et la surface totale verticale de la pièce (m²). Ses limites ont été définies en fonction de la comparaison du tableau 3. 6.

- Distance maximale aux vues naturelles : mesurée à partir de la distance maximale (m) du lieu de travail (bureau) à la vue naturelle.
- Quantité d'éclairage : mesurée en luminance (lux), c'est la moyenne entre la quantité d'éclairage au centre du lieu de travail, dans l'entrée et vers les vues naturelles. Ses limites ont été définies en fonction de la comparaison du tableau 3. 6.

Le **confort acoustique** sera la mesure du bruit de fond en dB(A) qui représente le comportement de l'oreille normale à une même intensité perçue : 40dB à 1kHz. Les limites de l'intervalle ont été définies en fonction de la comparaison du tableau 3. 6.

Enfin le **confort hygrothermique** est un indicateur qualitatif et quantitatif construit à partir de quatre critères et ses intervalles définis à partir de la comparaison du tableau 3.7.

- Température intérieure (°C) : mesure de la température de l'air à l'intérieur du lieu de travail
- Vitesse de l'air (m/s) : toutes les méthodes d'évaluation s'accordent sur la vitesse de l'air, elle doit être <0,5 m/s pour des raisons plutôt axées sur la santé. Les valeurs de confort tournent autour de >0,05 et <0,25
- Humidité relative : L'intervalle extrême associé à la santé des usagers est 20 – 70% d'humidité, valeurs au-delà desquelles on peut observer des pathologies gênantes. Le confort hygrométrique est plutôt situé entre 40 et 60%.
- Satisfaction hygrothermique : définie à partir de la satisfaction des occupants, dans une échelle de 1 à 5, la note 1 correspond à une satisfaction très mauvaise (très froide ou très chaude), le 3 à une situation indifférente ou normale et le 5 correspond à une excellente satisfaction par rapport à ce confort.

INDICATEUR	CRITERE	UNITE	INTERVALLE
Energie	Consommation de gaz et d'électricité	kWh _{EF} /(m ² .an)	]50 – 500[
Énergies Renouvelables	Production d'énergies renouvelables	kWh _{EF} produites/(m ² .an)	]0-50[
Emissions de CO₂	Quantité d'émissions de CO ₂	kg.eqCO ₂ / (m ² .an)	]5 – 145[
Confort Olfactif	Satisfaction Olfactive	%	]0 – 100[
Confort. Visuel	Quantité de vues	%	]0 – 50[
	Distance (max) aux vues	m	]0 – 6[
	Quantité d'éclairage	Lux	]250 – 1000[
Confort. Acoustique	Niveau de bruit	dB(A)	]32 – 50[
C. Hygrothermique	Température Intérieure	°C	]17 – 25[
	Vitesse de l'air	m/s	]0,05 – 0,25[
	Humidité Relative	%	]40 – 60[
	Satisfaction hygrothermique	%	]0 – 100[

Tableau 3. 8 : La définition des différents indicateurs retenus pour la méthodologie d'évaluation

Une réflexion détaillée a concerné les indicateurs de confort, puisque comme on observe dans le tableau 3.8, la gamme de l'intervalle est très dispersée, nous observons des plages de 5 unités jusqu'à 1 000 unités. La décision de choix de ces limites a dépendu des références internationales surtout dans le cas des indicateurs de confort hygrothermique et de confort olfactif (les indicateurs les plus subjectifs de tous). On a parallèlement décidé de l'évaluer avec le degré de satisfaction in situ des occupants.

3.5 L'évaluation des indicateurs appliquée aux bâtiments tertiaires d'un campus universitaire

Comme on a vu dans le chapitre 2, dans l'université il y a beaucoup d'acteurs qui interviennent durant la phase d'exploitation des bâtiments : les usagers (étudiants, professeurs, administratifs, chercheurs), la direction du patrimoine immobilier (celui qui accompagne au gestionnaire dans ses décisions) et les bâtiments à évaluer. Et il y a aussi une multitude de caractéristiques et exigences.

Afin de simplifier la tâche d'évaluation énergétique et environnementale on a utilisé trois bâtiments types « représentatifs » du campus.

3.5.1 La présentation des bâtiments évalués

Pour valider la méthode d'évaluation, nous avons effectué des mesures sur ces trois bâtiments « types ». Chacun représente les différentes activités associées à l'université : administration (bureaux), enseignement (amphis et salles de cours) et recherche (laboratoires). Leurs caractéristiques sont résumées dans le tableau 3.9.

Le choix de ces bâtiments et les différents lieux où les mesures ont été faites reposait sur trois critères :

- avoir un haut degré de représentativité des activités et locaux sur l'ensemble global des bâtiments et des espaces (surface, distribution et orientation),
- avoir un taux d'occupation élevé et
- avoir des antécédents de mesures énergétiques disponibles.

		A12	A9	C4
Type d'usage		Recherche	Enseignement	Administration
Année de construction		1966	1966	Entre 1954 et 1957 Acheté par l'université en 1997
m² SHON (Surface Hors Ouvre Nette)		11 069	2 300	7 230
Nombre d'étage		6	4	3
Orientation		Nord / sud	Les quatre	Nord / sud
Nombre de locaux mesurés		4 (2 bureaux (1S25 et 1S16) et 2 laboratoires (1N35a et 1N15))	2 (1 amphi et 1 salle de cours)	2 bureaux
Nombre de personnes enquêtées		8	116	2
Caractéristiques techniques	Structure	Voile, poteau, poutre et dalle en béton armé		Maçonnerie traditionnelle
	Façade	Panneau en béton armé avec une finition en granulat sans isolation		Pierre apparente et enduit sans isolation
	Menuiseries extérieures	Châssis en bois simple vitrage		

Tableau 3. 9 : Les caractéristiques des bâtiments évalués

Les bâtiments et les locaux sont présentés figures 3.6, 3.7 et 3.8 :



Figure 3. 6 : Photographies des locaux évalués dans le bâtiment de recherche (R) – A12

Figure 3. 7 : Photographies des locaux évalués dans le bâtiment d'administration (A) – C04



Figure 3. 8 : Photographies des locaux évalués dans le bâtiment d'enseignement (E)-A09

Les mesures des différents critères (y_i) pour chaque bâtiment ont été déterminées au travers :

- une lecture de la consommation électrique annuelle de chaque bâtiment et une estimation de la consommation de gaz à partir de la consommation annuelle de l'université.
- des campagnes de mesures durant un mois d'hiver (février) et un mois de transition (juin).
- différents entretiens avec les utilisateurs des trois bâtiments.

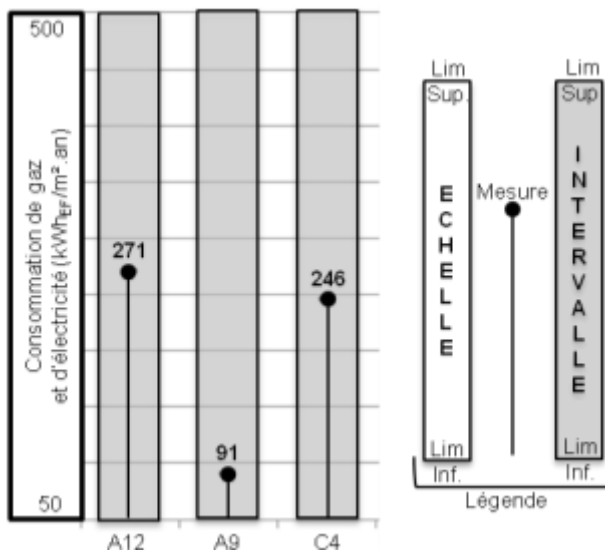
3.5.2 Les résultats de la campagne de mesure

Dans les figures suivantes, on résume les principaux résultats des quatre campagnes de mesures. Les détails des deux campagnes et les outils de mesures sont décrits dans l'annexe A.3.2 et A.3.3.

Pour chaque local les valeurs minimales et maximales des critères mesurés sont observées au cours des quatre mesures et finalement la moyenne du bâtiment est calculée.

Energie, énergies renouvelables et émissions de CO₂

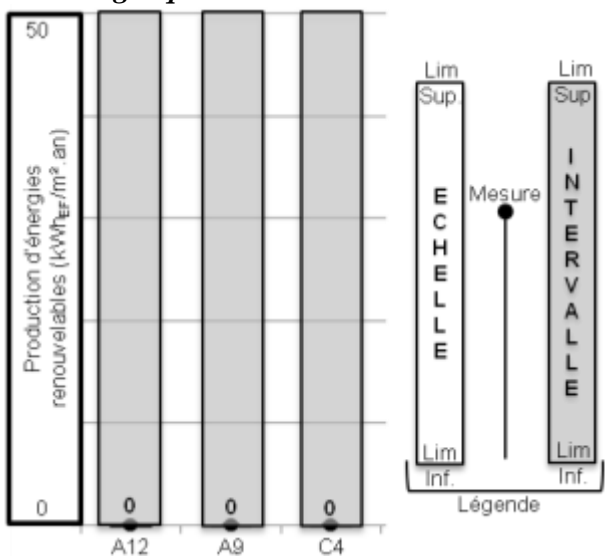
Les résultats de l'énergie facturée (figure 3.9) montrent que les bâtiments de recherche (A12) et d'administration (C4) sont les plus consommateurs, plus de la



moitié de l'intervalle d'évaluation. Ces résultats s'expliquent par le taux d'occupation dans ces bâtiments à la différence de ceux utilisés pour l'enseignement (A9) et par le type d'usage : plus de matériel de recherche et plus d'ordinateurs personnels.

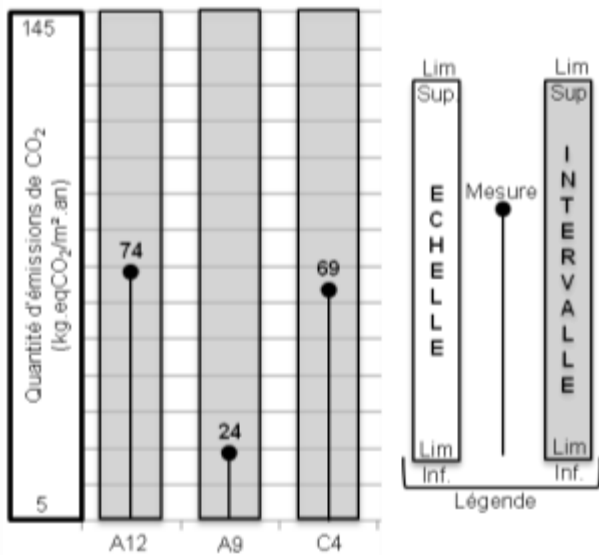
Dans les trois bâtiments la consommation d'électricité correspond à plus 50% de la consommation totale.

Figure 3. 9 : Résultat de la consommation énergétique et indication de l'intervalle



Pour le résultat de la production d'énergies renouvelables (figure 3.10) à l'état de l'étude aucun bâtiment de l'université ne produit d'énergie de source renouvelable.

Figure 3. 10 : Résultat de la production d'énergie renouvelable et indication de l'intervalle



Enfin sur le résultat des émissions de CO₂ (figure 3.11), montre une relation directe avec la consommation d'énergie, plus d'émissions de CO₂, pour les bâtiments de recherche et d'administration. Les émissions sont principalement dues à la consommation de gaz.

Figure 3.11 : Résultat des émissions de CO₂ et indication de l'intervalle

Confort olfactif

Les sources d'odeurs peuvent varier selon le type de salle, les bureaux étant confrontés aux émanations corporelles, et les laboratoires aux produits chimiques et aux différentes machines.

La qualité olfactive est indifférente presque pour tous les occupants (figure 3.12), traduisant une absence de problème quant à ce confort. Il peut également s'agir d'une accoutumance des utilisateurs à certaines sources d'odeurs, comme par exemple les chercheurs qui sont habitués aux odeurs des produits chimiques.

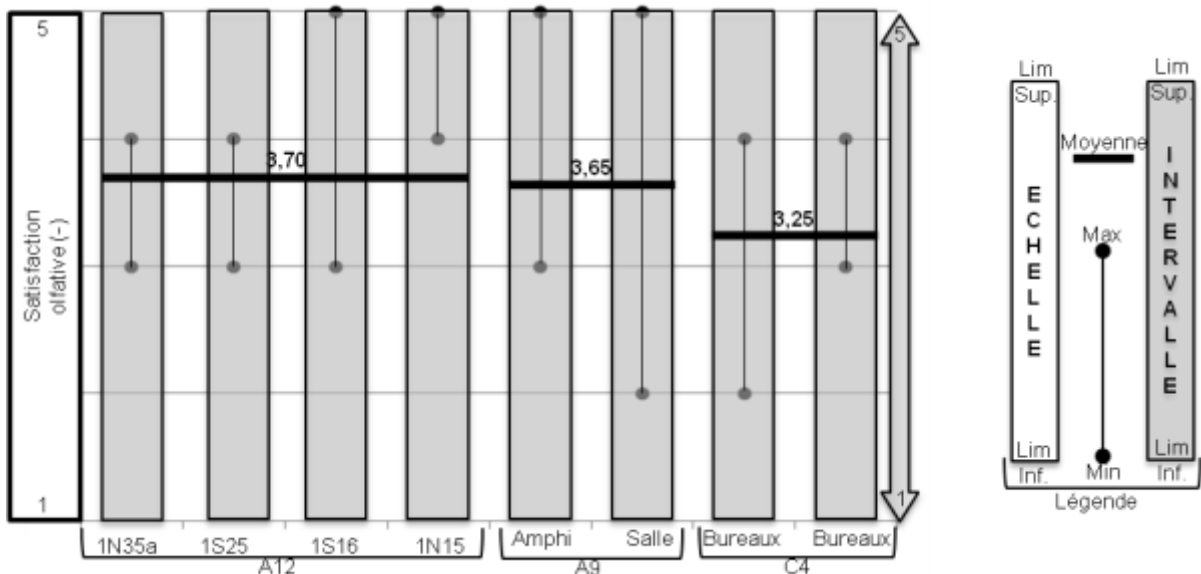


Figure 3.12 : Résultat de la satisfaction des usagers quant au confort olfactif et indication de l'intervalle

Confort visuel

La figure 3.13, montre que le pourcentage de vues est de 15% en moyenne et pour la distance une moyenne de 4,5m (figure 3.14).

On remarque plusieurs configurations : les bureaux (1S25, 1S16, Bureaux 1 et 2), possédant un faible % de vue entre 6 à 11%, et en moyenne 4,5m; les laboratoires, offrent un pourcentage de vues moyenne de 39% et une distance entre 2-3m ; l'amphi et la salle de cours, offrent le plus de vues et une distance à la surface vitrée conséquente.

Une bonne combinaison de ces deux variables permettrait d'optimiser la qualité du confort visuel, un accès aux vues important pouvant compenser une grande profondeur de salle, dans une certaine limite cependant.

La figure 3.15 nous permet de remarquer que la qualité de la lumière sur le plan de travail est très disparate selon les endroits. Elle tourne en moyenne autour de 170 lux à 1 326 lux pour les valeurs maximales. Cependant, on peut noter que certaines salles sont très en dessous de l'éclairage minimum considéré dans notre système: la salle 1S25 (bureau), par exemple, a seulement en moyenne 367 lux.

Il peut cependant exister des incertitudes quant à la qualité des prises de mesures, puisqu'elles ont été effectuées dans des lieux occupés, l'appareil de mesure pouvant être occasionnellement influencé par l'ombre des occupants.

En effet, le critère de luminance est très sensible à l'environnement, il peut être également perturbé par des systèmes de protection défectueux (comme les volets en mauvais état), et il varie continuellement selon l'orientation du bâtiment, le moment de la journée et la quantité d'ensoleillement.

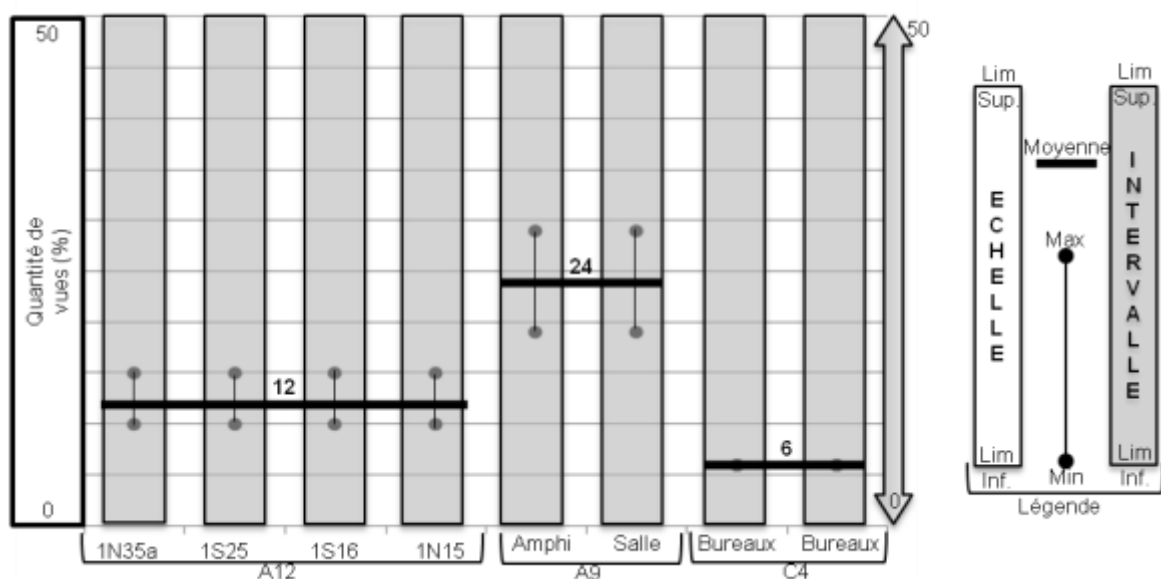


Figure 3. 13 : Résultats des mesures de la quantité de vues et indication de l'intervalle

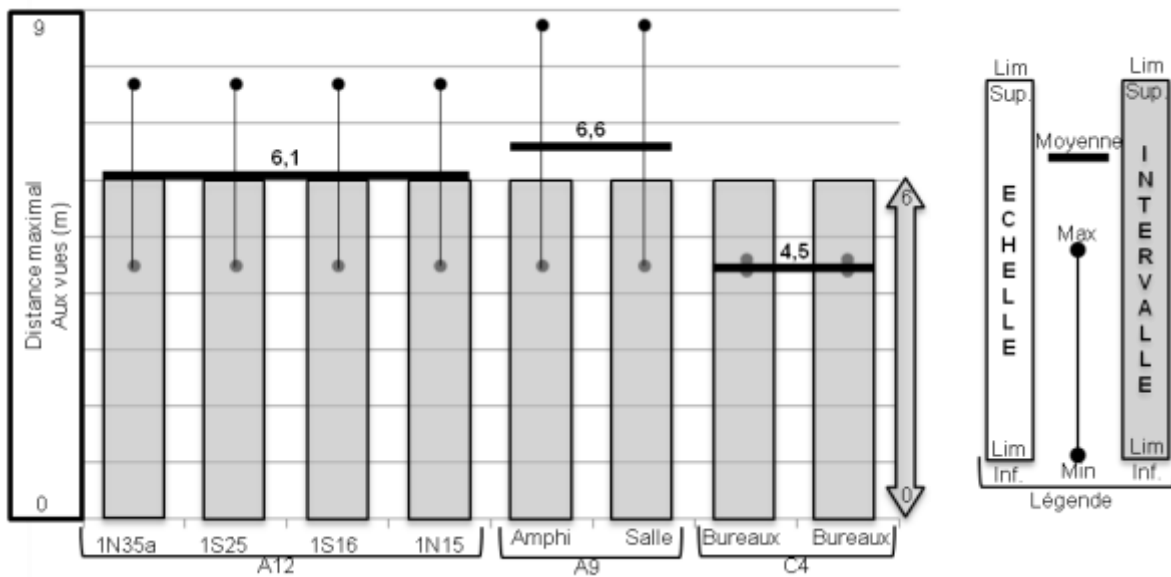


Figure 3. 14 : Résultats des mesures de la distance aux vues et indication de l'intervalle

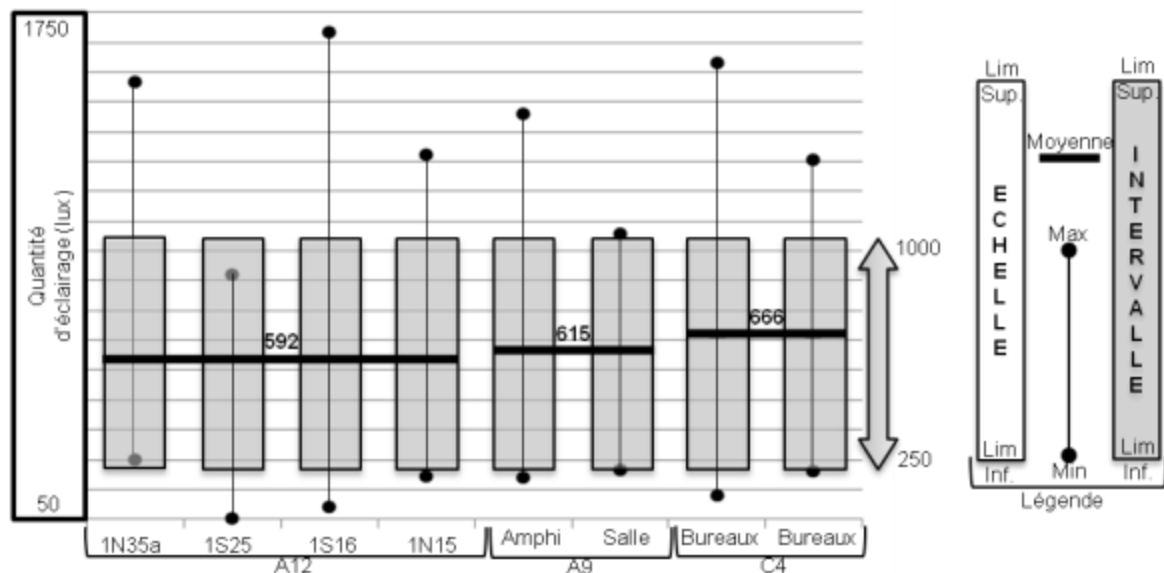


Figure 3. 15 : Résultat des mesures de la luminance de l'éclairage naturel et indication de l'intervalle

Confort acoustique

La figure 3.16 montre que les niveaux sonores se situent entre 37 et 56 dB(A). On remarque que la salle 1N35a du laboratoire (A12, recherche) atteint la valeur la plus haute 66 dB(A). Cette anomalie est sûrement due au bruit des systèmes de ventilation, aux appareils en marche ou aux manipulations en cours.

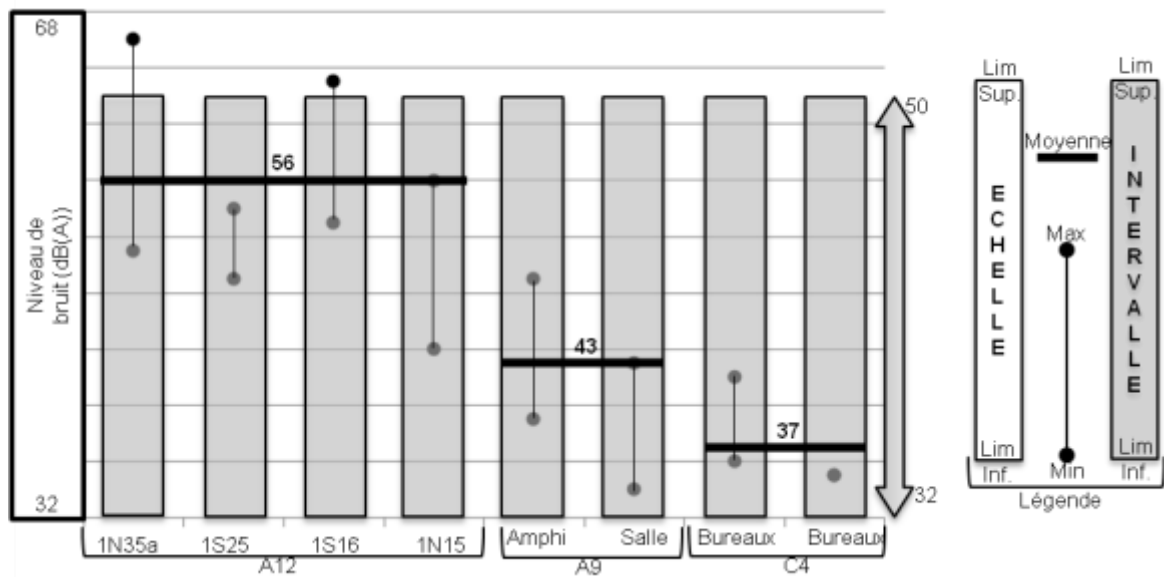


Figure 3. 16 : Résultats des mesures du niveau sonore et indication de l'intervalle

Confort hygrothermique

Dans la figure 3.17, on note que la température intérieure reste relativement constante (21 – 23 °C) malgré les variations de température extérieure (4 – 17,5°C, voir figures A.3.1 et A.3.2 dans les annexes). On peut signaler cependant que certains utilisateurs ont eu recours à un chauffage individuel le matin (voir annexe A.3.2).

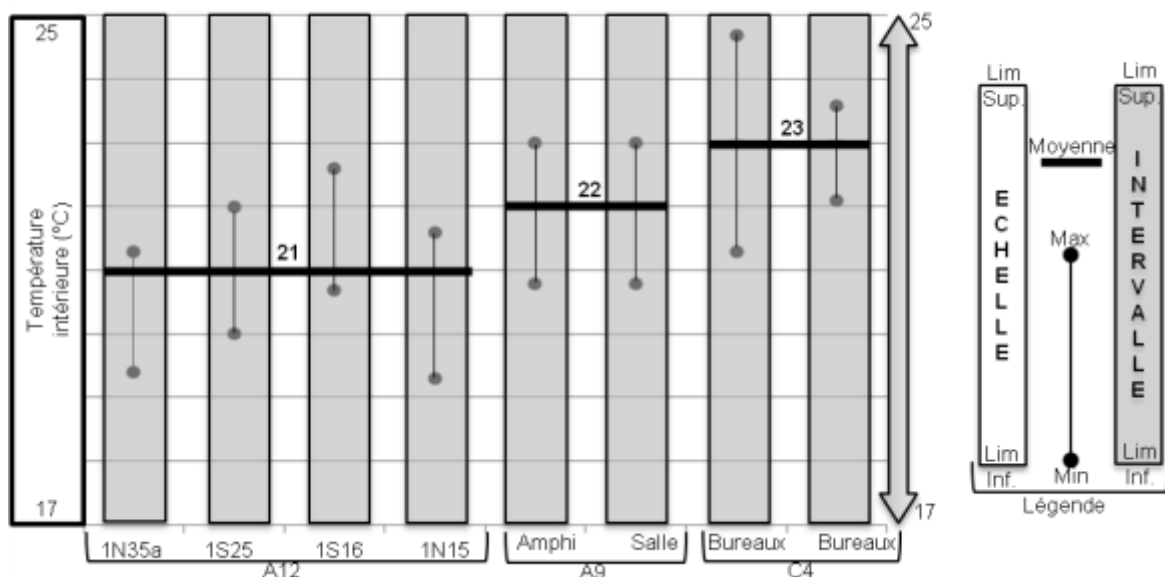


Figure 3. 17 : Résultat des mesures de la température de l'air et indication de l'intervalle

La figure 3.18 résume les mesures de la vitesse de l'air. Pour presque tous les locaux les mesures sont en dehors de l'intervalle, inexistant ou plus élevées, dans le cas des deux laboratoires. Dans ce dernier cas, il faut préciser que le bâtiment a des systèmes d'extraction de l'air très puissants et les salles ont au minimum deux portes qui aident à la forte ventilation.

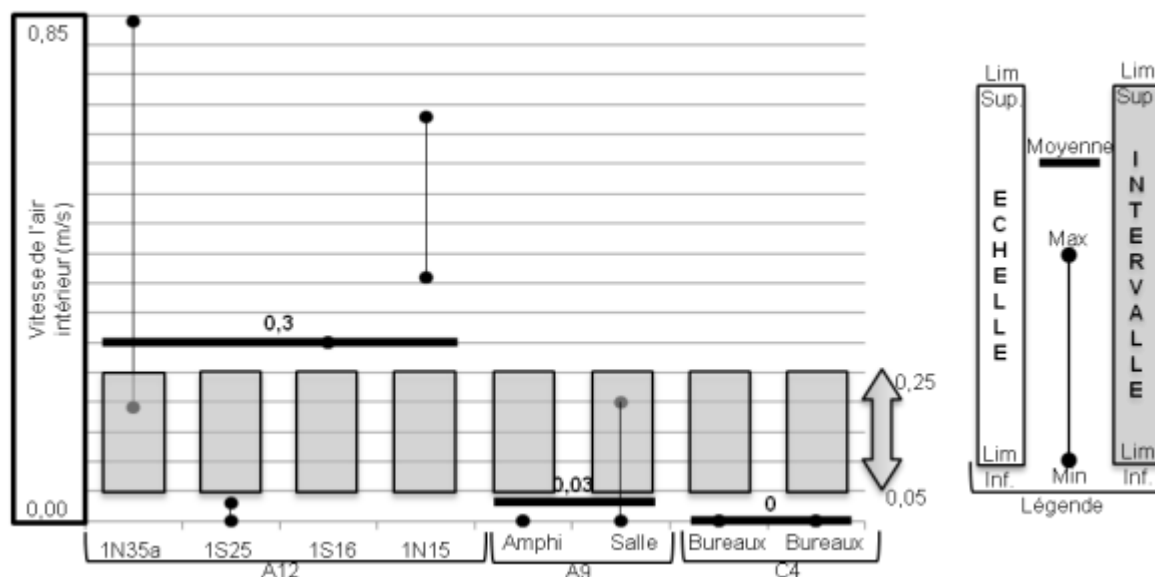


Figure 3. 18 : Résultats des mesures de la vitesse de l'air et indication de l'intervalle

La figure 3.19 montre que le taux d'humidité à l'intérieur varie fortement entre les minimums et les maximums, l'amortissement par rapport aux variations de l'extérieur est notable, mais cependant les trois bâtiments sont présentés avec un taux d'humidité très proches, 44% en moyenne. (A savoir qu'à Bordeaux il y a environ 10 gr de vapeur par kg d'air sec)

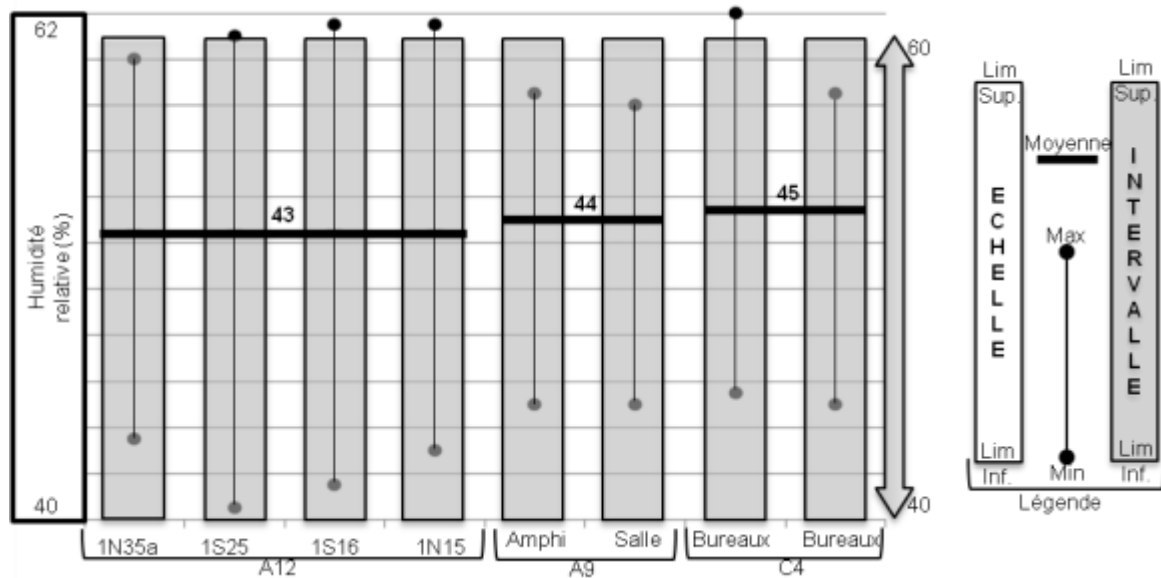


Figure 3. 19 : Mesures de l'humidité relative de l'air et indication de l'intervalle

Finalement la figure 3. 20 montre que le confort hygrothermique est considéré comme relativement mauvais dans le bâtiment A12 (plus de ventilation, utilisation de radiateur le matin et volets en mauvais état), régulier dans le bâtiment d'enseignement (A9) et un peu meilleur dans le bâtiment dédié à l'administration (C4).

