



HAL
open science

L'efficacité d'usage énergétique : pour une meilleure gestion de l'énergie électrique intégrant les occupants dans les bâtiments

Hervé Chenailler

► **To cite this version:**

Hervé Chenailler. L'efficacité d'usage énergétique : pour une meilleure gestion de l'énergie électrique intégrant les occupants dans les bâtiments. Energie électrique. Université de Grenoble, 2012. Français. NNT: . tel-00734291

HAL Id: tel-00734291

<https://theses.hal.science/tel-00734291>

Submitted on 21 Sep 2012

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

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

THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE GRENOBLE

Spécialité GENIE ELECTRIQUE

Arrêté ministériel : 7 août 2006

Présentée par

Hervé CHENAILLER

Thèse dirigée par **Frédéric WURTZ** et
codirigée par **Stéphane PLOIX**

préparée au sein du **Laboratoire G2ELAB**
dans l'**École Doctorale EEATS**

L'efficacité d'usage énergétique : pour une meilleure gestion de l'énergie électrique intégrant les occupants dans les bâtiments

Thèse soutenue publiquement le 17 Avril 2012,
devant le jury composé de :

Mme Sylvie PESTY

Professeur des Universités, UPMF, Saint Martin d'Hérès, Examineur

M Bruno PEUPOORTIER

Professeur des Universités, Mines ParisTech, Paris, Rapporteur

M Bernard MULTON

Professeur des Universités, ENS CACHAN- SATIE, Bruz, Rapporteur

M Laurent MORA

Maitre de conférence, I2M, Bordeaux, Examineur

M Frédéric WURTZ

Directeur de recherche, G2ELAB, Saint Martin d'Hérès, Directeur de thèse

M Stéphane PLOIX

Professeur des Universités, G-SCOP, Grenoble, Co-directeur de thèse



AVANT-PROPOS

Cette thèse s'inscrit dans une volonté d'aborder la thématique de l'usage de l'énergie dans un bâtiment. Ceci est un vaste sujet qui allie aussi bien des questionnements d'ordre technique que social et donc soumis à de nombreux débats en fonction des points de vue et des sensibilités de chacun. Aussi, cette thèse n'a pas pour vocation de se lancer dans une démarche ontologique de la recherche d'une réponse précise et experte sur ce domaine mais tâche davantage à être un travail transversal et à proposer des méthodes pour aborder la problématique de l'usage énergétique du bâtiment.

D'autre part, les expérimentations qui ont été mises en place n'ont pas été effectuées avec des compétences de sciences humaines mais davantage selon un processus « exploratoire in situ ». En effet, nous avons mis en place des enquêtes permettant de mettre en évidence certains points scientifiques mais un réel travail de collaboration avec des sciences humaines demeure une perspective logique à ces travaux afin de valider les pistes proposées dans cette thèse.

Remerciements

Les travaux effectués au cours de cette thèse n'auraient pu voir le jour sans les échanges effectués auprès des usagers de la plateforme d'étude PREDIS. Je tiens donc à remercier en premier lieu les occupants du bâtiment Habitat tertiaire de l'ENSE3 qui ont fait partie de façon volontaire ou non de mes investigations. Je remercie en particulier mes collègues de l'espace bureau PREDIS MHI (Sana, Abir, Rim, Ghaith, Frank, Hoang anh, et Ardavan) qui ont eu à « subir » mes enquêtes. Au delà du cadre formel de l'expérimentation, ils ont été surtout d'agréables collègues de travail contribuant à la bonne ambiance du lieu de travail.

Je tiens à exprimer ensuite ma gratitude envers mes encadrants qui m'ont offert l'opportunité de travailler sur un sujet aussi transversal que celui-ci. Bien que le sujet ait évolué par rapport à ce qui était imaginé initialement, je les remercie sincèrement d'avoir cru en l'intérêt et l'aboutissement de ces travaux, ainsi que de m'avoir soutenu, notamment vers la fin de la thèse. Je remercie ainsi :

- Mon directeur de thèse, Frédéric Wurtz, qui, depuis mes travaux de Master, m'a fait partager sa vision énergétique du bâtiment mais également dispose d'un esprit de synthèse formidable et d'une capacité à remotiver les troupes tout à fait appréciable, et ce même lorsqu'il est à l'étranger !

- Mon co-directeur Stéphane Ploix qui proposait toujours les bonnes pistes de réflexion grâce à ses multiples remarques pertinentes. J'ai ainsi apprécié tout à la fois sa grande curiosité naturelle dans un certain nombre de domaines scientifiques ainsi que sa bonne humeur toujours au rendez-vous.

Je remercie également Florence Joussellin pour son aide et sa contribution dans l'ensemble des travaux et enseignements que nous avons réalisés ensemble.

J'adresse ensuite mes remerciements à Bruno Peuportier et Bernard Multon qui m'ont fait l'honneur d'être les rapporteurs de ma thèse et avec qui j'ai échangé de manière très intéressante autour de mon sujet, avant et pendant ma soutenance, grâce à leur expertise et leur ouverture scientifique.

Je remercie chaleureusement Laurent Mora et Sylvie Pesty d'avoir accepté d'être membre de mon jury de thèse avec qui les échanges durant la soutenance ont été également constructives

J'aimerais remercier, et je ne pourrais hélas pas tous les citer, les personnes qui ont contribué, par leurs échanges, de près ou de loin, à mon travail de thèse mais également à mon enrichissement personnel au delà de la thèse. Je pense en particulier à Daniel Quenard, Olivier Sidler, Julie Dugdale,

J'aimerais remercier également les personnes du G-SCOP avec qui j'ai pu travailler et avoir des échanges très enrichissants et intéressants (Ayesha, Binh).

Merci également aux personnes du G2Elab, en particulier son personnel administratif, pour m'avoir accueilli durant ces trois années et m'avoir offert les services adéquats pour ces travaux de recherche

Mes remerciements porteront ensuite sur l'ensemble de mes amis qui ont été là pour m'aider, me soutenir ou me distraire. Un très grand merci à ceux qui ont dû effectuer une relecture de ma thèse (Mathieu, Anaïs, Denis, Yohan mais surtout Nicolas), Merci également à ceux avec qui j'ai pu m'aérer l'esprit dans l'environnement grenoblois (Impropub, la team du club rando (Cyril, Rémy, Mikaël, Virginie, Aurélia), ceux de l'ESMUG, Didier (merci pour les cours de ski), mes colocataires et bien d'autres que j'ai sans doute oublié.

Je remercie enfin mes parents et ma famille pour m'avoir laissé faire le choix qui n'était pas évident au départ, d'effectuer une thèse.

*La sauvegarde de notre monde humain n'est nulle part ailleurs que dans le cœur humain,
la pensée humaine, la responsabilité humaine.*

Václav Havel

La consommation énergétique pour ces travaux de recherche a été estimée aux environs de
850kWh_{él} soit 2195 kWhEP

AVANT-PROPOS	2
---------------------------	----------

ACRONYMES EMPLOYES	11
---------------------------------	-----------

Chapitre 1 : Le bâtiment : un secteur au cœur d'une problématique socio-technique

1 CONTEXTE ENVIRONNEMENTAL ET ENERGETIQUE.....	15
---	-----------

1.1 Contexte environnemental.....	15
--	-----------

1.2 Le secteur du bâtiment : principal consommateur énergétique dont la consommation ne cesse de croître	16
---	-----------

1.2.1 Situation énergétique du bâtiment en France.....	18
--	----

1.3 Vers des bâtiments à énergie positive	19
--	-----------

2 L'ELECTRICITE : UN VECTEUR ENERGETIQUE CENTRAL DANS LES BATIMENTS BASSE CONSOMMATION.....	21
--	-----------

2.1 L'usage électrique : entre service technologique et nécessité sociétale	21
--	-----------

2.2 L'électricité : première énergie consommée dans le secteur tertiaire	22
---	-----------

2.2.1 Le poste de consommation électrique supplante le poste de consommation thermique dans les bâtiments performants	23
---	----

2.2.2 L'explosion des services électriques et la question de la suffisance énergétique.....	25
---	----

2.3 Le génie électrique : composante majeure de la gestion énergétique des bâtiments	27
---	-----------

3 LE BATIMENT : UN SECTEUR EN REDEFINITION	28
---	-----------

3.1 Evolution des fonctionnalités du bâtiment	28
--	-----------

3.1.1 Le bâtiment de ses origines jusqu'à l'époque contemporaine	28
--	----

3.1.2 Bâtiments modernes intégrant l'énergie et bâtiments intelligents	29
--	----

3.1.3 Evolution des fonctionnalités du bâtiment en fonction des différents type de services.....	30
--	----

3.2 Vers un système bâtiment où l'occupant est acteur majeur	32
---	-----------

3.2.1 Composition du système bâtiment.....	32
--	----

4 L'USAGER ET SES COMPORTEMENTS ENERGETIQUES AU COEUR DES PROBLEMATIQUES SCIENTIFIQUES DU BATIMENT	34
---	-----------

4.1 Impact énergétique de l'usage.....	34
---	-----------

4.1.1 L'usage dans les bâtiments tertiaires et résidentiels	35
---	----

4.2 Modèles de prise en compte de l'utilisateur	36
--	-----------

4.2.1 Modèles stochastiques.....	36
----------------------------------	----

4.2.2 Modèles déterministes.....	37
----------------------------------	----

CONCLUSION ET OBJECTIFS DE LA THESE	37
--	-----------

Chapitre 2 : De nouvelles problématiques énergétiques dans les BBC : Application à la plateforme PREDIS MHI

1 OBJECTIFS ET PRESENTATION DE LA PLATEFORME PREDIS MHI.....	40
1.1 Contexte de la recherche scientifique du secteur du bâtiment en tant qu'acteur du smart grid.....	40
1.2 Positionnement de la plateforme PREDIS MHI.....	40
1.3 Description de la Plateforme PREDIS MHI	42
1.3.1 Principaux objectifs quantitatifs de la plateforme PREDIS MHI.....	42
1.3.2 Description de la plateforme MHI : Architecture	43
1.3.3 Equipements énergétiques efficaces	44
1.3.4 Gestion technique centralisée et Instrumentation	44
2 RETOUR D'EXPERIENCE DE LA PLATEFORME MHI	45
2.1 Problématiques relatives à l'usage : point de vue usager	45
2.1.1 Méthode d'enquête exploratoire in situ	46
2.1.2 Résultats de l'enquête et analyse sur la plateforme PREDIS MHI.....	47
2.1.3 Bilan des usages et de la satisfaction de la plateforme MHI	54
2.2 Problématiques relatives à l'usage: Point de vue exploitant.....	55
2.2.1 Bilan énergétique de la plateforme PREDIS MHI.....	55
2.2.2 Analyse de l'impact de l'usage sur la consommation électrique	57
2.2.3 Bilan de la plateforme PREDIS MHI du point de vue exploitant.....	59
3 BILAN DU RETOUR D'EXPERIENCE ET VEROUS SCIENTIFIQUES LIES A L'USAGE.....	60
3.1 Bilan du retour d'expérience de la plateforme PREDIS MHI et enseignements.....	60
3.2 Identification de verrous scientifiques pour la prise en compte de l'usage dans l'efficacité énergétique d'un bâtiment.....	62
CONCLUSION	63

Chapitre 3 : Un nouveau concept d'intégration de l'usage dans le bâtiment : l'efficacité d'usage énergétique

1 DISTINCTION ENTRE LES DIFFERENTS CONCEPTS LIES A L'EFFICACITE ENERGETIQUE	65
1.1 Etymologie des termes Usage/Rendement/ Efficacité /Efficience.....	65
1.1.1 Notion d'usage	65
1.1.2 Notion de rendement	65
1.1.3 Notion d'efficacité.....	65
1.1.4 Notion d'efficience	66
1.1.5 Définitions plurilingues	66
1.2 L'efficacité énergétique telle que définie dans d'autres domaines	67
1.2.1 L'efficacité énergétique vue par l'économie.....	67
1.2.2 L'efficacité dans le génie industriel	70

1.3 Bilan de l'étude sémantique et positionnement de notre approche.....	71
1.3.2 Distinction et positionnement de l'efficacité d'usage dans la chaîne de valeur énergétique	71

2 DEFINITION DE L'EFFICACITE D'USAGE ENERGETIQUE DANS LE DOMAINE DU BATIMENT PAR RAPPORT A L'EFFICACITE ENERGETIQUE « PHYSIQUE »

74

2.1 Propriétés générales du rapport d'efficacité d'usage.....	75
2.1.1 Un mythe rationnel	75
2.1.2 L'utilisation d'une épistémologie constructiviste	76
2.2 Proposition de définition du concept d'efficacité énergétique d'usage appliqué au système bâtiment .	76
2.2.1 Analyse de l'usage dans les bâtiments.....	77
2.2.2 Proposition de définition de l'Efficacité d'Usage Energétique (EUE)	83
2.3 Problématiques de l'efficacité d'usage énergétique	87
2.3.1 Problématique de la satisfaction rationnelle de l'usage.....	87
2.3.2 Problématique de la satisfaction sensible des services	88
2.3.3 Problématique de l'expression de la satisfaction globale	89

3 REDEFINITION DU SYSTEME BATIMENT INTEGRANT L'USAGE

89

CONCLUSION

90

Chapitre 4 : Application du concept d'efficacité d'usage énergétique comme outil d'aide à la conception de systèmes bâtiment intégrant l'usage : Etude de cas sur la plateforme PREDIS MHI

1 QUANTIFICATION DU CONCEPT AU TRAVERS D'UN DIAGRAMME D'EFFICACITE D'USAGE.....

94

1.1 Identification des paramètres d'usage au travers de l'approche QOOQCP.....	94
1.1.1 Présentation de l'approche QOOQCP	94
1.1.2 Détermination des paramètres d'usage rationnels et sensibles	96
1.2 Construction des fonctions de satisfaction à partir des différents paramètres d'usage	98
1.2.1 Construction de fonctions de satisfaction sensible (FSs).....	99
1.2.2 Fonctions de satisfaction Rationnelle (FSr).....	101
1.3 Construction effective de la fonction de satisfaction globale	102
1.3.1 Approche conjonctive.....	102
1.3.2 Approche pondératrice linéaire normée (PLN):	103
1.4.1 Construction du diagramme de compromis	103
1.4.2 Utilisation du diagramme de compromis dans l'espace relatif (Zone 1)	105
1.4.3 Utilisation des fronts de Pareto dans l'espace Absolu (Zone 2)	106

2 AIDE A LA CONCEPTION DU SYSTEME DE CHAUFFAGE/RAFRAICHISSEMENT.....

107

2.1 Analyse de l'usage et identification des paramètres d'usage avec l'approche QOOQCP.....	108
--	------------

2.1.1 Paramètres d'usage sensible	108
2.1.2 Paramètres d'usage rationnels	109
2.2 Construction des fonctions de satisfaction à partir des paramètres d'usage	110
2.2.1 Fonction de satisfaction sensible	110
2.2.2 Fonction de satisfaction rationnelle	112
2.2.3 Construction de la fonction de satisfaction globale pour le système de chauffage.....	114
2.3 Calcul des fonctions de satisfaction : Application au système de chauffage de la plateforme PREDIS114	
2.3.1 Systèmes de contrôle-commande	115
2.3.2 Calcul de l'évolution de la température.....	117
2.3.3 Construction des fonctions de satisfaction du système de chauffage de la plateforme PREDIS MHI ...	119
2.4 Diagrammes de compromis et prise de décision	120
2.4.1 Diagramme de compromis de satisfaction rationnelle.....	120
2.4.2 Diagramme de compromis de satisfaction sensible.....	121
2.4.3 Diagramme Satisfaction sensible / Satisfaction rationnelle.....	122
2.4.4 Diagramme de compromis de satisfaction globale	123
2.4.5 Bilan des diagrammes de compromis et prise de décision	125
3 PROPOSITION DE METHODOLOGIE DE MISE EN PLACE DU DIAGRAMME DE COMPROMIS DANS UN PROCESSUS DE CONCEPTION INTEGRANT L'USAGE	127
3.1 L'efficacité d'usage dans le processus de choix de systèmes énergétiques.....	128
3.2 Méthodologie de conception collaborative de SCB intégrant l'usage : application à la plateforme MHI PREDIS	129
CONCLUSION	130

Chapitre 5 : Application de l'efficacité d'usage énergétique au diagnostic et à la gestion d'énergie dans les bâtiments

1 ENJEUX ET ETAT DE L'ART DU DIAGNOSTIC D'USAGE DANS LES BATIMENTS	135
1.1 Différenciation diagnostic efficacité physique et diagnostic efficacité d'usage.....	135
1.1.1 Exemple de cas montrant que la différenciation est nécessaire	136
1.2 Enjeux du diagnostic de l'efficacité d'usage énergétique en exploitation	136
1.3 Etat de l'art des outils de diagnostic.....	137
2 LE DIAGRAMME DE COMPROMIS COMME OUTIL D'AIDE A LA SOBRIETE ENERGETIQUE DES USAGERS POUR DES SYSTEMES FACILEMENT MODELISABLES : APPLICATION A DES APPAREILS ELECTRIQUES DOMESTIQUES	138
2.1.1 Conditions d'expérimentations exploratoires in situ	139
2.1.2 Modélisation constructiviste pour le diagnostic de l'usage	140
2.2 Analyse de l'usage et des paramètres d'usage avec l'approche QOQCP: Exemple du réfrigérateur140	
2.2.1 Paramètres d'usage sensibles	141