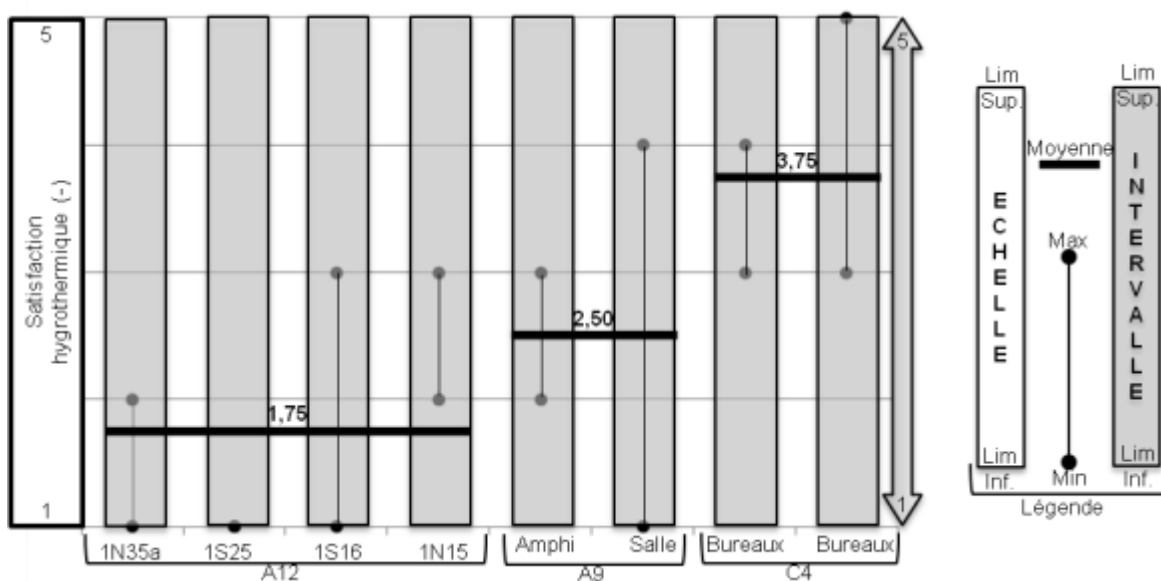


Figure 3. 20 : Résultats des mesures de la satisfaction des usagers quant au confort hygrothermique et indication de l'intervalle

Finalement dans le tableau 3.10 on résume les valeurs obtenues lors de la campagne de mesure (la moyenne des valeurs mesurées) et les intervalles utilisés pour les trois bâtiments analysés.

CRITERE	UNITE	INTERVALLE	VALEUR		
			A12	A9	C4
Consommation de gaz et d'électricité	kWh _{EF} /(m ² .an)	[50 – 500[	271	91	246
Production d'énergies renouvelables	kWh _{EF} produites/(m ² .an)	[0-50[	0	0	0
Quantité d'émissions de CO ₂	kg.eqCO ₂ / (m ² .an)	[5 – 145[	74	24	69
Satisfaction Olfactive	%	[0 – 100]	74	73	65
Quantité de vues	%	[0 – 50[	12	24	6
Distance (max) aux vues	M	[0 – 6[	6,1	6,6	4,5
Quantité d'éclairage	Lux	]250 – 1000[	592	615	666
Niveau de bruit	dB(A)	]32 – 50[	56	43	37
Température Intérieure	°C	]17 – 25[	21	22	23
Vitesse de l'air	m/s	]0,05 – 0,25[	0,3	0,03	0
Humidité Relative	%	]40 – 60[	43	44	45
Satisfaction Hygrothermique	%	[0 – 100]	34	50	65

Tableau 3. 10 : Les valeurs moyennes des différents critères retenus dans la méthodologie d'évaluation

Les valeurs issues des campagnes de mesures vont être utilisées pour le modèle de décision, modèle qui sera décrit dans le chapitre 4 et ces variables seront appelées « variables d'observation ».

3.6 Conclusion

L'état de l'art de divers référentiels internationaux, nationaux réglementations et recommandations et leur comparaison nous a permis d'identifier notre ligne de base d'indicateurs partagés qui vont contribuer à évaluer le comportement énergétique et environnemental d'un bâtiment tertiaire en phase d'exploitation.

La campagne de mesure a permis d'évaluer les valeurs des indicateurs définis dans trois bâtiments « type » représentatifs d'un campus universitaire, qui a la particularité d'avoir différentes fonctions et comportements en relation avec confort et énergie.

La définition fine des intervalles va permettre l'application et l'adaptation de ces indicateurs à différents contextes, avec une fourchette homogène et partagée.

En fonction aux principaux résultats on a vu que par rapport aux questions sur le terrain en lien avec sur le confort olfactif les utilisateurs ne lui donnent pas assez d'importance, puisqu'au moment de s'informer sur leur ressenti, la réponse n'était pas assez rapide. Et on a noté l'accoutumance des utilisateurs à certaines sources d'odeurs, comme par exemple les chercheurs permanents qui sont habitués aux odeurs des produits chimiques.

Concernant le confort visuel, on a vu une forte variation d'un bâtiment à l'autre, et de même entre le matin et l'après-midi. Ces variations peuvent s'expliquer par le type de mesure très sensible aux ombres, par des facteurs physiques de l'environnement type d'éclairage artificiel, par des facteurs externes niveau d'ensoleillement pendant la journée.

Le confort acoustique, en général a été l'indicateur le mieux évalué par les usagers des bureaux et du bâtiment d'enseignement, avec des mesures dans l'intervalle, mais plus élevées dans les salles de laboratoire dues à l'utilisation de machines propre au fonctionnement des salles.

Finalement comme on l'a vu, bien que ces systèmes aient un grand développement, ils ont encore quelques limitations (R. J. Cole, 1998), limitations que l'on va surmonter grâce à notre méthode d'évaluation (chapitre 4) :

- capacité d'offrir différents niveaux d'évaluation / dans notre méthode on montrera tous les niveaux d'évaluation : critères, indicateurs, indice partiel d'acceptabilité et indice global d'évaluation;
- capacité à reconnaître les spécifications régionales des critères environnementaux / nous le ferons au travers la définition des intervalles ;
- utilisation de différentes échelles de mesure pour différents ensembles de critères / cette limitation sera traduite par la fonction d'acceptabilité ;
- pondération des critères / dans notre méthode cela sera au travers la définition d'un niveau de compromis.

4 UNE MÉTHODOLOGIE POUR L'ÉVOLUTION DURABLE DE BÂTIMENTS EXISTANTS

Sommaire

4.1 Introduction	165
4.2 Contexte	166
4.3 La base méthodologique d'aide à la décision multicritère	170
4.4 L'application de la méthodologie	181
4.5 Pour aller plus loin	201
4.6 Conclusion	203

4.1 Introduction

Comme nous l'avons décrit dans le chapitre 3, le secteur de la construction est témoin d'un grand développement des systèmes d'évaluation environnementale. Ces démarches rendent son applicabilité et sa comparaison dans différents contextes et réalités difficiles.

Comme l'indiquent Macías et Garcia Navarro (2010), les systèmes d'évaluation environnementale sont développés pour une région spécifique, en offrant simplicité et facilité d'application, mais quand le bâtiment change de « lieu », les résultats perdent leur objectivité. De plus leur évaluation est presque toujours focalisée sur le bâtiment comme un élément isolé, parfois en relation avec son environnement immédiat, mais que se passe-t'il avec les usagers, derniers éléments de la chaîne de valeur ?

La littérature indique que l'évaluation dans la phase d'exploitation est un domaine qui n'est pas pleinement développé. Par exemple, Ding (2008) remarque que l'effort dans cette phase n'est pas encore suffisant, puisque les principaux systèmes d'évaluation environnementale des bâtiments sont surtout appliqués aux conceptions de nouvelles constructions. Comme Crawley & Aho (1999) le justifient, la raison pour laquelle ces systèmes sont principalement utilisés dans la phase de conception est le prix, puisque le travail à réaliser dans la phase d'exploitation est trop étendu et requiert un investissement important. D'un autre côté, la construction et la démolition sont des phases de vie d'un bâtiment qui consomment une quantité élevée d'énergie, ces phases intéressent plus les entreprises de construction et les maîtres d'ouvrage, mais d'un point de vue énergétique, ce sont les phases les moins significatives si nous les comparons à la phase d'exploitation (Lecuona Neumann, et al., 2005 et Tendero & García de Viedma, 2011).

En considérant d'un côté, le contexte d'utilisation des systèmes d'évaluation et de l'autre, le développement important des méthodes d'aide à la décision (Collignan 2011, Quirante 2012, Taillandier 2009, D'Aula 2011 et Semassou 2011) et d'optimisation (Evins, 2013), utilisées principalement dans la phase de conception l'outil présenté ici ne vise pas à être un nouveau système d'évaluation, mais une méthodologie d'évaluation multicritère du comportement des bâtiments tertiaires dans la phase d'exploitation d'un point de vue énergétique, environnemental et économique, en considérant la satisfaction de leurs usagers. Sachant que la vision des gestionnaires et des usagers d'un campus universitaire sur ces trois axes d'évaluation n'est pas directe, un des objectifs principaux de cette méthodologie d'évaluation est de pouvoir les mettre en relation de manière astucieuse.

En s'appuyant sur la base théorique des méthodes d'aide à la décision et d'optimisation-multicritères, cette méthodologie se veut être un outil d'aide à la décision pour les gestionnaires universitaires répondant par exemple aux interrogations suivantes :

- Comment devons-nous décider entre maintenir l'état actuel (énergétique, thermique ou environnemental) du bâtiment ou réaliser une réhabilitation ?,
- Quelles sont les personnes qui participent à la décision?,
- Comment cette décision est-elle prise? Et
- Avec quels critères ?

La méthodologie s'articule sur une évaluation à deux échelles, la première "macro" expliquée au chapitre 2, sur le comportement énergétique d'un campus universitaire et la deuxième « détaillée » sur la méthodologie de décision pour l'évolution durable des bâtiments existants présentée dans ce chapitre 4.

Dans la première partie de ce chapitre, les bases théoriques de la méthode d'aide à la décision et d'optimisation-multicritères sont décrites puis adaptées et appliquées aux bâtiments tertiaires. Dans la deuxième partie la méthodologie d'évaluation proposée est décrite, enfin un cas d'application, avec une évaluation thermique et économique simplifiées, est proposé dans la troisième partie.

4.2 Contexte

4.2.1 Qu'est qu'un modèle d'aide à la décision ?

A l'origine, les problèmes décisionnels se réduisaient à la minimalisation d'une exigence économique. Simon, en 1960 pose les premières bases de l'aide à la décision mais, avec l'émergence des analyses multicritères prenant en compte une réalité beaucoup plus complexe, ils peuvent traiter différents domaines. Aujourd'hui, les études se concentrent sur le développement d'outils et de méthodes d'analyse qui permettent de guider le choix des décideurs vers un compromis judicieux.

La Théorie de l'Utilité est la méthode la plus couramment utilisée dans l'aide à la décision en conception (Von Neumann & Morgenstern, 1945). Une notion de préférence est donnée à chaque alternative (Keeney & Raiffa, 1993).

L'aide à la décision s'appuie sur la modélisation d'une situation de choix. Il est important de bien caractériser les critères pour réaliser ce choix devant une prise de décision complexe. Cette complexité est due notamment au nombre de choix et à la mise en concurrence d'objectifs contradictoires (Taillandier, 2009 et D'Aula, 2011) Peut-on trouver une méthodologie qui permettrait de prendre en compte tout cette complexité ?

L'utilisation d'un seul critère ne peut pas représenter la richesse de la décision car on devrait sous un même chiffre, traduire la multitude de critères qui peuvent être des valeurs quantitatives très différentes voire qualitatives. C'est pour cela que la modélisation multicritère (Bouyssou, 1993 et Vincke, 1992) permet de mettre en relation différentes alternatives, concrètes et communes aux différents acteurs, autour desquels ils classent et comparent ces alternatives en leur donnant une hiérarchisation.

4.2.2 Les différents types de modèle

Les différentes méthodes d'aide à la décision multicritère ont été répertoriées et classées en trois catégories par Roy (1985) :

- celles se basant sur l'agrégation de l'ensemble des critères en un unique critère synthétique,
- celles qui permettent d'établir une décision par le biais de comparaison par paire des alternatives
- celles qui se basent sur l'amélioration pas à pas d'une décision initiale.

Les critères synthétiques

L'approche utilise une fonction qui agrège tous les critères d'une alternative en une valeur unique qui sera optimisée. Afin de hiérarchiser chaque critère face aux autres, un système de pondération (« moyenne pondérée ») est généralement utilisé (Roy, 1985).

Trois problèmes se dégagent de ce type de méthode (Ben Mena, 2000) :

- la commensurabilité, c'est-à-dire qu'une échelle de comparaison unique doit être utilisée,
- l'unicité du résultat qui ne considère pas la diversité des alternatives,
- l'attribution des pondérations qui doit représenter la volonté du décideur.

Les méthodes les plus utilisées pour la résolution de nombreux problèmes ont été répertoriées par Martel (1999) : MAUT (Keeney & Raiffa, 1993), SMART (Edwards & Barron, 1994), UTA (Jacquet-Lagrange & Siskos, 1982), TOPSIS (Hwang & Yoon, 1981), AHP (Saaty, 1977) et GP (Charnes, Cooper, & Ferguson, 1955).

Comparaison par paire des alternatives

La comparaison par paires des alternatives compare par paire chaque décision possible et en construit des relations de surclassement. Cette approche résout partiellement le problème de pondération mais avec un manque de clarté (Ben Mena, 2000).

Plusieurs méthodes principalement françaises appartiennent à cette catégorie Martel (1999): ELECTRE (Roy, 1968), PROMETHEE (Brans, Vincke, & Mareschal, 1986), ORESTE (Roubens, 1982), QUALIFLEX (Paelinck, 1978), REGIME (Hinloopen, Nijkamp, & Rietveld, 1983), N-TOMIC (Massaglia & Ostanello, 1991) et MACBETH (Bana e Costa & Vansnick, 1993).

Amélioration pas à pas d'une décision initiale

L'amélioration pas à pas d'une décision initiale consiste à choisir une alternative de départ aussi bonne que possible. Puis, une meilleure solution est cherchée au voisinage de cet ensemble (Ben Mena, 2000). La décision finale dépend souvent du choix du décideur arrêtant le processus de recherche quand il juge que la solution trouvée est suffisamment pertinente.

Cette catégorie est composée de nombreuses méthodes basées sur des algorithmes plus ou moins sophistiqués tels que ceux basés sur l'interactivité (Zionts, 1980), ceux basés sur la Théorie de l'Utilité Multi-Attribut (Köksalan & Bilgin Özpeynirci, 2009), et ceux basés sur l'exploration de solutions (Benayoun et al., 1971).

4.2.3 Les modèles d'optimisation appliqués aux bâtiments

De nombreux secteurs de l'industrie comme la mécanique, la chimie, les télécommunications, l'environnement ou le transport sont concernés par des problèmes complexes de grandes dimensions et multi-objectifs (coûts financiers, qualité de services) pour lesquels les décisions doivent être prises de façon optimale.

Un problème d'optimisation se définit comme la recherche d'un minimum ou d'un maximum ou d'un ensemble d'optima d'une fonction-objectif. L'optimisation est un « essai » mathématique qui cherche à analyser et à résoudre analytiquement ou numériquement les problèmes qui consistent à déterminer le meilleur élément de l'ensemble.

Particulièrement dans le secteur construction (patrimoine bâti), ces méthodes quantifient différentes décisions qui optimisent la performance d'un bâtiment dans la phase de conception où l'objectif principal de l'optimisation est souvent de réduire les coûts et la consommation énergétique tout en préservant une qualité d'ambiance pour l'utilisateur.

Les méthodes d'optimisation, les plus utilisées dans la construction, sont du type multi-objectif, objectif simple ou somme pondérée. Elles sont appliquées principalement dans la conception de l'enveloppe, pour diminuer la consommation énergétique, pour optimiser le cycle de vie ou pour livrer les solutions optimales d'une réhabilitation.

Les principaux types d'optimisation utilisés dans les bâtiments, répertoriés par Evins (2013) et résumés ici sont les suivantes :

- 1) L'optimisation de la conception de l'enveloppe du bâtiment par rapport :
 - aux façades par type (Romero D., Rincn J., & Almaso N., (2001), Zemella, et. al, (2011), Park C.-S., Augenbroe G., & Messadi T., (2003) et Saelens D., et al., (2005)),
 - à la température et débit d'air (Yoon, Park, & Augenbroe, 2011) et son contrôle (Evins R., Pointer P., & Vaidyanathan R., 2011),
 - au type de matériaux à utiliser, à la forme et à l'orientation du bâtiment (Massobrio & Sertorio, 1991),
 - à la quantité des apports solaires (Marsh A., 2003),
 - aux propriétés thermiques et visuelles de l'enveloppe (Mahdavi A. & Mahattanatawe P., 2003)
 - au coût de la construction par rapport au type de mur et au type de fenêtres (Diakaki, Grigoroudis, & Kolokotsa, 2008),
 - à la quantité et qualité de la lumière naturelle intérieure par rapport à la taille de la fenêtre, à leur emplacement et aux masques proches ou distants (Torres S.L. & Sakamoto Y., (2007), Wetter & Polak, (2005), Wright J. & Mourshed M., (2009), Turrin, Von Buelow, & Stouffs, (2011), Gagne & Andersen, (2012), Coley & Crabb, (1997) et Cassol, Schneider, França, & Silva Neto, (2011)),
 - à la diminution de l'inconfort des usagers par rapport aux propriétés des matériaux de l'enveloppe (Bouchlaghem & Letherman, 1990), au climat, à la performance énergétique, à l'orientation, aux matériaux de l'enveloppe, aux type de systèmes, aux protections solaires (Attia, et al. 2012).

- 2) La diminution de la consommation énergétique par rapport :
 - à la forme du bâtiment (Adamski, 2007),
 - à son orientation (Mohammad S. Al-Homoud, 1997),
 - à son emplacement (Kämpf & Robinson, 2009),
 - aux propriétés des matériaux de l'enveloppe (M.S. Al-Homoud, (2005) et M.S. Al-Homoud, (2009),
 - à la quantité de surface vitrées (Leskovar & Premrov, (2011), Marks (1997), Ghisi E. & Tinker J. (2001) et Caldas & Norford (2002)),
 - aux systèmes de ventilation (Sahu, Bhattacharjee, & Kaushik (2012), Zhang, Wright, & Hanby (2006), Wright et al. (2008))
 - aux apport solaires (Sullivan, Lee, & Selkowitz 1992),
 - aux ombres et géométrie de l'enveloppe (Znouda, Ghrab-Morcos, & Hadj-Alouane 2007),

- 3) L'optimisation du cycle de vie, par rapport :
 - à l'analyse des coûts et impacts (Tuhus-Dubrow & Krarti (2010), Wang, Zmeureanu & Rivard (2005), Wang, Rivard, & Zmeureanu (2006), Mela, Tiainen, & Heinisuo, 2012)).
 - au facteur de forme, orientation et quantité de surface vitrées (Wang W., Rivard H. & Zmeureanu R.G. 2003), à la quantité et qualité des isolants (Hasan, Vuolle, & Sirén, 2008),
- 4) L'optimisation lors de la réhabilitation par rapport :
 - au type de construction, à la puissance de la lumière et à sa gestion (Pernodet Chantrelle F., Lahmidi H., & Michel P., 2009),
 - aux coûts, à utilisation de l'énergie et au confort (Pernodet Chantrelle, et al., 2011),
 - au coût, à l'utilisation d'énergie et à la productivité, optimiser l'enveloppe et des systèmes (Jin & Overend, 2012),
 - au coût et à l'énergie, optimiser la réhabilitation par rapport à l'enveloppe et les systèmes solaires thermiques (Asadi, Da Silva, Antunes, & Dias 2012).

4.3 La base méthodologique d'aide à la décision multicritère

Dans cette partie, on utilisera la base méthodologique de la méthode multicritère OIA (Observation, Interprétation et Agrégation) (Collignan, 2011 et Quirante, 2012) pour évaluer les bâtiments dans la phase d'exploitation, avec des informations qui livrent des valeurs quantifiables et des objectifs de performance d'un bâtiment tertiaire, en incorporant l'appréciation des usagers.

Ensuite, on décrit les principaux termes, les bases de la théorie et l'explication de l'adaptation de ce modèle utilisé dans l'évaluation d'un bâtiment tertiaire vers une méthode d'aide à la décision.

4.3.1 La fonction de désirabilité (d'acceptabilité)

La fonction de désirabilité représente le degré d'accord entre les objectifs observés sur le problème et le niveau des réponses modélisées. La désirabilité livre son équivalent en pourcentage de satisfaction d'un compromis en fonction d'une réponse calculée par le modèle, dans une fonction aux objectifs fixés sur cette réponse.

A chaque variable d'observation y_i , est associée une fonction de désirabilité z_i qui prend des valeurs entre 0 et 1. La fonction de désirabilité est alors représentative du niveau de satisfaction pour l'objectif considéré (Eq. 4.1).

$$z(y_i) : [f_{\min}, f_{\max}] \rightarrow [0, 1] \quad (4.1)$$

Les principales fonctions de désirabilité peuvent prendre trois allures possibles (figure 4.1) en accord avec le type d'optimisation que on le recherche : (a) minimiser, (b) cibler ou (c) maximiser.

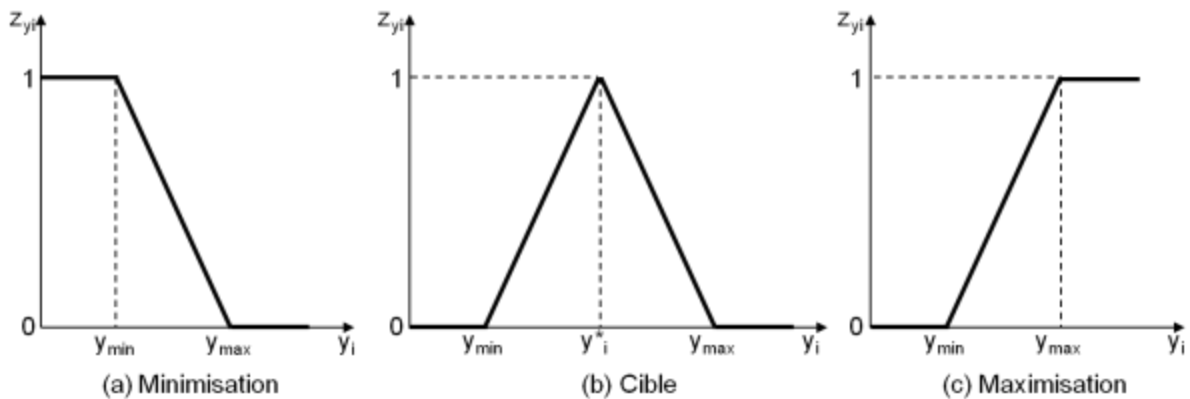


Figure 4.1 : Allure des fonctions de désirabilités

Les fonctions de désirabilités ont été définies par différents auteurs tels que Derringer & Suich, (1980), Harrington (1965), Del Castillo, Montgomery, & McCarville (1996) ou Ch'ng, Quah, & Low (2005). Cependant ces fonctions possèdent l'inconvénient de ne pas répondre aux exigences suivantes :

- tendre vers 0, ou éventuellement ne prendre cette valeur qu'en un seul point,
- tendre vers 1, ou éventuellement ne prendre cette valeur qu'en un seul point et
- ne pas utiliser de paliers de valeurs.

Par conséquent, nous choisissons les fonctions de désirabilité proposées par Harrington et modifiées par (Sebastian, Quirante, Ho Kon Tiat, & Ledoux, 2010), fonctions que nous appellerons **fonctions d'acceptabilité** et qui ont comme objectif d'évaluer le pourcentage de satisfaction d'un compromis (ici par exemple cibler le confort, minimiser la consommation ou maximiser l'utilisation d'énergies renouvelables). La figure 4.2 montre les allures des fonctions d'acceptabilité définies dans les équations 4.2, 4.3 et 4.4.

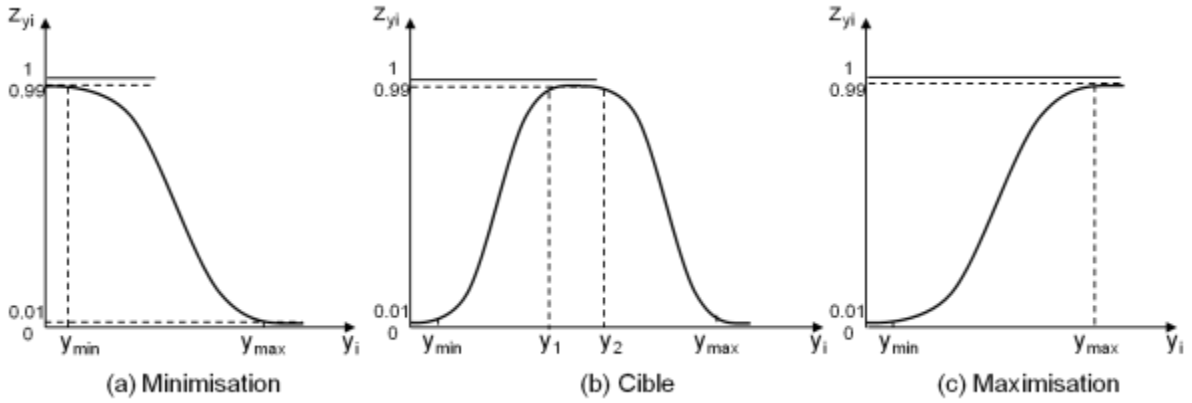


Figure 4.2 : Allures des fonctions d'acceptabilité

(a) Minimisation

$$z_{y_i} = \exp(-\exp(\beta + \alpha \cdot y_i))$$

$$\text{avec} \cdot \begin{cases} \alpha = \frac{\ln(\frac{\ln(0,01)}{\ln(0,99)})}{y_{\max} - y_{\min}} \\ \beta = \ln(-\ln(0,99)) - \alpha \cdot y_{\min} \end{cases} \quad (4.2)$$

(b) Cible

$$z_{y_i} = \exp\left(-\left|\frac{2 \cdot y_i - (U + L)}{U - L}\right|^n\right)$$

$$\text{avec} \cdot n = \frac{\ln(-\ln(0,99))}{\ln\left(\left|\frac{2 \cdot y_1 - U - L}{U - L}\right|\right)} ; U = \frac{y_{\max} + y_2}{2} \cdot \text{et} \cdot L = \frac{y_{\min} + y_1}{2} \quad (4.3)$$

(c) Maximisation

$$z_{y_i} = \exp(-\exp(\beta + \alpha \cdot y_i))$$

$$\text{avec} \cdot \begin{cases} \alpha = \frac{\ln(\frac{\ln(0,01)}{\ln(0,99)})}{y_{\max} - y_{\min}} \\ \beta = \ln(-\ln(0,99)) - \alpha \cdot y_{\max} \end{cases} \quad (4.4)$$

Dans notre cas d'étude, il y a 12 critères d'évaluation (donc 12 variables d'observation) avec 8 unités de mesures différentes. Il est donc nécessaire de normaliser chaque critère sur une échelle de mesure commune. L'utilisation de la fonction d'acceptabilité assure la transformation de toutes les fonctions-objectifs obtenues à partir de différentes échelles de mesures en une échelle unique d'acceptabilité et sans dimension.

4.3.2 L'agrégation de multicritères

Cette partie a pour but de transformer le problème multicritère en un problème monocritère. Ici pour chaque indicateur, on a différents critères qui le composent, et différents indicateurs qui composent chaque scénario de décision. Par conséquent, l'agrégation regroupe des critères, des indicateurs et des scénarios en une seule valeur.

Cherqui (2005) définit les méthodes agrégatives comme « l'inclusion de l'ensemble des données dans une formule mathématique en vue de l'obtention d'une valeur unique ».

Les principales méthodes d'agrégation sont :

- La moyenne arithmétique qui est la somme des valeurs numériques (des données) divisée par le nombre de ces valeurs. L'avantage ou le défaut important de cette moyenne est que si l'une des variables est nulle (un critère totalement insatisfaisant), la variable de sortie d'agrégation n'est pas nulle pour autant. Une solution avec un critère nul est rédhibitoire.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (4.5)$$

- La moyenne arithmétique pondérée qui est l'addition des valeurs chacune pondérée par une préférence (pondération ou poids w_i)

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n w_i x_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (4.6)$$

- La moyenne géométrique qui est la racine n-ième de la multiplication des valeurs numériques. L'utilisation de cette méthode garantit que toutes les variables sont au moins légèrement satisfaisantes. Cette méthode est compensatoire, puisque la forte valeur de quelques variables compense la faible valeur pour une autre variable.

$$\bar{x} = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n x_i} \quad (4.7)$$

- La moyenne géométrique pondérée qui est la racine n-ième de la multiplication des valeurs chacune étant pondérée par une préférence (poids)

$$\bar{x} = \sqrt[\sum_{i=1}^n w_i]{\prod_{i=1}^n x_i^{w_i}} \quad (4.8)$$

Cependant on peut aussi choisir d'utiliser le meilleur ou le pire des cas, c'est-à-dire agréger les variables suivant une stratégie de scénarios pessimiste ou optimiste, considérant que seule la moins ou la plus satisfaisante renseigne sur l'ensemble des variables observées.

4.3.3 L'indice de désirabilité (acceptabilité)

Nous avons examiné la fonction d'acceptabilité pour une seule fonction-objectif et les méthodes d'agrégation. Ces différents processus vont permettre de combiner les désirabilités individuelles afin d'obtenir une désirabilité globale.

Scott et Antonsson, (1998) ont proposé l'équation 4.9 pour calculer l'indice de désirabilité, nous l'appelons ici **Indice Partiel d'Acceptabilité (IPA)**.

$$IPA = \sqrt[s]{\frac{w_1 \times z(y_1)^s + \dots + w_n \times z(y_n)^s}{w_1 + \dots + w_n}}, \text{ où :}$$

- w_i = préférence de chaque variable (4.9)
- z_{y_i} = désirabilités individuelles (définie par les équations 4.2 à 4.4)
- s = niveau de compromis $[-\infty, 0, 1, +\infty]$

La préférence de chaque variable (la pondération w_j)

Différentes méthodes de pondération existent dans la littérature : Méthodes des jeux de cartes, (Simos, 1990) ou la méthode de la grille de pointage (Bard, 1992). La méthode que l'on a choisie d'utiliser est le Processus d'Analyse Hiérarchique (AHP) de Saaty, (1977 et 2008) pour à sa grande popularité pour déterminer la priorisation dans problèmes très variés comme la politique, les aspects sociaux, les envies personnelles, l'éducation, l'industrie ou l'ingénierie (Martínez, et al, 2010, Forman & Selly, 2001 et Vaidya & Kumar, 2006).

Dans ce processus, on calcule un poids (w_j) à chaque alternative, en réalisant une comparaison deux à deux de tous les critères. Les différentes étapes de la priorisation AHP sont illustrées dans la figure 4.3.

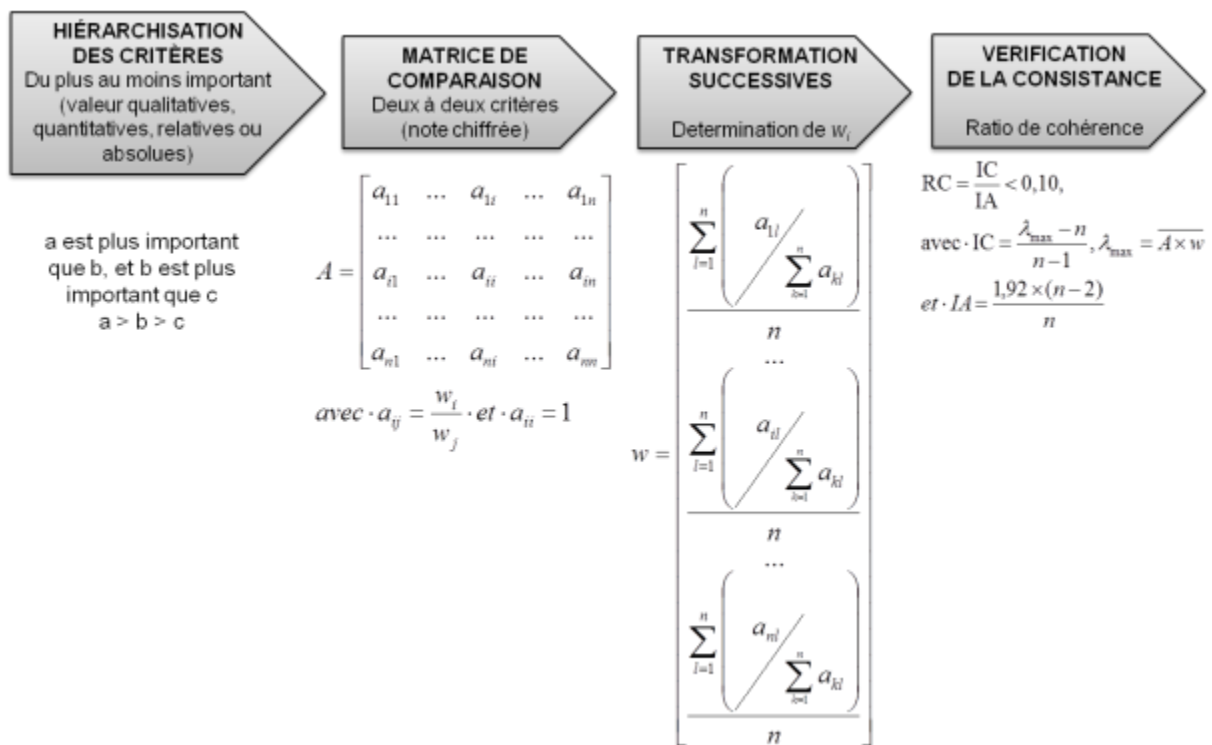


Figure 4. 3 : Etapes de la méthodologie AHP

Le niveau de compromis (s)

Le niveau de compromis permet de retrouver différentes fonctions d'acceptabilité, lesquelles sont définies à partir des méthodes d'agrégation, mais ici on présentera seulement les quatre les plus utilisées (Scott & Antonsson, 1998).