2.2.2 Paramètres d'usage rationnels	141
2.3 Construction des fonctions de satisfaction et des diagrammes de compromis.....	142
2.3.1 Fonction de satisfaction rationnelle pour le réfrigérateur.....	142
2.3.2 Diagramme de compromis de la satisfaction rationnelle.....	143
2.3.3 Application à d'autres OUE.....	147
2.4 Bilan du diagramme de compromis d'un équipement en exploitation	148
3 SYSTEME G-HOMETECH : UN SYSTEME DE GESTION ENERGETIQUE INTEGRANT L'USAGER POUR LES ENERGY SMART HOMES	149
3.1 Présentation des « energy smart homes »	149
3.1.1 La place de l'idéalisation du concept de BEPOS	150
3.1.2 Positionnement des « energy smart homes »	150
3.2 Présentation d'un exemple de logiciel de gestion énergétique dans les energy smart homes : G- HomeTech	151
3.3 L'efficacité d'usage appliquée au système de gestion d'énergie G-HomeTech.....	153
3.3.1 Amélioration des fonctions de satisfaction dans les algorithmes de calcul.....	153
3.3.2 Un complément à l'affichage décisionnel de gestion énergétique.....	155

Conclusions et Perspectives

CONCLUSION	155
CONCLUSION DE LA THESE	157
PERSPECTIVES	158
BIBLIOGRAPHIE	160
ANNEXES	18076

Acronymes employés

- BEPOS** : Bâtiment à Energie POSitive
- BBC** : Bâtiment Basse Consommation
- CTA** : Centrale de Traitement d’Air
- EP** : Energie Primaire
- EUE** : Efficacité d’Usage Energétique
- FS** : Fonction de satisfaction Globale
- FSr** : Fonction de Satisfaction Rationnelle
- FSs** : Fonction de Satisfaction Sensible
- GTC** : Gestion Technique Centralisée
- MHI** : Monitoring et Habitat Intelligent
- OUE** : Other Use Electric (correspond aux équipements électriques bruns, blancs et gris)
- PLN** : Pondéré Linéaire Normée
- QQOQCP** : Méthode d’analyse de l’usage et d’identification des paramètres d’usage répondant aux questions Quoi ? Qui ? Où ? Quand ? Comment ? Pourquoi ?
- RT** : Réglementation Thermique
- SCB** : Système Complexe Bâtiment
- SGEB** : Système de Gestion Energétique du Bâtiment
- VMC** : Ventilation Mécanique Contrôlée
- θ** : Paramètre d’usage rationnel
- σ** : Paramètre d’usage sensible

Introduction générale

La maîtrise de l'énergie fait partie des plus importants défis auxquels l'humanité doit se confronter, et cela passe en premier lieu par l'évolution des modes de vie et d'habitation. En effet, nous verrons dans un premier temps (Chapitre 1) que le secteur du bâtiment représente le plus grand consommateur d'énergie en particulier d'énergie électrique, au monde et en France. Afin de rendre pérenne le développement durable de ce secteur, il faudra recourir à des bâtiments passifs ou à énergie positive, que nous approcherons selon la vision «Système bâtiment», où le poste électrique sera un vecteur énergétique essentiel (en tant que source, contrôle et charge d'énergie). Or, la consommation de l'électricité étant intrinsèquement liée à l'usage, c'est-à-dire au comportement humain qui utilise le système bâtiment, nous tâcherons de comprendre quel est l'impact énergétique de l'acteur humain et verrons que cet acteur fait bien partie du Système Complexe Bâtiment également. Nous nous intéresserons ainsi tout au long de la thèse à cet aspect socio-technique du bâtiment qu'est l'usage de l'énergie par les habitants dans le fait que nous aborderons le système bâtiment dans des dimensions propres aux domaines des sciences physiques et des sciences humaines.

Afin d'étudier l'usage de l'énergie dans un bâtiment, nous nous baserons d'abord sur un cas d'application tertiaire (plateforme PREDIS) permettant d'avoir un retour d'expérience sur des usages et leur impact énergétique, en se plaçant aussi bien du point de vue usager en tant qu'« habitant » que du point de vue usager en tant qu'opérateur (Chapitre 2). Nous verrons que selon ces deux approches qui sont des acteurs à différentes échelles du bâtiment, nous pourrions dégager certains paramètres qui caractérisent l'usage, en particulier par rapport à la satisfaction de chacun des acteurs vis-à-vis du système bâtiment. Nous verrons donc apparaître deux types de satisfactions : une liée au confort sensible qui est davantage exprimée par les usagers, et une liée à une maîtrise de la demande énergétique qui est davantage exprimée par les exploitants. Enfin nous verrons que ce retour d'expérience permet d'interroger à plus grande échelle la part énergétique qui est liée à la performance technique d'un équipement et celle liée au comportement d'usage de l'acteur humain, et ceci nous permettra de distinguer certains verrous scientifiques relatifs à l'étude de l'usage.

Cela nous amènera à questionner ensuite le concept même d'efficacité énergétique dans les bâtiments et nous permettra, au travers d'une analyse de la sémantique et de ce qu'est l'usage d'un système bâtiment, de pouvoir distinguer dans ce concept même d'efficacité une partie physique et une partie usage (chapitre 3). Afin d'aborder la spécificité liée à l'acteur humain, nous nous placerons dans une nouvelle approche épistémologique (l'épistémologie constructiviste) qui permet de pouvoir traiter des problématiques de manière systémique (dépendantes et définies par son environnement) et de mettre en évidence le critère d'effectivité de la démarche qui sera présentée. On proposera donc de définir le concept d'efficacité d'usage énergétique (EUE) qui permet dès lors d'intégrer l'acteur humain dans les réflexions de recherche d'économies d'énergie des systèmes. L'EUE d'un équipement/ d'un service se présentera comme la volonté de maximiser la satisfaction globale de l'usager de l'équipement tout en minimisant la consommation énergétique. Nous verrons comment ensuite on peut traiter ce concept multi-objectifs en problème mono-objectif sous forme de rapport afin d'être analogue aux autres concepts d'efficacité énergétique dits «physiques» mais nous en verrons également les limites et les problématiques. Enfin, par l'analyse de l'usage, nous proposerons une définition bidimensionnelle de la satisfaction globale avec une composante de satisfaction rationnelle et une composante de satisfaction sensible.

Nous présenterons ensuite une quantification du concept d'efficacité d'usage énergétique afin de pouvoir étudier l'intérêt de cette approche sur le système bâtiment complexe (Chapitre 4). Nous serons amenés pour cela à définir des fonctions de satisfaction permettant de formaliser les concepts de satisfactions sensible et rationnelle. Pour cela, nous proposerons la méthode QQQQCP (méthode d'investigation posant les questions Quoi ? Qui ? Où ? Quand ? Comment ? Pourquoi ?) qui permettra d'identifier les paramètres d'usage qui composent ces fonctions de satisfaction. Nous verrons que toute cette méthodologie permet d'aboutir à la création d'un diagramme de compromis (ou diagramme EUE) qui permet de traiter directement la problématique de l'EUE sous sa forme multi-objectifs. Afin d'illustrer une telle démarche de quantification de l'EUE, nous appliquerons celle-ci sur l'exemple du système de chauffage de la plateforme PREDIS MHI. En particulier nous verrons que le diagramme de compromis peut s'avérer être un outil effectif d'aide à la décision pour la conception de systèmes énergétiques. Cela permet d'intégrer l'usage dès la conception de tels systèmes et nous montrerons que plus nous intégrerons l'usage dans la définition du système bâtiment (en terme de pilotage), meilleure sera la satisfaction des personnes et plus grandes seront les économies d'énergie.

Enfin, nous présenterons l'effectivité de l'EUE également au niveau de l'exploitation d'un bâtiment sous forme de diagnostic de l'usage énergétique (Chapitre 5). Pour cela, nous présenterons dans un premier temps la nécessité, en exploitation, de pouvoir distinguer la partie physique de la partie usage de la consommation énergétique. Ensuite, nous tâcherons de montrer l'utilité de l'EUE en phase d'exploitation comme outil d'aide à la sobriété énergétique des occupants au travers de l'exemple de l'utilisation d'un réfrigérateur. Finalement, nous pourrons voir que l'EUE pourrait davantage être intégrée dans des systèmes de gestion d'énergie tels que G-HomeTech afin d'atteindre l'objectif des smart energy buildings. Nous verrons pour cela que l'EUE pourrait permettre de redéfinir certains algorithmes de gestion afin d'intégrer la dimension usage.

Le bâtiment : un secteur au cœur d'une problématique socio-technique

Dans ce chapitre nous présenterons les contextes scientifiques, économiques et sociologiques dans lesquels se situent les travaux de la thèse. Notre sujet porte sur l'étude de l'efficacité énergétique en particulier dans les bâtiments qui apparaissent être un des enjeux énergétiques et sociétaux majeurs compte tenu des problématiques environnementales (réchauffement climatique) et économiques (raréfaction des ressources primaires) en jeu et du rôle fondamental que joue l'habitat dans les sociétés (partie 1).

Nous verrons que le domaine du bâtiment est en pleine évolution que ce soit du point de vue énergétique avec une importance croissante du génie électrique dans de tels systèmes bâtiments (partie 2), ou du point de vue fonctionnel avec une redéfinition des limites du système bâtiment (partie 3).

Enfin nous verrons que l'utilisateur humain est partie intégrante du système bâtiment étant donné qu'un bâtiment est construit afin d'être habité par des usagers, et doit à ce titre être pris en compte dans l'étude de l'efficacité énergétique des bâtiments (partie 4).

1 Contexte environnemental et énergétique

1.1 Contexte environnemental

La lutte contre le réchauffement climatique est un des plus importants défis actuels auxquels doit se confronter l'humanité. Les conséquences du réchauffement climatique sont multiples et ont divers degrés d'impact et de réversibilité. On pourra citer entre autres que l'on peut s'attendre à une fonte des glaces aux pôles, à des phénomènes naturels extrêmes plus fréquents, une mise en péril d'espèces animales et florales, etc... [GIEC, 2007]

La cause principale de ce dérèglement climatique est, ainsi que de manière plus générale la perturbation des écosystèmes et l'exploitation des ressources naturelles, très probablement l'activité humaine. En effet, l'évolution rapide et alarmante de concentration de gaz à effet de serre (comme le CO₂) depuis les années 1850 coïncide avec une activité humaine qui s'est alors grandement développée avec l'ère de la révolution industrielle [MULT, 2003] (figure1)

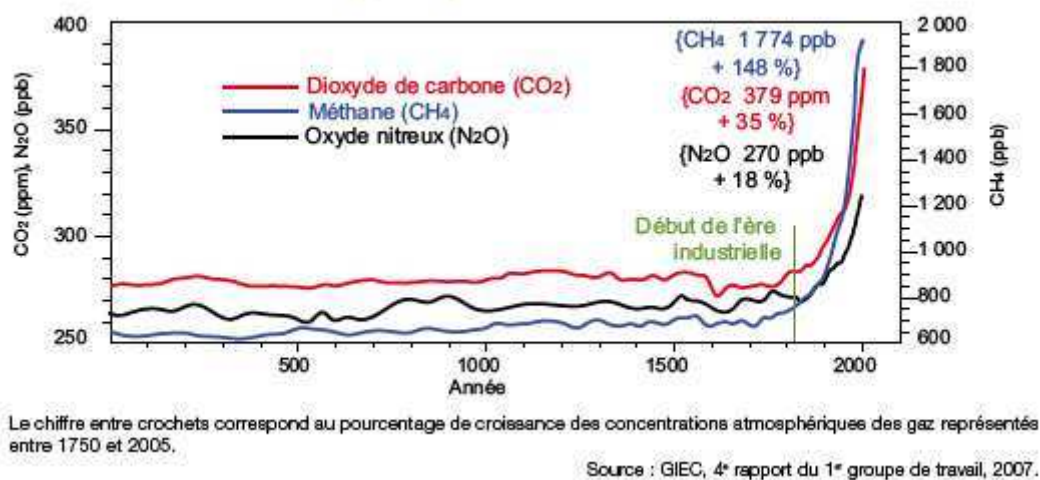


Figure 1 : Evolution du taux de concentration de différents gaz à effet de serre depuis 2000 ans

L'humanité est désormais responsable de l'ampleur des dégâts qu'aura ce dérèglement climatique car autant on ne peut désormais éviter le réchauffement climatique, autant il est encore possible de jouer sur le degré d'amplitude des dégâts occasionnés sur l'environnement et les problèmes sociopolitiques futurs grâce aux actions que l'on peut mener dès aujourd'hui [COCH, 2009]. Ainsi, dans le cadre d'études prospectives sur le réchauffement climatique, différents scénarios en fonction des politiques environnementales suivies par les Etats permettent de se rendre compte des conséquences plus ou moins irréversibles de nos agissements sur l'environnement (figure2).

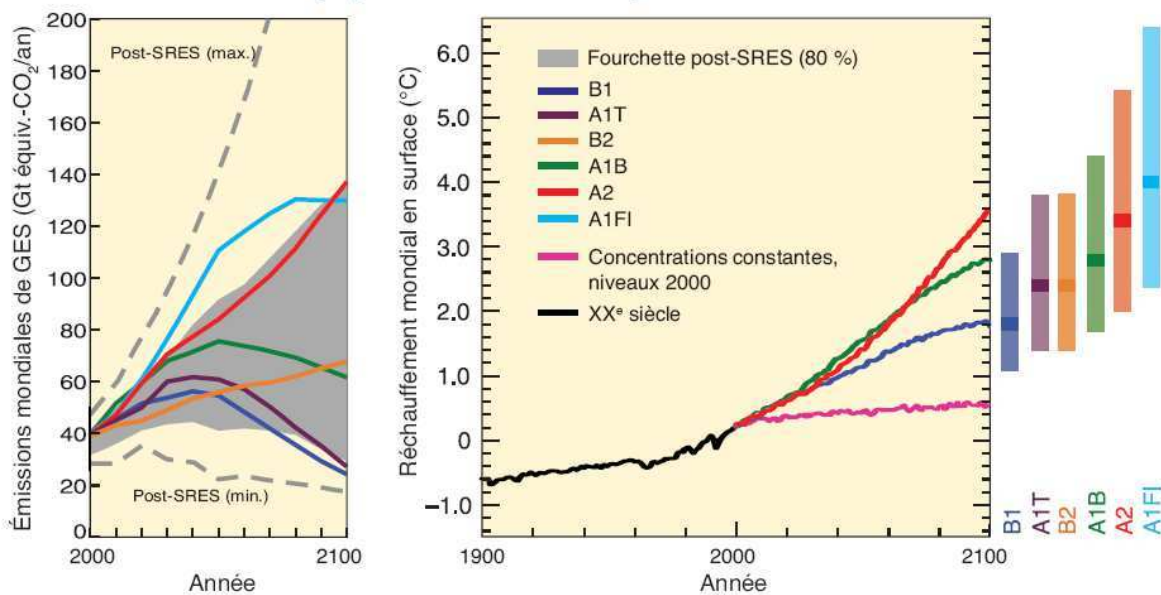


Figure 2 : Scénarios d'émissions de GES pour la période 2000–2100 (en l'absence de politiques climatiques additionnelles) et projections relatives aux températures en surface [GIEC, 2007]

1.2 Le secteur du bâtiment : principal consommateur énergétique dont la consommation ne cesse de croître

L'énergie est à l'heure actuelle omniprésente dans l'activité humaine tant l'ensemble de la vie humaine quotidienne est dépendante d'objets qui requièrent de l'énergie transformée pour fonctionner et aussi pour les fabriquer. L'accès à l'énergie et la production d'énergie, qui provient en grande partie des énergies fossiles émettrices massives de CO₂ (principal gaz à effet de serre identifié) (voir la répartition d'émission de CO₂ dans le monde figure 3), constituent dès lors des problématiques énergétiques auxquelles doivent se confronter les sociétés actuelles car celles-ci impliquent des dimensions environnementales, économiques et politiques d'envergure.

Dans ce cadre, la réduction de la consommation énergétique est indispensable [COCH, 2009]:

- pour des raisons éthiques : actuellement, 28% de la population mondiale consomment 77% de l'énergie produite dans le monde, les 72% de la population restant se partageant les 23% restants de l'énergie produite
- pour des raisons stratégiques : l'Europe et en particulier la France, dépendent d'autres pays pour son approvisionnement en énergies fossiles, dont certains sont plutôt instables politiquement (Afghanistan, Libye, Irak,...).
- pour des raisons financières : la facture annuelle d'électricité est aujourd'hui l'un des principaux postes de dépenses des ménages européens

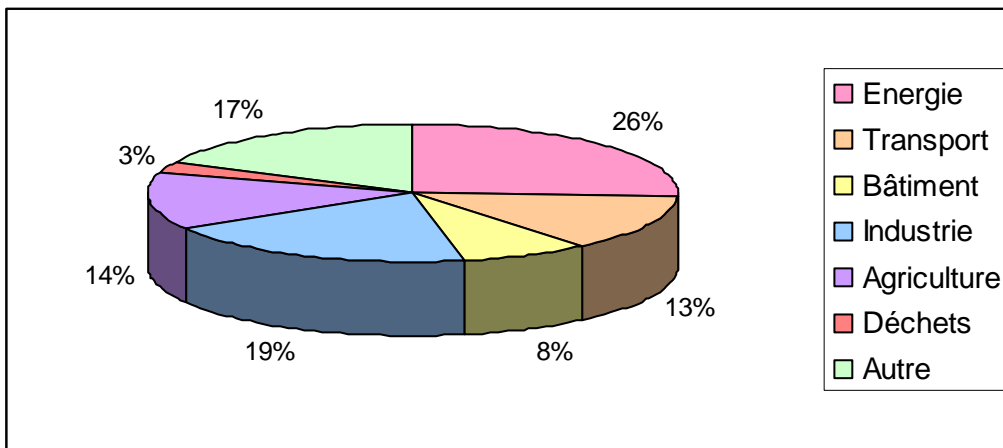


Figure 3 : Répartition par sources des émissions de CO2 dans le monde en 2004 [GIEC, 2007] (49Gt CO2 équivalent)

Parmi les postes de consommation d'énergie, le secteur du bâtiment¹ (résidentiel et tertiaire) fait partie des postes les plus importants d'émission de CO2, compte tenu de l'importance et de la diversité des énergies consommées (figure 3).

En effet, le secteur du bâtiment représente le plus important secteur consommateur d'énergie au niveau mondial : 37% de la consommation énergétique mondiale en 2008 (figure4). Cette demande énergétique, compte tenu de l'accroissement de la démographie mondiale, ne cesse de croître (+ 35% depuis 1990 [AIE, 2010]). On se rend compte que les autres secteurs de consommation ont, dans le même temps, eu une progression moins importante voire, en terme d'émissions de gaz à effet de serre, une progression inverse en réduisant leur impact grâce à des réglementations strictes [AIE, 2010].

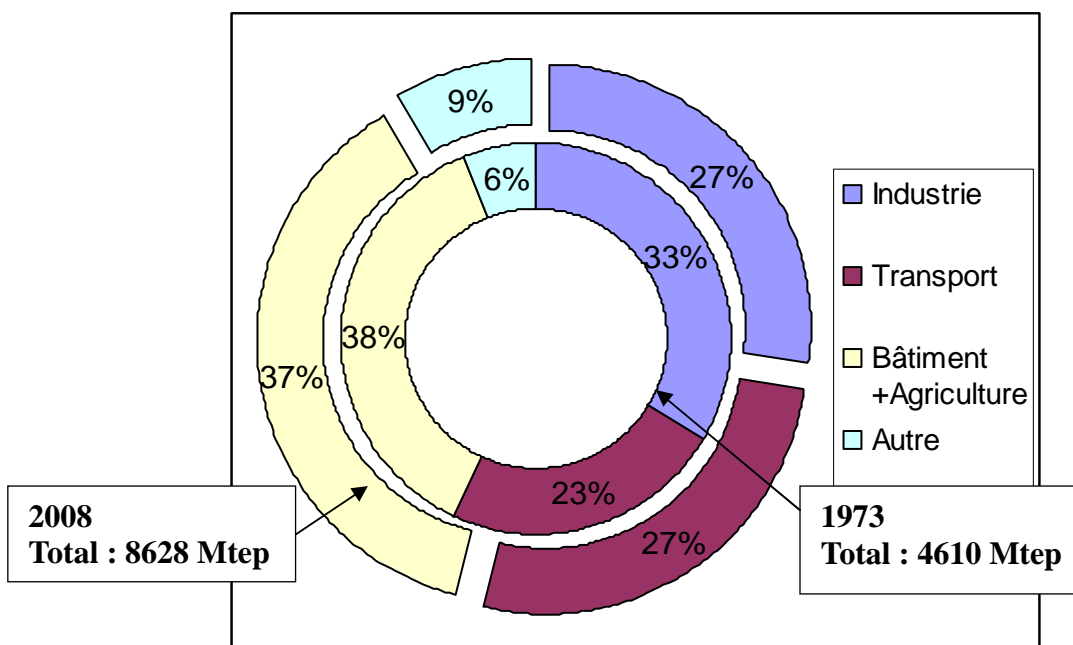


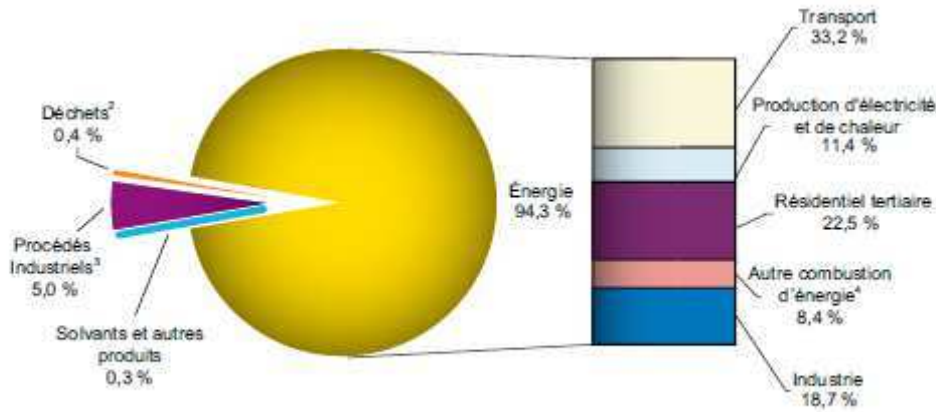
Figure 4 : Répartition de la consommation énergétique mondiale par secteur [AIE, 2010]

¹ On désignera par la suite par secteur du bâtiment (ou métiers du bâtiment et autres terminologies employant le terme de « bâtiment ») l'ensemble des bâtiments résidentiels et tertiaires sinon il sera précisé de quelle nature est le bâtiment. Bien que les usages y soient différents et que l'on peut nommer de manière courante « habitants » les personnes vivant dans les bâtiments résidentiels et « occupants » les personnes vivant dans les bâtiments tertiaires, en soit, toutes ces personnes « habitent » leurs lieux de vie et interagissent avec.

1.2.1 Situation énergétique du bâtiment en France

En France, on retrouve sensiblement les mêmes tendances qui sont celles également des autres pays industrialisés :

- Le secteur du bâtiment représente le premier poste de consommation d'énergie finale (43% en 2010 (figure6)) et également un des postes principaux émetteurs de CO2 (21% de la production de CO2 en France (figure 5)) [CITEPA, 2010].



Source : Agence européenne pour l'environnement d'après Citepa, juin 2010.

Figure 5 : Répartition par sources des émissions de CO2 en France en 2008 (391Mt CO2 au total) [CITEPA, 2010]

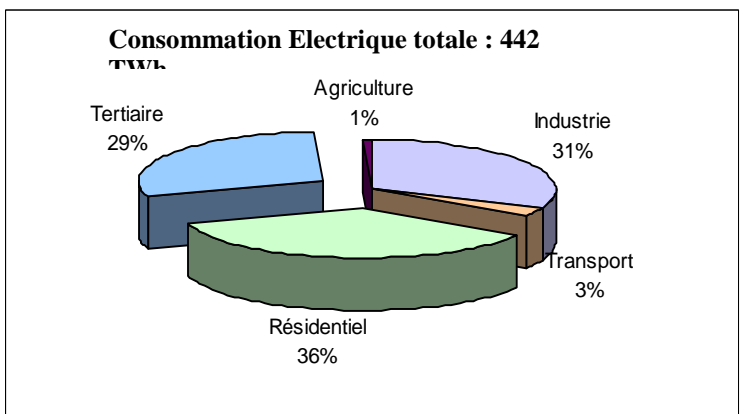
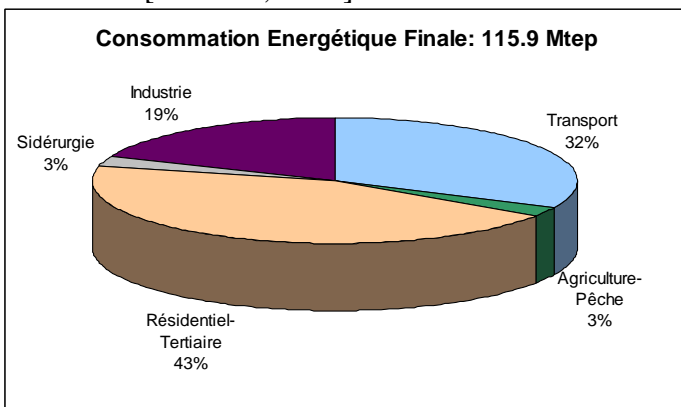


Figure 6 : Proportion de la consommation d'énergie par secteur en France [SOES, 2010]

Figure 7 : Répartition des postes de consommation électrique en France [MEDAD, 2010]

- Si l'on considère maintenant uniquement l'énergie électrique, le bâtiment est d'autant plus prédominant dans l'éventail énergétique français : plus de 65% de la consommation électrique française en 2010 (figure 7). A l'instar du niveau mondial, on constate au niveau français que le secteur du bâtiment est un secteur consommant de plus en plus d'énergie (en particulier de l'énergie électrique). Une telle évolution peut être imputée à la multiplication de bâtiments, à l'augmentation de leur surface ou au nombre de charges électriques à l'intérieur comme nous le verrons plus tard. Néanmoins, cette augmentation (aussi bien du point de vue émission de gaz à effet de serre qu'au niveau énergie électrique (figure8)) est également due à un manque de réglementation stricte qu'ont su mettre en place les autres secteurs.

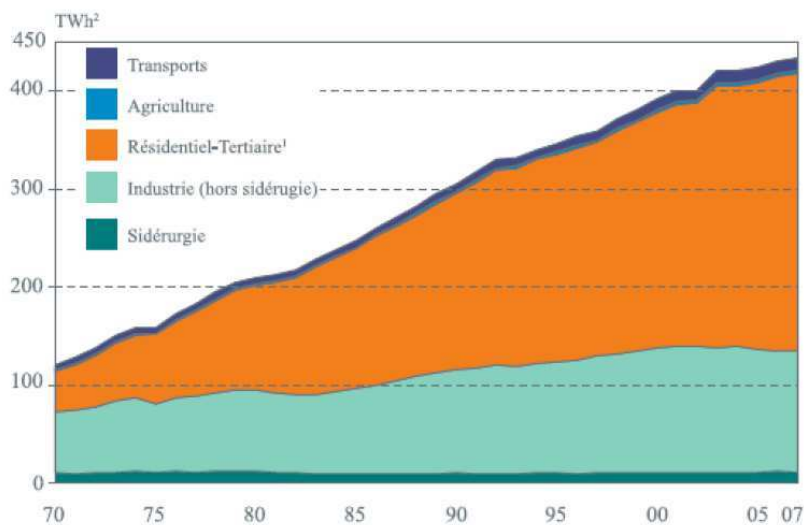


Figure 8 : Consommation finale d'électricité par secteur de 1970 à 2007 [SOES, 2008]

1.3 Vers des bâtiments à énergie positive

Compte tenu de l'importance énergétique que représente le secteur du bâtiment et afin d'atteindre les objectifs environnementaux aussi bien internationaux (protocole de Kyoto [ONU, 1998], programme européen «3*20» [UE, 2007]) que nationaux (Plan climat [MEDAD, 2006]), des mesures réglementaires ont été engagées concernant l'efficacité des bâtiments.

Le gouvernement français a mis en place une série de réglementations concernant la consommation énergétique des bâtiments depuis les années 1970 et ceci notamment avec la sortie de la première Réglementation Thermique en 1974 concernant la construction de bâtiments résidentiels. L'objectif premier de cette réglementation était de répondre à l'augmentation rapide du prix de l'énergie avec le premier choc pétrolier de 1973 en mettant en place des isolations plus performantes permettant de diminuer alors la facture énergétique. Par la suite, différentes réglementations ont été promulguées (RT 1982, RT 1988, RT 2000, RT2005, RT2012) (figure9) afin d'inciter des économies d'énergie dans les bâtiments neufs et en rénovation. Ainsi par exemple, la réglementation actuelle RT2005 [RT2005, 2005] demande une augmentation de 15% de la performance thermique des bâtiments par rapport à la RT2000.

Afin de parvenir aux exigences énergétiques des réglementations thermiques, différentes mesures concernant principalement le poste de chauffage sont préconisées comme, par exemple, l'optimisation de l'isolation thermique, la réduction des ponts thermiques ainsi que la maximisation des apports thermiques passifs (soleil).

Seule la dernière réglementation (la RT 2012, en préparation), préconisera une consommation énergétique standard et chiffrée : tous les bâtiments résidentiels neufs devront avoir leur consommation des postes thermiques, ventilation et éclairage inférieure à 50 kWh EP/an/m² (EP : Energie primaire²). Dans notre étude, nous utiliserons à ce propos, pour la description des performances énergétiques d'un bâtiment, des valeurs exprimées en Energie primaire de la consommation en employant le coefficient d'énergie primaire actuellement en

² Energie Primaire : Forme d'énergie disponible dans la nature avant toute transformation. L'utilisation de l'unité associée (WhEP) permet ainsi de prendre en compte l'ensemble des pertes liés à la transformation ou au transport de l'énergie.

vigueur de 2,58 pour tout ce qui concernera la consommation électrique au niveau du système bâtiment [DGEMP, 2007]

Néanmoins, on pourra souligner le particularisme français sur la faible valeur employée à l'heure actuelle par la réglementation thermique alors que de partout en Europe, on tend à élever ce coefficient car il faut inclure dans ce coefficient l'impact d'une analyse de cycle de vie. Sachant que l'électricité française est majoritairement de nature nucléaire, ce coefficient devrait inclure le prix du combustible, celui de son transport, du traitement des déchets radioactifs, etc...ce qui permettrait de valoriser les énergies renouvelables. L'ADEME elle-même préconise un coefficient de 3,61 pour l'électricité Basse Tension et de 3,25 pour la Haute Tension

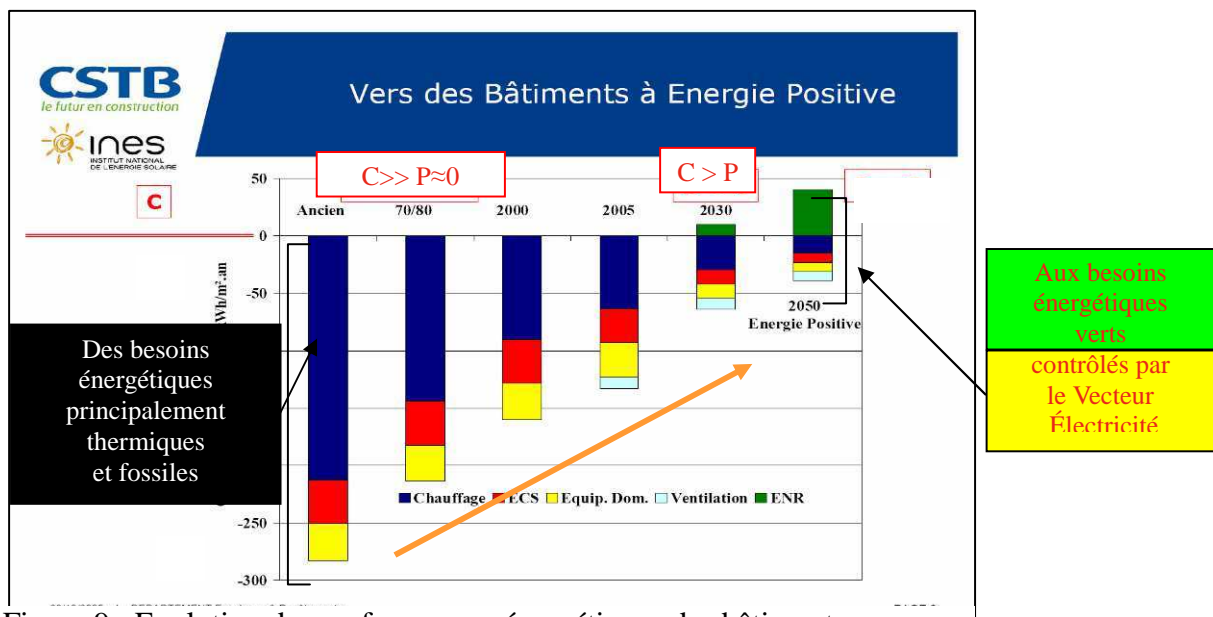


Figure 9 : Evolution des performances énergétiques des bâtiments au fur et à mesure des normes [QUEN, 2011]

Dans les futurs bâtiments dont les hautes performances énergétiques seront selon la réglementation thermique qui aura évoluée vers des bâtiments passifs (à l'horizon 2020 selon les engagements du Grenelle de l'Environnement), on peut distinguer différents concepts se classifiant en fonction de leurs performances énergétiques (Thiers, 2008). Nous retiendrons parmi ces bâtiments :

- Les *bâtiments basse consommation* (BBC) : Type de bâtiment intégrant un premier niveau de performance, se caractérisant par des besoins énergétiques plus faibles. La réglementation thermique (RT) permet de définir plusieurs classes de consommations énergétiques. Les BBC se situent dans une tranche de consommation inférieure à 50 kWhEP/m²/an (multiplié par le coefficient de correction climatique selon les régions)

- Les *bâtiments à énergie positive* (BEPOS). Ce sont des bâtiments qui allient à la fois de faibles consommations d'énergie (dus à une conception rigoureuse ainsi que de la mise en place d'équipements peu consommateurs d'énergie) une production locale d'énergie. Le bilan énergétique global sur une année fait que ce type de bâtiment transforme plus d'énergie qu'il n'en consomme. Ce bilan énergétique positif pourra être effectué, en particulier, grâce à la gestion des flux énergétiques sur les réseaux grâce au Smart Grid (sur lequel nous reviendrons plus tard) ou, à l'horizon 2020, par des systèmes de gestion d'énergie autonomes incorporés dans les bâtiments tels que G-HomeTech (cf. Chapitre 5).