1. Valeur minima ($s \rightarrow -\infty$)

L'IPA prendra la valeur minimale (équation 4.10) de toutes les fonctions individuelles d'acceptabilité. Ainsi nous assurons que l'on donne une attention particulière à la valeur minimale dans l'indice final de l'évaluation. Cette approche permet de chercher à améliorer le comportement le plus mauvais, mais elle implique que les autres critères ne font pas partie de l'évaluation finale et que l'appréciation n'est pas prise en compte.

$$IPA = \min_{x \in \{1, X\}} de \cdot Z(y_i) \quad (4.10)$$

2. Pondération de nullité ($s \rightarrow 0$)

La fonction générique (équation 4.11) est égale à la moyenne géométrique pondérée de toutes les acceptabilités associées à chaque objectif. Dans ce cas, nous donnons la même pondération à chaque variable. Mais ici le but recherché est de faire que chaque valeur minimale soit compensée par la plus forte, c'est-à-dire accentuer le meilleur comportement de tous les indicateurs.

$$IPA = (w_1 \cdot Z(y_1)^{w_1} \times \dots \times w_i \cdot Z(y_i)^{w_i} \times \dots \times w_n \cdot Z(y_n)^{w_n})^{\frac{1}{w_1 + \dots + w_i + \dots + w_n}} \quad (4.11)$$

3. Pondération d'unité ($s = 1$)

La fonction générique d'IPA (équation 4.12) est égale à la moyenne arithmétique pondérée de toutes les acceptabilités associées à chaque objectif. Elle est appliquée quand nous trouvons la variable qui est nulle dans les options. Par conséquent nous délivrons une alerte au décideur, en lui disant qu'il existe un indicateur qui génère des problèmes, et pourtant les alternatives à chercher devront augmenter le degré d'accomplissement de cet indicateur.

$$IPA = \frac{w_1 \cdot Z(y_1) + \dots + w_i \cdot Z(y_i) + \dots + w_n \cdot Z(y_n)}{w_1 + \dots + w_i + \dots + w_n} \quad (4.12)$$

4. Valeur maxima ($s \rightarrow +\infty$)

L'IPA prendra la valeur maximale (équation 4.13) de toutes les fonctions d'acceptabilité ; avec ceci nous assurons que l'indice final de l'évaluation ait un résultat excellent. Elle permet d'accentuer seulement le meilleur comportement. Mais comme la valeur minimale, les autres critères ne font pas partie de l'évaluation finale et l'appréciation n'est pas prise en compte.

$$IPA = \max_{x \in \{1, X\}} de \cdot Z(y) \quad (4.13)$$

4.3.4 Les différentes parties de la méthodologie d'aide à la décision

Dans le but de simplifier la tâche d'évaluation énergétique et environnementale dans la multiplicité de caractéristiques, des acteurs et des attentes d'un campus universitaire, cette méthodologie prend en compte cette complexité en livrant une unique trame d'évaluation.

L'évaluation globale de toutes les problématiques énergétiques et environnementales est séparée en deux analyses 1) une analyse macro qui considère l'ensemble universitaire (décrit dans le chapitre 2) 2) une analyse détaillée des bâtiments « types » représentatifs de tout cet ensemble universitaire.

Cette analyse détaillée est la méthodologie de décision pour une évolution durable des bâtiments existants. La démarche méthodologique composée de 2 parties est présentée de façon synthétique dans la figure 4.4 telle que :

- 1) Évaluation technique composée :
 - du modèle d'interprétation qui a comme objectif de transformer les variables d'observation (critères énergétiques et environnementaux) en valeurs adimensionnelles,
 - du modèle d'agrégation qui a comme objectif d'unir les variables d'interprétation avec les scénarios de décision (IPA) et les scénarios de décision dans une seule valeur d'évaluation (IGE)
- 2) Évaluation économique synthétique composée de l'analyse économique dans laquelle on évalue quantitativement différentes actions d'améliorations énergétiques sélectionnées dans l'analyse macro.

Finalement des résultats obtenus par l'évaluation technique et économique, le modèle de décision va nous permettre d'évaluer via une note technique et économique si le bâtiment continue à être exploité ou doit être réhabilité.

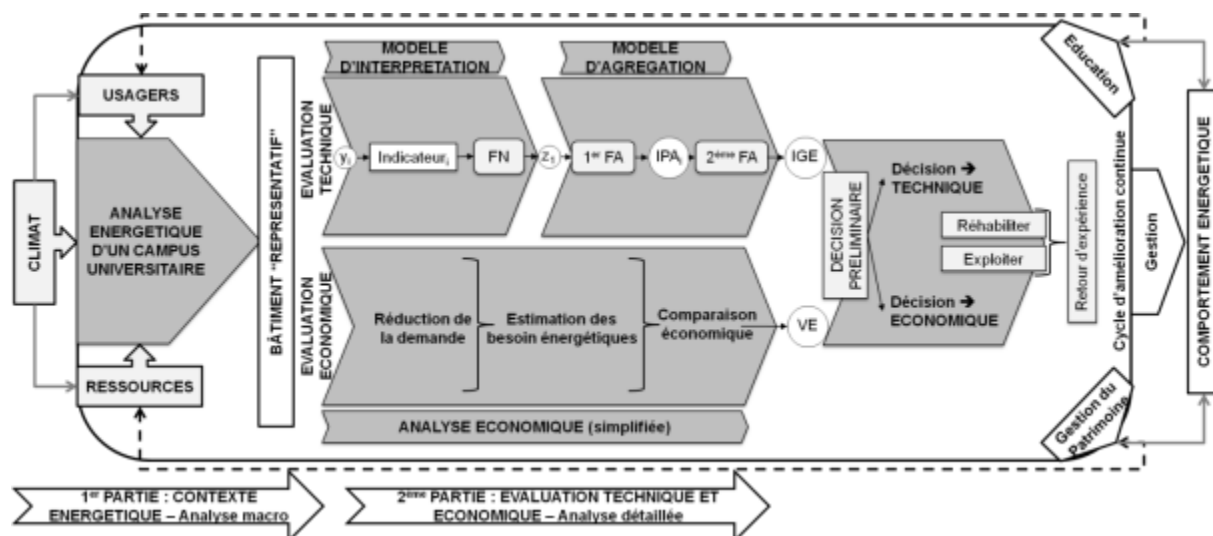


Figure 4. 4 : Les différentes parties de la méthodologie de décision

4.3.4.1 L'évaluation technique : Les modèles d'interprétation et d'agrégation

L'objectif de cette phase est de livrer un indice global qui quantifie l'état actuel du comportement d'un bâtiment « type » représentatif de l'ensemble universitaire en fonction de différents scénarios de décision et d'indicateurs qui en font partie.

Les scénarios ont été définis par rapport aux piliers du développement durable tels que : le scénario économique, le scénario environnemental et le scénario social. Ainsi, les critères qui composent les indicateurs sont l'énergie, les émissions de CO₂, les énergies renouvelables, les confort acoustique, visuel, hygrothermique et olfactif (variables d'observation), dont le choix, les critères et les intervalles d'évaluation ont été expliqués au chapitre 3.

Cette partie résumée dans la figure 4.5 est composée de deux modèles : celui d'interprétation et celui d'agrégation.

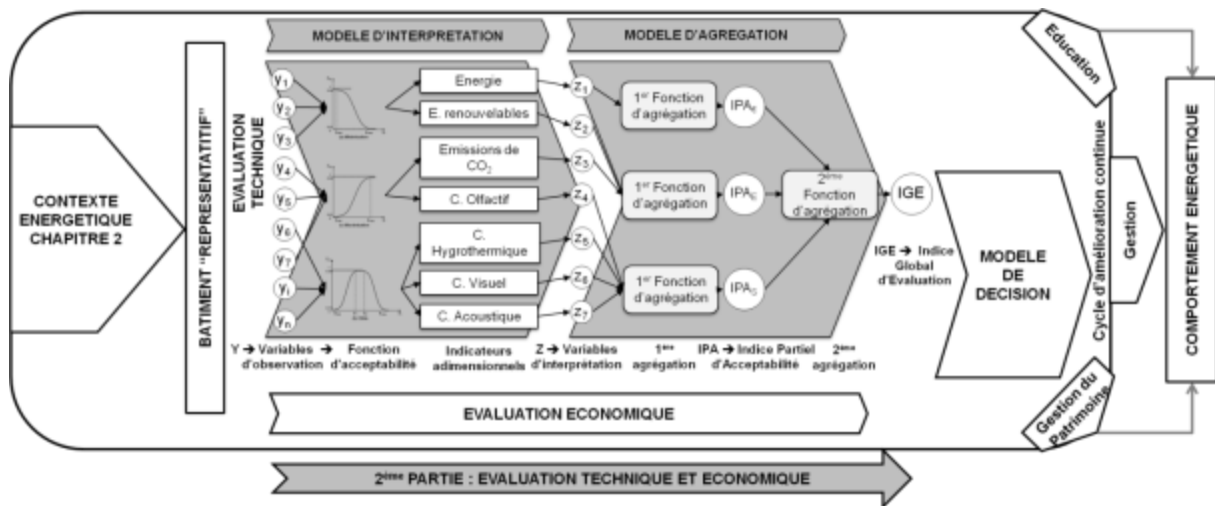


Figure 4. 5 : L'évaluation technique

Le **modèle d'interprétation** a comme objectif d'évaluer l'état des critères transformés en valeurs numériques adimensionnelles par différentes fonctions de normalisation, appelées « fonctions d'acceptabilité » (équations 4.2, 4.3 ou 4.4),

La deuxième étape appelée **modèle d'agrégation** permet d'abord d'attribuer à chaque indicateur et scénario la priorité que les usagers lui ont donnée (méthodologie AHP, « poids »). Puis de mettre en relation chaque indicateur avec chaque scénario de décision (*IPA*) et chaque scénario dans un indice global d'évaluation (*IGE*) dans une agrégation par cycle (au travers de la fonction d'agrégation, équation 4.9).

Pour cette première analyse, l'Indice Global d'Évaluation livre une vision technique du comportement actuel du bâtiment en donnant une piste préliminaire sur le choix à faire entre maintenir l'état actuel ou réhabiliter conformément aux valeurs obtenues.

4.3.4.2 L'évaluation économique simplifié : la consommation énergétique et l'investissement

Cette analyse économique (simplifiée) (figure 4.6) évalue quantitativement les différentes actions d'améliorations énergétiques sélectionnées dans l'analyse macro (chapitre 2). C'est-à-dire que l'on évalue les nouvelles demandes d'électricité et de chauffage à partir des réductions de la demande énergétique et d'un travail de sensibilisation des usagers.

Ces valeurs sont comparées à l'économie d'énergie obtenue et aux prix d'une réhabilitation, ceci en considérant la variation projetée du prix de l'énergie dans le temps durant lequel l'investissement pour la réhabilitation sera amorti. De cette façon, la Valeur Économique (*VE*) obtenue quantifie ces actions d'améliorations énergétiques et les compare avec une décision préliminaire de « réhabilitation ».

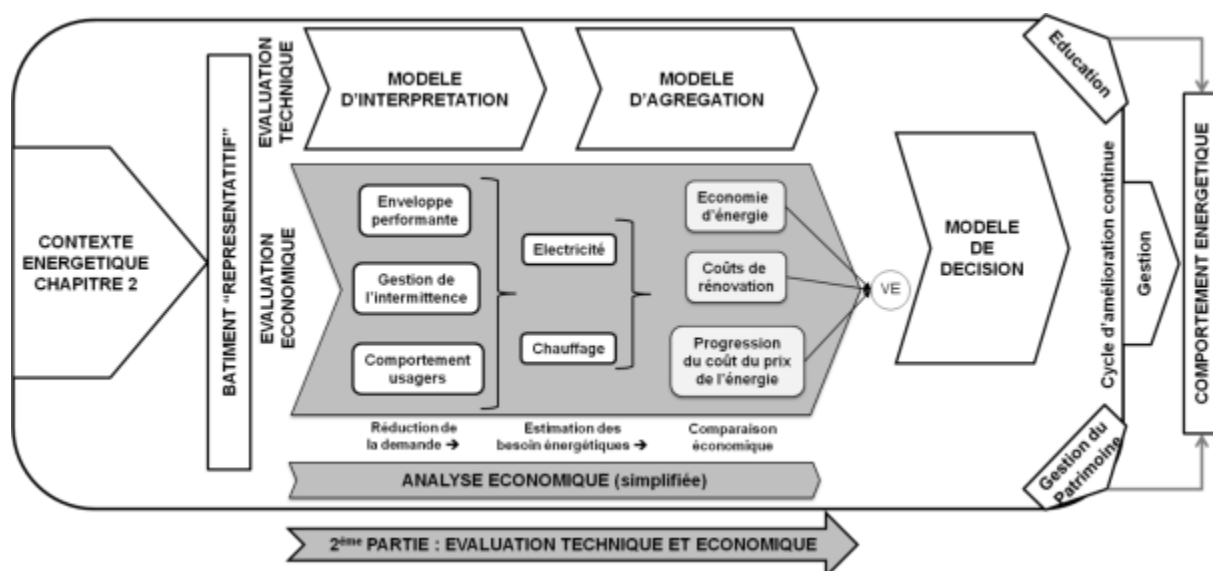


Figure 4. 6 : L'évaluation économique

4.3.4.3 Le modèle de décision

Finalement à partir de l'Indice Global d'Evaluation (*IGE*) obtenu par l'évaluation technique et de la valeur économique (*VE*), on présente au décideur ces informations comme appui à la décision entre :

- 1) Continuer l'exploitation avec des améliorations légères dans le comportement, par exemple si les valeurs *IGE* sont acceptables (supérieures à 80 %),
- 2) Faire une réhabilitation lourde (qui va touche la structure et l'enveloppe du bâtiment) si les valeurs d'*IGE* sont mauvaises (moins de 20 %) et *VE* est inaccessible dans une période déterminée du temps
- 3) Faire une réhabilitation légère si les deux valeurs d'*IGE* et *VE* se trouvent entre les deux cas précédents.

Dans le cas où l'on décide de continuer l'exploitation ou de réhabiliter, on projettera la modification de ces valeurs d'observation et on fera une nouvelle évaluation avec les nouvelles variables d'interprétation (y'_i) (figure 4.7).

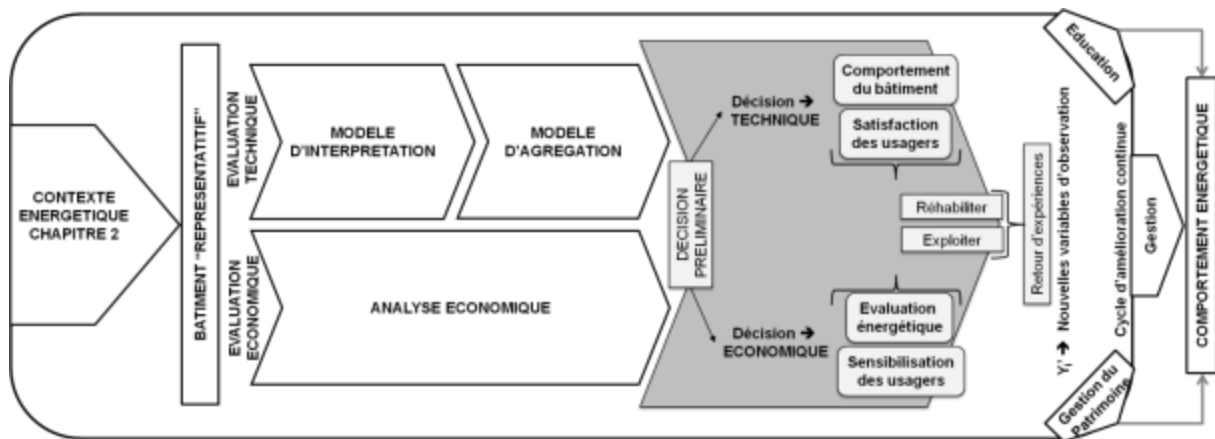


Figure 4. 7 : Le modèle de décision énergétique

4.4 L'application de la méthodologie

Pour valider la méthodologie d'évaluation, différentes campagnes de mesures ont été réalisées dans trois types de bâtiments, chacun représente différentes activités réalisées au sein de l'Université Bordeaux 1 - TPG (figure 4.8). Comme on a déjà décrit au chapitre précédent :

- un du type administratif – A (bureaux),
- un d'enseignement – E (salles de conférences et salles de classes) et
- un de recherche – R (laboratoires)



Figure 4. 8 : Les bâtiments évalués : A12 (recherche-R), C04 (administration-A) et A09 (enseignement-E)

4.4.1 L'évaluation technique

Les valeurs du **modèle d'interprétation** les valeurs y_i ont été détaillées dans le chapitre précédent et les valeurs z_i de chaque critère ont été calculées à partir de la fonction- objectif (FO) définie dans les équations 4.2, 4.3 et 4.4.

Le tableau 4.1 résume :

- les différents résultats des campagnes de mesures, de lecture des consommations d'électricité et de l'estimation de la consommation de gaz (valeurs d'observation - y_i),

- la fonction-objectif utilisée pour transformer chaque critère en une valeur adimensionnelle et obtenir les variables d'interprétation - z_i .

Indicateur	Critère	Intervalle]y ₀ – y ₁ [FO	A12		A09		C04	
			y _i	z _i	y _i	z _i	y _i	z _i
Energie (E)	Consommation de gaz et d'électricité (kWh _{EF} /(m ² .an))	]50 – 500[minimiser	271	0,10	91	0,97	246	0,29
Energies renouvelables (EnR)	Production d'énergies renouvelables (kWh _{EF} /(m ² .an))	]0-50[maximiser	0	0,01	0	0,01	0	0,01
Emissions de CO₂ (CO2)	Quantité d'émissions de CO ₂ (kg.eqCO ₂ /(m ² .an))	]5 – 145[minimiser	74	0,81	24	0,98	69	0,85
Confort olfactif (CO)	Satisfaction olfactive (%)	]0 – 100[maximiser	74	0,95	73	0,94	65	0,92
Confort visuel (CV)	Quantité de vues (%)	]0 – 50[cibler	12	0,98	24	0,99	6	0,01
	Distance (max) aux vues (m)	]0 – 6[cibler	6,1	0,01	6,6	0,01	4,5	0,17
	Quantité d'éclairage (lux)	]250 – 1000[cibler	592	0,99	615	0,99	666	0,99
Confort acoustique (CA)	Niveau de bruit (dBA)	]32 – 50[cibler	56	0,01	43	0,99	37	0,99
Confort hygrothermique (CH)	Température Intérieure (°C)	]17 – 25[cibler	21	0,99	22	0,99	23	0,99
	Vitesse de l'air (m/s)	]0,05 – 0,25[cibler	0,3	0,01	0,03	0,01	0	0,01
	Humidité relative (%)	]40 – 60[cibler	43	0,63	44	0,92	45	0,99
	Satisfaction hygrothermique (%)	]0 – 100[maximiser	34	0,56	50	0,81	65	0,92

Tableau 4. 1 : Les valeurs des différents critères retenus dans la méthodologie d'évaluation

Dans les résultats ci-dessus on observe que :

- la consommation énergétique et sa relation directe avec les émissions de CO₂, est plus importante pour les bâtiments de recherche et d'administration. Dans le premier cas, cette consommation est due au matériel scientifique alors que dans le deuxième elle est due aux serveurs et ordinateurs personnels. Pour la consommation de gaz, le bâtiment le plus consommateur est le plus occupé pendant la période hivernale,
- pour les énergies renouvelables, aucun bâtiment produit d'énergie du type renouvelable à la date de cet étude et
- pour les différents critères de confort : on observe que les meilleurs sont la satisfaction olfactive, la quantité d'éclairage et la température intérieure et les pires sont les distances aux vues et la vitesse de l'air.

Le tableau 4.2 montre les valeurs d'interprétation pour les différents indicateurs, calculés en fonction de la moyenne arithmétique (équation 4.5) entre les différents critères qui forment l'indicateur. Par exemple la valeur d'interprétation de l'indicateur confort visuel est obtenue à partir de la moyenne arithmétique entre les critères des quantités de vues, de la distance à la vue et de la quantité d'éclairage

Scenarios	Indicateur	A12	A09	C04
Economique (ECO)	Energie (E)	0,10	0,97	0,29
Environnemental (ENV)	Energies renouvelables (EnR)	0,01	0,01	0,01
	Emissions de CO ₂ (CO ₂)	0,81	0,98	0,85
Social (SOC)	Confort olfactif (CO)	0,95	0,94	0,92
	Confort visuel (CV)	0,66	0,66	0,33
	Confort acoustique (CA)	0,01	0,99	0,99
	Confort hygrothermique (CH)	0,55	0,68	0,72

Tableau 4. 2 : Les valeurs des différents indicateurs ($Z_{(yi)}$)

Dans la représentation graphique des résultats (figure 4.9), les variables d'interprétation Z_{yi} pour la moyenne arithmétique montrent que :

- les émissions de CO₂ et le confort olfactif sont les indicateurs avec un accomplissement presque excellent (moyenne 91%),
- contrairement à l'énergie pour le A12 et C4 qui est l'indicateur le plus déficient (moyenne 20 %), ainsi que la production d'énergies renouvelables pour les trois bâtiments types.

Finalement, nous pouvons observer que le profil du bâtiment d'enseignement possède un meilleur accomplissement, 4 des 7 indicateurs ont une valeur supérieure à 80%.

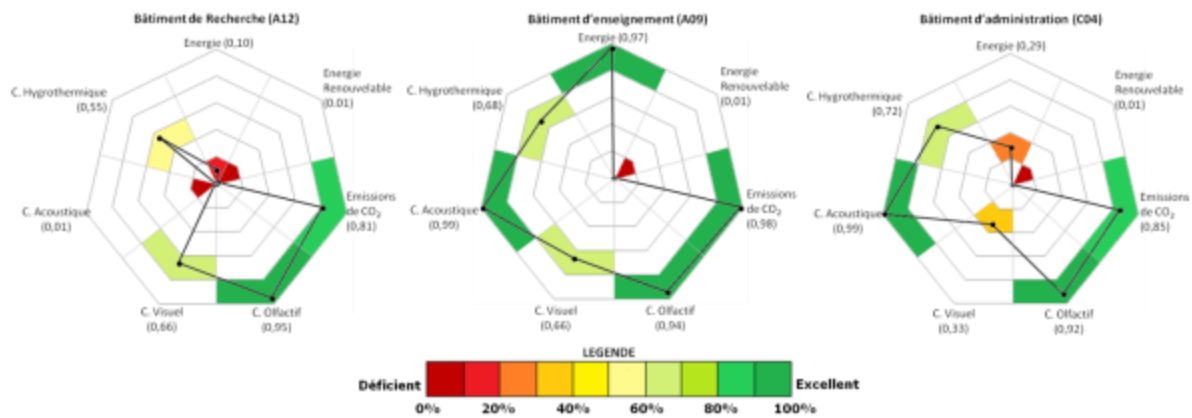


Figure 4.9 : Les valeurs d'interprétation des indicateurs des trois bâtiments évalués

Dans les résultats du **modèle d'agrégation**, on montrera les résultats pour un niveau de compensation de nullité (équation 4.11) et d'unité (équation 4.12), car un des buts de la méthodologie est de faire participer les usagers de l'université au travers les niveaux d'appréciation (w_i).

Pour établir le degré d'appréciation que les usagers (universitaires) donnent aux indicateurs et aux scénarios, trois enquêtes ont été réalisées (le détail des questions est dans l'annexe A.4.1) : une à la Pontificia Católica du Chili (ECCUC), une autre à l'Université Bordeaux IV – Montesquieu et la dernière à l'Université Bordeaux 1 - Campus Sciences et Technologies, en France. Dans les tableaux 4.3 et 4.4, on détaille l'enquête de l'Université Bordeaux 1 réalisée durant le mois de mars 2012, 800 personnes sur 11°500 usagers ont répondu à l'enquête ce qui a permis de construire la matrice de hiérarchisation. Les résultats détaillés des autres campus sont analysés dans le travail de Valderrama Ulloa & Puiggali, (2013) et les résultats résumés sont décrits dans l'annexe A.4.2.

Le tableau 4.3 résume les résultats de la hiérarchisation que chaque usager (chercheur, étudiants et administratifs) donne aux 7 indicateurs (Energie, Energie Renouvelable, Emissions de CO₂, Confort Olfactif, Confort Visuel, Confort Acoustique et Confort Hygrothermique), la matrice de comparaison, le niveau d'appréciation (w_i) et la vérification de la consistance ($RC < 0,10$) des résultats, selon la méthode décrite dans la figure 4.3.

Usagers	Chercheurs							Etudiants							Administratifs						
	E>CH>EnR>CV>CO ₂ >CA>CO							E>EnR>CH>CO ₂ >CV>CA>CO							E>CH>EnR>CO ₂ >CV>CA>CO						
Indicateurs	E	EnR	CO ₂	CV	CA	CH	w _i	E	EnR	CO ₂	CV	CA	CH	w _i	E	EnR	CO ₂	CV	CA	CH	w _i
E	1	6	6	5	6	7	43	1	7	5	4	5	5	39	1	6	5	6	6	6	42
EnR	1/6	1	3	2	3	1/5	12	1/7	1	5	4	5	5	24	1/6	1	4	4	4	1/5	16
CO ₂	1/6	1/3	1	1	1/3	1/4	5	1/5	1/5	1	1	1	1/5	5	1/5	1/4	1	2	1	1/4	6
CO	1/5	1/2	1	1	1/2	1/4	5	1/4	1/4	1	1	1	1/3	6	1/5	1/4	1	1	1	1/2	6
CV	1/6	1/3	3	2	1	1/5	9	1/5	1/5	1	1	1	1/3	5	1/6	1/4	1/2	1	1	1/4	5
CA	1/6	1/3	1	1	1/3	1/4	5	1/4	1/4	1	1	1	1/3	6	1/6	1/4	1	1	1	1/4	5
CH	1/7	5	4	4	4	1	22	1/5	1/5	5	3	3	1	15	1/6	5	4	2	4	1	20
λ _{max}	7,81							7,81							7,81						
IC	0,14							0,14							0,14						
IA	1,41							1,41							1,41						
RC	0,099 < 0,10							0,099 < 0,10							0,099 < 0,10						

Tableau 4.3 : La matrice de hiérarchisation et le niveau d'appréciation de chaque indicateur

Les résultats de la matrice de hiérarchisation des indicateurs montrent que l'énergie est pour tous les types d'utilisateurs, l'indicateur le plus important, en moyenne 41% de préférence.

Pour les indicateurs sociaux, le souci de confort est globalement le même que soit l'activité des utilisateurs. On remarque cependant que les chercheurs et le personnel administratif sont les plus sensibles au confort thermique, alors que pour les autres indicateurs, les enseignants (chercheurs) sont plus sensibles au visuel (9%), le personnel administratif étant lui le plus sensible au confort olfactif (6%) et les étudiants au confort olfactif et acoustique (6%).

De manière générale, la priorité est donnée au développement des énergies renouvelables pour les indicateurs environnementaux. On remarque que les chercheurs et les étudiants accordent un peu moins d'importance à la réduction des émissions de CO₂ que le personnel administratif (6%).

De la même façon que dans la matrice des indicateurs, le tableau 4.4 résume les résultats de la hiérarchisation que chaque utilisateur (chercheur, étudiants et administratifs) donne aux 3 scénarios (Economique, Environnemental et Social), la matrice de comparaison, le niveau d'appréciation (w_i) et la vérification de la consistance ($RC < 0,10$) des résultats, selon la méthode décrite dans la figure 4.3.

Usager	Chercheurs				Etudiants				Administratifs			
Hiérarchisation	ENV>ECO>SOC				SOC>ENV>ECO				SOC>ECO>ENV			
Scénarios	ENV	ECO	SOC	w_i	ENV	ECO	SOC	w_i	ENV	ECO	SOC	w_i
ENV Environnemental	1	9	5	77	1	2	1/7	15	1	1/2	1/7	9
ECO Economique	1/9	1	1	11	1/2	1	1/6	10	2	1	1/8	13
SOC Social	1/5	1	1	13	7	6	1	75	7	8	1	78
λ_{max}	3,04				3,08				3,08			
IC	0,02				0,04				0,04			
IA	0,66				0,66				0,66			
RC	0,03 < 0,10				0,06 < 0,10				0,06 < 0,10			

Tableau 4. 4 : La matrice de hiérarchisation et le niveau d'appréciation de chaque scénario

Les résultats de la matrice de hiérarchisation des scénarios montrent que le pilier social domine sur les autres scénarios pour les étudiants et le personnel administratif. On peut remarquer que les piliers économique et environnemental subissent une inversion de tendance en fonction des activités des utilisateurs : les

étudiants privilégient l'environnement à l'économie alors que le personnel administratif privilégie le pilier économique.

Pour la détermination de l'Indice Partiel d'Acceptabilité, le tableau 4.5 montre la comparaison des résultats obtenus par le calcul de la fonction d'agrégation (équation 4.9), pour chaque scénario de décision entre les deux cas intermédiaire ($s \rightarrow 0$ et $s \rightarrow 1$) de niveaux de compromis (équations 4.11 et 4.12).

Scénarios (IPA)	A12		A09		C04	
	$IPA_{(s \rightarrow 0)}$	$IPA_{(s \rightarrow 1)}$	$IPA_{(s \rightarrow 0)}$	$IPA_{(s \rightarrow 1)}$	$IPA_{(s \rightarrow 0)}$	$IPA_{(s \rightarrow 1)}$
Economique	0,10	0,10	0,97	0,97	0,29	0,29
Environnemental	0,04	0,25	0,02	0,18	0,03	0,24
Social	0,27	0,51	0,77	0,78	0,70	0,74

Tableau 4. 5 : Les valeurs de chaque scénario de décision (IPA)

La figure 4.10 montre le profil des deux niveaux de compensation pour chaque scénario des trois bâtiments étudiés. On observe que pour les deux profils le comportement est assez similaire, que le bâtiment d'administration est le mieux évalué alors que le bâtiment de recherche est le moins bien noté.

On voit aussi que pour les trois bâtiments, le scénario social est le plus « efficace ».

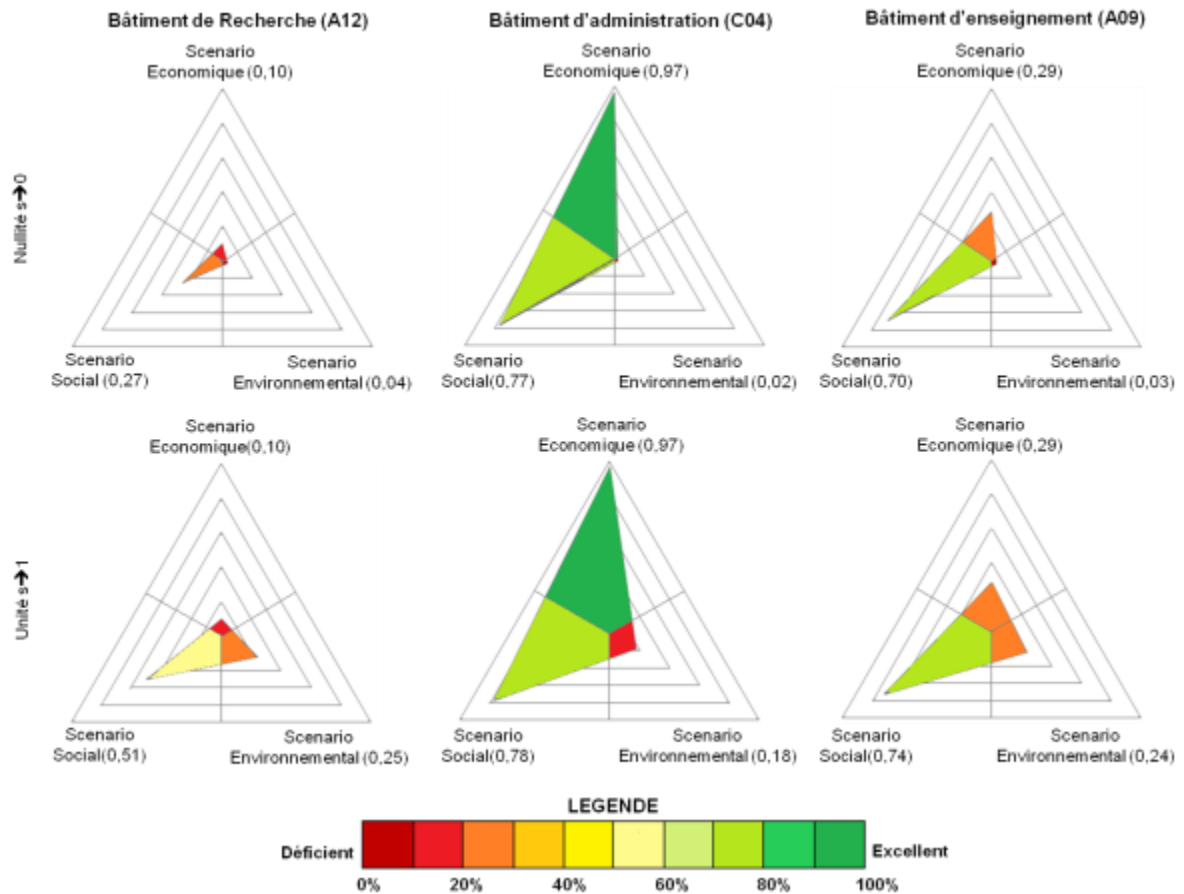


Figure 4. 10 : Les profils d'acceptabilité (IPA) des scénarios des trois bâtiments étudiés pour les deux types de compensation

Comme dans le cas précédent, le tableau 4.6 montre les résultats que l'on obtient avec les 2 niveaux de compromis, pour cette 2^{ème} famille d'agrégation.

Bâtiments Scénario	A12	A09	C04
IGE s' →0 de IPA s →0	0,05	0,46	0,48
IGE s' →0 de IPA s →1	0,24	0,64	0,59
IGE s' →1 de IPA s →0	0,07	0,68	0,59
IGE s' →1 de IPA s →1	0,26	0,71	0,63

Tableau 4. 6 : Les valeurs de chaque scenario de décision (IGE)

Les valeurs de s' →0 et s' →1 sont très similaire entre elles.

La valeur de l'évaluation technique (*IGE*) de la première décision préliminaire pour le bâtiment de recherche est entre 0,05 à 0,26, ce qui indique qu'en fonction de l'appréciation donnée par les usagers et dans un scénario intermédiaire, le bâtiment atteint seulement un 26% d'acceptation. Dans le bâtiment d'administration *IGE* est entre 0,48 – 0,63 et dans le bâtiment d'enseignement, il est entre 0,46 – 0,71, en étant le mieux évalué des trois.

Avec ces résultats préliminaires, on passe à la deuxième étape d'évaluation qui est celle de l'évaluation économique.

4.4.2 L'évaluation économique (simplifiée)

Dans cette partie, on ne montrera comme exemples, que les analyses du bâtiment de recherche car il a été le moins bien évalué.