A l'heure actuelle, de nombreux efforts restent à fournir pour parvenir à obtenir tous les bâtiments à haute performance énergétique. En premier lieu, il est nécessaire (et c'est l'objet de la dernière réglementation thermique RT2012) de rendre obligatoire les nouvelles constructions à très haute performance énergétique et s'en donner les moyens (notamment en faisant évoluer les métiers et outils du bâtiment vers une excellence énergétique ce qui n'est pas encore chose aisée comme nous le verrons dans le chapitre 2). D'autre part, l'immense effort porte sur la rénovation car l'essentiel des surconsommations énergétiques des bâtiments provient des bâtiments anciens dont la consommation en chauffage et en eau chaude sanitaire est en moyenne de 240kWh/m²/an (figure 9)

Notre étude, en particulier notre cas d'étude du chapitre 2, se situe dans le cadre de bâtiments tertiaire basse consommation mais la démarche que nous proposons s'applique à tout type de bâtiment et devient un aspect nécessaire dans la perspective des bâtiments à énergie positive.

2 L'électricité : un vecteur énergétique central dans les bâtiments basse consommation

Comme nous avons pu le voir précédemment (figure 8), l'électricité, en terme de proportion énergétique, devient de plus en plus prépondérante dans le bilan énergétique des bâtiments, et ce d'autant plus dans les futurs bâtiments passifs/à énergie positive où le poste thermique sera tellement réduit que le poste électrique sera le poste principal de la consommation énergétique. Au-delà de l'élément physique, l'électricité est un véritable vecteur énergétique et sociétal tant son utilisation sous diverses formes est omniprésente.

2.1 L'usage électrique : entre service technologique et nécessité sociétale

L'électricité, longtemps observée comme un phénomène naturel, s'est intégrée depuis les années 1750 dans notre société avec la découverte par Benjamin Franklin de la similitude entre énergie statique et la foudre. Alors qu'au début, l'électricité était utilisée dans le domaine public (éclairage public, spectacle, transport..) elle est rentrée au fur et à mesure dans la sphère privée des bâtiments résidentiels [DESJ, 1996]. Dès lors, l'électricité est perçue comme un besoin essentiel et même une « religion » tellement son usage est inhérent à toutes les strates de la société [MORA, 1931].

Son arrivée dans l'habitat se manifeste en premier lieu par la démocratisation de l'éclairage dans les foyers (dans les années 1940 pour la France), puis par le développement des équipements électrodomestiques [DESJ, 1996]. De tels équipements permettent de soulager les tâches domestiques en devenant ainsi une aide, voire un prolongement du corps en terme fonctionnel. C'est ce que Jean Baudrillard appelle la « gestuelle fonctionnelle » c'est-à-dire que l'on agit au travers d'un équipement pour effectuer une fonction [BAUD, 1968]. Dès lors, ces équipements utilisant l'énergie électrique vont se répandre au sein du foyer, pour accomplir les différentes familles de fonctions (chauffage, nettoyage, éclairage, bricolage, cuisine, média) allant jusqu'à une reconfiguration spatiale des habitats. Mais parallèlement à cela, l'électricité reconfigure les outils de travail motorisant les machines, créant des environnements virtuels avec l'avènement de l'informatique ce qui provoque une reconfiguration de notre environnement spatial et de notre approche aux objets.

L'apport de tels équipements révolutionne ainsi non seulement le rapport de l'homme au travail mais également les rapports sociaux au sein même des bâtiments où à l'extérieur de ceux-ci. En effet, les rapports aux autres (entre habitants) se trouvent dès lors redéfinis par l'utilisation d'équipements électriques pouvant, par exemple dans le cadre résidentiel, amener

à des tensions par rapports au mode de consommation (problématique de la « guerre des boutons » pour la maîtrise des dépenses d'énergie [DESJ,1996]).

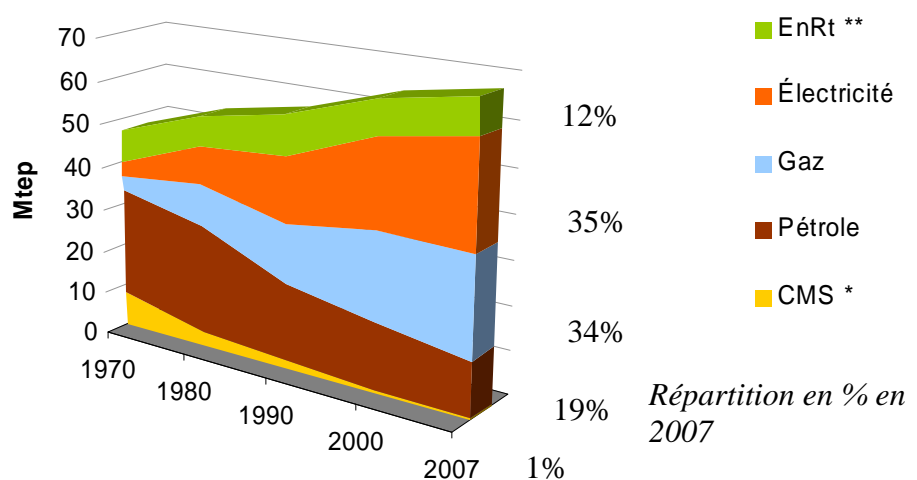
On se rend compte que l'usage de l'électricité est un élément fondamental car toute activité au sein d'un bâtiment se réfère à une utilisation de l'énergie électrique sous différentes formes. Avec les BBC et autres bâtiments performants, cette perspective va d'autant plus se vérifier avec la mise en place de systèmes de gestion d'énergie qui vont permettre d'offrir encore plus de services au travers des équipements électriques eux-mêmes mais également en termes d'ensembles d'équipements.

Comme nous allons le présenter ultérieurement (partie 3.1 chapitre 1) dans l'exemple des bâtiments intelligents, l'implantation de plus en plus d'équipements électriques en tout genre offre d'autant plus de services et l'utilisateur va être alors de plus en plus dépendant de ces services électrodomestiques. Cette omniprésence de l'électricité peut déjà s'apprécier lors de périodes critiques où une coupure d'électricité, ne serait-ce que d'une heure, provoque des conséquences techniques et sociologiques qui peuvent se révéler catastrophiques.

2.2 L'électricité : première énergie consommée dans le secteur tertiaire

Comme nous l'avons vu précédemment (figure 7), le domaine du bâtiment est le premier secteur consommateur d'électricité en France. Lorsque l'on regarde sa contribution dans le panel actuel de consommations énergétiques des bâtiments, l'électricité s'avère déjà être la principale source de consommation énergétique dans les bâtiments (35% en 2007) et cette tendance ne cesse de s'amplifier (figure 10).

Figure 10: Consommation énergétique finale du secteur résidentiel – tertiaire, par type d'énergie utilisée



Notes : consommation corrigée des effets du climat ; hors utilisation de ressources à des fins non énergétiques ;

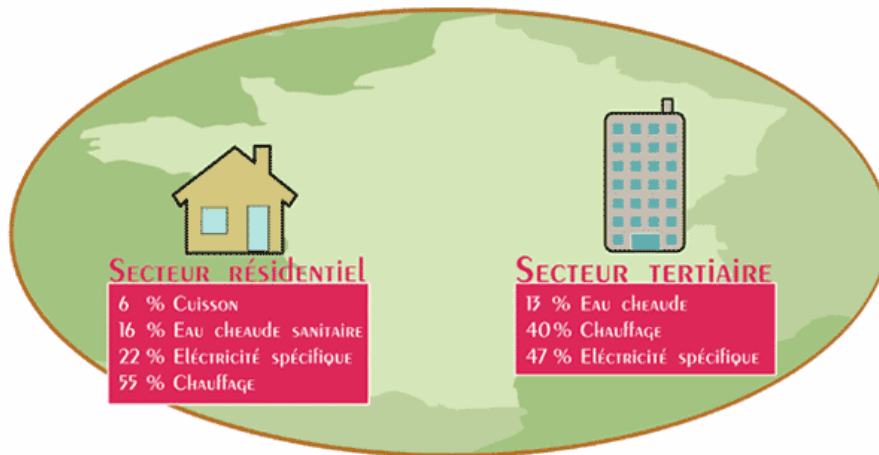
* CMS : combustibles minéraux solides (charbon + coke de houille) ; ** EnRt : énergies renouvelables autres que hydraulique éolien et photovoltaïque.

Source : SOeS, 2008.

Une telle importance de l'électricité est d'autant plus mise en exergue dans les bâtiments tertiaires où le poste de consommation d'électricité spécifique³ représente le premier poste de consommation énergétique (figure 11).

³

L'électricité spécifique correspond à l'électricité nécessaire pour les services qui ne peuvent être rendus que par l'usage de l'énergie électrique. On ne prend pas en compte dans l'électricité spécifique : l'eau chaude, le chauffage, la climatisation et la cuisson qui peuvent utiliser différents types d'énergie. [NOVE, 2011]



© www.cea.fr - 2003
RÉPARTITION DE LA CONSOMMATION D'ÉNERGIE DANS LE SECTEUR RÉSIDENTIEL ET TERTIAIRE EN FRANCE

Figure 11 : Répartition de la consommation d'énergie dans le secteur résidentiel et tertiaire en France en 2003 [CEA, 2003]

2.2.1 Le poste de consommation électrique supplante le poste de consommation thermique dans les bâtiments performants

Avec l'avènement de bâtiments performants par la mise en place des différentes réglementations thermiques, les besoins thermiques vont réduire et par là même le bilan énergétique va se voir changer.

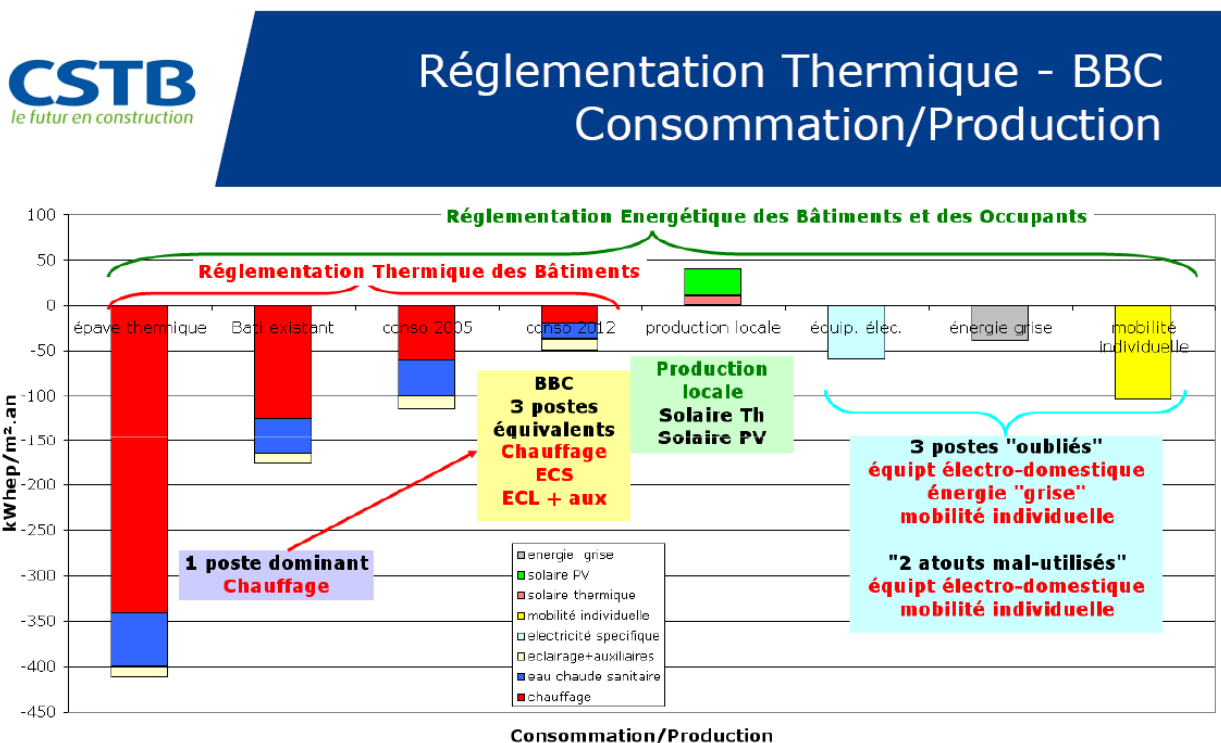


Figure 12 : Evolution des postes de consommation dans les bâtiments [QUEN, 2011]

Comme indiqué sur la figure 12 où sont représentées les consommations prévues par les différentes réglementations thermiques (RT2005 et RT2012), le poste des équipements électrodomestiques peut tenir du paradoxe énergétique puisqu'il est vu comme un atout

énergétique dans le cas de la gestion de réseaux électriques que nous verrons plus tard (smart grids) (du fait de ses possibilités de délestage) tout en étant oublié dans les réglementations actuelles et de manière plus générale dans les métiers de la conception. Pourtant, de par une mise en place de réglementations thermiques visant à réduire les besoins thermiques et de par l'absence de réglementation particulière sur la consommation électrique, le poste de consommation électrique va rapidement se retrouver comme premier poste de consommation (en particulier dans les BBC et les BEPOS).

Cette considération valable pour le domaine résidentiel prend une dimension encore plus importante pour les bâtiments tertiaires. L'exemple de la figure 13 montre qu'en pratique le poste électrique (Bureautique+ventilation+éclairage), à partir de la RT 2012, est supérieur au poste thermique et représente plus de $\frac{3}{4}$ de l'énergie consommée. Si l'on rajoute à cela les consommations des autres postes (auxiliaires chauffages, usages divers, etc.) qui utilisent également de l'énergie électrique, ce bâtiment tertiaire, comme toutes les prochaines générations de bâtiments, sera quasiment tout électrique.

On peut se rendre compte que la demande croissante en électricité des bâtiments, fait du génie électrique une composante principale du bâtiment à moyen et long terme. En effet, la demande en électricité a doublé en 20 ans et a été multipliée par 5 en moins de 40 ans (figure 14).

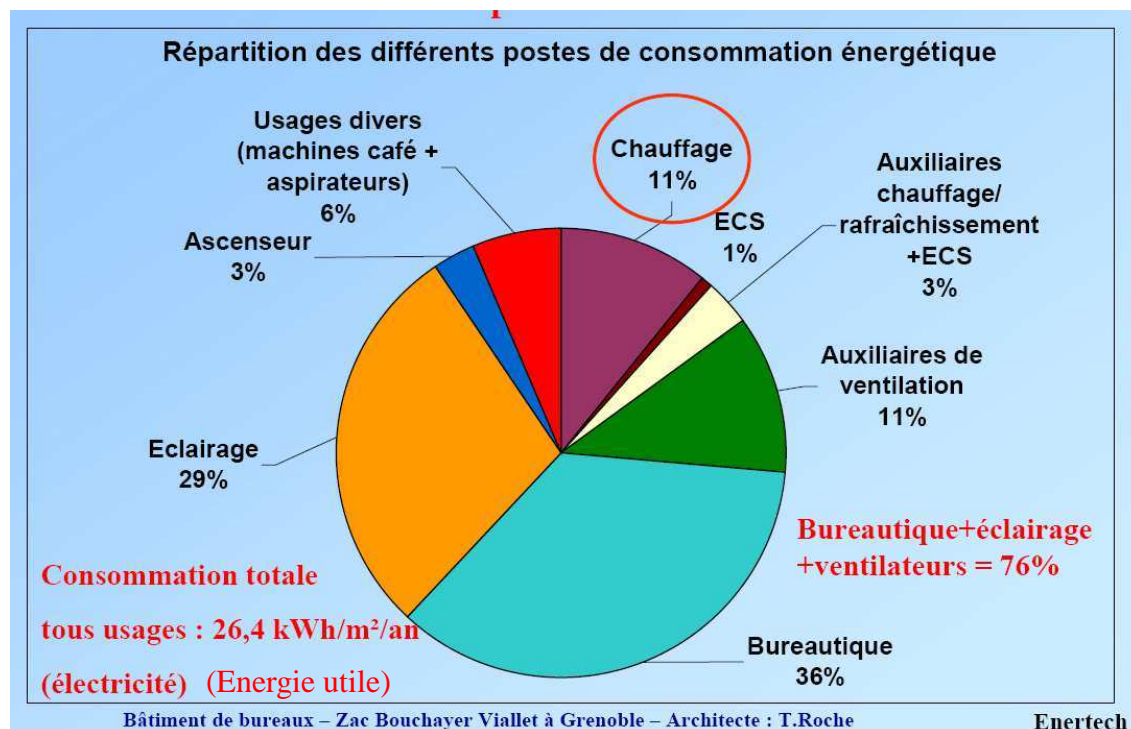
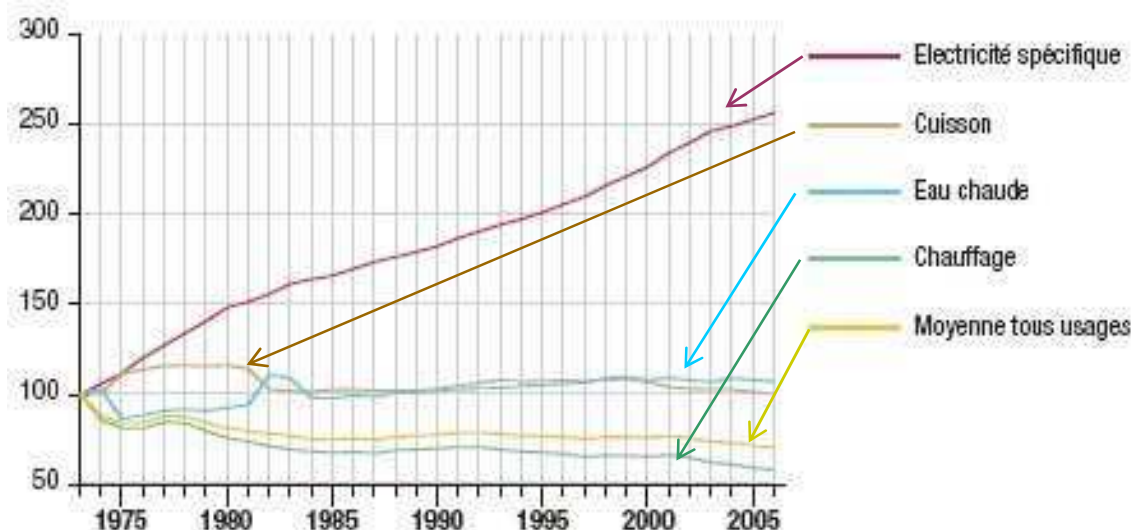


Figure 13 : Répartition des postes de consommation dans un bâtiment de Bureaux BBC (chauffage non électrique) [ENERT, 2005]

Si l'on regarde la tendance par rapport à 1973 par exemple, de la consommation des différents postes de consommation énergétique dans le résidentiel, on constate plus qu'un doublement de la consommation du poste d'électricité spécifique (figure14) (+150%) et dans le même temps on retrouve une même progression importante de ce poste dans les bâtiments tertiaires de + 40% [CEREN, 2007]



Source : ADEME/CEREN, consommation finale

Figure 14 : Evolution des consommations d'énergie (électricité et autres) dans le secteur résidentiel (indice 100 en 1973)

2.2.2 L'explosion des services électriques et la question de la suffisance énergétique

L'augmentation de la consommation électrique s'explique en grande partie par la multiplication des charges électriques dans le bâtiment. En effet, le progrès technologique amène de plus en plus d'équipements dont la principale source d'alimentation est l'électricité. Des nouvelles fonctionnalités comme les médias et la bureautique sont apparues avec l'avènement de l'informatique, des télécommunications, de l'audiovisuel, représentant alors d'autant plus de nouvelles charges électriques dans le bâtiment. Cette consommation d'électricité pour les usages de confort (éclairage, électroménager...) a fortement augmenté entre 1973 et 2003 (+ 85 % par m²), en raison de la multiplication des appareillages domestiques qui, en dépit de leur faible puissance, consomment une quantité d'électricité conséquente du fait de la multiplication des veilles [POQU, 2008].

Dans les bâtiments tertiaires de type Bureaux et Enseignement où les charges principales sont la bureautique et l'éclairage, l'augmentation se traduit par une part de l'informatique croissante et l'augmentation des puissances des ordinateurs en terme de calcul et donc de puissance électrique consommée. Ainsi, la consommation électrique des micro-ordinateurs augmente en moyenne de 5% par an [SIDL, 2009] et dans le même temps, la nécessité de redondance des serveurs informatiques provoque une explosion de la consommation énergétique des data centers (Problématique du « Green IT » [ENERG, 2007].

Une telle explosion d'équipements, autant en nombre qu'en puissance, amène à se poser la question de la *suffisance énergétique*. En effet, on peut se poser la question du fait d'avoir des écrans toujours plus grands, des machines toujours plus puissantes (par exemple pour les voitures, on observe une augmentation des cylindrées alors que même la limitation de vitesse n'autorise pas des vitesses excessives), etc. nécessitant une consommation plus importante, si c'est bien raisonnable et utile ? Quelle est la frontière entre le « simplement utile et le vraiment utile » de Platon ? [PLAT, 1999]

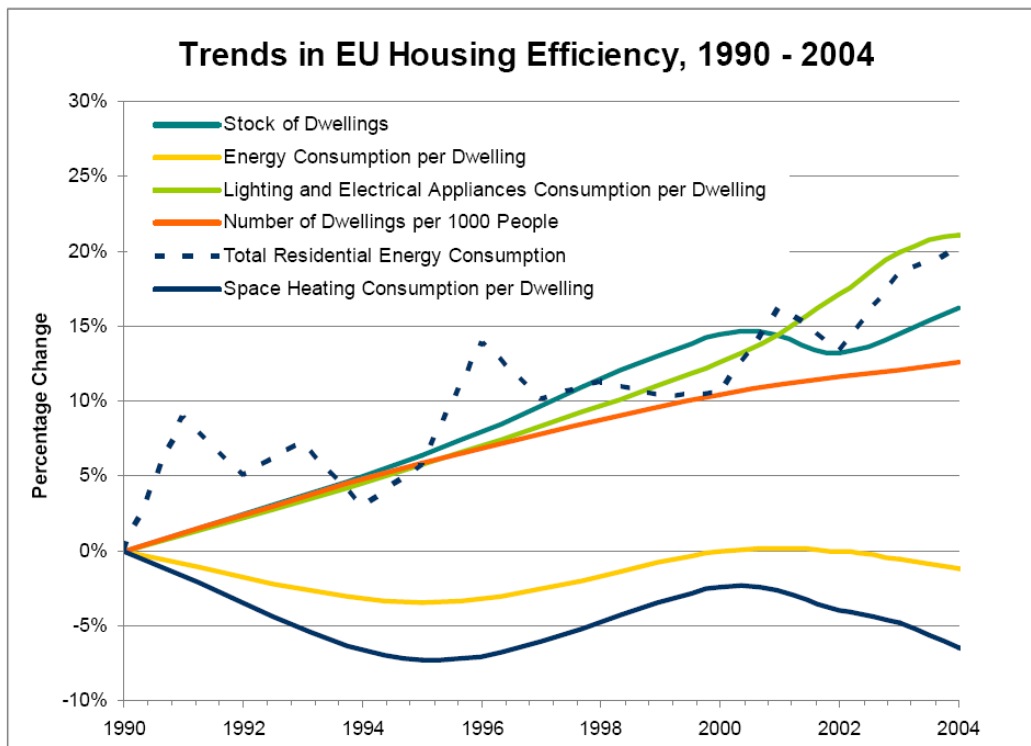


Figure 15 : Evolution de l'efficacité énergétique des maisons en Europe [CALW, 2008]

Dans ce cadre, un groupement européen ECEEE [CALW, 2008] préconise ainsi de mettre dans la balance de l'avancement technologique également la suffisance des services rendus. En effet, face au progrès technologique et à la volonté environnementale qui amènent à concevoir des équipements énergétiquement plus efficaces, la consommation d'équipements « toujours plus » (plus grands, plus rapides, etc..) augmente alors d'autant plus et annihile dans une certaine mesure les économies réalisées par des technologies intrinsèquement plus efficaces. Sur le graphe de la tendance européenne (figure 15), on se rend compte que malgré le fait que la consommation énergétique ait tendance à se stabiliser au sein de l'Union Européenne, la consommation en éclairage et équipement électrique a augmenté de 20% en 14 ans et cette tendance continue attestant de la gourmandise énergétique des habitants (qui souhaitent également des superficies de plus en plus grandes qui nécessiteront davantage d'éclairage).

A ce phénomène se rajoute une autre dynamique sociale de consommation appelée « l'effet rebond » qui traduit la tendance à utiliser plus souvent un équipement conçu comme énergétiquement efficace, ce qui, au final, ne rend pas le bilan énergétique économe [SORR, 2008]. Ainsi par exemple, des ampoules basse consommation que l'on éteint moins fréquemment ou un chauffage que l'on pousse plus après avoir mieux isolé son logement sont autant de comportements qui rendront le bilan énergétique non économe en énergie malgré l'emploi de technologies performantes. Une telle problématique, que l'on peut retrouver dans un certain nombre d'autres produits de consommation et bien connu du domaine de la microéconomie, soulève de nombreuses considérations quant à la (re)définition de l'efficacité vis-à-vis des économies d'énergies effectivement réalisées [RUZZ, 2008]. Nous reviendrons dans le chapitre 3 sur les limites de l'efficacité énergétique dans le bâtiment.

Par ces deux précédents phénomènes de consommation, on peut apprécier comment la dimension usage de l'électricité est inhérente aux comportements humains et que le génie électrique se présente alors au-delà d'une simple source énergétique mais également comme un vecteur de service.

2.3 Le génie électrique : composante majeure de la gestion énergétique des bâtiments

Afin de pouvoir contrôler et gérer l'énergie électrique entre les sources et charges électriques de plus en plus nombreuses dans les bâtiments, des Systèmes de Gestion Énergétique du Bâtiment (SGEB) sont apparus progressivement avec l'apparition de micro contrôleurs et des protocoles de communication.

On peut définir ces systèmes selon la définition de Long Ha qui caractérise les systèmes de gestion d'énergie du bâtiment comme « *un ensemble d'équipements dotés de microcontrôleurs ayant des capacités de communication via des protocoles standards, un système de contrôle-commande centralisé et une interface homme-machine permettant de réaliser certaines fonctions d'optimisation, de conduite et de suivi de la consommation d'énergie* » [HA, 2007].

A l'heure actuelle, les systèmes de Gestion technique Centralisée (GTC) font partie des SGEB car ils permettent de gérer la consommation des services de chauffage, de climatisation, d'eau chaude sanitaire et d'éclairage. L'application se fait essentiellement dans les bâtiments tertiaires de type industriel, commercial mais aussi de type bureaux. Nous reviendrons plus spécifiquement sur le contenu et les limites des systèmes GTC dans le Chapitre 2 car notre cas d'étude utilise une telle technologie.

Les SGEB agissent sur les différents organes du bâtiment aussi bien au niveau de l'alimentation d'équipements énergétiques (c'est-à-dire les équipements fournissant les services de chauffage, de ventilation, d'éclairage et les autres équipements d'électricité spécifique) que sur leur commande. Ainsi, l'électricité se retrouve dans la plupart des processus de transformation physique réalisés par les appareils énergétiques (transformation électromécanique pour un moteur, électrothermique pour un radiateur, électro-lumineux pour les éclairages de type fluorescent) mais peut également intervenir comme système de contrôle ou de commande, principalement dans la gestion de la circulation de flux énergiques comme l'eau chaude, l'air, ... au travers de vannes, de pompes et de ventilateurs.

Dans le cadre de BEPOS, les SGEB sont essentiels et offrent l'opportunité de gestion de l'énergie au sein du bâtiment entre production et consommation locale d'énergie au moyen de stratégies de contrôle-commande comme le délestage de charges, le report de charges, etc... (Foggia, 2009). Cette gestion est nécessaire au regard du paradoxe énergétique que constitue le bâtiment : lorsque l'on regarde son potentiel d'énergie un bâtiment reçoit, en moyenne, plus d'énergie naturelle solaire que ce qu'il consomme sur une année. En effet, si l'on considère l'irradiation solaire reçue par an, et dans l'hypothèse que l'on est capable de convertir l'intégralité de l'énergie d'irradiation solaire en énergie utile (thermique ou électrique), on pourrait bénéficier, sur un panneau incliné à 35° sur le site de Grenoble, d'une énergie de 1400kWh/m²/an. [PVGIS, 2010]. En terme de captation d'énergie brute, cela suffirait, moyennant les rendements des équipements de conversion solaire (de l'ordre de 60% pour les panneaux solaires et de 10 % pour les panneaux photovoltaïques), de rendre autonome en énergie un bâtiment résidentiel simple de 140 m² respectant la RT2000 (100kWh/m²/an).

Le génie électrique, en tant que vecteur énergétique se retrouve à la fois au niveau de la production, de la consommation et de la gestion d'énergie ce qui en fait un acteur majeur du système bâtiment.

3 Le bâtiment : un secteur en redéfinition

Nous avons pu voir au travers de l'étude énergétique ainsi que par l'émergence de nouvelles composantes dans le secteur du bâtiment (tel que le génie électrique ou le domaine du contrôle-commande de système de gestion), celui-ci était amené à évoluer. Avec la vision des bâtiments comme un système énergétique, c'est un point de vue différent qui est adopté permettant dès lors de considérer les bâtiments de façon globale, écologique (c'est-à-dire en le définissant par rapport à son environnement aussi bien énergétique, naturel que fonctionnel).

Cette évolution de point de vue du bâtiment s'inscrit dans une dynamique plus ancienne de redéfinition des fonctionnalités de l'habitat et du bâtiment qui s'est faite au cours de l'Histoire.

3.1 Evolution des fonctionnalités du bâtiment

Habiter fait partie des besoins vitaux naturels humains. Cette fonction d'habiter que doit fournir un bâtiment a évolué au fur et à mesure des époques et du développement de l'Homme. Ces deux histoires sont intimement liées car si le progrès technologique amène une évolution du secteur de bâtiment, le bâtiment représente d'autre part une stabilité nécessaire pour le développement des sociétés humaines. En particulier, le logement est l'espace où se réalisent les transformations sociales en fonction du niveau de qualité de celui-ci. [HOUD, 1969]

3.1.1 Le bâtiment de ses origines jusqu'à l'époque contemporaine

Si on en revient au premier type de bâtiment, qui est l'habitation dans sa forme la plus simple que fut la grotte, les fonctionnalités premières recherchées étaient celles d'un abri: **protection contre les intempéries** puis **sécurité** vis-à-vis de l'environnement sauvage. Ces fonctionnalités de base ont ainsi permis la survie de l'espèce humaine.

L'étape suivante dans l'évolution du bâtiment fut la hutte avec l'avènement de l'agriculture où le bâtiment devint ainsi le point central de la sédentarisation. Dès lors, le bâtiment se dota, en plus d'une protection plus performante, de spécialisations en fonction de l'usage qui était réalisé par le bâtiment ce qui amena différents types d'architecture: granges pour le stockage, etc....

On peut considérer que la recherche du confort, en particulier thermique, comme motivation première, apparut avec l'avènement des *domus* de l'époque gallo-romaine [MORO, 2000]. En effet, dans ce genre d'habitation, on trouva les premiers systèmes énergétiques annexes à l'architecture contribuant au **confort thermique** comme les premiers systèmes de chauffage par vapeur d'eau (hypocauste), contribuant au **confort hygiénique** (toilettes privées), au **confort sonore** (construction d'un péristyle) et au **confort olfactif** (cheminée d'évacuation pour la cuisine).

Ensuite, au fil des siècles, on peut remarquer que les fonctionnalités du bâtiment ont finalement très peu évolué. Les techniques architecturales ont, certes, évolué au cours des siècles [MONN, 2010] ainsi que les équipements réalisant ces fonctionnalités en particulier avec l'apparition de l'électricité qui a démocratisé l'éclairage, permettant l'accès à ce confort à toute la population [DESJ, 1996]. Mais jusqu'à la moitié du 20^{ème} siècle, les exigences des occupants de bâtiments (que ce soit résidentiel ou tertiaire) et ainsi les objectifs des constructions [MORO, 2000] n'ont pas fondamentalement changé par rapport à la définition de ce qu'est un bâtiment actuel et sont globalement :

- Organisation de l'espace
- Confort thermique d'hiver et d'été
- Confort visuel (éclairage)

- Sécurité contre l'intrusion
- Confort en équipements : eau, égout, chauffage, cuisson, etc...
- Tenue dans le temps

Comme précisé précédemment, à partir des années 1970, le secteur du bâtiment a connu une évolution de nouvelle nature. La mise en place de la réglementation RT 1974 visait à rendre les bâtiments résidentiels énergétiquement plus efficaces (RT 1982 pour les bâtiments non résidentiels). Bien que la motivation de l'époque fût davantage politique et économique, les bâtiments furent affublés d'une nouvelle exigence : **l'efficacité énergétique** (par extension). Cette fonctionnalité à laquelle le bâtiment dans son ensemble doit répondre, aura ensuite comme motivation la réduction de l'impact des bâtiments sur la facture énergétique globale du pays.