Dans cette étape, nous évaluons une valeur économique simplifiée dérivée d'une évaluation énergétique et d'un travail de sensibilisation des usagers qui commence dans la première partie de la méthodologie (chapitre 2). Après avoir évalué les actions énergétiques économiquement faisables à réaliser ici on quantifie seulement trois actions pour étudier la faisabilité de la méthode :

1. L'amélioration de l'enveloppe au travers une isolation par l'extérieur et un changement des fenêtres du simple au double vitrage.
2. La gestion de l'intermittence de l'occupation au travers des détecteurs de présence dans les couloirs et les toilettes et la mise en veille des ordinateurs quand ceux-ci ne sont pas utilisés.
3. La sensibilisation des usagers avec des actions comme la sensibilisation du débranchement des ordinateurs après avoir terminé la période de travail, l'extinction des lumières dans les bureaux, la baisse de puissance des radiateurs ou des climatisations, entre autres...

Pour la comparaison entre l'état actuel et l'état « optimisé » de la consommation énergétique, on calcule :

- la consommation d'électricité actuelle obtenue à partir des lectures de compteurs de l'année 2010 et l'estimation des coûts en fonction du prix du kWh fixé par le contrat avec EDF. La consommation optimisée est recalculée à partir de l'estimation de la réduction énergétique que l'on peut atteindre après la réalisation d'actions simples de réduction de la demande.
- l'estimation de la demande de chauffage actuelle obtenue par l'application d'un modèle simple et la demande « optimisée » est recalculée après la

projection d'une réhabilitation thermique et d'un travail de sensibilisation des usagers.

Finalement cette comparaison de la demande énergétique est évaluée économiquement avec le coût d'investissement pour réaliser les actions simples liés aux consommations d'électricité et pour réaliser la réhabilitation afin de diminuer la consommation de gaz.

La consommation de l'électricité

Cette rubrique permet de calculer la facturation de l'électricité. Il convient donc de distinguer les items : (1) heures de pointe, heures pleines, heures creuses, et dépassements et (2) les quatre périodes de facturation : hiver (janvier, février et mars), demi-saison (avril, mai, juin), été (juillet, août, septembre et octobre) et transition (novembre et décembre).

Le coût de la consommation d'électricité a été calculé en fonction des tarifs de l'année 2010 fixés par EDF (Electricité de France – tarif A5 Base MU, jusqu'au 30 août 2011). Le tableau 4.7, permet de visualiser les différentes tranches de facturation par type d'horaires et par type de période.

Période - Mois	Energie active			Dépassement ³		
	Pointe	Plein	Creuse	Pointe	Plein	Creuse
	cEuros/kWh			Euros/kW		
Hiver : janvier, février et	10,398	5,933	4,073	3,95	2,88	1,26
Hiver mars	---	5,933	4,073	---	2,88	1,26
Transition : novembre,	---	6,406	4,386	4,30	3,05	
Transition décembre	10,678	6,406	4,386	---	3,05	
Demi- saison : avril, mai et juin	---	3,640	2,682	---	0,91	
Été : juillet, août, septembre et octobre	---	3,918	2,450	---	1,13	

Tableau 4.7 : Les prix de la facture d'électricité (2010)

Le coût de la consommation d'électricité a été calculé à partir des relevés du compteur électrique de l'année 2010 et à partir des tarifs de facturation décrits antérieurement.

En 2012 on observe déjà que les prix ne cessent pas d'augmenter en relation au tableau 4.7 :

- 1) Pour la période d'hiver : 4,386 c€/kWh pour HC (heures creuses), 6,406 c€/kWh pour HP (heures pleines) et 10,678 c€/kWh pour heures de pointes,
- 2) Pour la période de transition : 4,474 c€/kWh pour HC et 6,535 c€/kWh pour HP
- 3) Pour la demi-saison : 2,529 c€/kWh pour HC et 4,044 c€/kWh pour HP et
- 4) Pour l'été : 2,580 c€/kWh pour HC et 4,125 c€/kWh pour HP

³ Comme les différentes unités de facturation le montrent, la comparaison ne peut pas se faire en énergie. Les dépassements correspondent à la racine carrée de la somme quadratique des dépassements constatés sur la période de temps analysée.

Le coût de la consommation « optimisée » a été calculé en tenant compte des actions suivantes :

- 1) Travail de sensibilisation pour avoir des « usagers sensibles », c'est-à-dire chaque fois qu'ils partent déjeuner les ordinateurs se mettent en veille automatique, ce comportement permet de diminuer de 20 kWh (veille de 130 ordinateurs par jour de travail, pendant seulement 2 heures (de 12h à 14h)).
- 2) Gestion de l'intermittence : avancer ou retarder les heures de pointes et mettre des détecteurs de lumières dans les lieux de travail, couloirs et toilettes (3kWh (35 détecteur de présence, 7 par étage avec RDC) de diminution du lundi au vendredi par jour de travail).

Par ailleurs les solutions les moins chères à réaliser, les profils de la consommation pour la facturation d'électricité sont détaillés dans l'annexe A.4.3.

Le tableau 4.8 montre le résumé des consommations d'électricité des états actuel et optimisé et les coûts associés.

Consommation kWh/an		Coûts Euros/an	
Actuelle	Optimisée	Actuel	Optimisé
1 591 798	1 574 956	78 842	77 673

Tableau 4. 8 : La consommation de l'électricité (kWh et Euros) pour le bâtiment de recherche (A12)

La consommation de chauffage

Pour le calcul de la consommation de chauffage et ses coûts associés, on a utilisé différents scénarios de modélisation.

Le modèle (figure 4.11) et les valeurs (tableau 4.9) qui ont permis de faire les estimations de la demande dans le bâtiment de recherche sont décrits ci-après :

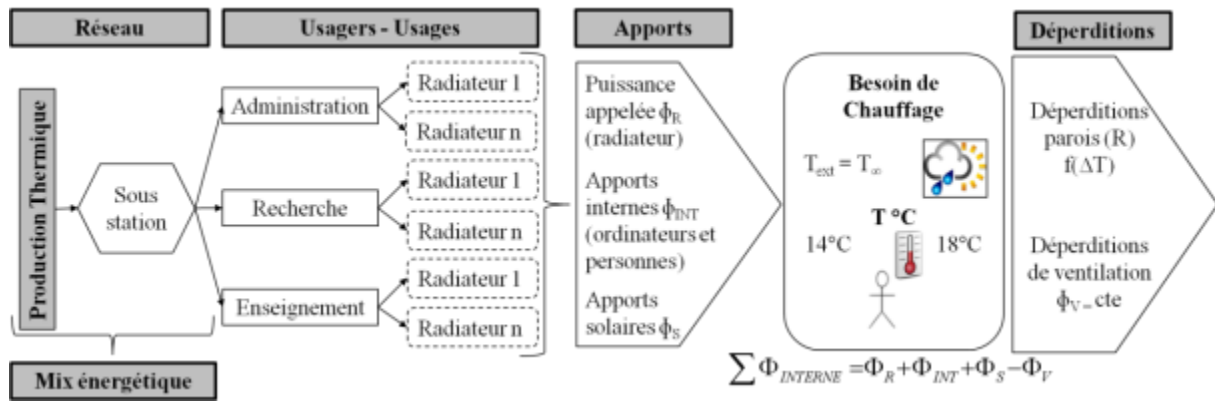


Figure 4.11 : Le schéma du modèle

$$T_{intérieure}(t) = (T_{initiale} - T_{\infty} - \sum \phi_{intérieurs} \cdot R) \cdot \exp\left(-\frac{1}{R \cdot m \cdot C_p} t\right) + \sum \phi_{intérieurs} \cdot R + T_{\infty}, \quad (4.14)$$

mC_p : masse thermique du volume du « local » ($J \cdot K^{-1}$), égale à :

$$mC_p = m_{air} + m_{meubles} + i_{plancher} + i_{murs}, \text{ avec :} \quad (4.15)$$

m_{air} et $m_{meubles}$: masse thermique de l'air et des meubles, égale à :

$$m_{air-meubles} = \rho_T \cdot V_L \cdot C_{pT}, \text{ avec :} \quad (4.16)$$

ρ_T : masse volumique de l'air et des meubles ($kg \cdot m^{-3}$)

V_L : volume d'air dans le local et des meubles dans le local (m^3)

C_{pT} : capacité massique de l'air et des meubles ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$)

$i_{plancher}$: inertie surfacique du plancher, égale à :

$$i_{plancher} = S_p \cdot k_p, \text{ avec :} \quad (4.17)$$

S_p : surface plancher (m^2)

k_p : capacité thermique surfacique du plancher ($J \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$) (Règles Th-I RT2005)

i_{mur} : inertie surfacique du mur extérieur, égale à :

$$i_{mur} = S_m \cdot k_m, \text{ avec :} \quad (4.18)$$

S_m : surface du mur extérieur sans la partie vitrée (m^2)

k_m : capacité thermique surfacique du mur ($J \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$)

$\phi_{intérieures}$: apports thermiques (W), égal à

$$\phi_{intérieures} = \phi_R + \phi_i + \phi_s - \phi_V, \text{ avec :} \quad (4.19)$$

ϕ_R : flux émis par le radiateur (W)

ϕ_i : flux issu des apports internes (ordinateurs et individus) (W)

ϕ_s : flux issu des apports solaires (W), égal à :

$$\phi_s = \varphi_S \cdot S_v \cdot F_{S_s}, \text{ avec :} \quad (4.20)$$

φ_S : radiation solaire reçue, ($W \cdot m^{-2}$)

S_v : surface réceptrice « vitrages » (m^2)

F_{S_s} : facteur de correction d'ombrage (0,6 caractéristique de fenêtres)

R = résistance thermique des parois du « local » ($m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$), égal à :

$$R = \frac{e_{élément_1}}{\lambda_{élément_1}} + \dots + \frac{e_{élément_n}}{\lambda_{élément_n}} \text{ avec :} \quad (4.21)$$

e : épaisseur de l'élément en question (m)

λ : conductivité thermique de l'élément en question ($W \cdot K^{-1} \cdot m^{-2}$)

ϕ_V : déperditions dues à la ventilation (W), égales à :

$$\phi_V = \rho_{air} \cdot Q_v \cdot C_{p_{air}} \cdot (T_{\infty} - T_{t-1}), \text{ avec :} \quad (4.22)$$

ρ_{air} : densité de l'air ($kg \cdot m^{-3}$)

Q_v : débit volumique de l'air (Code du travail, République Française, 2008)

$C_{p_{air}}$: capacité massique de l'air ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$), et

$T_{intérieure}$ = température intérieure du local à l'instant t

$T_{initiale}$ = température intérieure du local à l'instant $t - 1$

T_{∞} = température extérieure du local à l'instant t

Variable	Valeurs
ρ_T air	1,2 kg.m ⁻³
ρ_T meubles	800 kg.m ⁻³
V_L air	95%
V_L meubles	5%
C_{pT} air	1 015 J.kg ⁻¹ .K ⁻¹
C_{pT} meubles	1 250 J.kg ⁻¹ .K ⁻¹
k_p plancher léger	5 W.m ⁻² .K ⁻¹
k_m mur léger non isolé	4 J.m ⁻² .K ⁻¹
k_m mur léger isolé par l'extérieur	2 J.m ⁻² .K ⁻¹
ϕ_R puissance maximale	1200 W
ϕ_i ordinateur allumé	100 W
ϕ_i ordinateur éteint	20 W
ϕ_i individu	80 W
Q_v	25 m ³ .h ⁻¹ .occupant ⁻¹
$T_{INTERIEUR}$	16°C

Tableau 4. 9 : Principales valeurs de base pour le calcul du bilan thermique

Pour faire les calculs, on a défini différents scénarios. On appellera scénario, toute succession d'étapes de vie dans le local considéré en relation avec les paramètres détaillés ci-après. L'objectif est de déterminer la puissance nécessaire pour maintenir le confort thermique de l'usager. Les paramètres que l'on va faire varier dans les scénarios sont :

- Le climat : on considère 2 cas : le cas d'une semaine d'hiver (janvier) pour laquelle la température de confort est de 19°C et le cas d'une semaine de transition (avril) pour laquelle la température de confort est de 18°C
- L'isolation des bâtiments : on considère, dans un premier temps, un bâtiment non isolé correspondant à l'état actuel du bâtiment. Puis dans second temps, on améliore l'isolation avec un changement des fenêtres et d'isolation des murs par l'extérieur, ce qui correspond à l'état du bâtiment après rénovation.
- La sensibilité de l'usager à la consommation d'énergie dans son « bureau » : on considère le cas d'un usager sensible à l'énergie qui fait attention à la consommation d'énergie et qui module la puissance du radiateur pour maintenir son confort thermique et le cas d'un usager non sensible qui demande une température de consigne élevée.

Comme exemple de la description des différents scénarios on peut voir dans les figure 4.12 et figure 4.13, la relation entre les températures intérieures et extérieures avec l'appel de puissance pour une semaine type d'hiver, dans un bâtiment de recherche avec un chercheur non sensible et la différence avec un chercheur sensible. Le détail des données qui nous ont amené aux résultats qui suivent n'est pas proposé dans cette partie, notons qu'entre autre les taux d'occupation, les orientations, les apports solaires et le type d'enveloppe sont considérés (description dans l'annexe A.4.4).

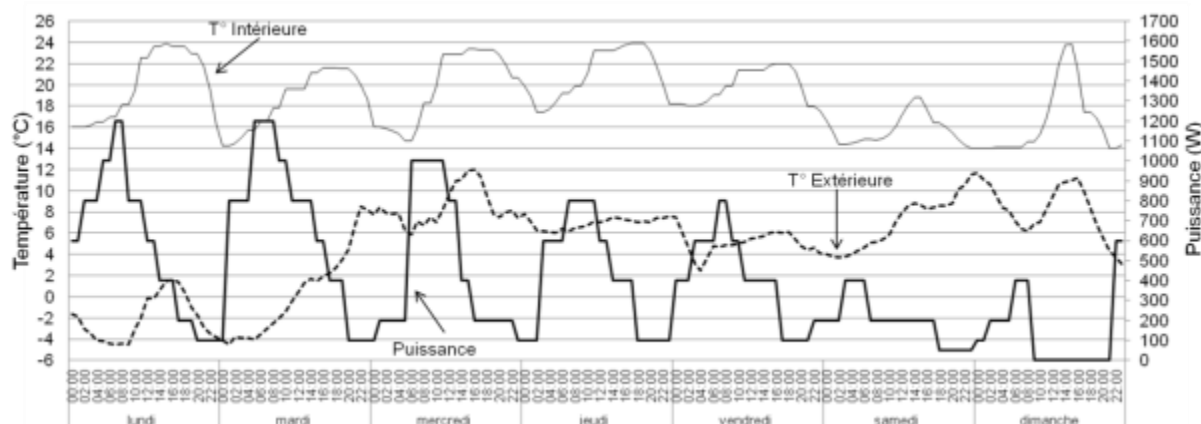


Figure 4. 12 : Un chercheur non sensible, bureau Bâtiment A12 état actuel, semaine d'hiver

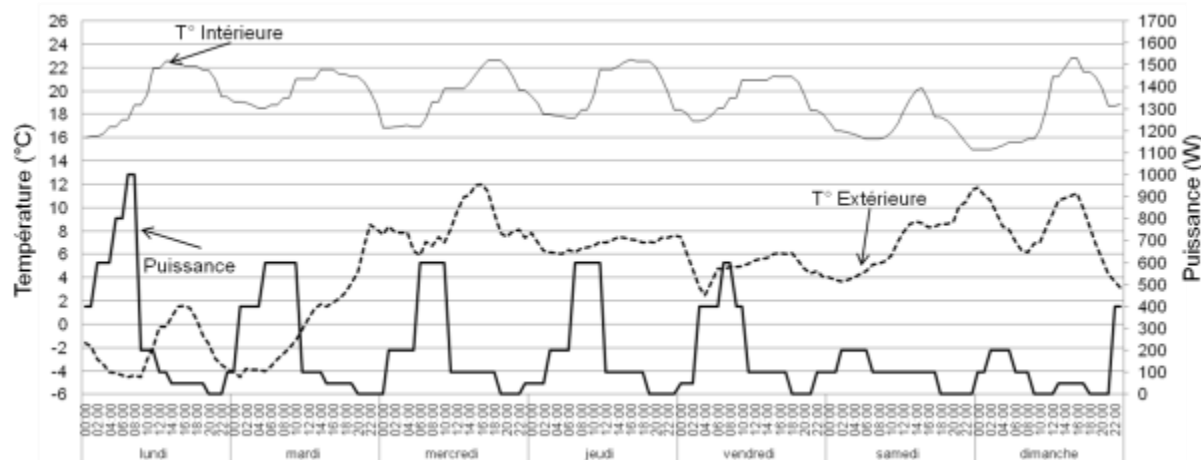


Figure 4. 13 : Un chercheur sensible, bureau Bâtiment A12 état actuel, semaine d'hiver

Toutefois, il ne suffit pas d'isoler le bâtiment pour réduire la consommation d'énergie (comparaisons résumées dans le tableau 4.10 pour le bâtiment de recherche et dans l'annexe A.4.5 pour les bâtiments C4 et A9). En fait, la différence entre la puissance appelée pour un usager sensible à l'énergie dans un bâtiment dans son état actuel et celle appelée par un usager non sensible dans un bâtiment rénové met en évidence l'importance du comportement des usagers pour réduire la consommation énergétique et donc la nécessité de les éduquer et de les sensibiliser.

Type de comportement	Variation de la consommation (kWh/m ² .an)				
	Etat Actuel	Gain Comportement	Etat Rénové	Gain Comportement	Gain Etat
Chercheur non sensible	128	-19%	64	-6%	-50%
Chercheur sensible	104		60		-42%

Tableau 4. 10 : Le bilan du comportement thermique par rapport à l'état actuel et au type de comportement d'usagers dans le bâtiment de recherche

A partir de la consommation de chauffage résumée dans le tableau 4.10 et les prix du gaz pour chaque période, résumés dans le tableau 4.11, on a calculé le coût de la consommation (tableau 4.12) pour la période de chauffage à partir du 15 octobre jusqu'au 15 avril. Le calcul a été fait pour l'état actuel avec Usager Non-Sensible, l'état actuel avec « Usager Sensible » (**Optimisé_{u-s}**) et l'état rénové (**Optimisé_r**) (isolation par l'extérieur et changement des menuiseries et vitrages) avec « Usagers Sensibles ».

Mois	cEuros/kWh
Janvier – Février – Mars	3,023
Avril	3,390
Octobre	4,003
Novembre – Décembre	4,121

Tableau 4. 11 : Les prix de la facture de gaz (2010)

Consommation kWh/an			Coûts Euros/an		
Actuelle	Optimisé _{u-s}	Optimisé _r	Actuelle	Optimisé _{u-s}	Optimisé _r
1 416 832	1 151 176	664 140	49 459	40 185	23 184

Tableau 4. 12 : La consommation du gaz (kWh et Euros) pour le bâtiment de recherche (A12)

Les coûts d'investissement

Pour la détermination des coûts d'investissement il faut ainsi définir des prix unitaires pour chaque opération type. Le tableau 4.13 donne la liste des prix utilisés dans notre exemple (les données détaillées se trouvent dans l'annexe A.4.6). Si certains de ces prix sont réalistes, d'autres sont fondés sur une estimation (déterminés après étude de différentes base des données : Le Moniteur (2013) et de l'Union Nationale des Economistes de la Construction & Entreprises Générales de France - BTP, (2013). Nous les donnons surtout à titre illustratif, afin de pouvoir montrer le fonctionnement complet de la méthode.

Actions	Description	Unité	Prix Euros HT
Isolation par l'extérieur	Laine de roche 60mm + enduit base + bardage	m ²	136,2
	Laine de roche 40mm + enduit base+bardage	m ²	133,9
	Laine de chanvre 60mm + enduit base+bardage	m ²	138,3
Pose de fenêtres	Double vitrage classique 4-16-4	m ²	883
	Double vitrage performante 4-16-4	m ²	906
Economie dans l'électricité	Détecteur de présence	U	32

Tableau 4. 13 : Les prix des différentes actions d'amélioration énergétique

Pour le calcul des coûts de rénovation, on a choisi une isolation de laine de roche d'épaisseur 60mm par l'extérieur et des fenêtres double vitrage classiques. Le tableau 4.14 montre les coûts associés pour chaque action d'amélioration énergétique.

Bâtiment	Murs	Fenêtres	Détecteur de présence
A12	168 901	1 795 110	1 120

Tableau 4. 14 : Les coûts (euros HT) associés à la réhabilitation thermique et énergétique

Pour la détermination de la valeur économique (VE) que donne une comparaison entre la réhabilitation et la continuation dans l'état actuel, on a utilisé le concept de VAN (Valeur Actuelle Nette), définie comme le flux actualisé représentant l'enrichissement supplémentaire d'un investissement par rapport au minimum exigé par les apporteurs de capitaux, défini dans l'équation 4.23.

$$VAN = \sum_{p=0}^{p=N} CF(1+t)^{-p} - I, \text{ avec :} \quad (4.23)$$

CF : flux

t : taux d'actualisation annuelle (5,3%) (EUR-Lex, 2014)

p : le numéro de l'annuité

N : le nombre total d'annuités (50 ans)

I : l'investissement

Les résultats de cette réduction projetée de la consommation énergétique, ainsi que le prix associé sont résumés dans le tableau 4.15. Ces conclusions sont données en fonction des coûts calculés précédemment et en fonction d'une progression annuelle de 5,2% du prix de l'énergie dans un scénario pessimiste à 0,8% dans un scénario optimiste (INSEE, 2014).

Energie	Consommation (kWh/an.m ²)		Coûts de la consommation (€/an)	
	Actuelle	Optimisée	Actuel	Optimisé
Electricité	143	142	78 842	77 673
Gaz	128	60	49 459	23 184
Total	271	202	128 301	100 857
Economie d'énergie annuelle (€)			27 444	
Coûts de l'investissement (€)			1 965 131	
Valeur Actuelle Nette (€) (à 50 ans) Dans un scénario pessimiste			-7 283 054	
Valeur Actuelle Nette (€) (à 50 ans) Dans un scénario optimiste			-7 055 618	

Tableau 4.15 : Résumé de la valeur économique du bâtiment de recherche

4.4.3 Le modèle de décision

Comme on a décrit précédemment, ce modèle représente une analyse objective des résultats de l'évaluation d'un bâtiment tertiaire en phase d'exploitation d'un point de vue technique et économique. Ces résultats accompagnent les décideurs /

gestionnaires d'un campus universitaire pour avoir une vision technique de l'état actuel de ses bâtiments et connaître quel sont les avis de ses usagers.

D'une part, l'évaluation technique a permis d'évaluer le comportement énergétique et environnemental d'un bâtiment tertiaire, en obtenant au travers l'appréciation des usagers, des critères objectifs utilisés par des certifications internationales.

D'autre part, l'évaluation économique a permis d'évaluer financièrement différentes actions d'amélioration énergétique à réaliser dans un état optimisé du bâtiment en mettant l'accent sur la sensibilisation de ses usagers sur les thématiques énergétiques et environnementales. Avec ces deux évaluations, nous pouvons donner une information objective au décideur pour l'aider dans la décision entre réhabiliter ou continuer avec l'exploitation du bâtiment. Dans le cas particulier de l'évaluation d'un bâtiment de recherche, l'évaluation technique composée de différents indicateurs définis et de la satisfaction des usagers nous a donné un *IGE* entre 5% et 26% de niveau d'accomplissement. Cette plage des résultats répond aux deux types d'engagement « compromis » considérés dans la décision : compenser les résultats par l'indicateur le plus fort ou par le plus faible.

D'un autre côté, l'évaluation économique nous a donné une valeur économique (*VE*) qui a été obtenue à partir :

- d'une réduction de demande énergétique issue d'une réhabilitation thermique,
- des améliorations énergétiques économiquement faisables,
- d'un travail de sensibilisation des occupants du bâtiment,
- d'une comparaison économique entre l'état actuel et un état optimisé,
- du prix actuel et futur de l'énergie et de l'inflation.

Le résultat a donné une valeur de VAN inférieure à 0, par conséquent cette valeur indique que le projet n'est pas rentable économiquement. C'est pour cela que la décision avec ces améliorations ici proposées devrait être de réaliser une réhabilitation lourde (changement de dimension de fenêtres, par exemple) avec un prix entre 1400 à 2100 €HT/m², prix moyen d'une nouvelle construction pour ce type de bâtiment (Union Nationale des Economistes de la Construction & Entreprises Générales de France - BTP, 2013).

4.5 Pour aller plus loin

Les scénarios établis précédemment (Paragraphe 4.4.2 – La consommation de chauffage) ont permis de visualiser la puissance puis l'énergie nécessaire pour chauffer 3 bâtiments (A12, C04, A9 de l'Université Bordeaux 1) dans leur état actuel et dans un état rénové.

Dans ce paragraphe, on s'interroge pour savoir si cette demande en énergie peut être satisfaite en recourant aux énergies renouvelables. Dans cette analyse, le caractère financier n'est pas pris en compte et seulement les dimensions des installations seront des limites. Il convient tout d'abord d'étudier le potentiel d'EnR à l'échelle du campus TPG. Puis les 3 bâtiments types, dans leur état rénové, qui n'ont pas la même temporalité d'appel (usages) seront interconnectés pour être alimentés par des sources de production d'énergies renouvelables.

4.5.1 Les scénarios d'EnR pour l'Université Bordeaux 1

Dans une première étape, en se basant sur le potentiel d'EnR à Bordeaux, on a établi un scénario possible pour fournir l'énergie thermique nécessaire pour tout le campus étudié dans son état actuel, scénario qui est présenté figure 4.14. Les sources d'EnR retenues pour répondre aux besoins énergétiques du campus sont la géothermie (ADEME et BRGM, 2013), le solaire thermique (INES Education, 2013) et la cogénération bois (Exoès, 2013).

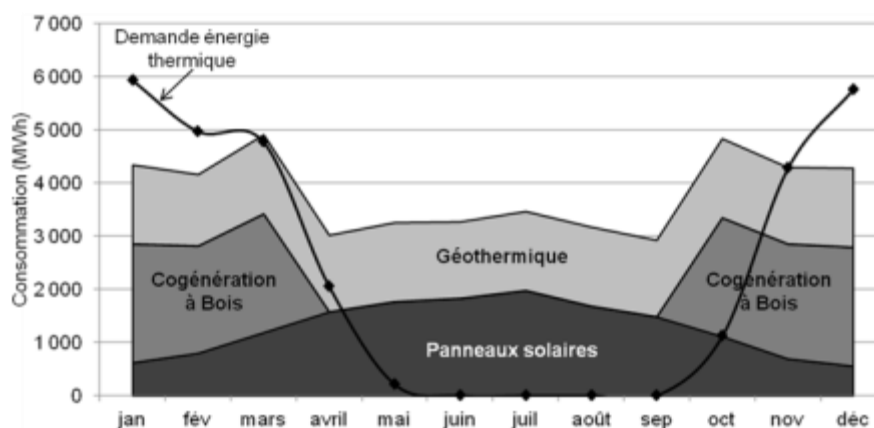


Figure 4.14 : Les scénarios d'EnR pour satisfaire la demande d'énergie thermique actuelle, sur une année, de l'Université Bordeaux 1

On note tout de suite le caractère ambitieux et démesuré de l'opération et la nécessité de se préoccuper de la relation entre demande, flux et stock d'énergie.

La géothermie et la cogénération à bois constituent des stocks d'énergie « naturels ». Pour le solaire thermique, la chaleur récupérée peut être stockée si elle dépasse

la demande énergétique et offrira alors un nouveau degré de liberté pour le gestionnaire du mix.

4.5.2 La réponse dynamique à la demande énergétique des trois bâtiments types de l'Université Bordeaux 1

Considérons les 3 bâtiments A12, A9 et C4 dans le cas du meilleur scénario qui correspond à des bâtiments rénovés avec des usagers sensibles à leur consommation d'énergie.

Par exemple, pour répondre à la demande d'énergie thermique, lors d'une semaine d'hiver, des bâtiments A12, A9 et C4 dans le meilleur scénario, on fournit une production constante de 50 kW avec la géothermie et on a recourt à une cogénération à bois de puissance 700 kW produisant 60% de chaleur et 30% d'électricité.

Lorsque la demande énergétique est inférieure à la chaleur fournie, cette chaleur peut être stockée pour satisfaire la demande dans les heures de pointe. On considère que l'on peut stocker de la chaleur, sous forme d'eau chaude, avec un rendement de 80% dans un volume de stockage placé dans la sous-station existante associée à chaque bâtiment. Après stockage, le mix énergétique est illustré figure 4.15.

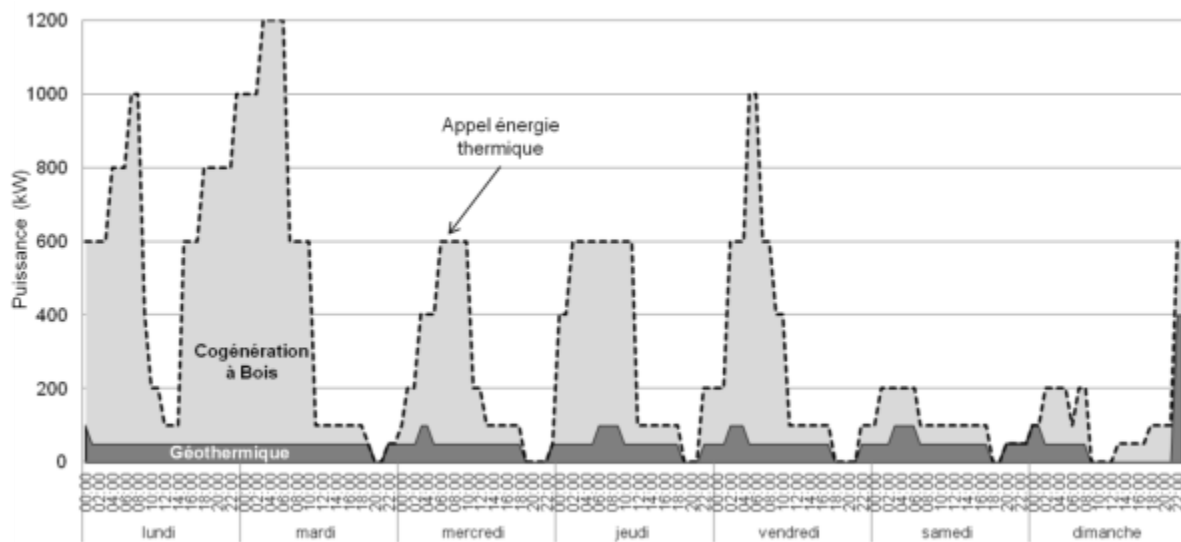


Figure 4. 15 : Mix énergétique en réponse à la demande d'énergie thermique des trois bâtiments types interconnectés, de l'Université Bordeaux 1 pour une semaine d'hiver (avec stockage)

4.6 Conclusion

La présente méthodologie d'évaluation se fait à deux échelles d'observation. La première de niveau macro considère l'ensemble des bâtiments du campus universitaire. Dans ce niveau, les comportements globaux peuvent être identifiés, la façon dont les usagers utilisent l'énergie (expliquée dans le chapitre 2). Dans un deuxième niveau, en fonction des bâtiments « types » identifiés du niveau macro, une analyse dans une échelle d'observation plus petite peut être réalisée sur ces bâtiments « types », ici un de recherche, d'administration et d'enseignement.

La méthodologie de décision est développée à cette échelle d'observation plus petite, dans laquelle les indicateurs qui livrent l'information sur l'état actuel des bâtiments sont évalués et éventuellement dans une deuxième phase incorporée dans l'évaluation. Les stratégies d'améliorations énergétiques sont ensuite établies. Comme l'on peut observer dans les résultats, les indicateurs les mieux évalués du point de vue des usagers ne sont pas ceux qui présentent la meilleure évaluation technique, dans notre cas les énergies renouvelables ou l'énergie. Avec l'utilisation de la méthode d'optimisation adaptée aux bâtiments, nous avons pu simplifier la comparaison et l'inclusion d'indicateurs qui évaluent techniquement un bâtiment au travers la fonction d'acceptabilité ($Z_{i(y)}$).

D'autre part, la méthodologie a permis de montrer et de regrouper tous les résultats à différents niveaux d'évaluation : seulement au niveau d'indicateurs, pour chaque scénario de décision (*IGA*) ou comme une évaluation finale (*IFE*). Cette manière de montrer les résultats permet d'intervenir dans différentes échelles de décision en relation avec les échelles de décisions politiques.

La nouveauté et intérêt de cette méthodologie réside dans l'incorporation des usagers au travers la priorisation donnée à chaque indicateur et à chaque scénario et au travers du travail de sensibilisation dans la gestion énergétique que les gestionnaires réalisent. Ces appréciations des usagers peuvent aussi orienter les choix des décideurs. De plus, l'évaluation étant évolutive, cette appréciation peut aussi être donnée par les décideurs, les gestionnaires et les experts dans la matière.

D'un autre côté elle est capable de s'adapter à différents contextes en fonction de l'observation macro qui est faite au commencement de l'étude, de même en fonction des intervalles de normalisation utilisés pour pouvoir évaluer les critères qui forment les indicateurs.

L'évaluation économique simplifiée complète l'analyse technique en évaluant et comparant l'état actuel avec un état optimisé par différentes actions d'améliorations énergétiques et par la sensibilisation des usagers.

Finally, in the continuity of the energy improvement process we have built an energy mix based on EnR for three typical buildings in their renovated state and with users sensitive to the thermal comfort – energy relation, of the university campus UBx1-TPG. The installation of storage volumes in sub-stations for example is necessary to be able to manage this demand and respond to needs during the hours when the production of heat is inferior to the demand.

CONCLUSIONS GÉNÉRALES

La méthodologie proposée pour l'évaluation de l'évolution durable de bâtiments tertiaires existants est née du contexte actuel sur les problématiques énergétiques et environnementales qui font que ce secteur a besoin d'outils permettant d'évaluer et suivre les patrimoines bâtis d'une manière facile, directe et en même temps objective.

Comme noté dans le **Chapitre 1**, dédié au contexte énergétique français et chilien, les changements dans leurs matrices énergétiques ont tenté de répondre à la demande requise ; une demande qui dépend du contexte économique (état du pays, prix de l'énergie), du développement du pays (secteur de l'industrie, des transports et du bâtiment) et du contexte énergétique propre à chacun.

Dans le cas de la France, la matrice énergétique est principalement composée d'énergie nucléaire due au soutien historique de l'Etat français, alors qu'au Chili, cette matrice est caractérisée par la dépendance aux variations économiques internationales et à un développement conflictuel de sa seule ressource énergétique nationale : l'énergie hydroélectrique.

Dans le cas particulier du patrimoine bâti, les nouvelles constructions ont été l'un des responsables de l'augmentation des consommations, mais il ne faut pas oublier que les bâtiments existants contribuent à cette consommation à cause des trop réduits, voire inexistantes, améliorations thermiques faites jusqu'à présent.

Bien qu'en France, l'État français ait fait un effort particulier pour l'efficacité énergétique des bâtiments dès les années 70, il y a encore beaucoup à faire, parce que ces efforts ont porté principalement sur les nouveaux bâtiments. Pour sa part, le Chili a un décalage de 20 ans sur ces préoccupations, qui aujourd'hui sont accentuées par la dépendance énergétique.

Dans les secteurs résidentiel et tertiaire, les principaux types d'usages énergétiques sont liés au chauffage, mais dans le secteur tertiaire la consommation d'électricité a augmenté en raison de l'utilisation accrue des ordinateurs individuels, des équipements électroniques et électriques et des systèmes de climatisation.

Pour pouvoir comparer les différentes analyses énergétiques entre ces deux pays et du secteur tertiaire en particulier, c'est dans la dernière partie du **Chapitre 1** qu'est proposée une analyse qui permet de comprendre ce comportement et l'augmentation de la consommation d'énergie. Nous avons donc décidé d'analyser spécifiquement les variables climatiques qui peuvent expliquer ces comportements. Divers paramètres climatiques ont donc été caractérisés et mis en relation avec la consommation énergétique d'un patrimoine particulier dans le secteur tertiaire, « les campus universitaires ». Dans cette analyse, il a clairement été montré que les consommations s'étudient de manière simple avec les Degré Jour Unifiés, ils mettent en relation la température extérieure et la température de confort, propre à l'usage

du lieu de l'étude. Ce paramètre nous permet de répartir les différentes analyses suivant différentes périodes de l'année sous un même critère d'évaluation, simplifier la complexité dans la comparaison et mettre en avance le confort des usagers.

Dans le **Chapitre 2**, les valeurs de DJU nous ont permis d'identifier à différentes saisons de l'année quelles sont les variables influant sur la consommation d'énergie. Dans ce chapitre nous avons présenté les différents sites universitaires analysés du point de vue énergétique et les types d'usages et d'usagers participant à cette consommation. Les caractéristiques d'usage, la façon de consommer l'énergie et les comportements des usagers ont été liés à la donnée du DJU. Ainsi, nous avons constaté et quantifié, quelques points-clés :

- les usagers jouent un rôle important dans la consommation de base de l'électricité. De forts appels de puissance sont faits en particulier, à des moments précis durant les journées très froides (chauffage individuel) ou très chaudes (climatisation individuelle),
- le gaz répond directement au contrôle de son fonctionnement et à la connexion du réseau de chaleur. Et le facteur déterminant de son comportement est le climat,
- concernant le site de Bordeaux 1 - TPG, sa matrice énergétique contient également une chaudière à bois en plus des ressources de gaz et d'électricité. Sa performance répond à la fois au type de fonctionnement et à la qualité du bois utilisé pour la production de chaleur.

Postérieurement, nous avons vérifié dans l'analyse qualitative quel est l'apport du climat, du comportement des usagers et la qualité des ressources dans la consommation énergétique. Ils sont aussi importants pour le type de contrôle que nous faisons de la gestion énergétique.

Dans cette analyse énergétique quantitative et qualitative, nous avons identifié trois axes d'amélioration pour atteindre une réduction des consommations énergétiques :

- un travail permanent d'éducation des usagers : sensibilisation, communication en matière énergétique et environnementale,
- gestion globale du taux d'occupation des bâtiments pour fournir de l'énergie utile, connaissance des attentes des usagers pour pouvoir répartir les demandes énergétiques,
- gestion du patrimoine : maîtriser la réhabilitation, optimiser les réseaux, incorporer l'utilisation d'énergies renouvelables.

C'est pourquoi nous avons proposé dans le **Chapitre 3** d'évaluer les comportements énergétiques et environnementaux actuels de bâtiments représentatifs choisis lors de la première analyse globale. Une ligne de base d'indicateurs, judicieusement choisis sert de support à l'évaluateur. La sélection de ces indicateurs répond à une analyse détaillée et leur échelle d'observation appelée « intervalle » nous permet une adaptation à différents contextes, ici son application a été limitée au contexte réglementaire français.

Finalement, le **Chapitre 4** répond au besoin d'analyser concrètement ces indicateurs avec une seule et même échelle d'observation. Ainsi, nous avons présenté une méthodologie basée sur les méthodes d'optimisation multicritères et appliquée à la phase d'exploitation du patrimoine bâti. Cette méthodologie propose l'analyse technique du comportement énergétique, environnemental des bâtiments, du confort de ses usagers et de son appréciation. Dans la première application de cette analyse, les usagers universitaires ont été les acteurs principaux, mais la méthodologie étant évolutive, elle peut intégrer d'autres acteurs ou autres types de priorisation, comme les politiques énergétiques mise en route pendant l'évaluation.

Dans une deuxième analyse parallèle, les améliorations énergétiques qui ont été identifiées dans l'analyse globale du comportement énergétique des campus universitaires, ont été évaluées. Ces améliorations sont fortement axées sur la sensibilisation des usagers. Comment les inciter à repenser leur conception du confort pour les conduire à modifier leur comportements énergivores ?, alors nous nous sommes concentrés sur les améliorations énergétiques en promouvant de meilleures pratiques pour réduire la consommation, mais aussi comme nous l'avons montré dans notre cas d'étude, des améliorations thermiques du patrimoine bâti sont nécessaires.

Dans l'analyse, nous avons choisi d'apporter des améliorations simples, économiquement faisables et donc de donner des informations sur la façon dont on continue d'exploiter les bâtiments. Ensuite il est possible de décider entre poursuivre l'exploitation quand la consommation énergétique est celle attendue, réhabiliter avec une amélioration énergétique ou thermique quand les coûts sont viables ou réaliser une réhabilitation lourde dans le cas le plus défavorable. Les conditions de sécurité par exemple, ou autres qui ne sont pas mise en avant dans le manuscrit sont proposées dans les perspectives.

Dans les résultats que nous obtenons, on peut guider la décision au travers°:

- l'appréciation qu'en ont les usagers des bâtiments,
- le niveau d'engagement « pessimiste, optimiste ou intermédiaire » que nous voulons donner aux décisions ; nous avons choisi les deux types de compromis qu'incluent les usagers dans son calcul (la moyenne géométrique pondérée et la moyenne arithmétique pondérée).

L'une des innovations de cette méthodologie est de pouvoir l'adapter et la partager dans différents contextes et réalités; d'intégrer la participation des usagers dans les décisions techniques afin qu'ils soient impliqués dans cette évolution, mais aussi dans l'incorporation d'un fort travail de sensibilisation. Enfin, comme la méthodologie est évolutive, chacune des évaluations faites peut être adaptée à différents contextes et en plus elle permet de réaliser différents retours d'expériences à chaque changement réalisé et chaque décision prise peut être évaluée pas à pas.

La décision de faire participer les usagers répond au fait que la participation des usagers permet de rendre les changements plus positifs sur l'utilisation de l'énergie durablement dans le temps. De plus, nous avons voulu renforcer le rôle des universités par cette analyse comme entités formatrices promouvant les meilleures pratiques.

PERSPECTIVES

La méthodologie développée dans le cadre de ce travail de thèse repose sur l'importance donnée aux indicateurs clefs retenus d'une part, l'énergie et les émissions de CO₂ et d'autre part, la manière dont les usagers participent aux problématiques environnementales et à l'évolution des consommations dans les bâtiments tertiaires qu'ils utilisent.

Néanmoins, les paramètres déterminés par l'évaluation des performances énergétiques du secteur donné ne sont pas exclusifs. Il existe en effet d'autres indicateurs laissés de côté pendant la réflexion compte tenu des choix faits.

Ainsi on peut détailler parmi les paramètres climatiques de comparaison :

- L'hygrométrie relative de l'air : difficile à évaluer parce qu'il dépend du type de climat (tempéré, froid ou chaud) et du lien avec l'humidité relative et la température. Le but pourrait être de chercher s'il existe des relations avec ces types de climat. L'évaluation de la consommation serait appliquée au contexte spécifique de l'étude et à différentes situations du ressenti du confort
- L'exposition au vent : en relation directe avec les types d'échanges (convectif ou évaporatif). On pourrait l'ajouter dans les types d'écart de températures à l'intérieur d'une pièce plutôt qu'à l'air extérieur.

Pour les indicateurs d'évaluation on peut détailler :

- Le schéma urbain - le site ou l'emplacement : puis comme l'analyse s'est concentrée sur les bâtiments existants l'environnement fait partie d'autre type de relation non analysé ici (bâtiment-environnement extérieur). Dans cet indicateur en plus, le type de politique d'aménagement urbain des campus passe par un autre niveau d'étude (à Bordeaux l'analyse doit être plus étendue et considérer d'autres collectivités comme la Communauté Urbaine de Bordeaux (CUB) et au Chili, pour les gestionnaires d'espaces verts des campus).
- L'état technique de la structure : écarté car le cadre normatif des structures au Chili est beaucoup plus restrictif que celui européen, son analyse lié à la problématique sismique aurait interféré d'une manière inégale. Bien qu'une nouvelle réglementation sismique a été introduite en France récemment (Eurocode 8 NF EN 1998 – modifié 1^{er} mai 2011).

Une autre perspective pourrait être d'intégrer dans les solutions de réhabilitation, d'autres solutions telles que l'isolation par l'intérieur, le changement de dimensions des ouvertures, l'installation d'une double peau, voire toutes les solutions actuellement sur le marché de la construction. De plus, des améliorations thermiques qui considèrent d'autres paramètres peuvent être proposées comme la valeur

patrimoniale, l'inertie thermique, les systèmes de ventilation croisée. Dans cette étude, le but a été d'arriver à évaluer le plus simplement possible et d'atteindre une application la plus proche d'une décision économique.

Par ailleurs, le modèle économique a été présenté comme une aide à l'évaluation économique pour analyser l'applicabilité du modèle et donc nous savons qu'en si peu de lignes on ne peut pas développer en détail tous les indices économiques. Ainsi les parties faisant partie des perspectives à évaluer en détail sont :

- le taux d'inflation historique dans chaque pays d'application de l'évaluation,
- la projection la plus proche des prix de l'énergie (difficile à estimer avec le contexte actuel de l'énergie),
- l'analyse des autres types de financements tels que les subventions, les exonérations fiscales ou les aides de l'état pour la réhabilitation thermique, entre autres.

Enfin, les énergies renouvelables font partie des perspectives visées en particulier sur la conception d'un réseau énergétiquement intelligent qui s'adapte à la demande, avec des solutions de stockage (comme on a déjà avancé dans le paragraphe 4.5). La quantité et la qualité des potentiels de ressources d'énergie renouvelables à Bordeaux principalement lié aux types de chauffage comme la géothermique et le solaire thermique et au Chili lié à la production de l'électricité solaire offrent ces perspectives.

RÉFÉRENCES

Chapitre 1

1. AFEDES - Association française pour l'étude et le développement des applications de l'énergie solaire. 1974. Le rayonnement solaire au sol et ses mesures. Vol. 1. Paris, France: Editions Européennes.
2. Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME). 2011. « Les chiffres clés du bâtiment Energie et Environnement ».
3. Andaloro, Antonio P.F., Roberta Salomone, Giuseppe Ioppolo, et Laura Andaloro. 2010. « Energy certification of buildings: A comparative analysis of progress towards implementation in European countries ». *Energy Policy* 38 (10): 5840-5866.
4. Beltrando, Gérard. 2011. Les climats: processus, variabilité et risques. Armand Colin.
5. Bobadilla Ariel, Trebilcock Maureen, Muñoz Cristian, et al. 2012. « Proposal of an energy environmental rating method for public buildings in Chile ». In *Opportunities, limits & needs towards an environmentally responsible architecture*. Lima, Perú: Pontificia Universidad Católica del Perú.
6. Chile Sustentable. 2010. « La urgencia de un plan nacional de acción de eficiencia energética para Chile ».
7. Chlela, F. 2008. « Développement d'une méthodologie de conception de bâtiments à basse consommation d'énergie ». Thèse Université de La Rochelle.
8. Cole, Raymond J., & Valdebenito, M. J. (2013). The importation of building environmental certification systems: international usages of BREEAM and LEED. *Building Research & Information*, (ahead-of-print), 1-15.
9. Comisión Nacional de Energía - Gobierno de Chile. 2009. « Modelo de Proyección - Demanda energética Nacional de largo plazo ».
10. Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA). 2011. « Mémento sur l'énergie - Energy handbook ».
11. Commissariat Général au Développement Durable. 2011a. « Repères. Chiffres clés de l'énergie ». Ministère de l'écologie du Développement durable, des transports et du Logement.
12. Commissariat Général au Développement Durable. 2011b. « Références - Bilan énergétique de la France pour 2010 ». Ministère de l'écologie, du Développement durable, des transports et du Logement.
13. Commissariat Général au Développement Durable - Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie. 2011. « Indicateurs & Indices. Indicateurs de développement durable nationaux: Consommation d'énergie des secteurs résidentiel et tertiaire ». Consulté mars 2013 à l'adresse : <http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/indicateurs-indices/f/1932/1339/consommation-denergie-secteurs-residentiel-tertiaire.html>.

14. COSTIC - Comité scientifique et technique des industries climatiques. 2002. « Définition des degrés-jours ». Consulté décembre 2011 à l'adresse <http://www.costic.com/dju/presentation.html>.
15. Encinas, Felipe, et André De Herde. 2013. « Sensitivity analysis in building performance simulation for summer comfort assessment of apartments from the real estate market ». *Energy and Buildings* 65: 55-65.
16. European Commission. 2013. « PV potential estimation utility ». Consulté mars 2013 à l'adresse : <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php#>.
17. Fracastoro, Gian Vincenzo, et Matteo Serraino. 2011. « A methodology for assessing the energy performance of large scale building stocks and possible applications ». *Energy and Buildings* 43 (4): 844-852.
18. GIE Enjeu Energie Positive 2011. « Comment le confort des utilisateurs doit influencer la conception et l'exploitation d'un bâtiment tertiaire à énergie positive ? ». Consulté mars 2013 à l'adresse : http://www.enjeu-energie-positive.com/telechargements_GIE/Fiche_CONFORT.pdf
19. Instituto Nacional de Estadísticas - Chile. 2010. « Análisis Económico 2010 - Estadísticas y la evolución coyuntural ».
20. Instituto Nacional de Normalización. 2008. *Arquitectura y construcción: Zonificación climático habitacional para Chile y recomendaciones para el diseño arquitectónico*. NCh 1079 Of.2008.
21. International Energy Agency. 2013a. « IEA Statistics & Balances ». Consulté mars 2013 à l'adresse : <http://www.iea.org/stats/index.asp>.
22. International Energy Agency. 2013b. « IEA Statistics - Total primary energy supply France ». Consulté mars 2013 à l'adresse : <http://www.iea.org/stats/index.asp>.
23. International Energy Agency. 2013c. « IEA Statistics - Total primary energy supply Chile ». Consulté mars 2013 à l'adresse : <http://www.iea.org/stats/index.asp>.
24. International Energy Agency. 2013d. « IEA Statistics - Final consumption by sector France ». Consulté mars 2013 à l'adresse : <http://www.iea.org/stats/index.asp>.
25. International Energy Agency. 2013e. « IEA Statistics - Final consumption by sector Chile ». Consulté mars 2013 à l'adresse : <http://www.iea.org/stats/index.asp>.
26. Joly, Daniel, Thierry Brossard, Hervé Cardot, Jean Cavailles, Mohamed Hilal, et Pierre Wavresky. 2010. « Les types de climats en France, une construction spatiale [En ligne] ». *Cybergeo: European Journal of Geography*. Consulté mars 2013 à l'adresse : <http://cybergeo.revues.org/23155>.
27. Meteociel.fr. 2011. « Météo - observations météo en temps réel et prévisions météo pour la France ». Consulté mars 2012 à l'adresse : <http://www.meteociel.fr/>.
28. Ministère de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de la mer. 2009. « Le Grenelle Environnement - Les 13 domaines d'action ».

29. Ministerio de Energía - Gobierno de Chile. 2010. « Estrategia Nacional de Energía ».
30. Ministerio de Energía - Gobierno de Chile. 2012a. « Balance Nacional de Energía (2000-2011) ». Consulté mars 2013 à l'adresse : http://antiguo.minenergia.cl/minwww/opencms/14_portal_informacion/06_Estadisticas/Balances_Energ.html.
31. Ministerio de Energía - Gobierno de Chile. 2012b. « Evolución sectorial del consumo (2000-2011) ». Consulté mars 2013 à l'adresse : http://antiguo.minenergia.cl/minwww/opencms/14_portal_informacion/06_Estadisticas/Balances_Energ.html.
32. Ministerio de Energía - Gobierno de Chile. 2012c. « Consumo energético del sector comercial, público y residencial (2000-2009) ». Consulté mars 2013 à l'adresse : http://antiguo.minenergia.cl/minwww/opencms/14_portal_informacion/06_Estadisticas/Balances_Energ.html.
33. Ministerio de Vivienda y Urbanismo - Gobierno de Chile, et Instituto de la Construcción. 2006. « Manual de aplicación - Reglamentación térmica ».
34. Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico - OCDE. 2011. « Renewable energy ». Consulté mars 2013 à l'adresse : http://www.oecd-ilibrary.org/economics/country-statistical-profiles-key-tables-from-oecd_20752288.
35. Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico - OCDE. 2012a. « Country statistical profile: France 2012 ». Consulté mars 2013 à l'adresse : http://www.oecd-ilibrary.org/economics/country-statistical-profiles-key-tables-from-oecd_20752288.
36. Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico - OCDE. 2012b. « Country statistical profile: Chile 2012 ». Consulté mars 2013 à l'adresse : http://www.oecd-ilibrary.org/economics/country-statistical-profiles-key-tables-from-oecd_20752288.
37. Peuportier B. (2013). Livre blanc sur les recherches en énergétique des bâtiments. 239p. Presses des Mines collection Développement durable. Paris.
38. Rioseco R., et Tesser C. 2013. « Cartografía interactiva de los climas de Chile: Chile continental [en línea]. Instituto de Geografía. Pontificia Universidad Católica de Chile ». Consulté mars 2013. http://www7.uc.cl/sw_educ/geografia/cartografiainteractiva/Continental/Paginas/UntitledFrameset-1.htm.
39. Romero H. 2008. Irradiancia solar en territorios de la República de Chile. Comisión nacional d energía.
40. Tutiempo Network, S.L. 2013. « Clima en Pudahuel. Datos climáticos históricos ». Consulté janvier 2013. <http://www.tutiempo.net/clima/Pudahuel/07-2010/855740.htm>.

Chapitre 2

1. Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME). 2011. « Les chiffres clés du bâtiment Energie et Environnement ».
2. ADEME, EDF et Ecocampus 2003. « Le programme MDE-Campus ». Consulté septembre 2013 à l'adresse : <http://www.ademe.fr/htdocs/publications/lettre/99/actus.htm>
3. Alshuwaikhat, Habib M., et Ismaila Abubakar. 2008. « An integrated approach to achieving campus sustainability: assessment of the current campus environmental management practices ». *Journal of Cleaner Production* 16 (16): 1777-1785.
4. Altan, Hasim. 2010. « Energy efficiency interventions in UK higher education institutions ». *Energy Policy* 38 (12): 7722-7731.
5. Balloffet P. 2006. « Chaufferie Principale et Gestion technique centralisée G.T.C. - DPI Université Bordeaux 1 ».
6. Barelli, L., et G. Bidini. 2004. « Development of an energetic diagnosis method for the buildings: example of the Perugia University ». *Energy and Buildings* 36 (1): 81-87.
7. Bernet J., Lamerre L., et Monnier A. 2011. « Estimation de la consommation liée à informatique sur le Campus de l'Université Bordeaux 1 ». Master 2: Energétique et Développement. Université Bordeaux 1.
8. Bonnet Jean-François, Christophe Devel, Patrick Faucher, et Jacques Roturier. 2002. « Analysis of electricity and water end-uses in university campuses: case-study of the University of Bordeaux in the framework of the Ecocampus European Collaboration ». *Journal of Cleaner Production* 10 (1) : 13-24.
9. Caisse des Dépôts et Consignations, et Conférence des présidents d'université. 2009. « Cartographie Energie-CO2 du patrimoine universitaire français ». Consulté mars 2011 à l'adresse : <http://www.cartoco2campus.com/>.
10. Cantalapiedra, I.R., M. Bosch, et F. López. 2006. « Involvement of final architecture diploma projects in the analysis of the UPC buildings energy performance as a way of teaching practical sustainability ». *Journal of Cleaner Production* 14 (9–11): 958-962.
11. Cao, Bin, Yingxin Zhu, Qin Ouyang, Xiang Zhou, et Li Huang. 2011. « Field study of human thermal comfort and thermal adaptability during the summer and winter in Beijing ». *Energy and Buildings* 43 (5): 1051-1056.
12. Clarke, Amelia, et Rosa Kouri. 2009. « Choosing an appropriate university or college environmental management system ». *Journal of Cleaner Production* 17 (11): 971-984.
13. Comissionat de Sostenibilitat, Cooperació i Desenvolupament. 2011. « Tercer informe SIRENA d'evolució dels consums energètics i d'aigua a la UPC, correponent a l'any 2010 ».

14. Costa, Andrea, Marcus M. Keane, J. Ignacio Torrens, et Edward Corry. 2013. « Building operation and energy performance: Monitoring, analysis and optimisation toolkit ». *Applied Energy* 101: 310-316.
15. Davis III, J. A, et D. W Nutter. 2010. « Occupancy diversity factors for common university building types ». *Energy and Buildings* 42 (9): 1543–1551.
16. Derahim, Norfadillah, Halimaton Saadiah Hashim, Noraziah Ali, Sarah Aziz Abdul, et Ghani Aziz. 2012. « UKM's Staff Perspective on Sustainability and Its Contribution Towards a Sustainable University ». *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 59: 376-381.
17. Desideri, Umberto, et Stefania Proietti. 2002. « Analysis of energy consumption in the high schools of a province in central Italy ». *Energy and Buildings* 34 (10): 1003-1016.
18. Deval, J.-C. 1984. « Le confort thermique en climat tempéré ». *Revue de physique appliquée* 19 (7): 513-531.
19. Dirección de Infraestructura. 2012. « Facturas energéticas del Campus San Joaquín - PUC (2001-2010) ».
20. Direction du Patrimoine et de la Logistique - Université Bordeaux IV. 2011. « Factures énergétiques du Campus TPG - UBxIV (2002-2010) ».
21. Direction du Patrimoine Immobilier - Université Bordeaux 1. 2010a. « Réseau de Chaleur ».
22. Direction du Patrimoine Immobilier - Université Bordeaux 1. 2010b. « Factures énergétiques du Campus TPG - UBx1 (1997-2010) ».
23. Escrivá-Escrivá, Guillermo, Carlos Álvarez-Bel, et Elisa Peñalvo-López. 2010. « New indices to assess building energy efficiency at the use stage ». *Energy and Buildings* 43 (2-3): 476-484.
24. Ferrer-Balas, Didac, Heloise Buckland, et Mireia de Mingo. 2009. « Explorations on the University's role in society for sustainable development through a systems transition approach. Case-study of the Technical University of Catalonia (UPC) ». *Journal of Cleaner Production* 17 (12): 1075-1085.
25. Fondaterra. 2010. « Campus-2EC ». Consulté mars 2011 à l'adresse : http://www.fondaterra.com/index.php?option=com_fpro&view=fpro&cid=2&lang=fr.
26. Gómez-Amo, J.L., F. Tena, J.A. Martínez-Lozano, et M.P. Utrillas. 2004. « Energy saving and solar energy use in the University of Valencia (Spain) ». *Renewable Energy* 29 (5): 675-685.
27. Herremans, Irene, et David E. Allwright. 2000. « Environmental management systems at North American universities: What drives good performance? ». *International Journal of Sustainability in Higher Education* 1 (2): 168-181.
28. Hwang, Ruey-Lung, Tzu-Ping Lin, et Nai-Jung Kuo. 2006. « Field experiments on thermal comfort in campus classrooms in Taiwan ». *Energy and Buildings* 38 (1): 53-62.
29. Kennedy, Matthew, et Biswajit Basu. 2013. « A study on the implementation of renewable heating technologies in the domestic sector in Ireland with

- implications on consumers' decision-making ». *Journal of Cleaner Production* 44: 133-142.
30. Koester, Robert J., James Eflin, et John Vann. 2006. « Greening of the campus: a whole-systems approach ». *Journal of Cleaner Production* 14 (9–11): 769-779.
 31. Leaman, Adrian, et Bill Bordass. 2007. « Are users more tolerant of 'green' buildings? » *Building Research & Information* 35 (6): 662-673.
 32. Leite Frandoloso M., Londero Brandli L., et Pedrosa Dias F. 2012. « How to improve eco-efficiency and indoor comfort at University of Passo Fundo - Brazil ». In *28th International Conference on Passive and Low Energy Architecture (PLEA)*, 1-10. Lima, Perú.
 33. Levy, Jonathan I., et Kumkum M. Dilwali. 2000. « Economic incentives for sustainable resource consumption at a large university – Past performance and future considerations ». *International Journal of Sustainability in Higher Education* 1 (3): 252-266.
 34. Lozano García, Francisco J., Kathleen Kevany, et Donald Huisingh. 2006. « Sustainability in higher education: what is happening? » *Journal of Cleaner Production* 14 (9–11): 757-760.
 35. Lozano, Rodrigo. 2006. « Incorporation and institutionalization of SD into universities: breaking through barriers to change ». *Journal of Cleaner Production* 14 (9–11): 787-796.
 36. Lozano, Rodrigo. 2011. « The state of sustainability reporting in universities ». *International Journal of Sustainability in Higher Education* 12 (1): 67-78.
 37. Lück, K. 2012. « Energy efficient building services for tempering performance-oriented interior spaces – A literature review ». *Journal of Cleaner Production* 22 (1): 1-10.
 38. Manzanal Fernández, Rosario, Luis Rodríguez-Barreiro, et José Carrasquer. 2007. « Evaluation of environmental attitudes: analysis and results of a scale applied to university students ». *Science Education* 91 (6): 988-1009.
 39. Matarazzo-Neuberger, Waverli Maia, et Vicente Manzione Filho. 2010. « The Methodist University Sustainable Program - Using the earth charter to mainstream sustainability ». *Journal of Education for Sustainable Development* 4 (2): 271 -278.
 40. McClelland, Lou, et Stuart W. Cook. 1983. « Policy implications of a successful energy conservation program in university buildings and dormitories ». *Energy and Buildings* 5 (3): 213-217.
 41. McMillan, Jennifer, et Rob Dyball. 2009. « Developing a Whole-of-University Approach to Educating for Sustainability ». *Journal of Education for Sustainable Development* 3 (1): 55 -64.
 42. Méry, Marie-Gabrielle. 2008. « Liaison Energie Francophonie ». Édité par Institut de l'énergie et de l'environnement de la Francophonie. Une expérience

- réussie de bonne pratique. Efficacité énergétique dans les campus universitaires d'Île-de-France 78: 95-100.
43. Mikulik, J., et M. Babina. 2009. « The Role of Universities in Environmental Management ». *Polish Journal of Environmental Studies* 18 (4): 527-531.
 44. Mohareb, Eugene A., Christopher A. Kennedy, L.D. Danny Harvey, et Kim D. Pressnail. 2011. « Decoupling of building energy use and climate ». *Energy and Buildings* 43 (10): 2961-2963.
 45. Molina, C., et L. Veas. 2012. « Evaluación del confort térmico en recintos de 10 edificios públicos de Chile en invierno ». *Revista de la Construcción* 11 (2): 27-38.
 46. Nejati, Mostafa, et Mehran Nejati. 2012. « Assessment of Sustainable University Factors from the Perspective of University Students ». *Journal of Cleaner Production* (0).
 47. Nobatek-Ecocampus, Université de Bordeaux et EDF. 2010. « Initiatives Campus Verts – Exemples de mises en œuvre et retours d'expérience dans les universités durables en France, Europe et Amérique du Nord ».
 48. Ó Gallachóir, B.P., M. Keane, E. Morrissey, et J. O'Donnell. 2007. « Using indicators to profile energy consumption and to inform energy policy in a university—A case study in Ireland ». *Energy and Buildings* 39 (8): 913-922.
 49. Pereira, Luisa, Nelson Soares, Pedro Conceição, João Ferreira, et Patricia Da Silva. 2013. « Improvement of the energy efficiency of a portuguese university building ». In *Forum of young researchs in Sustainable Building 2013*, 1-10. Prague, Czech Republic: Faculty of Civil Engineering, Czech Technical University in Prague.
 50. Peuportier B. (2013). Livre blanc sur les recherches en énergétique des bâtiments. 239p. Presses des Mines collection Développement durable. Paris.
 51. Pontificia Universidad Católica de Chile, et Dirección de Infraestructura. 2012a. « Datos de superficie y usuarios Campus San Joaquín (2008-2010) ».
 52. Pontificia Universidad Católica de Chile, et Dirección de Infraestructura. 2012b. « Mapa interactivo - Campus San Joaquín ». Consulté mars 2013 à l'adresse : http://www7.uc.cl/campus/sj/san_joaquin.html.
 53. Pontificia Universidad Católica de Chile, et Oficina de Sustentabilidad UC. 2012. « APL Campus Sustentable ». Consulté mars 2013 à l'adresse : <http://sustentable.uc.cl/noticia/apl-campus-sustentable-1207>.
 54. Probert, S. D. 1995. « Environmentally and energy responsible universities? » *Applied Energy* 50 (1): 69-83.
 55. Rodríguez-Barreiro, Luis M., Rosario Fernández-Manzanal, Luis M. Serra, José Carrasquer, María B. Murillo, María J. Morales, José M. Calvo, et Javier del Valle. 2013. « Approach to a causal model between attitudes and environmental behavior. A graduate case study ». *Journal of Cleaner Production* 48: 116-125.

56. Santin Guerra, Olivia. 2011. « Behavioural Patterns and User Profiles related to energy consumption for heating ». *Energy and Buildings* 43 (10): 2662-2672.
57. Savely, Susanne M., Arch I. Carson, et George L. Delclos. 2007. « An environmental management system implementation model for U.S. colleges and universities ». *Journal of Cleaner Production* 15 (7): 660-670.
58. Université de Bordeaux. 2008. « Opération Campus - Note d'intention : Vers un nouveau modèle d'université ». Consulté mars 2011 à l'adresse : <http://www.univ-bordeaux.fr/operation-campus.html>.
59. Université de Bordeaux, et Département T.C - Cellule Infographie & multimédia. 2012. « Cartographie 2012 : Tranche 1, 2 et 3 ». Consulté mars 2011 à l'adresse : <http://www.u-bordeaux1.fr/fileadmin/images-PDF/UNIVERSITE/Presentation/plans/2012/Tranche1-2-2012.pdf>.
60. Université de Bordeaux, et Département TIC. 2012. « Plan du Campus Talence, Pessac et Gradignan ». Consulté mars 2013 à l'adresse : <http://www.univ-bordeaux.fr/tic/Cartographie/TPG.html>.
61. Université de Bordeaux, et Direction du Patrimoine et de la Logistique - Université Bordeaux IV. 2011. « L'Université Montesquieu - Bordeaux IV en chiffres ».
62. Université de Bordeaux, et Direction du Patrimoine Immobilier - Université Bordeaux 1. 2010. « L'Université Bordeaux 1 patrimoine bâti ».
63. Valderrama Ulloa, Claudia, Annie Cohen, Philippe Lagièrre, et Jean-Rodolphe Puiggali. 2011. « Análisis del comportamiento energético en un conjunto de edificios multifuncionales. Caso de estudio: un campus universitario ». *Revista de la Construcción* 10 (2): 26-39.
64. Valderrama Ulloa, Claudia, et François Schott. 2012. « L'enjeu du réseau de chaleur dans un campus universitaire : une réponse aux attentes des différents usagers ». In *Thermique en conditions extrêmes*, 1:418-425. Talence: Société Française de Thermique.
65. Viebahn, Peter. 2002. « An environmental management model for universities: from environmental guidelines to staff involvement ». *Journal of Cleaner Production* 10 (1): 3-12.
66. Weber, Christoph, et Adriaan Perrels. 2000. « Modeling lifestyle effects on energy demand and related emissions ». *Energy Policy* 28 (8): 549-566.
67. Van Weenen, Hans. 2000. « Towards a vision of a sustainable university ». *International Journal of Sustainability in Higher Education* 1 (1): 20-34.
68. Wong, W.P., R.F. Fellows, et A.M.M. Liu. 2006. « Use of electrical energy in university buildings: a Hong Kong case study ». *Facilities* 24 (1/2): 5-17.
69. Wright, T., S. A. 2002. « Definitions and frameworks for environmental sustainability in higher education ». *International Journal of Sustainability in Higher Education* 3 (3): 203-220.

70. Yuan, Xueliang, et Jian Zuo. 2012. « A Critical Assessment of the Higher Education for Sustainable Development from Students' Perspectives—a Chinese Study ». *Journal of Cleaner Production*.
71. Zélem M.-C. 2008. « Ecocampus : les difficultés de la mise en agenda d'une démarche de changement durable des pratiques énergétiques. Le cas du Centre Universitaire de Formation et de recherche Jean-François Champollion d'Albi ». In Colloque « L'éducation au développement durable, de l'école au campus », 1-10. Albi, France.