Avec les bâtiments basse consommation et leurs améliorations futures, le bâtiment se retrouve au cœur d'un système global plus complexe et dès lors le nombre de fonctionnalités se multiplie. Dans ce cadre de la certification des BBC, les exigences HQE (Haute Qualité Environnementale) synthétisent bien les fonctionnalités que doivent offrir, du point de vue ingénierie thermique et qualité environnementale, les bâtiments actuels et qui sont les objectifs du maître d'œuvre [MAND, 2006] [HQE, 2010](Annexe 1).

3.1.2 Bâtiments modernes intégrant l'énergie et bâtiments intelligents

Avec les bâtiments BBC et plus particulièrement les bâtiments à énergie positive, le bâtiment s'intègre dans un schéma énergétique plus global. En effet, de par son rôle de production locale d'énergie (en particulier électrique) le bâtiment s'intègre comme un nouvel acteur du réseau électrique à la fois en tant que source et charge mais également stockage d'énergie électrique [FOGG, 2009].

Le *smart grid*, ou réseau électrique intelligent, permet en effet, grâce à des technologies de communication, d'optimiser la production et la distribution d'électricité sur un réseau électrique (figure16). Une perspective d'un tel réseau serait de se servir des bâtiments à énergie positive comme « tampon énergétique » grâce à des moyens de stockage physiques (batteries, etc..) et de pallier ainsi aux intermittences de production des sources d'énergies renouvelables décentralisés (éolien) ainsi qu'aux pics de consommation au travers de systèmes de délestage [FOGG, 2009]. Le bâtiment se rajoute ainsi une fonctionnalité à une échelle macroscopique qui est celle de **producteur d'énergie** et élément de **stockage d'énergie**.

Par extension, on pourra citer que le bâtiment s'inscrit également dans une nouvelle logique d'urbanisation grâce au couplage bâtiments / véhicules où ces derniers seraient alimentés par le surplus / la production locale d'énergie générée par les bâtiments valorisant ainsi les bâtiments comme acteurs du **mouvement urbain**.

Davantage au niveau de la recherche, le concept de bâtiment intelligent représente un aboutissement en terme de nombre de services que propose un bâtiment. Le bâtiment intelligent dispose dans la littérature de multiples définitions qui peuvent varier en fonction des cultures scientifiques [ARKI, 1997] [SO, 2001] [WIGG, 2002] mais l'objectif final reste *l'amélioration du confort et de la productivité des occupants* [WONG, 2005]. Ce concept est porté en particulier par le domaine informatique avec l'avènement des technologies de l'information et de la communication qui mettent en place des approches du bâtiment complémentaires aux points de vue énergétiques de l'ingénierie thermique. Les bâtiments intelligents sont des lieux où chaque équipement (principalement électrique) peut être commandé à distance (via télécommande ou Internet) et où les ambiances et informations sont distribuées spatialement de façon intuitive au sein du bâtiment en fonction du confort voulu. Ce sont ainsi davantage les fonctionnalités d'**assistance** à l'usage qui sont mises en avant. On

remarquera au passage que les solutions domotiques sont à l'origine des bâtiments intelligents mais n'ont pu aboutir en particulier pour des raisons techniques et fonctionnelles [CAEL, 1998].

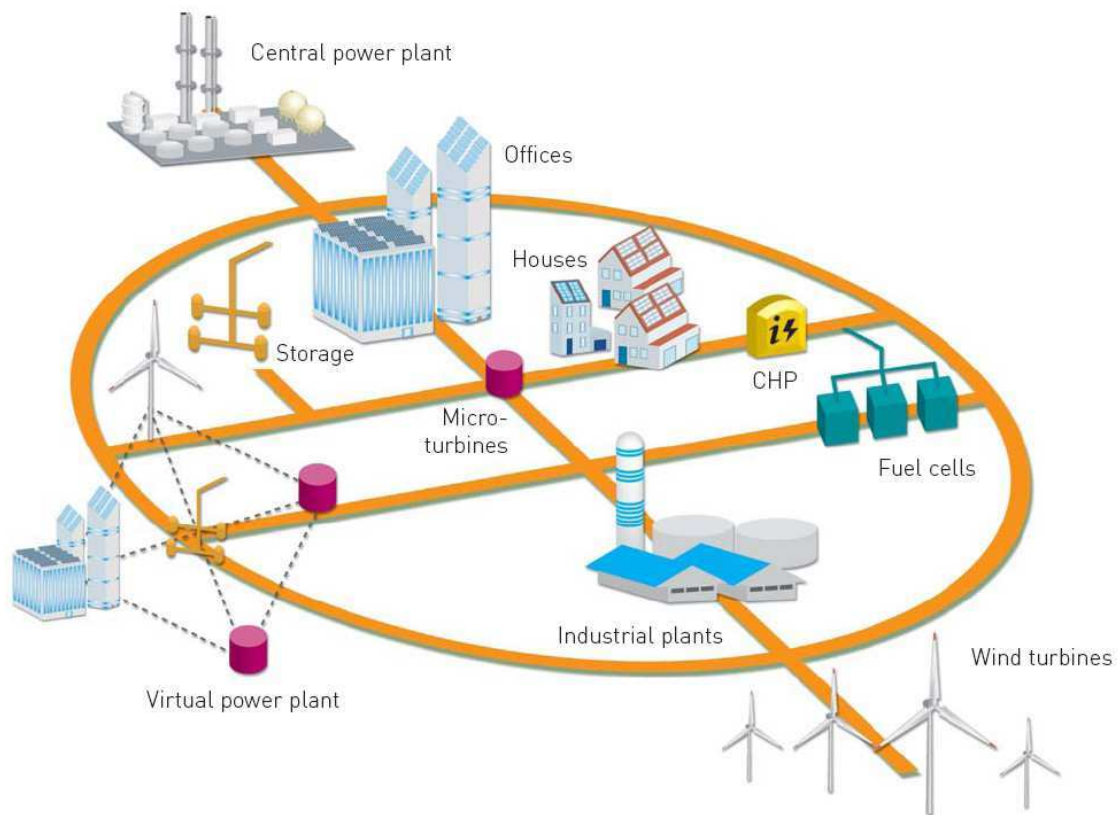


Figure 16 : Schématisation du principe des smart grids [ENERZ, 2011]

Enfin, de nombreuses recherches, notamment dans le domaine médical et de la gériatrie, mettent en œuvre des solutions domotiques au profit des personnes à mobilité réduite [CHAN, 2008]. Les services ainsi proposés sont ceux relatifs à la santé permettant, par exemple, de détecter si la personne fait un malaise en vue d'appeler les services de santé concernés. Ainsi, les fonctionnalités **d'aide à la personne** qui sont effectuées par les équipements, offrent une dimension supplémentaire au bâtiment.

3.1.3 Evolution des fonctionnalités du bâtiment en fonction des différents type de services

Nous pouvons ainsi constater, de par l'évolution du secteur du bâtiment, des équipements et des hommes y habitant, que les fonctionnalités d'un bâtiment se multiplient tout en se cumulant afin de répondre à de plus en plus d'exigences internes et externes.

Si l'on considère dans leur ensemble ces fonctionnalités, on pourrait les situer sur un axe temporel afin d'apprécier au mieux les étapes passées et à venir des services du bâtiment. Dans la figure 17, on retrouve de manière non exhaustive, la synthèse des fonctionnalités que peuvent proposer les bâtiments actuels. Pour les bâtiments qui s'inscrivent plutôt dans le domaine des perspectives (bâtiment à énergie positive et bâtiment intelligent), on peut distinguer parmi les fonctionnalités qui sont présentées précédemment (partie 3.1), deux approches qui sont complémentaires et qui sont liées par une notion qui sera la clé de voûte de notre étude : l'**usage**.

En effet, dans la perspective de bâtiment à énergie positive, le point de vue est davantage *techno-centré*, c'est-à-dire que l'on cherche à mettre en œuvre un certain nombre de techniques, d'équipements efficaces, etc... afin d'avoir un bilan énergétique positif. L'usage, en tant que variable apportée par les occupants, a tendance à n'être considéré que sous une forme standard en fonction de quelques types d'usage. Par exemple, si l'on s'en réfère à la méthode Th-CE (CSTB, 2005) qui est la méthode réglementaire française utilisée pour calculer la consommation énergétique des bâtiments, l'usage est considéré de différentes manières : comme un créneau d'occupation de X personnes durant des horaires prédéfinis, comme un acteur agissant sur la consigne de température ou agissant avec les ouvrants par exemple. Cependant, ces modèles ne prennent pas en compte la totale complexité du comportement des usagers qui peuvent réagir de différentes façons afin de parvenir à leurs besoins.

En parallèle, les bâtiments intelligents se prévalent de mettre les occupants et leur *confort* au cœur des préoccupations comme nous l'avons vu dans la définition même du concept [WONG, 2005]. Néanmoins, les préoccupations relatives à la consommation énergétique sont assez peu mises en avant car la multiplication et la combinaison des services sont fournies principalement par des équipements électriques et représentent alors une accumulation de charges électriques alourdissant, comme nous avons pu le voir auparavant, la facture énergétique totale.

Le cadre de la thèse se positionnera comme une perspective mettant en œuvre ces *deux derniers concepts de bâtiment autour de la notion d'usage du bâtiment car il est nécessaire de pouvoir aborder le bâtiment aussi bien sous sa forme « service à l'utilisateur » que sa forme « énergétique ».*

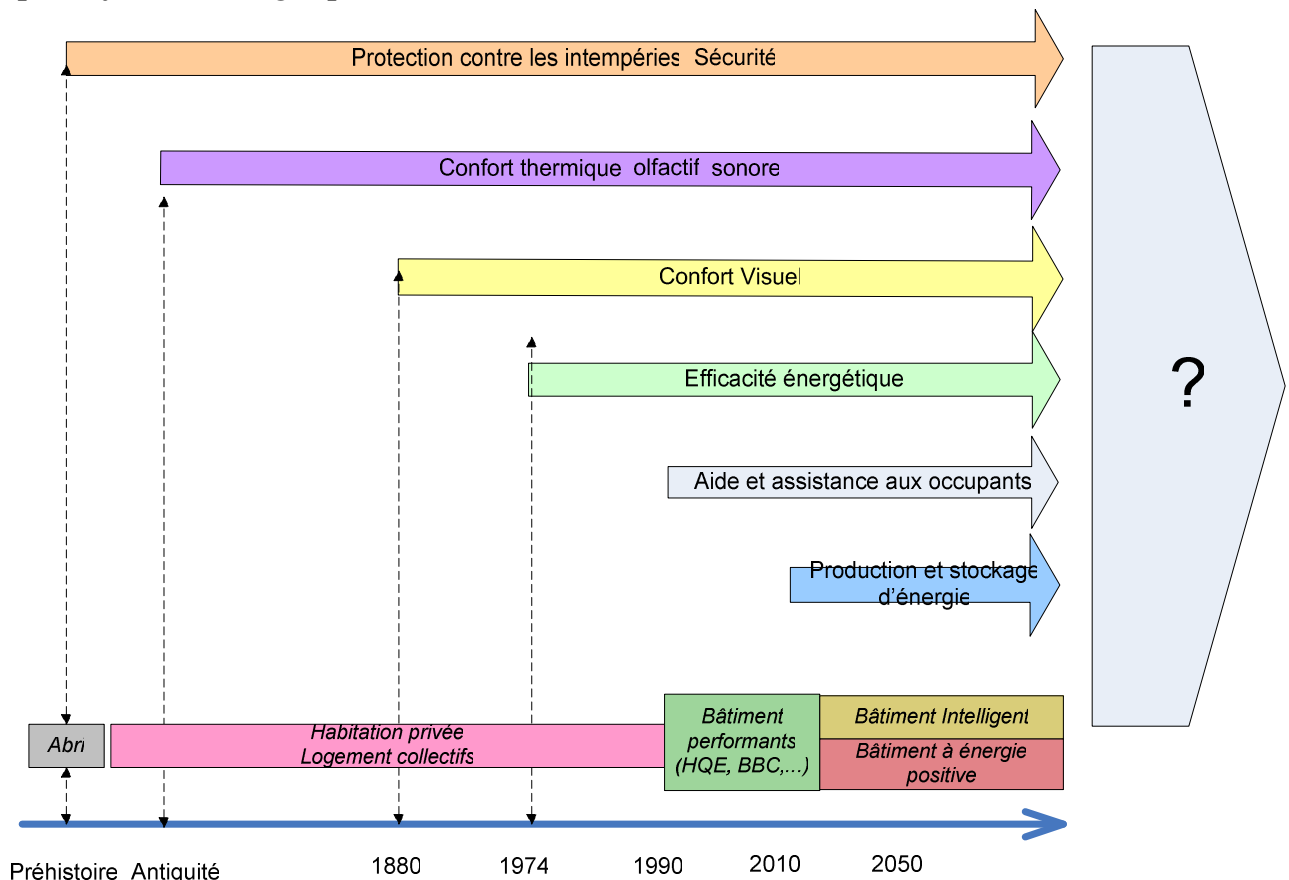


Figure 17 : Evolution des fonctionnalités du bâtiment

3.2 Vers un système bâtiment où l'occupant est acteur majeur

Comme nous avons pu le voir dans l'évolution du bâtiment et la multiplication des fonctionnalités, le bâtiment devient un système qui est à la fois multiphysique et multi-acteurs.

Multiphysique car de nombreux flux énergétiques sont présents dans un bâtiment avec les équipements techniques [HA, 2007] :

- flux thermique avec les équipements de chauffage et de refroidissement
- flux aéraulique avec les systèmes de ventilation
- flux lumineux avec l'éclairage naturel et artificiel
- flux électrique avec tous les postes de consommation et production électriques
- flux hydraulique avec l'eau sanitaire

Nous nous intéresserons par la suite aux quatre premiers flux car ce sont ceux qui rentrent en compte, directement ou indirectement, dans les bilans énergétiques des bâtiments.

L'approche classique employée lors de la conception de bâtiments s'attache à distinguer, au travers de la diversité des acteurs et leur cœur de métier, les différents flux physiques. Chaque métier opère dans son domaine de compétences spécifique (Chauffage/climatisation, électricité, architecture, etc..) avec les connaissances techniques dont leur expérience et leur savoir disposent. Cette vision segmentée du bâtiment apparaît comme techno-centrée, c'est-à-dire que chaque métier correspond à une approche « *Objet* » du bâtiment (selon l'approche évoquée par F. Wurtz [WURT, 2008]) où chaque composant du bâtiment est étudié séparément. Cette approche « *Objet* » du bâtiment peut être utile afin de pouvoir concevoir indépendamment les différents appareils, qui équipent ce bâtiment. La limite d'une telle perspective est *l'implication des acteurs humains* dans cette boucle de valeurs [WURT, 2008] dont on ne pourra se passer dans la gestion du bâtiment.

Compte tenu de la multiplicité des flux énergétiques, on peut parler alors de « système bâtiment » le bâtiment dans son intégralité. La vision systémique du bâtiment permet d'étudier le bâtiment dans son ensemble et de prendre en compte les relations étroites qui lient les différentes composantes. Ainsi, si l'on agit sur un paramètre, cela affectera un autre paramètre du système. Cette considération est nécessaire afin de pouvoir aboutir à un confort optimal des occupants et à une minimisation de la consommation énergétique du bâtiment.

3.2.1 Composition du système bâtiment

Dans notre cadre d'étude, qui correspond à celui de la gestion d'énergie au sein du bâtiment, le système bâtiment peut être considéré sous la structure suivante dans laquelle nous pourrions distinguer des éléments « actifs » ou « passifs » vis-à-vis de la contrôlabilité des paramètres de confort: température, humidité, courant d'air, qualité d'air, luminosité, odeur, bruit [AFNOR, 2000]. Chaque partie correspond d'autre part à un domaine scientifique où des modèles et outils existent permettant d'étudier indépendamment chaque élément. Ce découpage reprend alors le point de vue multi agent présent dans le domaine de la gestion énergétique où chaque composant dispose d'éléments de commande indépendants mais communicants [ABRA, 2002].

- Architecture: cela regroupe l'ensemble des éléments de construction relatifs à l'enveloppe du bâtiment comme le choix des matériaux (l'isolation en particulier), l'orientation, la compacité, le volume des pièces etc... Ces derniers éléments sont davantage « passifs » dans la gestion des flux énergétiques car une fois le bâti construit, les degrés de modification sont moindres. Seuls les ouvrants (portes et

fenêtres) et protections solaires, revêts et meubles qui sont intégrés à cette architecture sont des éléments sur lesquels les occupants ont un degré de liberté.