Chapitre 3

1. Abrial, S., Debizet, G., & Symes, M. (2008). De la « construction durable » à l'émergence de nouveaux modes de collaboration entre élus locaux et professionnels: leadership et cadres d'actions en France et au Royaume-Uni. Présenté à Le développement urbain durable saisi par les sciences sociales, St-Etienne, Francia.
2. Air Quality Sciences. (2009). Building rating systems (Certification programs): a comparison of key programs. yumpu.com. Consulté janvier 2013, à l'adresse : <http://www.yumpu.com/en/document/view/10635344/building-rating-systems-certification-programs-a->
3. Alençar, T. A., & Cole, R. J. (2012). Adaptation of environmental indicators to assess the existing buildings to different requirements of users (p. 195-204). Présenté à 1st International Conference on Building Sustainability Assessment, Porto, Portugal: Green Lines Institute - Universidade do Minho.
4. Altomonte, S., & Schiavon, S. (2013). Occupant satisfaction in LEED and non-LEED certified buildings. *Building and Environment*. doi:10.1016/j.buildenv.2013.06.008
5. Association Française de Normalisation (AFNOR). Ergonomie. Principes d'ergonomie visuelle applicables à l'éclairage des lieux de travail. , NF X 35-103 (2008).
6. Association Française de Normalisation (AFNOR). Ergonomie des ambiances thermiques. Détermination analytique et interprétation du confort thermique par le calcul des indices PMV et PPD et par des critères de confort thermique local. , NF EN ISO 7730 61 (2010).
7. Bauler, T. (2012). An analytical framework to discuss the usability of (environmental) indicators for policy. *Ecological Indicators*, 17, 38-45.
8. Blaviesciunaite, A., & Cole R.J. (2012). The cultural values embedded in building environmental assessment tools: a comparison of LEED-Canada and CASBEE. Présenté à 1st International Conférence on Building Sustainability Assessment, Porto, Portugal.

9. Boonstra C., & Dyrstad Pettersen T. (2003). Tools for environmental assessment of existing buildings. *Sustainable building and construction*, 80-83.
10. Boulanger P.-M. (2004). Les indicateurs de développement durable : un défi scientifique, un enjeu démocratique (Vol. 12, p. 1-24). Présenté à Développement durable et économie de l'environnement, Paris, France.
11. Building Research Establishment Ltd. (2008). BRE Environmental & Sustainability Standard. Issue 1.0.
12. Cadiergues, R. (s. d.). L'éclairage artificiel. Guide RefCad nR27.a.
13. Caisse des Dépôts et Consignations & de la Conférence des Présidents d'Université. (2009). Cartographie Energie-CO2 du patrimoine universitaire français. Consulté septembre 2012, à l'adresse : <http://www.cartoco2campus.com/>
14. Canada Green Building Council - Conseil du Bâtiment Durable du Canada. (2009). LEED Canada pour bâtiments existants: exploitation et entretien - Système d'évaluation.
15. Certivéa. (2009). Référentiel Technique de Certification - Bâtiments Tertiaires en Exploitation - Démarche HQE.
16. Cole, R. (2003). Building environmental assessment methods: a measure of success. *International e-Journal of Construction*.
17. Cole, R. J. (1999). Building environmental assessment methods: clarifying intentions. *Building Research & Information*, 27(4-5), 230-246.
18. Cole, Raymond J. (1998). Emerging trends in building environmental assessment methods. *Building Research & Information*, 26(1), 3-16.
19. Cole, Raymond J., & Valdebenito, M. J. (2013). The importation of building environmental certification systems: international usages of BREEAM and LEED. *Building Research & Information*, (ahead-of-print), 1-15.
20. Commission de la Santé et de la sécurité du travail du Québec (CSST). (2004). Guide: Confort thermique à l'intérieur d'un établissement.
21. Corporación de Desarrollo Tecnológico, & Cámara Chilena de la Construcción. (2010a). Certificaciones Ambientales y Energéticas - Repaso Verde. *Sustenta BIT*, (7), 22-25.
22. Corporación de Desarrollo Tecnológico, & Cámara Chilena de la Construcción. (2010b). Certificación LEED - Análisis Crítico. *Sustenta BIT*, (10), 20-23.
23. EPA - Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos. (1995). A Conceptual Framework to Support the Development and Use of Environmental Information for Decision-Making, Environmental Statistics and Information Division, Office of Policy, Planning and Evaluation. EPA.
24. Ganslandt R., & Hofmann H. (1992). Handbook of lighting design (1re éd.). ERCO Leuchten GmbH, Lüdenscheid Friedr. Vieweg et Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Braunschweig/Wiesbaden.

25. German Sustainable Building Council. (2009). German Sustainable Building Certificate. Structure - Application - Criteria.
26. German Sustainable Building Council. (s. d.). DGNB. Consulté janvier 2012, à l'adresse : http://www.dgnb.de/_en/
27. Haapio, A., & Viitaniemi, P. (2008). A critical review of building environmental assessment tools. *Environmental Impact Assessment Review*, 28(7), 469-482.
28. Heink, U., & Kowarik, I. (2010). What are indicators? On the definition of indicators in ecology and environmental planning. *Ecological Indicators*, 10(3), 584-593.
29. Huang, L., Zhu, Y., Ouyang, Q., & Cao, B. (2012). A study on the effects of thermal, luminous, and acoustic environments on indoor environmental comfort in offices. *Building and Environment*, 49(0), 304-309.
30. Inbuilt. (2010). BREEAM versus LEED.
31. International Institute for Sustainable development (IISD). (2010). Compendium of Sustainability Indicators. Consulté septembre 2012, à l'adresse : <http://www.iisd.org/measure/compendium/searchinitiatives.aspx>
32. International Living Building Institute (ILBI). (2010). Living Building Challenge 2.0. Consulté mars 2012 à l'adresse : <https://ilbi.org/lbc>
33. Japan Sustainable Building Consortium. (2006). CASBEE Technical Manual 2006 Edition: CASBEE for Existing Building (Brief version). Institute for Building Environment and Energy Conservation. Consulté mars 2012 à l'adresse : <http://www.ibec.or.jp/CASBEE/english/>
34. Kajikawa, Y., Inoue, T., & Goh, T. (2011). Analysis of building environment assessment frameworks and their implications for sustainability indicators. *Sustainability Science*, 6(2), 233-246.
35. Kosmopoulos, P., & Fragidou, I. P. (2005). Comparison of the HQE method and the Ev assessment (p. 257-262). Présenté à International Conference Passive and Low Energy Cooling for the Built Environment, Santorini, Greece.
36. Le Moniteur. (2007). Etudes de cas. Tertiaire rénové : quelles différences entre Effinergie et Minergie?
37. Le Moniteur. (2012). Etudes de cas. HQE, BREEAM, LEED : sont-elles vraiment concurrentes? Management.
38. Lee, W. L., & Burnett, J. (2008). Benchmarking energy use assessment of HK-BEAM, BREEAM and LEED. *Building and Environment*, 43(11), 1882-1891.
39. Macías, M., & Garcia Navarro, J. (2010). Metodología y herramienta VERDE para la evaluación de la sostenibilidad en edificios. *Informes de la Construcción*, 62(517), 87-100.
40. Mandallena Céline, Lagièrre Philippe, & Puiggali Jean-Rodolphe. (2008). Evaluation et amélioration des performances environnementales d'un bâtiment tertiaire en exploitation. *European journal of environmental and civil engineering*, 12(4), 333-346.

41. Ministère de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de la mer, en charge des technologies vertes et des négociations sur le climat - MEEDDM. Caractéristiques thermiques et aux exigences de performance énergétique de bâtiments. , Pub. L. No. Arrêté du 26 octobre 2010 (2010).
42. Mitchell, G. (1996). Problems and fundamentals of sustainable development indicators. *Sustainable Development*, 4, 1-11.
43. Newsham, G. R., Mancini, S., & Birt, B. J. (2009). Do LEED-certified buildings save energy? Yes, but.... *Energy and Buildings*, 41(8), 897-905.
44. Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico - OCDE. (1993). OECD Core set of indicators for environmental performance reviews (Vol. 1). Paris, France: Organisation for Economic Co-operation and Development.
45. Parris, T. M., & Kates, R. W. (2003). Characterizing a sustainability transition: Goals, targets, trends, and driving forces. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 100(14), 8068-8073.
46. Patlitzianas, K. D., Doukas, H., Kagiannas, A. G., & Psarras, J. (2008). Sustainable energy policy indicators: Review and recommendations. *Renewable Energy*, 33(5), 966-973.
47. Perdrix, A., Parat S., Liaudy S., & Maitre A. (2005). Syndrome des bâtiments malsains (SBM). *Revue francophone des laboratoires*, (373), 67 - 72.
48. Scofield, J. H. (2009). Do LEED-certified buildings save energy? Not really.... *Energy and Buildings*, 41(12), 1386-1390.
49. Sleeuw Martin. (2011). A comparison of BREEAM and LEED environmental assessment methods. University of East Anglia Estate.
50. Sustain. (2008). Assessing the assessor BREEAM v/s LEED, 9(6), 30-33.
51. Sustainable Building Alliance. (2012). Piloting SBA Common Metrics. Technical and operational feasibility of the SBA common metrics. Practical modeling of case studies. Final report.
52. The American Society of Heating, Refrigeration and Air-conditioning Engineers. (2004). ASHRAE Standard 55 - 2004 for High Performance Building - Thermal environmental conditions for human occupancy.
53. Valderrama Ulloa, C., Crepin, J., Lagièrre, Philippe, & Puiggali, J.-R. (2012). Adaptation of environmental indicators to assess the existing buildings to different requirements of users (p. 375-385). Présenté à 1st International Conference on Building Sustainability Assessment, Porto, Portugal: Green Lines Institute - Universidade do Minho.
54. Weissenstein, C., & Bignon, J.-C. (2010). Conception environnementale du bâtiment: proposition d'une méthode d'évaluation contextuelle et pondérée. Présenté à 4th Séminaire de Conception Architecturale Numérique, Marseille, France.
55. World Green Building Council. (2013). The business case for green building. A review of the costs and benefits for developers, investors and occupants.
56. World Health Organization. (2002). Health in Sustainable Development Planning: The role of indicators.

57. Yepez-Salmon, G. (2011). Construction d'un outil d'évaluation environnementale des écoquartiers : vers une méthode systémique de mise en œuvre de la ville durable. Thèse Université Bordeaux 1.

Chapitre 4

1. Adamski, M. (2007). Optimization of the form of a building on an oval base. *Building and Environment*, 42(4), 1632-1643.
2. ADEME et BRGM (2013) Géothermie Perspectives : La Géothermie en France. Consulté mars 2013 à l'adresse : <http://www.geothermie-perspectives.fr/07-geothermie-france/03-haute-energie-02.html>.
3. Al-Homoud, M.S. (2005). A systematic approach for the thermal design optimization of building envelopes. *Journal of Building Physics*, 29(2), 95-119.
4. Al-Homoud, M.S. (2009). Envelope thermal design optimization of buildings with intermittent occupancy. *Journal of Building Physics*, 33(1), 65-82.
5. Al-Homoud, Mohammad S. (1997). Optimum thermal design of office buildings. *International Journal of Energy Research*, 21(10), 941-957.
6. Asadi, E., Da Silva, M. G., Antunes, C. H., & Dias, L. (2012). Multi-objective optimization for building retrofit strategies: A model and an application. *Energy and Buildings*, 44, 81-87.
7. Attia, S., Gratia, E., De Herde, A., & Hensen, J. L. M. (2012). Simulation-based decision support tool for early stages of zero-energy building design. *Energy and Buildings*, 49, 2-15.
8. Bana e Costa, C. A., & Vansnick, J. C. (1993). Sur la quantification des jugements de valeurs: l'approche Macbeth.
9. Bard, J. F. (1992). A comparison of the Analytic Hierarchy Process with multiattribute utility theory: A case study. *lie Transactions*, 24(5), 111-121.
10. Ben Mena, S. (2000). Introduction aux méthodes multicritères d'aide à la décision. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ*, 4(2), 83-93.
11. Benayoun, R., De Montgolfier, J., Tergny, J., & Laritchev, O. (1971). Linear programming with multiple objective functions: Step method (STEM). *Mathematical programming*, 1(1), 366-375.
12. Bouchlaghem, N. M., & Letherman, K. M. (1990). Numerical optimization applied to the thermal design of buildings. *Building and Environment*, 25(2), 117-124.
13. Bouyssou, D. (1993). Décision multicritère ou aide multicritère. Newsletter of the European Working Group « Multicriteria Aid for Decisions », Series, 2(2), 1-2.
14. Brans, J.-P., Vincke, P., & Mareschal, B. (1986). How to select and how to rank projects: The PROMETHEE method. *European journal of operational research*, 24(2), 228-238.

15. Caldas, L. G., & Norford, L. K. (2002). A design optimization tool based on a genetic algorithm. *Automation in Construction*, 11(2), 173-184.
16. Cassol, F., Schneider, P. S., França, F. H. R., & Silva Neto, A. J. (2011). Multi-objective optimization as a new approach to illumination design of interior spaces. *Building and Environment*, 46(2), 331-338.
17. Ch'ng, C. K., Quah, S. H., & Low, H. C. (2005). A New Approach for Multiple-Response Optimization. *Quality Engineering*, 17(4), 621-626.
18. Charnes, A., Cooper, W. W., & Ferguson, R. O. (1955). Optimal estimation of executive compensation by linear programming. *Management science*, 1(2), 138-151.
19. Cherqui, F. (2005). Méthodologie d'évaluation d'un projet d'aménagement durable d'un quartier-méthode ADEQUA. Thèse Université de La Rochelle.
20. Coley, D. A., & Crabb, J. A. (1997). An artificial intelligence approach to the prediction of natural lighting levels. *Building and environment*, 32(2), 81-85.
21. Collignan, A. (2011). Méthode d'optimisation et d'aide à la décision en conception mécanique: application à une structure aéronautique. Thèse Université Bordeaux 1.
22. Crawley, D., & Aho, I. (1999). Building environmental assessment methods: applications and development trends. *Building Research & Information*, 27(4-5), 300-308.
23. D'Aula, E. (2011). ICADA Base para un Índice de Calidad Acústica global de la Arquitectura Interior - Aplicación a los espacios comerciales urbanos . Thèse Universitat Politècnica de Catalunya.
24. Del Castillo, E., Montgomery, D. C., & McCarville, D. R. (1996). Modified desirability functions for multiple response optimization. *Journal of Quality Technology*, 28, 337-345.
25. Derringer, G., & Suich, R. (1980). Simultaneous-optimization of several response variables. *Journal of Quality Technology*, 12(4), 214-219.
26. Diakaki, C., Grigoroudis, E., & Kolokotsa, D. (2008). Towards a multi-objective optimization approach for improving energy efficiency in buildings. *Energy and Buildings*, 40(9), 1747-1754.
27. Ding, G. K. C. (2008). Sustainable construction—The role of environmental assessment tools. *Journal of Environmental Management*, 86(3), 451-464.
28. Edwards, W., & Barron, F. H. (1994). SMARTS and SMARTER: Improved simple methods for multiattribute utility measurement. *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, 60(3), 306-325.
29. European Commission. (s. d.). PV potential estimation utility. Consulté mars 2013, à l'adresse : <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php#>
30. EUR-Lex L'accès au droit de l'Union européenne JO L 140 du 30.4.2004.p1 52014XC0107(04) (2014). Consulté janvier 2014, à l'adresse : <http://eur-lex.europa.eu/Result.do?direct=yes&lang=fr&where=LB:32004R0794&wherei hm=Base+juridique:32004R0794>

31. Evins, R. (2013). A review of computational optimisation methods applied to sustainable building design. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 22, 230-245.
32. Evins R., Pointer P., & Vaidyanathan R. (2011). Multi-objective optimisation of the configuration and control of a double-skin facade (p. 1343). Présenté à Building Simulation, Sydney, Australia: IBPSA.
33. Exoès, Exoès – Produits (2013) Consulté mars 2013 à l'adresse : <http://www.exoes.com/FR/recuperation-de-chaleur/exploitation-de-la-chaleur.html>.
34. Forman, E. H., & Selly, M. A. (2001). Decision by objectives: how to convince others that you are right. World Scientific.
35. Gagne, J., & Andersen, M. (2012). A generative facade design method based on daylighting performance goals. *Journal of Building Performance Simulation*, 5(3), 141-154.
36. Ghisi E., & Tinker J. (2001). Optimising energy consumption in offices as a function of window area and room size (p. 1307). Présenté à Building Simulation, Rio de Janeiro, Brazil: IBPSA.
37. Harrington, E. C. (1965). The Desirability Function. *Industrial Quality Control*, 21(10), 494-498.
38. Hasan, A., Vuolle, M., & Sirén, K. (2008). Minimisation of life cycle cost of a detached house using combined simulation and optimisation. *Building and Environment*, 43(12), 2022-2034.
39. Hinloopen, E., Nijkamp, P., & Rietveld, P. (1983). The regime method: A new multicriteria technique. In *Essays and surveys on multiple criteria decision making* (p. 146-155). Springer.
40. Hwang, C.-L., & Yoon, K. (1981). Multiple attribute decision making. Springer.
41. INES Education, CalSol - Gisement solaire estimation de l'énergie solaire disponible pour une application énergétique. (2013) Consulté mars 2013 à l'adresse : <http://ines.solaire.free.fr/gisesol.php>.
42. INSEE (Institut national de la statistique et des études économiques). Informations rapides – Indice des prix à la consommation – moyennes annuelles 2012 et 2013 (2014) Consulté janvier 2014 à l'adresse : http://www.insee.fr/fr/indicateurs/ind78/20140114/moyennes-annuelles2013_web.pdf
43. Jacquet-Lagrange, E., & Siskos, J. (1982). Assessing a set of additive utility functions for multicriteria decision-making, the UTA method. *European journal of operational research*, 10(2), 151-164.
44. Jin, Q., & Overend, M. (2012). Facade renovation for a public building based on a whole-life value approach. In *Building simulation and optimization* (p. 378). Loughborough, England: IBPSA.
45. Kämpf, J. H., & Robinson, D. (2009). A hybrid CMA-ES and HDE optimisation algorithm with application to solar energy potential. *Applied Soft Computing*, 9(2), 738-745.

46. Keeney, R. L., & Raiffa, H. (1993). *Decisions with multiple objectives: preferences and value trade-offs*. Cambridge University Press.
47. Köksalan, M., & Bilgin Özpeynirci, S. (2009). An interactive sorting method for additive utility functions. *Computers & Operations Research*, 36(9), 2565-2572.
48. Le Moniteur. (2013). Prix de la construction - Batiprix - Accueil. Consulté mars 2013, à l'adresse : <http://www.batiprix.com/>
49. Lecuona Neumann, A., Izquierdo Millán, M., & Rodríguez Aumente, P. (2005). Investigación e impacto ambiental de los edificios. *La Energía. Informes de la Construcción*, 57(498), 47-61.
50. Leskovar, V. Ž., & Premrov, M. (2011). An approach in architectural design of energy-efficient timber buildings with a focus on the optimal glazing size in the south-oriented façade. *Energy and Buildings*, 43(12), 3410-3418.
51. Macías, M., & Garcia Navarro, J. (2010). Metodología y herramienta VERDE para la evaluación de la sostenibilidad en edificios. *Informes de la Construcción*, 62(517), 87-100.
52. Mahdavi A., & Mahattanatawe P. (2003). Enclosure systems design and control support via dynamic simulation-assisted optimization (p. 785). Présenté à Building Simulation, Eindhoven, Netherlands: IBPSA.
53. Marks, W. (1997). Multicriteria optimisation of shape of energy-saving buildings. *Building and Environment*, 32(4), 331-339.
54. Marsh A. (2003). Computer-optimised shading design (p. 831). Présenté à Building Simulation, Eindhoven, Netherlands: IBPSA.
55. Martel, J.-M. (1999). L'aide multicritère à la décision: méthodes et applications. *CORS-SCRO Bulletin*, 31, 1.
56. Martínez, E., Álvarez, M., Arquero, Á., & Romero, M. (2010). Selection of the optimal emplacement in buildings. Emplacement a university building by an Analytical Hierarchy Process (AHP). *Informes de la construcción revista de información técnica*, 62(519), 35.
57. Massaglia, R., & Ostanello, A. (1991). N-tomic: a support system for multicriteria segmentation problems. *Multiple Criteria Decision Support*, 356, 167-174.
58. Massobrio, A., & Sertorio, L. (1991). A theoretical approach to solar architecture. *Il Nuovo Cimento B*, 106(1), 69-90.
59. Mela, K., Tiainen, T., & Heinisuo, M. (2012). Comparative study of multiple criteria decision making methods for building design. *Advanced Engineering Informatics*, 26(4), 716-726.
60. Paelinck, J. H. P. (1978). Qualiflex: a flexible multiple-criteria method. *Economics Letters*, 1(3), 193-197.
61. Park C.-S., Augenbroe G., & Messadi T. (2003). Daylighting optimization in smart facade systems (p. 1009). Présenté à Building Simulation, Eindhoven, Netherlands: IBPSA.

62. Pernodet Chantrelle F., Lahmidi H., & Michel P. (2009). Use of genetic algorithms for multicriteria optimization of building refurbishment (p. 188). Présenté à Building Simulation, Glasgow, Scotland: IBPSA.
63. Pernodet Chantrelle, F., Lahmidi, H., Keilholz, W., Mankibi, M. E., & Michel, P. (2011). Development of a multicriteria tool for optimizing the renovation of buildings. *Applied Energy*, 88(4), 1386-1394.
64. Quirante, T. (2012). Modeling method and numerical optimization for decision support in robust embodiment design of products and processes. Thèse Université Bordeaux 1.
65. République Française. Code du travail - Article R232-5-3. , Code du travail (2008).
66. Romero D., Rincn J., & Almaso N. (2001). Optimization of the thermal behavior of tropical buildings (p. 1079). Présenté à Building Simulation, Rio de Janeiro, Brazil: IBPSA.
67. Roubens, M. (1982). Preference relations on actions and criteria in multicriteria decision making. *European Journal of Operational Research*, 10(1), 51-55.
68. Roy, B. (1968). Classement et choix en présence de points de vue multiples. *RAIRO-Operations Research-Recherche Opérationnelle*, 2(V1), 57-75.
69. Roy, B. (1985). *Méthodologie multicritère d'aide à la décision*. Editions Economica.
70. Saaty, T. L. (1977). A scaling method for priorities in hierarchical structures. *Journal of mathematical psychology*, 15(3), 234-281.
71. Saaty, T. L. (2008). Relative measurement and its generalization in decision making why pairwise comparisons are central in mathematics for the measurement of intangible factors the analytic hierarchy/network process. *RACSAM-Revista de la Real Academia de Ciencias Exactas, Fisicas y Naturales. Serie A. Matematicas*, 102(2), 251-318.
72. Saelens D., Blocken B., Roels S., & Hens H. (2005). Optimization of the energy performance of multiple-skin facades (p. 1059). Présenté à Building Simulation, Montreal, Canada: IBPSA.
73. Sahu, M., Bhattacharjee, B., & Kaushik, S. C. (2012). Thermal design of air-conditioned building for tropical climate using admittance method and genetic algorithm. *Energy and Buildings*, 53, 1-6.
74. Scott, M. J., & Antonsson, E. K. (1998). Aggregation functions for engineering design trade-offs. *Fuzzy Sets and Systems*, 99(3), 253-264.
75. Sebastian, P., Quirante, T., Ho Kon Tiat, V., & Ledoux, Y. (2010). Multi-objective optimization of the design of two-stage flash evaporators: Part 2. Multi-objective optimization. *International Journal of Thermal Sciences*, 49(12), 2459-2466.
76. Semassou, G. C. (2011). Aide à la décision pour le choix de sites et systèmes énergétiques adaptés aux besoins du benin. Thèse Université Bordeaux 1.

77. Simon, S. M. D. (1960). The new science of management decision. In In Proceedings of the 33 rd Conference of the Operational Research Society of New Zealand. Citeseer.
78. Simos, J. (1990). Evaluer l'impact sur l'environnement: Une approche originale par l'analyse multicritère et la négociation.
79. Sullivan, R., Lee, E. S., & Selkowitz, S. (1992). A method of optimizing solar control and daylighting performance in commercial office buildings. In Thermal performance of the exterior envelopes of buildings (p. sp). Berkeley, United State.
80. Taillandier, F. (2009). La notion de risque comme clef du pilotage d'un parc patrimonial immobilier. Thèse Université de Savoie.
81. Tendero, R., & García de Viedma, M. (2011). Edificación para un desarrollo sostenible: una actividad modal. *Informes de la Construcción*, 63(521), 75-87.
82. Torres S.L., & Sakamoto Y. (2007). Facade design optimization for daylight with a simple genetic algorithm (p. 1162). Présenté à Building Simulation, Beijing, China: IBPSA.
83. Tuhus-Dubrow, D., & Krarti, M. (2010). Genetic-algorithm based approach to optimize building envelope design for residential buildings. *Building and Environment*, 45(7), 1574-1581.
84. Turrin, M., Von Buelow, P., & Stouffs, R. (2011). Design explorations of performance driven geometry in architectural design using parametric modeling and genetic algorithms. *Advanced Engineering Informatics*, 25(4), 656-675.
85. Union Nationale des Economistes de la Construction, & Entreprises Générales de France - BTP. (2013). Observatoire des prix Constatés d'opération de Construction. Consulté mars 2013 à l'adresse : <http://www.prix-constates-construction.fr/>
86. Vaidya, O. S., & Kumar, S. (2006). Analytic hierarchy process: An overview of applications. *European Journal of Operational Research*, 169(1), 1-29.
87. Valderrama Ulloa, C., & Puiggali, J.-R. (2013). ¿Cuáles son los requerimientos energéticos y medioambientales de distintas generaciones presentes en un campus universitario y cómo se proyectan en su futuro energético? Présenté à 1er Coloquio Internacional : Universidades y Territorio, Bogotá, Colombia: Facultad de Arquitectura y Diseño - Universidad de los Andes.
88. Vincke, P. (1992). *Multicriteria Decision-Aid*. UK: John Wiley & Sons.
89. Von Neumann, J., & Morgenstern, O. (1945). Theory of games and economic behavior. *Bull. Amer. Math. Soc*, 51, 498-504.
90. Wang, W., Rivard, H., & Zmeureanu, R. (2006). Floor shape optimization for green building design. *Advanced Engineering Informatics*, 20(4), 363-378.
91. Wang W., Rivard H., & Zmeureanu R.G. (2003). Optimizing building design with respect to life-cycle environmental impacts (p. 1355). Présenté à Building Simulation, Eindhoven, Netherlands: IBPSA.

92. Wang, W., Zmeureanu, R., & Rivard, H. (2005). Applying multi-objective genetic algorithms in green building design optimization. *Building and Environment*, 40(11), 1512-1525.
93. Wetter, M., & Polak, E. (2005). Building design optimization using a convergent pattern search algorithm with adaptive precision simulations. *Energy and buildings*, 37(6), 603-612.
94. Wright J., & Mourshed M. (2009). Geometric optimization of fenestration (p. 920). Présenté à Building Simulation, Glasgow, Scotland: IBPSA.
95. Wright, J., Zhang, Y., Angelov, P., Hanby, V., & Buswell, R. (2008). Evolutionary Synthesis of HVAC System Configurations: Algorithm Development (RP-1049). *HVAC&R Research*, 14(1), 33-55.
96. Yoon, S.-H., Park, C.-S., & Augenbroe, G. (2011). On-line parameter estimation and optimal control strategy of a double-skin system. *Building and Environment*, 46(5), 1141-1150.
97. Zemella, G., De March, D., Borrotti, M., & Poli, I. (2011). Optimised design of energy efficient building façades via Evolutionary Neural Networks. *Energy and Buildings*, 43(12), 3297-3302.
98. Zhang, Y., Wright, J. A., & Hanby, V. I. (2006). Energy Aspects of HVAC System Configurations—Problem Definition and Test Cases. *HVAC&R Research*, 12(sup3), 871-888.
99. Zions, S. (1980). *Methods for solving management problems involving multiple objectives*. Springer.
100. Znouda, E., Ghrab-Morcos, N., & Hadj-Alouane, A. (2007). Optimization of Mediterranean building design using genetic algorithms. *Energy and buildings*, 39(2), 148-153.

ANNEXES

Chapitre 1

A.1.1 Les différentes politiques énergétiques et environnementales

Au niveau mondial

- Mai 1992 : lors de la conférence de Rio de Janeiro, adoption par les Nations Unies de la Convention cadre sur les changements climatiques (CCNUCC).
- Décembre 1997 : ratification du Protocole de Kyoto.
- Février 2005 : entrée en vigueur du Protocole de Kyoto.
- Octobre 2006 : parution du rapport Stern
- Novembre 2007 : parution du 4ème rapport du GIEC
- Décembre 2007 : au cours des négociations de l'ONU à Bali, accord sur une feuille de route pour les deux années à venir pour préparer le cadre post - 2012
- Décembre 2008 : autre étape préparatoire à Poznan des futures négociations de Copenhague visant à établir un nouvel accord post - Kyoto
- Décembre 2009 et janvier 2010 : négociations de Copenhague, annonce de la réduction des émissions de gaz à effet de serre pour 2020
- Décembre 2012 : les représentants des pays présents à la 18^e conférence des Nations Unies sur le climat de Doha se sont entendus pour prolonger les mesures du protocole de Kyoto jusqu'en 2020

Au niveau européen

- Juin 2000 : lancement des programmes européens sur les changements climatiques (PECC)
- Janvier 2005 : entrée en vigueur du système européen d'échange des quotas d'émissions de gaz à effet de serre (EU-ETS)
- Octobre 2005 : lancement du 2ème programme européen sur le changement climatique (PECC II)
- Janvier 2007 : annonce par la Commission Européenne d'un objectif à l'horizon 2020 de 20 % de réduction des émissions de gaz à effet de serre, avec une augmentation de 20 % de l'efficacité énergétique, et une part de 20% d'énergies renouvelables dans la consommation énergétique totale, dont 10% de biocarburant dans la consommation totale des véhicules
- Janvier 2008 : présentation par la Commission européenne d'une proposition de mise en œuvre des mesures annoncées en 2007 (Paquet énergie – climat)
- Décembre 2008 : adoption du Paquet énergie - climat en codécision par le Conseil et le Parlement européen

Au niveau français

- Juin 2003 : Stratégie nationale de développement durable
- Juillet 2004 : présentation du Plan climat qui doit être actualisé tous les deux ans. C'est le plan d'action du gouvernement pour respecter, voire dépasser légèrement, l'objectif du protocole de Kyoto. Il regroupe toutes les mesures visant à économiser 54 millions de teCO₂ par an en 2010 et définit une stratégie de recherche technologique afin de contribuer à la division par 4 des émissions de gaz à effet de

serre d'ici 2050 (Plan climat, 2004). Les actions concernant le secteur du bâtiment sont inscrites principalement dans le Chapitre « Bâtiment et éco-habitat » et "Climatisation durable". Elles concernent :

- l'amélioration de la performance énergétique des bâtiments : une amélioration de 15% de la performance énergétique globale dès 2005 avec un objectif d'amélioration de 40% d'ici à 2020.
- la mise en application d'une réglementation pour les bâtiments réhabilités ou rénovés.
- la création d'un diagnostic de performance énergétique des bâtiments (DPE).
- la mise en place de certificats d'économie d'énergie, de crédits d'impôts, d'aides publiques ciblées sur la performance énergétique.
- la mise en œuvre d'un outil statistique et de suivi.
- la création du PREBAT (Programme de Recherche et d'Expérimentation sur l'énergie dans les Bâtiments).
- la minimisation des impacts énergétiques dus à la climatisation.

- Juillet 2005 : Adoption de la loi POPE (Programmation fixant les orientations de la politique énergétique). Elle contient au total 110 articles définissant quatre grands objectifs de politique énergétique et les moyens à mettre en œuvre pour les atteindre :

- contribuer à l'indépendance énergétique nationale et garantir la sécurité d'approvisionnement ;
- assurer un prix compétitif de l'énergie ;
- préserver la santé humaine et l'environnement, en particulier en luttant contre l'aggravation de l'effet de serre ;
- garantir l'adhésion sociale et territoriale en assurant l'accès de tous à l'énergie.

Avec cette Loi, la France se donne des objectifs chiffrés au travers un certain nombre de programmes mobilisateurs :

- la réduction en moyenne de 2 % par an de 2005 à 2015 de l'intensité énergétique finale (rapport entre la consommation d'énergie et la croissance économique) et de 2,5 % de 2005 à 2030.
- la production de 10 % des besoins énergétiques français à partir de sources d'énergies renouvelables à l'horizon 2010 :
 - une production intérieure d'électricité d'origine renouvelable à hauteur de 21 % de la consommation en 2010 contre 14 % actuellement, soit + 50 % ;
 - le développement des énergies renouvelables thermiques pour permettre de 2005 à 2010 une hausse de 50% de la production de chaleur d'origine renouvelable ;
 - l'incorporation de biocarburants et autres carburants renouvelables à hauteur de 2 % d'ici au 31 décembre 2005 et de 5,75 % d'ici au 31 décembre 2010 ;

- 2006 : Directive européenne sur la performance énergétique des bâtiments (DPEB). Les exigences concernent (EPBD, 2002) :

- la disponibilité d'une méthode de calcul de la performance énergétique des bâtiments qui devra être exprimée clairement et pourra être complétée par un indicateur d'émission de CO₂ (article 3).
- les exigences minimales en matière de performance énergétique (article 4), revues tous les cinq ans, pour les bâtiments neufs (article 5) et les bâtiments existants de surface supérieure à 1000 m² (article 6).
- les études de faisabilité technique, environnementale et économique pour les bâtiments neufs (article 5) de taille supérieure à 1000 m², portant sur des systèmes alternatifs d'approvisionnement en énergie.
- la mise en place d'un certificat de performance énergétique (article 7), dénommé en France "Diagnostic de Performance Energétique (DPE)", comportant la consommation énergétique et des recommandations destinées à améliorer la rentabilité de la performance énergétique qui devra être fourni aux acheteurs et aux locataires pour les locaux faisant l'objet de transactions. Il sera également affiché de manière visible dans tous les locaux publics recevant du public, de surface supérieure à 1000 m².
- la mise en œuvre d'une inspection périodique des chaudières à combustibles de 20 à 100 kW (article 8) et des systèmes de climatisation de plus de 12 kW (article 9). La mise en place également d'une inspection ponctuelle des systèmes de chauffage de plus de 20 kW âgés de plus de 15 ans, suivie de recommandations de modifications possibles (article 8).
- la réalisation des diagnostics de performance énergétique, des inspections et des recommandations par des experts qualifiés et/ou agréés par les Etats membres (article 10).

- Juillet – Décembre 2007 : Grenelle de l'Environnement

Parmi les mesures opérationnelles concernant le secteur du bâtiment, nous pouvons citer à titre d'exemple :

- pour les bâtiments existants :
 - réduire d'au moins 38% la consommation énergétique du parc de bâtiments de 2007 à 2020.
 - rénovation thermique des 50 millions de m² des bâtiments de l'Etat et des 70 millions de m² de ses principaux établissements publics.
 - rénovation de 800 000 logements sociaux pour ramener leur consommation de 230 kWhEP/m².an à 150 kWhEP/m².an en 2020.
- pour les bâtiments neufs :
 - norme bâtiment basse consommation (BBC, 50 kWhEP/m².an) s'appliquera de façon modulée à toutes les constructions neuves à partir de 2011.
 - norme bâtiment à énergie positive pour toutes les constructions neuves à compter de 2021 (consommation d'énergie des bâtiments inférieure à la quantité d'énergie produite à partir de sources renouvelables)

- Juillet 2011 : parution du Plan national d'adaptation au changement climatique
- 2012 : nouvelle Réglementation Thermique. Conformément à l'article 4 de la loi Grenelle 1, la RT 2012 a pour objectif de limiter la consommation d'énergie primaire des bâtiments neufs à un maximum de 50 kWh_{EP}/(m².an) en moyenne.

La réglementation thermique 2012 comporte 3 exigences de résultats (besoin bioclimatique, consommation d'énergie primaire, confort en été) et quelques exigences de moyens, limitées au strict nécessaire, pour refléter la volonté affirmée de faire pénétrer significativement une pratique (affichage des consommations par exemple).

L'efficacité énergétique du bâti

L'exigence d'efficacité énergétique minimale du bâti est définie par le coefficient « Bbio_{max} » (besoins bioclimatiques du bâti). Cette exigence impose une limitation du besoin en énergie pour les composantes liées à la conception du bâti (chauffage, refroidissement et éclairage), imposant ainsi son optimisation indépendamment des systèmes énergétiques mis en œuvre.

La consommation énergétique du bâtiment

L'exigence de consommation conventionnelle maximale d'énergie primaire se traduit par le coefficient « Cep_{max} », portant sur les consommations de chauffage, de refroidissement, d'éclairage, de production d'eau chaude sanitaire et d'auxiliaires (pompes et ventilateurs). Conformément à l'article 4 de la loi Grenelle 1, la valeur du Cep_{max} s'élève à 50 kWh/(m².an) d'énergie primaire, modulé selon la localisation géographique, l'altitude, le type d'usage du bâtiment, la surface moyenne des logements et les émissions de gaz à effet de serre pour le bois énergie et les réseaux de chaleur les moins émetteurs de CO₂. Cette exigence impose, en plus de l'optimisation du bâti exprimée par le Bbio, le recours à des équipements énergétiques performants, à haut rendement.

Le confort d'été dans les bâtiments non climatisés

A l'instar de la RT 2005, la RT 2012 définit des catégories de bâtiments dans lesquels il est possible d'assurer un bon niveau de confort en été sans avoir à recourir à un système actif de refroidissement. Pour ces bâtiments, la réglementation impose que la température la plus chaude atteinte dans les locaux, au cours d'une séquence de 5 jours très chauds d'été n'excède pas un seuil.

Au niveau chilien

La préoccupation croissante des chiliens pour l'énergie et en particulier le secteur électrique est le résultat d'un contexte caractérisé par des risques répétés d'approvisionnement avec des cycles hydrologiques secs et de pénurie, par les hausses du prix des combustibles et par l'opposition croissante aux projets énergétiques par des communautés locales.

Selon l'analyse de Chile Sustentable (2011), les principaux facteurs de vulnérabilité du secteur énergétique chilien, sont :

- absence d'objectifs sur l'efficacité d'usage et gestion de l'énergie
- dépendance Excessive aux combustibles fossiles importés
- faible diversification des sources énergétiques et production énergétique excessive à partir de charbon et de méga hydroélectriques.
- absence de la dimension environnementale dans la planification énergétique
- inégalité dans la fourniture et contrats des services énergétiques dans les différentes classes sociales et régions.
- faible rôle de l'Etat dans la détermination de la politique et de la planification énergétique.

La stratégie nationale d'énergie, annoncé le 27 Février 2012, présente l'importance d'intégrer l'efficacité énergétique dans le réseau électrique et la mise en œuvre du Plan d'action, mais oublie les mesures, les mécanismes et le temps nécessaires pour sa mise en marche. Cette stratégie présente les aspects les plus importantes du Plan d'action, l'efficacité énergétique potentielle par secteur, la nécessité d'une institution qui permettra de créer des stratégies d'efficacité énergétique à moyen et long terme.

Le Plan National d'action d'efficacité énergétique 2012-2030 (PNAEE)

Le Plan d'action vise à générer des avantages économiques, sociaux et environnementaux pour la société et le développement du Chili. Parmi ceux-ci :

- réduire les dépenses d'énergie des familles chiliennes (électricité et gaz), en particulier des plus vulnérables, et augmenter leur confort sans payer plus.
- réduire les émissions de gaz à effet de serre et ses impacts
- réduire la dépendance du pays envers les combustibles fossiles importés, avec la réduction de la vulnérabilité énergétique chilienne
- réduire les dépenses publiques et améliorer la sécurité énergétique.
- générer un marché d'efficacité énergétique (EE), en encourageant les services de diagnostic énergétiques, l'isolation thermique, fabrication des matériaux, l'importation et l'installation des équipements, moteurs, etc., plus efficaces
- réduire les coûts opérationnels du secteur productif, pour qu'il soit plus compétitif.

Le plan d'action basé sur un fort soutien d'information et de calculs; fournit des indications précises à court et moyen terme pour augmenter les niveaux d'efficacité énergétique de chaque secteur d'utilisateur, et est une feuille de route utile pour atteindre des objectifs d'efficacité énergétique au Chili.

Les actions concernant le secteur du bâtiment sont :

- EE dans les bâtiments existants :
 - améliorer la qualité énergétique de l'enveloppe des les bâtiments construits sans standards EE. Programme : bas financement des solutions de réhabilitation thermique dans les bâtiments privés.
 - réhabilitation thermique de logements sociaux (les plus pauvres). Programme : certification énergétique des bâtiments existants.
- EE dans les bâtiments neufs :
 - promouvoir la conception de bâtiments avec hauts standards d'EE. Programmes : actualisation et extension de réglementations de conception, certification énergétique des bâtiments neufs et régulation de haut standard dans les bâtiments publics
 - promouvoir l'offre de produits et services de construction pour l'EE. Programme : subvention de produits et services pour l'EE
- dans la ville :
 - générer de l'information pour l'aménagement urbain avec EE. Programme : observatoire des indicateurs d'EE urbain
 - promouvoir l'EE dans les zones urbaines. Programme : prise en main les périodes de hautes températures dans des lieux publics.

Les buts de l'EE sont :

- réduction de la consommation dans le secteur résidentiel et tertiaire d'ici à 2020 en 18%
- économies de budget de 33 000 millions de dollars US
- réduction de 3 millions tonnes d'émission de CO₂ à 2020

Réglementation thermique chilienne

La réglementation thermique chilienne a été élaborée par le Ministère du Logement et de l'Urbanisme (MINVU), dans son programme d'action de l'année 1994, avec les objectifs suivants :

- améliorer la qualité de vie des habitants au travers le confort thermique
- optimiser et/ou réduire la consommation de combustibles destinée à chauffer ou à ventiler les bâtiments
- promouvoir et stimuler l'activité économique, productive, industrielle et de la recherche

La réglementation thermique chilienne est seulement applicable aux logements et a été élaborée en trois étapes :

- 1994 : définition des exigences thermiques de la toiture, elle doit respecter des valeurs de coefficient de transmission surfacique (U) compris entre 0.84 à 0.25 W/m².K, définie pour la zone thermique dans laquelle le projet est installé.

- 2007 : définition des exigences thermiques pour les murs, les sols ventilés et la surface maximale de fenêtres.

Les murs extérieurs et sols ventilés, devront avoir un coefficient de transmission surfacique (U) compris entre 4.0 à 0.6 W/m².K, pour les murs et une valeur de U compris entre 3.60 à 0.32 W/m².K, pour les sols ventilés, selon la zone thermique dans laquelle le projet est installé.

Les fenêtres doivent respecter les exigences décrites dans le tableau A.1.1, en fonction du type de vitrage et à la zone thermique dans laquelle le projet est installé.

Zone thermique	Simple vitrage	Double vitrage étanche	
		3.6 ≥ U ≥ 2.4 W/m ² .K	U ≤ 2.4 W/m ² .K
1	50%	60%	80%
2	40%	60%	80%
3	25%	60%	80%
4	21%	60%	75%
5	18%	51%	70%
6	14%	37%	55%
7	12%	28%	37%

Tableau A.1.1 : Pourcentage maximal de surface de fenêtres par rapport aux murs verticales de l'enveloppe

- 2012 : Certification énergétique pour les logements.

A.1.2 Les paramètres climatologiques

La température

Les principaux facteurs de son comportement sont la disposition des masses continentales et océaniques et aussi l'altitude. A l'échelle quotidienne, la température varie parallèlement au bilan énergétique mais avec un décalage temporel : le maximum est atteint en début d'après-midi, le minimum quelques minutes après le lever du jour.

Le Degré Jour Unifié

Les degrés-jours de chauffage sont définis comme la somme annuelle (mensuelle ou journalière, selon l'échelle de temps analysée) de la moyenne temporelle entre la température de l'air extérieur et une température de base de chauffage pour chaque jour de l'année où la température extérieure est inférieure à la température de base.

Les degrés-jours de climatisation utilisant la même définition dans le cas où la température extérieure est supérieure à la température de base.

L'Humidité

L'humidité de l'air influence la sensation thermique et les risques de condensation. Dans les climats plus humide et aux températures d'hiver basses il y a plus de risques d'apparition de condensation sur les éléments de construction.

Le Vent

La vitesse est la rapidité à laquelle la masse d'air entre en mouvement, peut être mesurée en km/h ou en m/s. La fréquence des vents est le nombre de vent soufflant à une certaine vitesse pour une période donnée.

La Nébulosité

C'est le nombre de jours couverts et l'étendue du ciel couverte par les nuages. Ce facteur est lié au rayonnement solaire disponible et à la qualité et de la quantité de lumière naturelle. Dans l'éclairage, nous utilisons la notion de types de ciel en référence à l'identification par la Commission Internationale de l'éclairage (CIE) des quatre niveaux de nébulosité.

Les Précipitations

Apparemment facile à obtenir, la mesure de la lame d'eau précipitée est souvent peu précise (effet du vent par exemple) et comme les précipitations sont très variables dans l'espace, les valeurs ne donnent qu'un ordre de grandeur parfois grossier et leur représentation spatiale est limitée

A.1.3 La description des climats des pays de l'étude

La typologie climatologique de la France retient ces six grands types de climat :

Climat Méditerranée

Les températures peuvent descendre jusqu'à -20°C , comme cela a été le cas en 1963, ou bien dépasser les 40°C à l'ombre au cours des étés (record de France de $44,1^{\circ}\text{C}$ à l'ombre dans le Gard en Août 2003).

Le climat Méditerranéen connaît également de forts contrastes de précipitations selon les mois de l'année. En moyenne il peut tomber 6 fois plus de précipitations en octobre qu'en Juillet.

Le temps qu'il fait le long du pourtour méditerranéen dépend en grande partie de l'orientation des vents :

Le vent de nord-est est réputé pour amener un froid sec en hiver et un temps chaud et sec en été.

Le vent du sud, appelé « Marin », est réputé pour amener des entrées maritimes notamment sur le Languedoc-Roussillon et de réchauffer l'eau de mer en été.

Climat Océanique

Le climat Océanique, comme l'indique son nom, est la plupart du temps lié à l'océan Atlantique. Les flux sont le plus souvent orientés d'ouest en est, et les régions sont directement touchées par les dépressions formées sur l'océan.

Avec de comportement aléatoire, il peut avoir de fortes périodes de sécheresse, comme en été 2003, ou à l'opposé de fortes chutes de neige comme c'est le cas depuis quelques hivers notamment en Normandie.

Les températures sont douces en été, mais aussi très variables d'un jour à l'autre. Les températures sont assez douces en hiver le long des côtes, mais bien plus fraîches lorsque l'on s'en éloigne.

Climat Continental

Les températures sont très contrastées au cours de l'année: de -15°C en hiver à 35°C en été. L'amplitude annuelle s'avère très forte. Néanmoins les précipitations restent faibles avec une moyenne de 600 mm. Elles tombent sous forme de neige en hiver et de pluies orageuses en été. L'hiver est long et très rigoureux avec un bon nombre de jours sans dégel, mais les étés sont chauds et orageux. Quand au printemps, il peut être qualifié de très court. Contrairement aux autres climats, le climat Continental français a pour particularité d'être d'avantage pluvieux en été qu'en automne et hiver

Climat Semi Océanique

Ce climat a en hiver des périodes froides et sèches et par moment douces et humides. Les régions situées dans cette zone climatique sont à la fois sous l'influence de l'océan Atlantique, mais aussi sous l'influence du climat Continental.

Climat Montagnard

Les étés en montagne sont caractérisés par des orages souvent violents en soirée et des températures douces.

L'hiver est caractérisé par des températures froides, avec des journées sans dégel nombreuses (en moyenne, la température s'abaisse de 1°C tous les 160m) mais aussi par d'abondantes chutes de neiges dont les plus précoces débutent au mois d'octobre dans les hauts massifs.

Au Chili ont trouve la classification de Köppen avec au moins sept sous-types climatiques :

- BS : Climat de steppe (semi-aride) dans la cote nord
Evaporation annuelle supérieure aux précipitations annuelles, aucun cours d'eau permanent
- BW : Climat désertique dans le nord. Précipitations annuelles < 250 mm
- ET : Toundra de l'Est et du Sud
Température moyenne du mois le plus chaud < 10 C et la saison d'été est très peu marquée
- Afa : Subtropical humide à Île de Pâques

Température moyenne de chaque mois de l'année > 18 C, pas de saison hivernale et il y fortes précipitations annuelles (supérieure à l'évaporation annuelle).

- Cs : Climat méditerranéen, froid avec été sec dans le centre du Chili
Températures moyennes des 3 mois les plus froids comprises entre -3 C et 18°C, la température moyenne du mois le plus chaud > 10 C. Les saisons été et hiver sont bien définies
- Cf : Climat océanique tempéré chaud sans saison sèche dans le sud
Climat humide, avec de précipitations tous les mois de l'année
- EF : Climat polaire dans le territoire Antarctique
Température moyenne du mois le plus chaud < 0 C

Chapitre 2

A.2.1 L'état actuel des consommations pour l'IMA et le DUSA

Dans la figure A.2.1, on peut voir la consommation trimestrielle de gaz et d'électricité pour les années 2006 à 2009, pour les sites de l'IMA et du DUSA. Les valeurs sont normalisées, en fonction des valeurs du tableau A.2.1 et regroupées par ordre croissant en fonction de la consommation mensuelle maximale des trois années et en fonction des différents mois de comportement.

Site	Ressource	Valeur de normalisation
DUSA	Gaz _t 1 ^{er} trimestre 2006	206 MWh
IMA	Gaz _t 1 ^{er} trimestre 2006	380 MWh

Tableau A.2.1 : Valeurs de la normalisation pour l'analyse des consommations

Pour les site de l'IMA et du DUSA, on observe que la consommation d'électricité est composée d'une ligne de base correspondant au trimestre 3 et liée aux usages directs et permanents de l'électricité puis au trimestre 2 s'ajoute une contribution au confort thermique et enfin pour les trimestres 1 et 4 l'électricité est aussi utilisée comme vecteur de chauffage dans les deux sites.

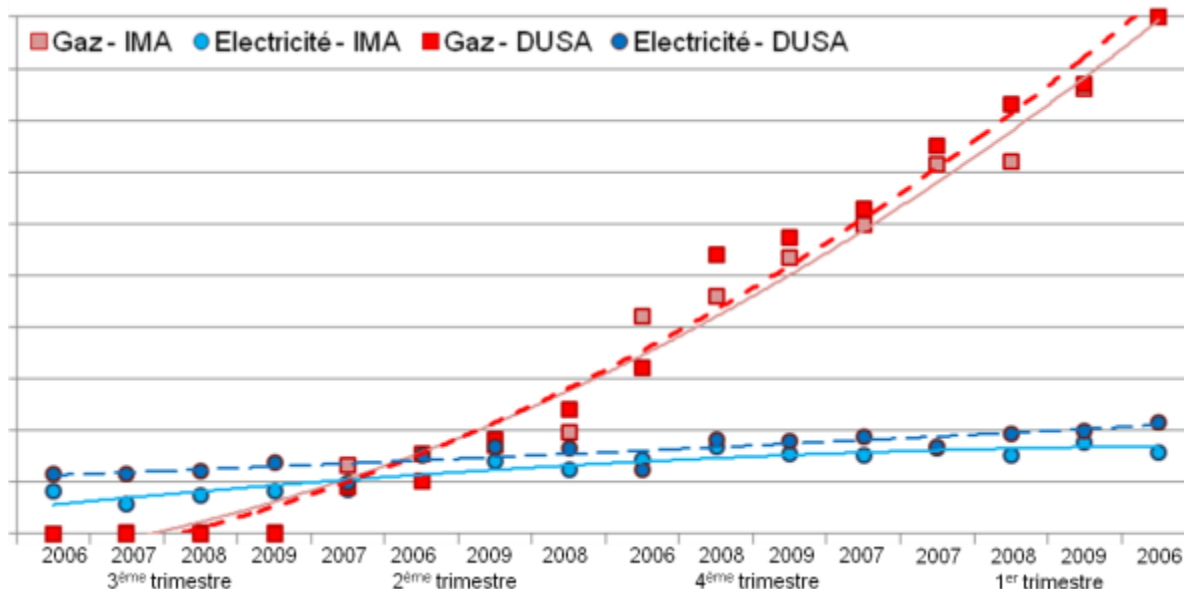


Figure A.2 1 : Profile de l'énergie facturée en fonction au climat de l'IMA et du DUSA

A.2.2 L'énergie actuelle ramenée au climat

Les valeurs de normalisation utilisée pour l'analyse énergie – climat, sont détaillées dans le tableau A.2.2.

Ressources	Site	Valeurs de normalisation		
		2008	2009	2010
Electricité	DUSA (mensuelle) en kWh	Février 17 855	Mars 13 660	Janvier 12 151
	IMA (mensuelle) en kWh	décembre 23 206	Mars 23 522	Mars 29 684
	PUC (mensuelle) en kWh	août 1 789 073	juin 1 437 071	mai 1 632 054
Gaz	DUSA (trimestriel) en kWh	171 370	206 188	206 157
	IMA (trimestriel) en kWh	274 245	328 177	295 499
	Université Bordeaux IV (trimestriel) en kWh	1 312 972	1 496 927	1 765 100

Tableau A.2.2 : Données pour la normalisation pour l'analyse de l'énergie en fonction au climat

A.2.2.1 L'électricité

Dans la figure A.2.2 on peut voir que, pour les années 2008-2010, les consommations annuelles de l'IMA et du DUSA globalement en cohérence avec le climat. On remarque qu'en moyenne pour les mois d'hiver la consommation s'élève à

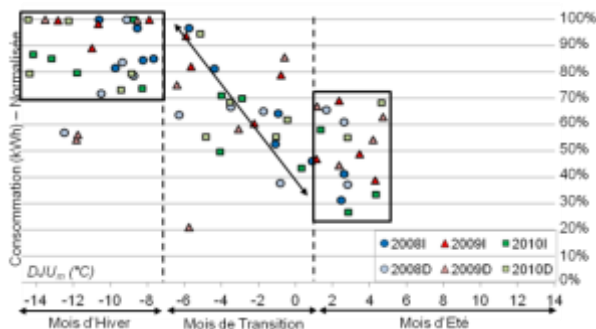


Figure A.2 2 : Comportement de la consommation mensuelle de l'électricité des sites d'IMA et du DUSA

plus de 70%, comme réponse au besoin de chauffage, pour les mois de transition il y a une variation d'entre 40% à 95% de consommation en réponse à la variation du climat et pour les mois d'été la consommation descend en dessous de 70%. Pour le DUSA on observe qu'il y a quelques données qui échappent à ce comportement (\blacktriangle \bullet) mais globalement les deux sites suivent le même comportement.

Enfin pour le campus de la PUC, on observe dans la figure A.2.3, que la ligne base

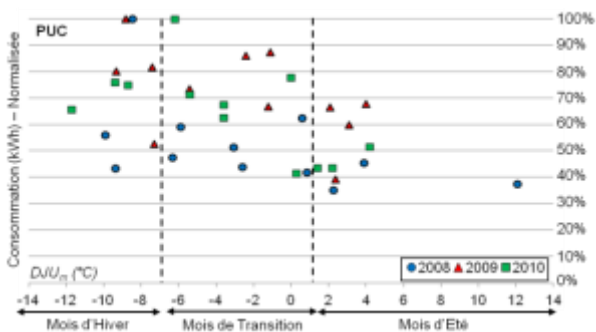


Figure A.2 3 : Comportement de la consommation mensuelle de l'électricité dans la PUC-CSJ

de consommation se situe au-dessus de 40% et pendant les trois périodes il n'y a pas grande différence. Par contre on peut voir dans le graphique que la consommation de l'année 2009 a été plus soutenue vers 75% et l'année 2008 avec la valeur la plus basse. Dans ce graphique on vérifie que l'électricité est une ressource utilisée indistinctement en hiver comme en été dans ce site universitaire.

A.2.2.2 Le gaz

Pour le campus de Bordeaux IV, de façon très générale, on peut observer dans la figure A.2.4, que la consommation de gaz suit un cycle, mais le manque de données détaillées, ne permet pas de faire ressortir des analyses plus poussées.

La consommation trimestrielle de gaz pour les deux sites d'IMA et DUSA, suit un cycle en relation directe avec le DJU figure A.2.5 une forte consommation pendant le mois d'hiver, plus de 70%, une consommation moyenne pendant le passage à période de transition 60 à 50% (début de la période de chauffage) et une diminution à 30% de la consommation en fin des mois de transition (fin de la période de chauffage).

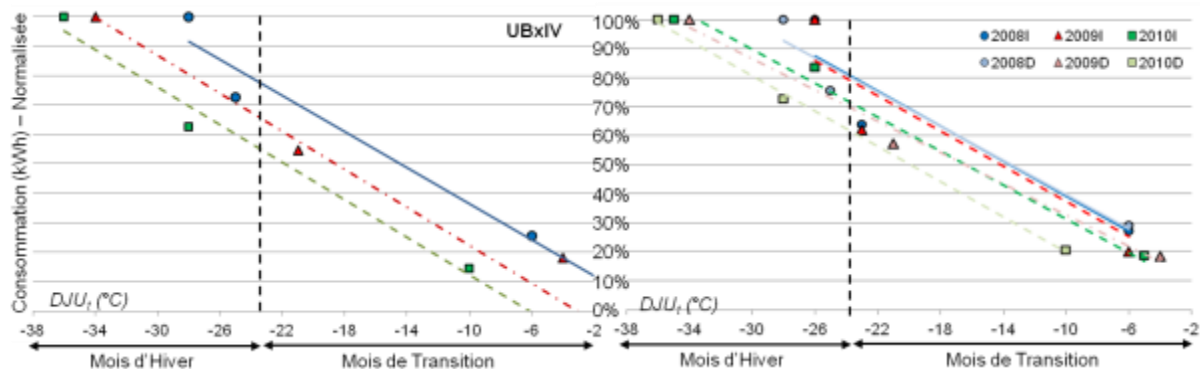


Figure A.2 4 : Comportement de la consommation de gaz de l'Université Bordeaux IV-TPG

Figure A.2 5 : Comportement de la consommation de gaz des sites de l'IMA et du DUSA

A.2.3 L'énergie actuelle ramenée à la surface et aux usagers

Dans la figure A.2.6, on observe l'évolution de la consommation annuelle du gaz et de l'électricité par surface SHON pour les différents campus et sites.

La consommation annuelle du gaz et de l'électricité d'UBx1 par m² a augmenté au cours de ces dernières années. La consommation de gaz (■) présente une forte augmentation de 12% en 2006, due à la mise en marche de la chaudière à bois, année utilisée pour la réadaptation du réseau de chaleur. Par contre c'est en 2004 que la consommation d'électricité (●) a augmenté de 12%, due à la construction d'à peu près 3900m² pour l'extension d'un bâtiment de recherche en informatique et par conséquent la nécessité des nouvelles demandes d'usages électriques.

Pour la consommation des ressources de la PUC, on observe que la courbe de consommation d'électricité est 2 fois supérieure à la courbe de gaz et aussi on peut observer qu'il y a une légère augmentation de consommation pendant l'année 2007, de 14% pour le gaz (■) et de 6% pour l'électricité (●) due à construction de nouveaux bâtiments, de 6000 m² de surface SHON (Faculté de Théologie et le consortium du vin).

Pour UBxIV, on note dans la figure A.2.6 que la consommation annuelle d'électricité (●) par m² a augmenté entre 2003-2006 de 11%, principalement liée à l'augmentation de la surface et donc à des usages nouveaux. On remarque que la consommation nécessite un temps d'adaptation car la consommation décroît légèrement les années qui suivent l'augmentation de superficie.

La consommation annuelle d'électricité de l'IMA par m² (●) a augmenté entre 2007-2010, liée à l'augmentation du matériel de recherche et à des usages pédagogiques nouveaux. Par contre, on remarque que la consommation de gaz par m² (■) est irrégulière sans dégager une tendance claire. La consommation de gaz est trois fois plus importante que la consommation d'électricité. Pour le DUSA, on remarque que

la consommation annuelle d'électricité par m² (●) est en diminution à partir du 2008, à la différence de la consommation de gaz (■) qui a augmenté à partir du 2006. On note ensuite que la consommation de gaz pour le DUSA est aussi trois fois plus importante que celle d'électricité.

Finalement, à partir de la comparaison de ces courbes on peut voir que pour l'UBx1 la consommation de gaz ramenée au m² est plus importante que pour le reste des campus et sites. De plus, la consommation d'électricité par m² a, pour tous les campus et sites, une forte relation avec l'évolution des surfaces au travers les années.

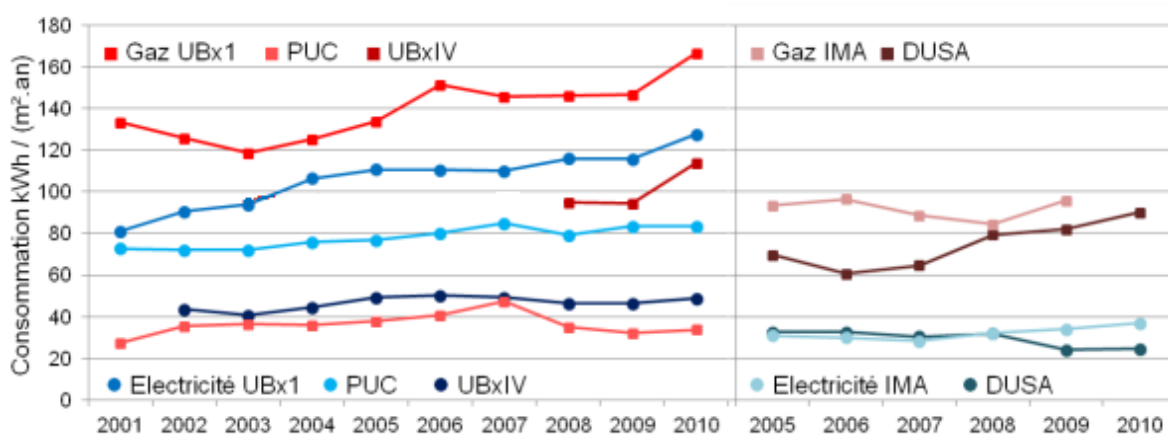


Figure A.2 6 : L'énergie par rapport à la surface

Dans la figure A.2.7, on observe l'évolution de la consommation annuelle du gaz et de l'électricité ramenée au nombre d'utilisateurs pour les différents campus et sites.

Le comportement de consommation par usagers de UBx1, a le même type de comportement que la consommation par m², pendant la période 2001-2010, on observe pour l'électricité (●) une augmentation totale de 38% et pour le gaz (■) une augmentation de 22%. De plus, comme la description précédente, on observe de fortes augmentations en 2007 pour le gaz et en 2004 pour l'électricité, liées à ces nouveaux utilisateurs.

On note ensuite pour UBxIV, que les courbes de consommation annuelle par usagers sont à peu près stables. Cependant, on remarque une importante variation de 16% pour l'électricité (●) entre 2003 et 2005, période de construction du pôle numérique. Entre les années 2008-2010 le nombre d'étudiants est passé de 9 500 à 11 000 et la consommation par usager a augmenté.

Pour la PUC, on observe le même comportement que la courbe de consommation par m², avec la forte augmentation de 2007, pour la construction des nouveaux

bâtiments et la croissance de 400 usagers de plus pour la même année. On observe que pour le campus San Joaquín de la PUC, l'électricité (●) a une forte demande avec 250 kWh/usagers de plus que le gaz (■). Et finalement, on observe que pendant la période 2001-2010, l'électricité a eu une augmentation totale de 28% et le gaz, une augmentation de 33%

Enfin, le comportement des consommations de gaz (■) et d'électricité (●) de l'IMA sont similaires : une forte diminution en 2007, liée à l'augmentation du nombre d'usagers. On peut remarquer dans ce graphique que la consommation d'électricité par usager représente encore un tiers de celle du gaz. Pour le DUSA, on note que la consommation annuelle de gaz (■) a eu une forte augmentation (26%) entre 2006-2009. Finalement, la comparaison des ces deux courbes montre que pour le l'IMA, la consommation moyenne de gaz ramenée au nombre d'usagers est plus importante sur la période d'observation, que pour le DUSA (1 800kWh de différence).

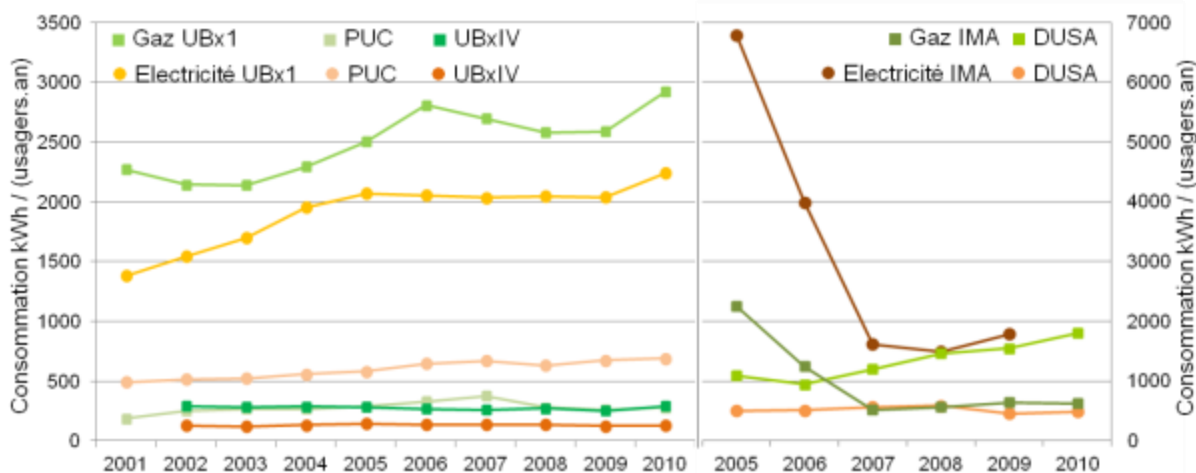


Figure A.2 7 : L'énergie par rapport au nombre d'usagers

Chapitre 3

A.3.1 : La description des systèmes d'évaluation internationaux

LEED : Leadership in Energy and Environmental Design

- Statut: Organisation non-gouvernementale
- Pays d'origine, date de création: US, 1998.
- Echelle : Internationale
- Domaines d'application: tous types de bâtiments.
- Objectifs : LEED est un système de standardisation de bâtiments à haute qualité environnementale. C'est l'un des leaders mondiaux des méthodes d'évaluation environnementale. Cette certification propose un cadre pour identifier et mettre en œuvre des solutions vertes pour la conception, la construction, le fonctionnement et la maintenance des bâtiments en travaillant sur la notion de cycle de vie.

- Principaux themes: Sustainable site, Water efficiency, Energy & Atmosphere, Material & Resources, Indoor environmental quality et Innovation & design process
- Les 3 thèmes les plus importants : Energy and Atmosphere (31.9%), Sustainable sites (23.6%), Indoor Environmental Quality (13.6%).
- Système de notation: Notation simple par addition des crédits attribués à chaque critère évalué (ces crédits possèdent une pondération définie par le NIST). Les bâtiments peuvent se voir attribuer les rangs « Certified », « Silver », «Gold» ou «Platinum».

LEED est la deuxième certification environnementale la plus répandue dans le monde après BREEAM. En tant qu'elle propose une vision complète du bâtiment durable, et l'évaluation s'étend au-delà du bâtiment, le thème « Sustainable Site » en témoignant. Elle insiste sur des thèmes importants comme la valorisation du recyclage et de la gestion de l'eau. Cependant on pourrait remarquer qu'elle reste fortement centrée sur la performance technique du bâtiment et sur ses interactions avec l'environnement alentour, mais ne traite pas aussi bien la problématique humaine que le font d'autres certifications, notamment concernant le confort et le bien-être. De plus, elle ne tient pas compte des particularités locales comme le climat, et s'appuie sur des standards américains tels qu'ASHRAE et ANSI, imposant les normes américaines à une certification d'influence mondiale.