- Chauffage et refroidissement : cela associe les dispositifs agissant de façon directe sur le comportement thermique du système bâtiment. Cela inclut le chauffage ou la climatisation d'une ou de plusieurs pièces. De tels équipements ne sont commandables que de manière directe (thermostat) ou indirecte (programmateur) par les occupants ce qui définit leur aspect « actif ».
- Ventilation : cette catégorie représente les équipements qui agissent sur la qualité de l'air par le renouvellement de celui-ci. Ces équipements sont également « actifs » car les occupants peuvent commander la consigne.
- Eclairage : ce poste regroupe les dispositifs fournissant et contrôlant l'éclairage artificiel afin de pouvoir offrir un confort visuel adéquat aux occupants. Ceux-ci peuvent avoir accès directement au réglage ou à la simple commande de l'éclairage rendant cet élément « actif ».
- Equipements électriques spécifiques : Ce groupe d'éléments traduit en fait la notion « d'*appliance* » utilisée en anglais pour définir tous les équipements électriques qui sont en interaction directe avec les occupants et offrent des services associés à la fonction de ces équipements (nous y reviendrons dans le chapitre 5).

En considérant le bâtiment comme un système multiphysique, la gestion énergétique du bâtiment ne pourra se faire que par une mise en commun interdisciplinaire des modèles ce qui suscite des problématiques en termes d'uniformisation de langage pour échanger les données [LEBE, 2009]. Le projet SIMINTHEC (figure18) a ainsi pour vocation, dans ce cadre, de proposer une plateforme d'interopérabilité entre différents simulateurs représentant les différentes composantes du système bâtiment : partie électrique, partie thermique, partie contrôle-commande et partie occupants (dont nous reviendrons sur son intégration dans le système bâtiment dans la partie 3 du chapitre 3).

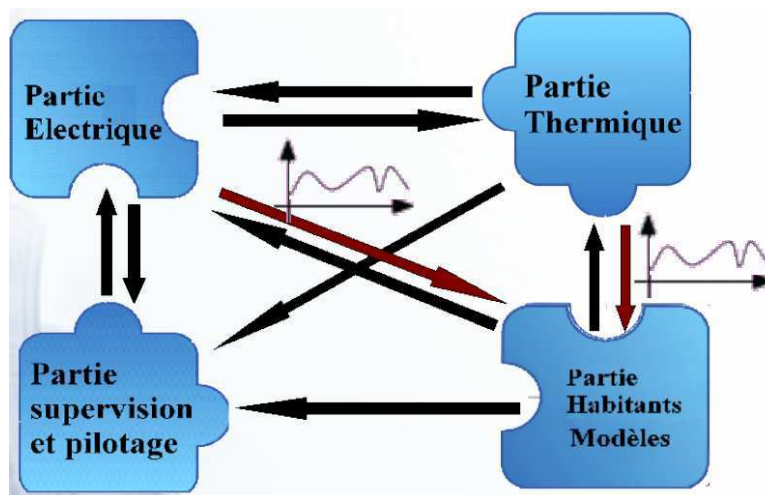


Figure 18 : SIMulation et outils logiciels INteropérables pour la gestion des énergies THermique et EleCtriques [LE, 2010]

4 L'utilisateur et ses comportements énergétiques au coeur des problématiques scientifiques du bâtiment

Nous avons présenté jusqu'à présent comment le bâtiment était un secteur énergétique majeur et comment il avait évolué en terme de redéfinition fonctionnelle. Il est apparu que, par définition même du bâtiment, l'utilisateur du système bâtiment (l'habitant) est l'acteur central et en cela il a un rôle principal dans la consommation énergétique. Aussi, la connaissance de cet acteur à part entière du système bâtiment est nécessaire pour pouvoir ensuite gérer de manière optimale l'énergie consommée tout en offrant un confort maximum à l'utilisateur.

4.1 Impact énergétique de l'usage

Comme nous avons pu le constater précédemment (figure 10), l'énergie consommée dans un bâtiment, en particulier l'énergie électrique, est fortement liée à l'usage, et donc intrinsèquement au comportement des usagers.

Lorsque l'on compare la consommation énergétique entre les prédictions énergétiques (provenant, au mieux, de simulations énergétiques) et la consommation réelle, la consommation réelle dépasse tout le temps les prévisions et ce, au-delà de la simple fonctionnalité du bâtiment (résidentiel ou tertiaire) qui est d'abriter les activités humaines [HAAS, 1998] [BRANC, 2004]. Aussi, une telle divergence de résultats est principalement due aux usages faits par les occupants [OWEN, 1988].

Cet écart peut s'élever jusqu'à plus de 50% par rapport à la consommation calculée initialement montrant ainsi d'une part la pauvreté des outils, méthodes et modèles permettant de prendre en compte l'utilisateur et d'autre part la sensibilité extrême de la consommation énergétique aux comportements des habitants.

En effet, si on prend l'exemple récent d'un retour d'expérience de la tour Elithis, bâtiment tertiaire de bureaux à énergie positive, il a été constaté à peine au bout d'un an d'exploitation, que la consommation énergétique avait été largement sous-estimée et en particulier le poste de consommation électrique (et donc l'usage) a été sous-estimé de moitié. [LENO, 2010]. On se rend alors compte que bien que les charges électriques soient individuellement moins consommatrices d'énergie grâce à une recherche d'efficacité énergétique, elles sont finalement, à l'usage, mal conçues / mal dimensionnées rendant le bilan énergétique plus négatif que prévu.

L'utilisateur a donc une place centrale dans le concept même d'habitat et ainsi lors de son exploitation. Comme le souligne une étude sur l'impact « fantôme » des comportements des occupants [MASA, 2010], il existe dans la littérature peu d'études s'attachant au problème même de la dynamique de consommation d'énergie, en particulier en ce qui concerne l'électricité. Cette dynamique sera bien entendu différente entre les bâtiments tertiaires (dont les horaires de fonctionnements et les charges électriques peuvent être davantage connus) et les bâtiments résidentiels (où chaque individu ayant un rapport particulier aux objets électriques consommera selon ses propres habitudes et désirs). Le bâtiment étant un domaine technologique historiquement lié à la thermique de l'enveloppe, l'occupant a été ainsi étudié soit en terme de système réagissant en fonction du confort thermique [NICO, 2002] soit comme un être répondant à différents stimuli (chaleur, prix de l'énergie [BEER, 2007], placement d'interrupteurs d'éclairage [LINDEL, 2006]).

Une des raisons de la difficulté d'étude de l'être humain est liée à la complexité de celui-ci tant ses actes peuvent être versatiles. Certaines des causes de cette variabilité des usages ont été étudiées afin de distinguer les principaux paramètres influents. On y retrouve

ainsi que l'usage varie en fonction de la catégorie socioprofessionnelle (âge, genre, revenu, niveau d'études) [LINDEN,2006] mais aussi bien de paramètres plus personnels, comme la sensibilité environnementale, qui peuvent être source de fluctuations de consommation mais aussi de potentiel d'économies d'énergie [VRIN, 2007].

Un des phénomènes illustrant parfaitement la liaison entre les comportements humains et la consommation énergétique est le comportement d'utilisation ou de non-utilisation des veilles par exemple. En effet, en fonction de l'éducation, certaines personnes éteindront ces charges électriques non nécessaires alors que d'autres trouveront cela insignifiant et laisseront ces veilles. Pourtant, celles-ci constituent un potentiel d'énergie important représentant entre 8 et 10% de la consommation électrique d'un bâtiment résidentiel [LOPE, 2005].

Enfin, on peut estimer que la consommation énergétique des bâtiments résidentiels peut être réduite de 10 à 30% rien que par la mise en place d'incitations et sensibilisations telles que le simple affichage de la consommation [MULL, 1998] [DARB, 2006]. Cela montre qu'au final, il y a une grande part de variabilité de la consommation liée aux besoins et aux volontés d'action des habitants.

4.1.1 L'usage dans les bâtiments tertiaires et résidentiels

La nature et les caractéristiques de l'usage dans les bâtiments tertiaires sont sensiblement différentes que celles associées à l'usage résidentiel. Ce que l'on peut constater en analysant la nature des rapports des occupants aux usages énergétiques, en particulier électriques, c'est qu'il y a un facteur de *déresponsabilisation* de la consommation des équipements qui semble important. En effet, dans les habitats résidentiels, l'usager / consommateur est également le payeur de l'énergie consommée lui imposant alors une responsabilité financière. Cet engagement vis-à-vis du portefeuille n'est pas présent dans les bâtiments collectifs où l'on s'appuie sur la « société qui paye » (dynamiques sociologiques de groupe) et laissant alors libre cours à des comportements énergétiques excessifs (peu d'extinction de veilles, etc..).

Parmi les facteurs d'usage influençant grandement la consommation énergétique de bâtiments tertiaires, on trouve l'occupation des bâtiments et des postes de travail ainsi que la gestion de l'énergie durant ces périodes. En effet, une étude visant l'occupation effective des postes montre que sur un échantillon de 48 bureaux de 3 bâtiments différents [MADH, 2008], les occupants pouvaient passer plus de 50% de leur temps en dehors de leur poste de travail. Si l'on considère les extinctions de lumière et d'ordinateurs associés (ou du moins la mise en veille selon les cas) qui ne sont pas toujours réalisées durant ces périodes d'activité, le potentiel d'énergie serait ainsi conséquent car on pourrait réduire de moitié la consommation électrique d'un bâtiment par une meilleure gestion de la consommation [TANI, 2008]. Une autre étude [MASO, 2010] montre d'autre part que plus de 50% de l'énergie consommée l'est en dehors des périodes d'ouverture des locaux, et si l'on ne s'intéresse aux week-ends, cela représente entre 19 et 28% de la consommation énergétique où normalement il n'y a pas d'activité dans le bâtiment.

Ces consommations supplémentaires en dehors de l'usage effectif du bâtiment montrent alors l'importance du comportement humain sur la consommation énergétique et surtout du gaspillage d'énergie lié aux mauvais usages.

Dans les bâtiments résidentiels, la variabilité de l'usage est encore plus grande car le comportement individuel des habitants va influencer le mode d'usage des charges énergétiques du bâtiment. Alors que dans les bâtiments tertiaires, les modes de fonctionnements des charges énergétiques correspondent à un point satisfaisant la majorité des occupants, dans le résidentiel, les desiderata des individus sont davantage exprimés. Ainsi, chaque habitant peut avoir et imposer sa propre notion de confort ainsi qu'utiliser les charges

électriques à sa convenance en fonction de son vécu, des liens sociaux avec les autres membres du foyer, sa perception de l'objet,... [DESJ, 1996]

4.2 Modèles de prise en compte de l'utilisateur

Comme nous avons pu le voir, le bâtiment se retrouve être un acteur clé et central de plusieurs domaines scientifiques. De par l'histoire des fonctionnalités, nous avons pu voir que ce sont davantage les métiers de l'architecture et de la thermique qui se sont tout d'abord intéressés à la problématique des usagers. Ce n'est que récemment avec l'arrivée de nouveaux apports comme le génie mécanique, le génie électrique ou le contrôle-commande dans le processus de conception de bâtiment neuf [SIMB, 2009] qu'interviennent de nouvelles approches et modèles associés.

Dans le domaine thermique, où ont cours de nombreux travaux sur l'efficacité énergétique des bâtiments, la plupart des travaux de recherche vont dans le sens d'une meilleure efficacité des composants thermiques, des enveloppes [CHLE, 2008] [THIER, 2008a]. Dans ce cadre-là, et comme cela l'est en particulier traduit dans les outils de simulation thermique dynamique tels que COMFIE Pleiades [PEUP, 1990] ou Energy plus [CRAW, 2001], l'habitant est considéré comme une source de chaleur thermique occupant les locaux [THIER, 2008a] qui dépend des vêtements portés [HAVE, 2002], de l'activité des personnes [PARS, 2002] contribuant aux apports thermiques internes. Néanmoins dans ce cadre-là, la définition de l'activité se limite à des classes d'actions comme celui de dormir, manger, être assis, travailler,...

4.2.1 Modèles stochastiques

L'occupation d'un bâtiment, notamment en tant que taux d'occupation au cours du temps, fait l'objet de nombreuses études permettant de modéliser cette première forme d'interaction homme/bâtiment. En dehors des modèles standard promulgués par la réglementation (méthode Th-CE [CSTB, 2006]), on peut déterminer des lois de probabilité d'occupation des locaux ou des pièces. Ainsi, des modèles stochastiques de l'occupation de bureau ont été construits à partir de données empiriques et de paramètres humains (catégorie socioprofessionnelle) permettant ainsi d'avoir un niveau plus fin du taux d'occupation (en faisant apparaître les différentes pauses relatives à l'activité des personnes) [PAGE,2007] .

De manière connexe à ces études d'occupation de pièce se trouvent les modélisations des usagers par rapport à leurs actions sur les ouvrants tels que les portes et fenêtres, en fonction de la température, de la météorologie, et d'autres données du bâtiment [PAGE, 2008]. Un tel modèle stochastique permet de définir des densités de probabilité d'ouverture en fonction de différents paramètres d'usage afin de pouvoir être intégré ensuite dans une simulation thermique du bâtiment.

De même dans le domaine de l'éclairage, des modèles stochastiques semblables ont été élaborés [LINDEL, 2006] à partir d'un ensemble de mesures et questionnaires au sein d'un bâtiment en particulier sur l'interaction des usagers sur les systèmes de commande de l'éclairage afin de déterminer des profils temporels d'usages des équipements.

Cette modélisation de l'interaction des usagers avec des systèmes électriques tels que les systèmes d'éclairage, fait également l'objet de travaux visant à reconstituer les dynamiques d'allumage et d'extinction au travers de chaînes de Markov par exemple [WIDE,2009] ou des réseaux de neurones [AYDI, 2002].

La définition de probabilité d'utilisation d'un équipement peut ensuite être employée afin de générer des courbes de charges électriques d'équipements ou de bâtiments [CLAR, 2004]. Ces courbes de charges issues de méthode « bottom up » reprennent des modèles d'usage basés sur des questionnaires afin d'en faire des outils pour les gestionnaires de réseaux [CAPA, 1994]. Une telle méthodologie mixte entre questionnaires (données de

sciences humaines) et densité de probabilité d'utilisation d'un équipement (domaine de sciences mathématiques) permet par là même de pouvoir proposer une approche sociotechnique des usages.

On remarque que dans ces derniers cas, c'est davantage l'approche stochastique qui a été privilégiée compte tenu de la nature aléatoire de ces usages. L'inconvénient de ces approches stochastiques est la robustesse du modèle vis-à-vis d'autres usages car il est difficile et présomptueux de définir un modèle unique et final (approche ontologique) de l'usage d'un bâtiment ou d'un équipement. La reproductibilité du modèle dépendra des différents paramètres inhérents à l'usage (culture, personnalité, etc..) qui nécessitera que l'on aborde la définition des modèles d'une autre manière (nous verrons comment au travers de l'approche constructiviste dans la partie 2 chapitre 3).

4.2.2 Modèles déterministes

Les modèles déterministes cherchent à trouver des règles générales du comportement de l'humain afin de pouvoir le modéliser dans un bâtiment donné. Parmi les approches déterministes, on peut retrouver les approches visant à définir des classes d'usager en regroupant sous forme de clusters les différentes dynamiques de consommation en fonction de profils types d'usagers [BOUR, 2006].

Le regroupement de profils d'usage types aide à caractériser la dynamique de consommation d'un équipement (tel que le photocopieur [CIRI, 2009]) et en fonction des modes de veille d'un équipement, on peut déterminer les profils temporels d'usage (comme la fréquence d'occupation, des mises en veilles, etc.. qui sont d'autant d'informations sur l'usage).

L'utilisation d'un langage de description comportementale fait partie de l'approche déterministe afin de simuler le comportement d'usager virtuel par rapport à des scénarii d'usage. Un tel outil permet de décrire finement les comportements, notamment en terme de réactivité des usagers. Cette élaboration de personnages virtuels propose un principe de conception et d'évolution des personnages qui permet de faire ressortir, au travers de la simulation via des outils tel que Brahms, des événements qui pourront ensuite être utilisés pour de la co-simulation avec différents autres modèles [LE, 2010]. Un tel procédé permet ainsi d'obtenir un modèle réactif de l'occupant par rapport au confort ambiant modélisable par ailleurs. [LE, 2010]

Conclusion et objectifs de la thèse

Nous avons pu voir dans ce chapitre que le bâtiment constituait un secteur énergétique prépondérant dans les contextes environnementaux, économiques et sociétaux actuels. L'efficacité énergétique des bâtiments apparaît comme un moyen incontournable pour aller vers des bâtiments plus économes. Nous avons pu voir que pour obtenir un tel objectif, au travers de BBC ou BEPOS, de nouveaux domaines dans la conception et la gestion énergétique entraient en jeu, en particulier le génie électrique. Nous avons montré également que l'importance croissante de l'électricité dans les bâtiments n'était pas anodine et découlait d'une évolution historique des fonctionnalités du bâtiment qui vont vers des bâtiments de moins en moins énergivores mais également offrant de plus en plus de confort à l'usager. Nous avons pu insister sur le fait que l'usager est finalement la clé de voûte du système bâtiment car c'est lui qui conditionne la consommation énergétique de celui-ci.