CASBEE : Comprehensive Assessment System for Built Environment Efficiency

- Statut: Organisation
 - Pays d'origine, date de création: Japon, 2001.
 - Echelle : internationale
 - Domaines d'application: tous types de bâtiments.
 - Objectifs : CASBEE a été créé par un comité de recherche avec le soutien du gouvernement japonais. Les outils d'évaluation CASBEE ont été élaborés selon ces principes: Le système devra être organisé pour récompenser les bâtiments de qualité supérieure, et par la même occasion attirer les concepteurs et autres acteurs du bâtiment ; Le système d'évaluation devra être aussi simple que possible ; Le système devra être applicable à une grande gamme de types de bâtiments ; Le système devra prendre en considération les questions et les problèmes spécifiques au Japon et à l'Asie.
 - Principaux thèmes :
- Building Environmental Quality (Q) :
- Q1 : Indoor Environment
 - Q2 : Quality of Service
 - Q3 : Outdoor Environment on Site
- Building Environmental Load (LR):
- LR1: Energy
 - LR2 : Ressources & Material
 - LR3: Offsite Environment.

- Système de notation: Les critères sont regroupés en deux grandes parties : Building Environmental Quality (Q) et Building Environmental Load (LR).

La notation CASBEE est évolutive: elle considère les efforts réalisés pour répondre aux problématiques et les note par niveau : « level 1 » pour un niveau répondant aux exigences de base (normes, standards au Japon), « level 3 » pour un niveau ordinaire et « level 4 – 5 » pour des niveaux supérieurs à l'ordinaire. Les crédits ne sont pas seulement additionnés, mais pondérés par les avis des différentes parties prenantes du bâtiment.

Les résultats sont en premier lieu présentés par partie (Q et LR) sous forme de graphique, et ensuite regroupés pour évaluer la thématique générale Building Environmental Efficiency (BEE). En fonction de l'évaluation du BEE est attribué le grade de "Poor", "Slightly Poor", "Good", "Very Good" ou "Superior".

C'est une méthode de notation qui laisse plus de liberté que les méthodes par addition de crédits.

C'est l'un des systèmes d'évaluation les plus complets et les plus détaillés. Il se démarque des autres certifications par son insistance sur la qualité du service (notamment informatique), les normes de sécurité spécifiques aux tremblements de terre, mais surtout par la place qu'il accorde à la nature. En effet, les interactions bâtiment/nature sont beaucoup plus mises en valeur que dans les pays occidentaux : management des espaces verts, protection et construction de la biodiversité... La dimension sociale est également plus poussée, une attention étant portée à l'insertion esthétique et historique du bâtiment, ou à une conception favorisant le confort des usagers.

HQE : Haute Qualité Environnementale

- Statut: Association non gouvernementale.

- Pays d'origine, date de création: FRANCE, 2005.

- Echelle : Nationale (tend vers l'international) – réalisation sur des bâtiments isolés et des quartiers.

- Domaines d'application: school, office, laboratory

- Objectifs : Proposer des méthodes visant à améliorer la qualité environnementale des bâtiments neufs et existants des secteurs résidentiels et tertiaires et en particulier les constructions publiques.

Assurer la promotion de la qualité environnementale en s'appuyant sur une définition explicite et sur un système de management.

- Principaux thèmes : -- éco-construction -- éco-gestion -- confort -- santé

- Relation harmonieuse des bâtiments avec leur environnement immédiat

- Choix d'intégrer des procédés et des outils de construction

- Chantier à faibles nuisances

- Gestion des énergies

- Gestion de l'eau

- Gestion des déchets d'activité

- Gestion de l'entretien et de la maintenance

- Confort hygrothermique
 - Confort acoustique
 - Confort visuel
 - Confort olfactif
 - Conditions sanitaires des espaces
 - Qualité sanitaire de l'air
 - Qualité sanitaire de l'eau
- Système de notation: 14 cibles sont évaluées, dont au minimum 3 doivent atteindre le niveau « très performant » (TP) et 5 « performant » (P).

Cette certification est un guide de pilotage de projets. Elle propose des solutions de management environnemental plutôt que des solutions techniques et laisse au maître d'ouvrage la liberté de choisir les cibles qu'il veut privilégier, et aux concepteurs le choix des techniques pour atteindre les objectifs fixés. Cette souplesse dans la grille de notation empêche cependant toute comparaison possible entre deux bâtiments certifiés HQE, leur performance environnementale n'étant pas la même selon les cibles privilégiées.

HQE ne considère que les éléments intrinsèques au bâtiment et à sa parcelle. C'est le reflet de la gestion séparée de l'urbanisme et de la construction (réglementation différente).

Une des faiblesses de cette certification est qu'elle est attribuée en tout ou rien, c'est-à-dire que le bâtiment est certifié ou non certifié. La démarche HQE est critiquée pour la faiblesse de ses exigences et est convoitée comme un argument de vente par les immobiliers, contribuant au développement d'un « marché de la certification ». Or, ce marché n'a pas toujours pour objectif premier la préservation de l'environnement.

BREEAM : Building Research Establishment Environmental Assessment Method

- Statut: Organisme de recherche fondé par l'Etat
- Pays d'origine, date de création: ENGLAND, 1990.
- Echelle : Internationale
- Domaines d'application: tous types de bâtiments.
- Objectifs : Les objectifs de BREEAM sont de réduire l'impact environnemental des bâtiments, de permettre aux bâtiments d'être reconnus selon leurs bénéfices environnementaux, de mettre à disposition un label environnemental crédible pour les bâtiments, et de stimuler la demande en matière de bâtiments durables.
- Principaux thèmes : Management, Health & Wellbeing, Energy, Transport, Water, Materials, Waste, Land use and Ecology, Pollution et Innovation
- Les 3 thèmes les plus importants : Energy (19%), Health and Wellbeing (15%), Materials (12.5%).

- Système de notation: Notation par addition de points attribués à chaque critère satisfait. La somme des points de chaque domaine donne la note globale « very good », « good » ou « pass ».

BREEAM est le leader mondial de la certification environnementale. Cette méthode d'évaluation fait partie de l'une des plus complètes, et se base sur la réglementation CIBSE et les réglementations européennes. Elle a été la source d'inspiration de certaines certifications comme LEED. Ses points forts sont sa rigueur concernant la réduction des émissions de CO₂, la thématique des transports et l'emploi de matériaux durables.

DGNB : Deutsche Gesellschaft für nachhaltiges Bauen (German Sustainable Building Council)

- Statut: Association
- Pays d'origine, date de création: Allemagne, 2007.
- Echelle : Nationale
- Domaines d'application: Ecoles, Bureaux administratifs, Commerces, Bâtiments industriels.
- Objectifs : Fournir une plus-value pour les projets de construction, réduire les impacts environnementaux des chantiers et des bâtiments, mettre en place des éléments de classification et de comparaison entre les bâtiments, élaborer une check-list des bonnes pratiques pour la construction des bâtiments, minimiser les risques économiques et tourner son regard vers le cycle de vie du bâtiment.
- Principaux thèmes: Ecological quality, Economical Quality, Socio-Cultural and Functional Quality, Technical quality, Process Quality et Quality of the Location
- Système de notation: Addition de critères dont la pondération est fixée de 0.5 à 3, et addition des points des thèmes dont la pondération est de 22.5%, sauf pour la « qualité du procès » à 10%. Les bâtiments sont récompensés d'un titre bronze, argent ou or.

La certification DGNB se base essentiellement sur des normes allemandes et européennes : EnEV 2007 et DIN EN ISO 14040 et 14044. C'est une certification qui englobe les principales thématiques du développement durable : écologie, économie, socio-culturel et qualité fonctionnelle, techniques, processus et qualité du site. L'évaluation se fait sur la performance du bâtiment, la thématique du site n'influant pas dans la notation.

LBC : Living Building Challenge

- Statut: Organisation non gouvernementale
- Pays d'origine, date de création: US, 2006
- Echelle : internationale
- Domaines d'application: tous types de bâtiments
- Objectifs : Le but de cette certification est de définir la mesure la plus avancée du développement durable dans le bâtiment et agit pour réduire le fossé entre les solutions idéales et les limites réelles. C'est un guide qui définit un idéal de durabilité

et veut inspirer les acteurs du bâtiment par sa philosophie. C'est une définition générale qui laisse la place aux particularités locales et qui pousse les équipes de conception à adopter des solutions adaptées à ces particularités.

- Principaux thèmes: Site, Water, Energy, Health, Material, Equity et Beauty

- Système de notation: Sept domaines de performances subdivisées en 20 Impératifs dont chacun constitue une sphère d'influence. Il n'y a pas de méthode de notation clairement définie.

Commentaires : Sa définition reste très générale par rapport à ses exigences : elle ne fournit que peu d'indications techniques et ne fixe pas de buts concrets à atteindre. Cependant, elle introduit des notions intéressantes comme les domaines « Equity » et « Beauty » dans lesquels sont développés la considération physique et sociale de tous les usagers, leur appréciation et leur implication dans leur environnement (urbain ou rural). Elle développe également la notion de « Biophilia » c'est-à-dire tirer des bénéfices « sociaux, psychologiques, pédagogiques et physiques » du contact avec la nature. (Alençar & Cole, 2012).

A.3.2 : La collecte de données pour la campagne de mesures

FICHE DE MESURES																		
Responsables :	Date :	Février - Juin				Bâtiment :	A12				Etage N° :	1°				Niveaux :	6	
P. Balloffet P. Koulytchizky P. Ngo Si Xugen L. Cadieu E. Velázquez C. Codorgan C. Valderrama	Heures :	9:45 et 15:15								Surface Planta : 1839				Surface total : 11069				
	Bâtiment	Largeur (l) : 16,4				Longueur (L) : 120				Hauteur (H) : 15				Bureaux / Labos		Total		
														140 / 35		412		
	Bureau N° :	1N35a				1S25				1S16				1N15				
	N° Personnes :	1				2				2				3				
Orientation :	NE				SE				NO				SO					
Dimension (L/L/H)	5,7 / 7,9 / 3				2,9 / 4,7 / 3				2,9 / 4,7 / 3				8,9 / 7,9 / 3					
Confort Thermique	Qualification	Mesures																
		Bureau 1				Bureau 2				Bureau 3				Bureau 4				
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	
Olfactif	Etat	3	4	3	3	4	3	4	3	3	3	3	5	4	4	5	5	
Luxmètre	Entrée	224	527	175	82	35	72	89	28	100	94	93	90	192	407	127	60	
	Travail	180	460	260	370	51	276	221	150	79	418	156	335	390	665	244	360	
	Fenêtre	1534	2000	740	1800	308	575	610	2000	1738	2000	1000	2000	804	2000	292	2000	
Surface Vitrée	% de la surface est vitrée	10%				11%				11%				15%				
	Surface Murs	102,6				45,6				45,6				100,8				
	Surface fenêtres	10				5				5				15				
Eclairage Naturel	distance max à la surface vitrée	7,7				4,5				4,5				7,7				
Sonomètre	dB A	63	61	66	51	54	53	49	53	53	63	63	63	48	49	56	44	
	dB C	76	73	77	67	68	64	64	65	69	74	75	74	60	61	60	53	
Température Int.	°C	21	21,3	20,5	19,4	20	21,8	21,6	22	21	20,7	21,2	22,6	20,6	21,6	19,4	19,3	
Température Ext.	°C	13,5	17,5	4	8,6	13,5	17,5	4	8,6	13,5	17,5	4	8,6	13,5	17,5	4	8,6	
Humidité Relative (Ext)	%	58	48	39	24,9	60	51	39	18,9	61	52	41	21,4	61	48	43	24,4	
Humidité Relative (Int)	%	94	63	97	47	94	63	97	47	94	63	97	47	94	63	97	47	
Vitesse du vent	m/s	0,57	0,19	0,8	0,84	0	0	0	0,3	0	0	0,3	0,1	0,41	0,68	0,53	0,6	
Confort Thermique	%	1	1	2	1	1	1	1	1	1	2	2	3	2	3	3	3	
Observation						Utilisation du radiateur le matin				Utilisation du radiateur le matin								

Tableau A.3.1 : La fiche de mesures du bâtiment A12

FICHE DE MESURES																			
Responsables :		Date :		Février - Juin		Bâtiment :		A09		Février - Juin		Bâtiment :		C04					
P. Balloffet P. Koulytchizky P. Ngo Si Xugen L. Cadieu E. Velázquez C. Codorgan C. Valderrama		Heures :		10:20 et 15:35		Hauteur (H) :		12		11:07 - 16:07		Hauteur (H) :		129 bureaux					
		Surface total : 2303				Hauteur (H) : 12				Surface total : 7230				Hauteur (H) : 12					
		Etage N° :		1°/4°		Niveaux :		4		Etage N° :		1°		Niveaux :		3			
		Bâtiment		Largeur (l) : 11,7 et 18,8		Longueur (L) : 73,8 et 37,2		Largeur (l) : 5,9		Longueur (L) : 120		A. Cohen		P. Balloffet					
		Bureau N° :		Amphithéâtre		Salle de cours		A. Cohen		P. Balloffet									
		N° Personnes :		180 mx - 104 ex		35 mx - 12 cours		1		1									
		Orientation :		NS-O		SE		NO		SO									
		Dimension (l/L/H)		17,5/16,9/4,2 et 7,9		11,7/4,9/3,25		2,9 / 4,7 / 3		8,9 / 7,9 / 3									
		Confort Thermique		Qualification		Mesures													
Bureau 1						Bureau 2				Bureau 3				Bureau 4					
Olfactif		Etat		3	3	5	4	2	2	3	5	2	3	4	4	3	4	3	3
Luxmètre		Entrée		209	265		107	217	244	312	95	131	134	238	30	138	262	200	250
		Travail		528	748		775	760	1204	363	125	227	238	180	475	868	884	117	255
		Fenêtre		1509	1813		920	1366	1466	425	775	2000	2000	330	2000	2000	2000	432	600
Surface Vitrée		% de la surface est vitrée		29%				19%				6%				6%			
		Surface Murs		416,24				107,5				53,3				50,7			
		Surface fenêtres		120				20				3,12				3,12			
Eclairage Naturel		distance max à la surface vitrée		8,75				4,5				4,4				4,6			
Sonomètre		dB A		39	45	49	49	34	42	39	43	36	42	36	42	35	35	35	35
		dB C		60	61	60	61	53	55	53	55	58	58	58	58	57	56	57	56
Température Int.		°C		20,8	22,8		23	20,8	22,6	23,3	22,8	21,3	22,2	24,7	23,7	22,1	22,5	23,4	23,6
Température Ext.		°C		14,3	17,3	7,1	9,3	14,3	17,3	7,1	9,3	14,6	16,4	9,2	9,7	14,6	16,4	9,2	9,7
Humidité Relative (Ext)		%		54	55		27,5	54	48	39	28	62	55	40	29	55	51	42	28
Humidité Relative (Int)		%		92	64	97	40	92	64	97	40	84	65	91	40	84	65	91	40
Vitesse du vent		m/s		0	0	0	0	0	0	0,2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Confort Thermique		%		3	2	2	3	1	3	2	4	3	3	4	4	3	3	5	5
Observation																			

Tableau A.3.2 : La fiche de mesures des bâtiments A09 et C04

A.3.3 : Les outils utilisés pour la campagne de mesures



Figure A.3.1 : Les outils de mesures : le sonomètre (A), l'appareil multifonction de mesures physiques (B) (température, humidité et vitesse de l'air) et le luxmètre (C)

Chapitre 4

A.4.1 : L'enquête pour l'élaboration de la matrice de la hiérarchisation

Enquête Energie-Confort

Cette enquête a été élaborée pour valider un modèle de décision développé dans le cadre d'un travail doctoral portant sur la qualité des bâtiments dans la logique du Développement Durable. Elle contribuera à mieux cerner les attentes des usagers d'un patrimoine bâti en phase d'exploitation.

Adressé aux usagers d'un campus universitaire, ce modèle conduit à considérer l'appréciation que les différents usagers (personnels et étudiants) donnent d'une part aux trois piliers du développement durable (social, économique et environnemental) et, d'autre part, à différents indicateurs qui vont évaluer la performance d'un bâtiment et la satisfaction des attentes des usagers.

A l'université

1) Quelle est votre activité à l'université?

Etudiant(e) (hors Doctorat) Personnel administratif - technique / Personnel de la bibliothèque Enseignant(e) / Enseignant(e)-chercheur(se)/ Doctorant (e) Autre

2) Sur quel site se trouve votre lieu de travail principal ?

3) Quelle est l'orientation principale de votre espace de travail (atelier, bureau, laboratoire, salles de cours) ?

Nord Sud Est Ouest Je ne sais pas

Niveau d'appréciation quant aux piliers du développement durable et aux indicateurs de confort

4) Parmi les 3 piliers du développement durable, sur lesquels voudriez-vous agir en premier dans votre espace de travail (atelier, bureau, laboratoire, salles de cours) ?

ECONOMIQUE (Réduction de la consommation d'énergie) SOCIAL (Amélioration du confort acoustique, olfactif, thermique ou visuel) ENVIRONNEMENTAL (Préservation de l'environnement, utilisation d'énergies renouvelables, par exemple)

5) Dans votre lieu de travail (atelier, bureau, laboratoire, salles de cours), quel type de confort privilégiez-vous en premier?

Acoustique Olfactif Thermique Visuel (lumière - vue)

6) Dans un contexte environnemental, quelle est pour vous la priorité?

Réduire les émissions de CO2 Développer l'utilisation des énergies renouvelables

Vous

7) Vous êtes?

Homme Femme

8) Vous avez?

Entre 17-30 ans Entre 31-45 ans Plus de 46 ans

9) Êtes-vous membre d'une instance de décision dans l'établissement que vous fréquentez?

Oui Non

Figure A.4.1 : L'enquête d'appréciation

A.4.2 : Les résultats de la priorisation dans l'ECCUC et Université Bordeaux IV-Montesquieu

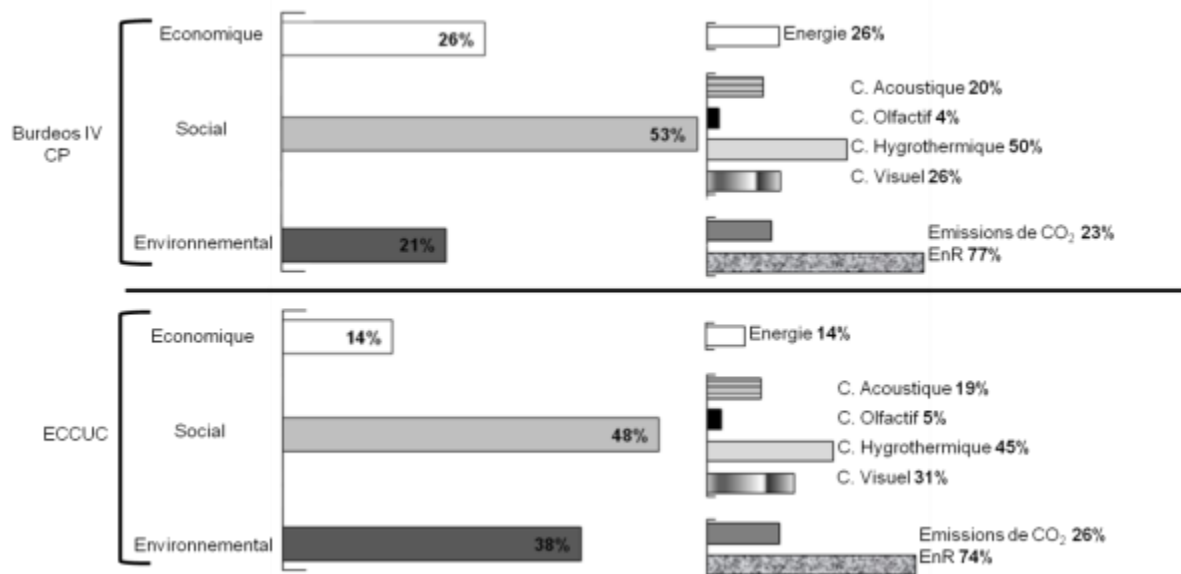


Figure A.4.2 : Priorisations des indicateurs et des scénarios pour les deux sites

A.4.3 : La facturation d'électricité

Il convient donc de distinguer les items : (1) heures de pointe (rouge), heures pleines (bleu), heures creuses (vert), et dépassements et (2) les quatre périodes de facturation : hiver (janvier, février et mars), demi-saison (avril, mai, juin), été (juillet, août, septembre et octobre) et transition (novembre et décembre).

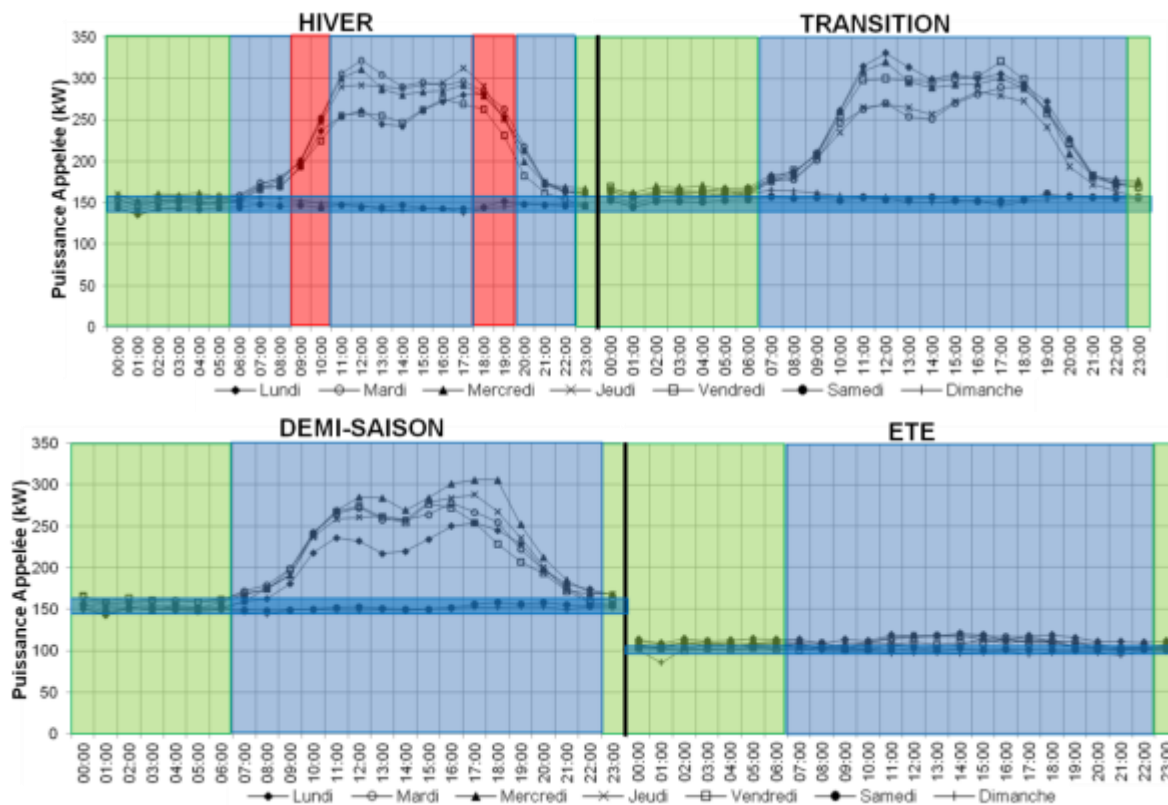


Figure A.4.3 : Les horaires et les périodes de facturation de la consommation de l'électricité

A.4.4 : La description des hypothèses pour le calcul de la demande de chauffage

Heure	SUD		NORD		OUEST		EST	
	Jour clair	Jour nuageux	Jour clair	Jour nuageux	Jour clair	Jour nuageux	Jour clair	Jour nuageux
7:00	16	13	16	13	16	13	16	13
8:00	137	51	21	17	21	17	172	60
9:00	264	83	36	30	36	30	237	78
10:00	351	103	46	38	46	38	217	78
11:00	401	113	51	42	51	42	152	70
12:00	415	116	52	43	87	59	52	43
13:00	392	111	50	41	171	72	50	41
14:00	333	99	44	36	227	79	44	36
15:00	236	76	33	27	231	75	33	27
16:00	92	33	16	13	126	40	16	13
17:00	11	9			11	9		

Tableau A.4.1 : Apport solaire (W/m^2) en fonction à l'orientation pour un mois d'hiver à Bordeaux – source : European Commission 2013

Heure	SUD		NORD		OUEST		EST	
	Jour clair	Jour nuageux	Jour clair	Jour nuageux	Jour clair	Jour nuageux	Jour clair	Jour nuageux
5:00	21	17	21	17	21	17	21	17
6:00	48	40	125	68	48	40	360	127
7:00	69	57	106	77	69	57	471	158
8:00	179	101	83	69	83	69	499	165
9:00	265	121	92	76	92	76	462	156
10:00	332	132	95	79	95	79	377	139
11:00	371	137	96	80	96	80	262	119
12:00	382	138	97	80	165	104	97	80
13:00	364	136	96	80	293	125	96	80
14:00	317	130	95	78	402	144	95	78
15:00	245	117	90	74	476	159	90	74
16:00	155	95	80	66	499	165	80	66
17:00	64	53	127	79	452	153	64	53
18:00	42	34	130	66	316	114	42	34
19:00	13	11	13	11	13	11	13	11

Tableau A.4.2 : Apport solaire (W/m^2) en fonction à l'orientation pour un mois de transition à Bordeaux source : European Commission 2013

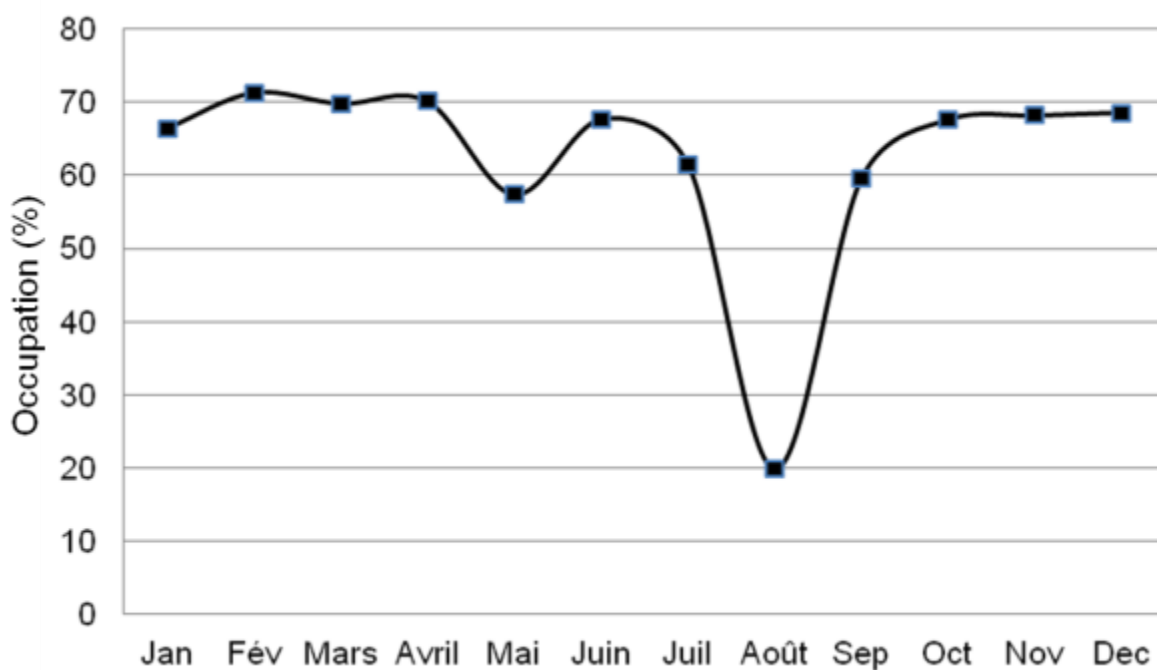


Figure A.4.4 : Taux d'occupation bâtiment A12 (moyenne entre les années 2008-2009-2010)

DEFINITION DU BATIMENT A12					
Résistance thermique surfacique (m² K/W)			Périmètre Etage 0 (m)	275	
Choix de la toiture:	Toit terrasse non isolé	1,11	Périmètre Etage 1 et 2(m)	272	
Choix de l'enveloppe extérieure:	Béton non isolé	0,23	Périmètre Etage 3 (m)	272	
Choix de l'isolation de l'enveloppe:	Sans Isolation	/	Surface Etage 0 (m ²)	1885	
Choix du sol:	Dalle Béton	0,07	Surface Etage 1 et 2 (m ²)	1907	
Choix de l'isolation du sol	Dalle sur vide sanitaire	0,28	Surface Etage 3 (m ²)	1907	
Choix du vitrage:	Simple	0,17	Hauteur par étage (m)	3	
Pente du toit:	0		Nombre d'étages sans RDC	4	
Angle correspondant (en rad):	0		Surface Toiture (m ²)	1907	
ψ plancher/mur (W/K)			471,4	Surface Parois (m ²)	1240
ψ mur/mur (W/K)			28,8	Surface Sol(m ²)	1885
U vitrage (W/m²K)			5,2	Surface Vitrage (m ²)	1655
				Surface Cadre Bois (m ²)	378
				Périmètre total des fenêtres (m)	6489
				Nombres de PT évalués	16
			Résistance totale A12		
			S tot / R tot	23096	
			S TOT	7065	
			R TOT (K/W)	0,31	

Tableau A.4.3 : Caractéristiques de l'enveloppe A12 état actuel

DEFINITION DU BATIMENT A12					
Résistance thermique surfacique (m² K/W)			Périmètre Etage 0 (m)	275	
Choix de la toiture:	Toit terrasse	6,73	Périmètre Etage 1 et 2(m)	272	
Choix de l'enveloppe extérieure:	Béton isolé	0,61	Périmètre Etage 3 (m)	272	
Choix de l'isolation de l'enveloppe:	Isolation Extérieure	/	Surface Etage 0 (m ²)	1885	
Choix du sol:	Dalle Béton	0,07	Surface Etage 1 et 2 (m ²)	1907	
Choix de l'isolation du sol	Dalle sur vide sanitaire	0,28	Surface Etage 3 (m ²)	1907	
Choix du vitrage:	Double	0,36	Hauteur par étage (m)	3	
Pente du toit:	0		Nombre d'étages sans RDC	4	
Angle correspondant (en rad):	0		Surface Toiture (m ²)	1907	
ψ plancher/mur (W/K)			475,3	Surface Parois (m ²)	1240
ψ mur/mur (W/K)			9,6	Surface Sol(m ²)	1885
U vitrage (W/m²K)			2,8	Surface Vitrage (m ²)	1655
				Surface Cadre Bois (m ²)	378
				Périmètre total des fenêtres (m)	6489
				Nombres de PT évalués	16
			Résistance totale A12		
			S tot / R tot	14225	
			S TOT	7065	
			R TOT (K/W)	0,50	

Tableau A.4.4 : Caractéristiques enveloppe A12 état rénové

A.4.5 : Le bilan du comportement thermique pour les bâtiments d'administration (A09) et d'enseignement (C04)

Bâtiment	Variation de la consommation (kWh/m ² .an)					
	Etat Actuel	Gain % Comportement	Etat Réno	Gain % Comportement	Gain % Etat	
C4	Administratif non sensible	108	13	59,8	5	45
	Administratif sensible	94		56,6		40
A9	Etudiants non sensibles	34	6	18,5	1	46
	Etudiants sensibles	32		18,3		43

Tableau A.4.5 : Le bilan du comportement par rapport à l'état actuel et par le type de comportement

A.4.6 : L'analyse de prix unitaire pour la réhabilitation thermique

Isolation par l'extérieur laine roche et bardage PVC				
MATERIEL	UNITE	CANT	PRIX	TOTAL
Laine roche 60 mm	m ²	1	17,09	17,1
Fixation	m ²	1	6,3	6,3
Enduit	m ²	1	11,25	11,3
Bardage PVC	m ²	1	31,9	31,9
Perts	%	7	----	4,7
MAIN D'OUVRE				
M.ouvre isolant	HH	0,75	25,85	19,4
M.ouvre bardage	HH	1,25	36,5	45,6
TOTAL Euros HT				136,2

Tableau A.4.6 : Prix unitaire pour l'isolation de laine roche (60mm)

Isolation par l'extérieur laine roche et bardage PVC				
MATERIEL	UNITE	CANT	PRIX	TOTAL
Laine roche 40 mm	m ²	1	14,9	14,9
Fixation	m ²	1	6,3	6,3
Enduit	m ²	1	11,25	11,3
Bardage PVC	m ²	1	31,9	31,9
Perts	%	7	----	4,5
MAIN D'OUVRE				
M.ouvre isolant	HH	0,75	25,85	19,4
M.ouvre bardage	HH	1,25	36,5	45,6
TOTAL Euros HT				133,9

Tableau A.4.7 : Prix unitaire pour l'isolation de laine roche (40mm)

Isolation par l'extérieur laine de chanvre et bardage PVC				
MATERIEL	UNITE	CANT	PRIX	TOTAL
Laine de chanvre	m ²	1	19,03	19,0
Fixation	m ²	1	6,3	6,3
Enduit	m ²	1	11,25	11,3
Bardage PVC	m ²	1	31,9	31,9
Perts	%	7	----	4,8
MAIN D'OUVRE				
M.ouvre isolant	HH	0,75	25,85	19,4
M.ouvre bardage	HH	1,25	36,5	45,6
TOTAL Euros HT				138,3

Tableau A.4.8 : Prix unitaire pour l'isolation de laine de chanvre

Fenêtres double 4-16-4				
MATERIEL	UNITE	CANT	PRIX	TOTAL
Chassis vitre pvc	m ²	3,7	203,93	754,5
Fixation	ens	14	2,09	29,3
Joint Precomprimé	ml	2,42	1,2	2,9
Mastic acrylique	U	2,59	2,01	5,2
Perts	%	7	----	55,4
MAIN D'OUVRE				
M.ouvre	HH	1,45	24,58	35,6
TOTAL Euros HT				883,0

Tableau A.4.9 : Prix unitaire pour les fenêtres double