L'objet de cette thèse se situera sur les quatre aspects présentés précédemment. On s'intéressera donc en particulier à mieux comprendre l'usage dans les bâtiments et voir comment mieux intégrer l'usage de l'énergie, en particulier électrique, dans la conception et l'exploitation des bâtiments BBC.

Pour cela, on s'appuiera dans un premier temps sur un retour d'expérience dans un bâtiment BBC tertiaire (chapitre 2) qui permettra de mettre en évidence un concept d'efficacité d'usage (chapitre 3). Nous illustrerons et appliquerons ensuite celui-ci lors des phases de conception (chapitre 4) et exploitation (chapitre 5) du bâtiment et achèverons sur un exemple d'intégration dans un SGEB. Les exemples employés dans les chapitres 4 et 5 concernent respectivement des bâtiments tertiaires (conception de systèmes énergétique : chapitre 4) et résidentiels (exploitation de charges électrique : chapitre 5) mais nous verrons que la méthodologie reste la même dans les deux cas et peut être aussi bien utilisée pour des bâtiments tertiaires que résidentiels.

Objectifs de la thèse:

Nous allons tâcher de montrer que le fait d'intégrer davantage l'usage dans les systèmes bâtiments, que ce soit en phase de conception ou d'exploitation, permet à la fois d'économiser de l'énergie mais également augmente la satisfaction des usagers aussi bien en terme d'utilisation que de confort des habitants. Nous allons également proposer des outils et des méthodes permettant de quantifier l'impact énergétique des usages et en particulier de mauvais usages afin d'aboutir à des outils d'aide à la décision lors de la conception de systèmes bâtiment et de l'aide à la sobriété énergétique en exploitation.

De nouvelles problématiques énergétiques dans les BBC : Application à la plateforme PREDIS MHI

Comme nous avons pu le voir dans le chapitre 1, le domaine du bâtiment est au cœur de préoccupations socio-techniques ainsi que des problématiques énergétiques, en particulier la consommation d'énergie électrique. La question de l'usage de l'énergie se positionne dès lors comme une thématique centrale des problématiques scientifiques liées au secteur du bâtiment car selon ce paramètre on aura un bâtiment plus ou moins performant en terme de consommation d'énergie et de confort. Dans ce cadre-là, une plateforme a été conçue (la plateforme Usage PREDIS MHI) afin d'étudier les comportements d'usage de l'énergie électrique dans les bâtiments de type tertiaire. Nous verrons dès les phases de conception quelles ont été les préoccupations énergétiques et d'usage prises en compte dans ce projet (partie 1). Puis au travers du retour d'expérience de l'exploitation de la plateforme sur une année complète, nous verrons émerger un certain nombre de points saillants liés à l'usage, que ce soit du point de vue de l'utilisateur en tant qu'habitant (partie 2.1) que du point de vue exploitant (partie 2.2). Ces deux dimensions que nous retrouverons tout au long du retour d'expérience nous amèneront à nous poser un ensemble de questions qui s'avèrent pour la plupart comme étant autant de verrous scientifiques où l'on tient compte, en effet, de l'acteur humain (partie 3).

1 Objectifs et présentation de la Plateforme PREDIS MHI

1.1 Contexte de la recherche scientifique du secteur du bâtiment en tant qu'acteur du smart grid

Nous avons vu qu'avec l'évolution des fonctionnalités multiples et à venir des bâtiments, celles-ci inscrivent le domaine du bâtiment dans de nouveaux axes de recherche mettant en jeu différents domaines scientifiques autour de nouvelles problématiques nécessitant une transversalité des compétences.

Dans ce cadre, on peut identifier de nombreux travaux et programmes de recherche (en particulier le programme français PREBAT [PREBAT, 2004]) portant sur différents axes de recherche répondant aux verrous scientifiques énergétiques actuels du bâtiment:

- Développement de fonctions métiers sur infrastructure des Technologies de l'Information et de Communication (TIC): l'objectif est de développer des stratégies de gestion d'énergie visant l'optimisation énergétique et des services en mettant en place des TIC. De tels systèmes de gestion auront une infrastructure auto-configurable en fonction de l'usage et du bâtiment dans lesquels ils seront implantés.

- Développement d'outils d'évaluation et de validation: cela regroupe les études visant à diagnostiquer et analyser la performance énergétique des bâtiments en développant des modèles de bâtiment, des modèles d'approvisionnement énergétique ainsi que des simulateurs de systèmes bâtiments intégrant leurs occupants [SIMB, 2008].

- Développement d'Interfaces Homme-Machine dédiées: il s'agit de créer des Interfaces Hommes-Machines (IHM) adaptées aux fonctions métiers intégrées dans la conception et l'exploitation de bâtiment.

- Etude de l'acceptabilité par les occupants et sociétale: cela regroupe l'approche sciences humaines de l'usage en intégrant l'acceptabilité des solutions de gestion proposées ainsi que la construction de modèles d'usage intégrant une approche anthropologique afin de prendre en compte les dynamiques micro-sociologiques des usages [EMEL, 2011].

- Analyse des usages et de leur évolution dans les filières: cela consiste au suivi de l'évolution des comportements et usages afin de spécifier de nouveaux outils au cours du cycle de vie du bâtiment (conception, construction, exploitation, maintenance).

- Etude de nouveaux modèles économiques: le bâtiment s'inscrit également comme un acteur économique particulier de par sa place parmi le nœud énergétique redéfinissant un certain nombre de modèles économiques.

- Intégration de nouveaux équipements (production, stockage, consommation): comme nous l'avons vu au travers des BEPOS, le bâtiment est un foyer d'innovation en termes de composants et systèmes thermiques, de nouveaux équipements mécatroniques ainsi que d'équipements de production et de stockage d'énergie.

- Etude de la distribution électrique et de ses interfaces: cette partie intègre le développement de réseaux électriques internes au bâtiment comme par exemple une alimentation continue pour éclairage à LED et production photovoltaïque

- Adaptation de technologies de capteurs et d'actionneurs au contexte bâtiment : dans le cas où les usages vont conditionner les dynamiques de consommation du bâtiment, une redéfinition des actionneurs en interface direct avec les usages devra être réalisée.

1.2 Positionnement de la plateforme PREDIS MHI

Dans ce large scope d'axes de recherche, il a été décidé de construire la plateforme Monitoring et Habitat Intelligent (MHI) afin de s'inscrire sur plusieurs de ces axes. En

premier lieu, la plateforme MHI fait tout d'abord partie de la plateforme PREDIS de l'ENSE3 et gérée par le G2ELAB et hérite ainsi d'une certaine approche de l'énergie électrique. En effet, la plateforme PREDIS (figure 19) a pour vocation de mettre à la disposition de tous les acteurs de l'énergie un outil de formation et de recherche s'appuyant sur des démonstrateurs technologiques développés grâce à une stratégie d'alliances et de partenariats auprès des industriels et des collectivités territoriales. La plateforme PREDIS travaille sur le sujet de l'énergie électrique et des réseaux visant ainsi à améliorer, à l'échelle d'un bâtiment ou d'un territoire, l'efficacité et la sûreté des réseaux de distribution d'énergie en tenant compte de la diversité des sources et de la capacité des usagers à revendre leur production d'électricité.

Dans le contexte de recherche du domaine du bâtiment présenté précédemment, la plateforme PREDIS MHI se situe alors sur certains de ces axes (figure 20) et a ainsi pour vocation générale **l'étude de l'usage électrique au sein d'un bâtiment de type tertiaire**. Le choix d'une focalisation sur le tertiaire provient de deux attributs: d'une part l'usage dans le tertiaire est plus globalisé que dans le résidentiel et aussi plus facilement modélisable et d'autre part, cela permet de tester plus facilement des algorithmes de gestion énergétique et les réactions sur les occupants dans ce genre de plateforme que chez des particuliers. La plateforme PREDIS MHI permet en effet d'explorer l'aspect dynamique de consommation électrique des bâtiments tertiaire ses impacts sur l'infrastructure globale de réseaux électriques. Pour cela, les recherches actuelles menées sur la plateforme MHI visent à étudier l'usage de l'énergie par les habitants : quels sont les différents usages ainsi que leur impact énergétique ? Quelle part d'énergie peut-on gagner en connaissant mieux l'usage ? Comment mieux gérer l'énergie ?

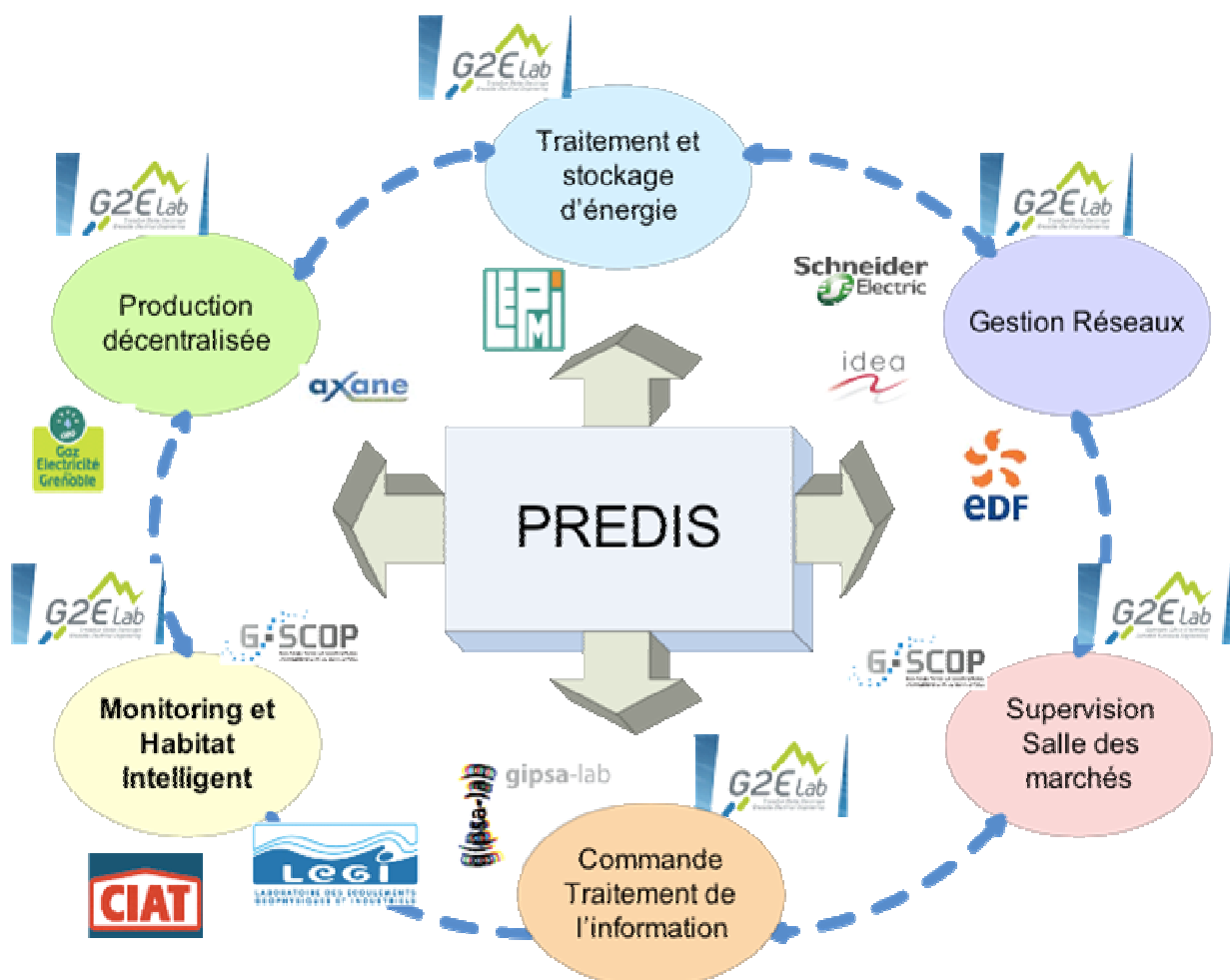


Figure 19 : Présentation des partenariats entre entreprises et laboratoires de recherche dans PREDIS

L'objectif de la plateforme MHI est alors double :

- *comprendre l'usage électrique d'un bâtiment tertiaire (et à terme par extension les bâtiments résidentiels) pour mieux envisager les actions sur le secteur bâtiment (résidentiel et tertiaire) qui représente 65% de la consommation du réseau électrique en France aujourd'hui*
- *concevoir des gestionnaires énergétiques du bâtiment performant et permettant d'inscrire cette plateforme dans un smart-grid avec des réponses aux besoins de « demand response » (exemple du projet G-HomeTech que nous développerons plus tard)*

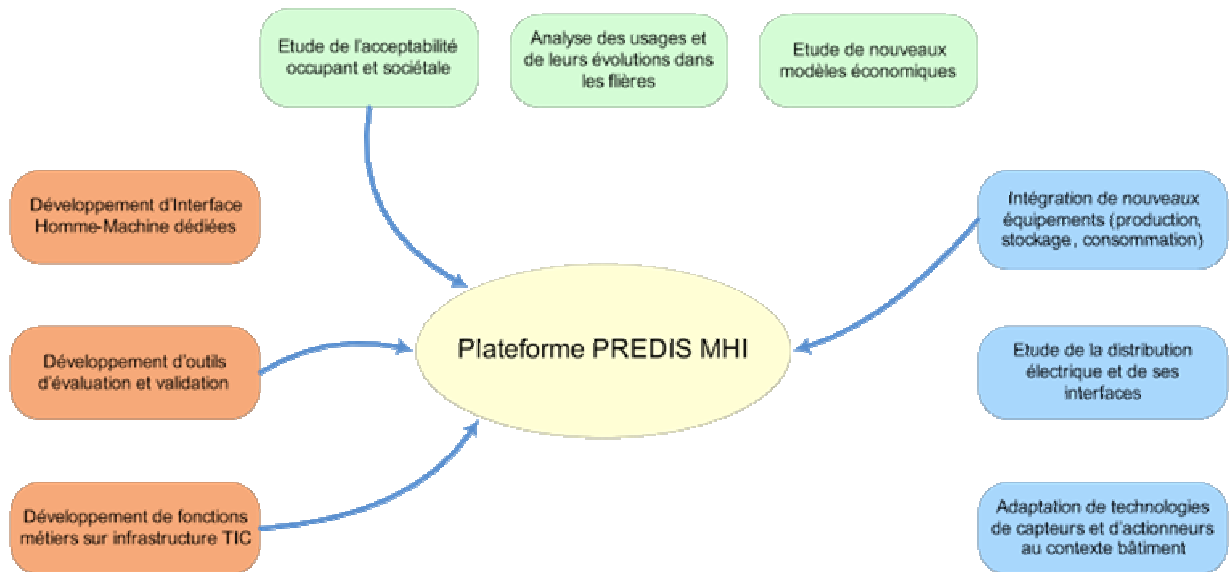


Figure 20 : Positionnement de la Plateforme PREDIS MHI sur les axes de recherche du domaine énergétique du bâtiment

1.3 Description de la Plateforme PREDIS MHI

La plateforme PREDIS MHI s'inscrivant dans la démarche de futurs bâtiments tertiaires a été conçue de façon à être énergétiquement performante. Elle a pour cela bénéficié d'une démarche de conception HQE (Voir Annexe 1). Compte tenu de sa configuration architecturale particulière (bâtiment dans le bâtiment qui sera présentée par la suite et dans l'annexe 1) la plateforme MHI n'a pas pour ambition de pouvoir valider un modèle particulier car ce type d'architecture, qui a été subie, n'est pas représentatif du parc immobilier français. Aussi, les résultats numériques de consommations seront pris ici en relatif et non en absolu par rapport aux chiffrages indiqués dans la RT car l'architecture spécifique de la plateforme PREDIS MHI est difficilement comparable avec les bâtiments plus classiques typés RT2005.

1.3.1 Principaux objectifs quantitatifs de la plateforme PREDIS MHI.

Lors de la phase de conception du bâtiment, un certain nombre d'objectifs chiffrés ont été annoncés afin d'atteindre la performance énergétique ainsi qu'un confort optimal des habitants. Nous référencerons ici succinctement les principales données ayant un lien avec la consommation énergétique et l'usage :

- La consommation énergétique du poste de chauffage pour toute la plateforme PREDIS MHI doit être inférieure de **50kWhEP/m²/an**. Aucune exigence n'existe pour les autres postes énergétiques.

- Un taux de surchauffe (correspondant au nombre d'heures d'occupation lorsque la température est supérieure à 28°C) maximal correspondant à 42 heures annuelles cumulées sur la Plateforme MHI. Ce calcul effectué par le Bureau d'études Fluides a mené celui-ci à justifier l'installation d'un système de rafraîchissement du bâtiment par freecooling.

1.3.2 Description de la plateforme MHI : Architecture

La plateforme PREDIS MHI sur laquelle se portera l'ensemble de l'étude est un ensemble de deux salles situées au sein du bâtiment PREDIS Habitat tertiaire qui est un « bâtiment dans le bâtiment » entièrement rénové dans le but d'étudier l'usage énergétique dans les bâtiments tertiaires. Cette architecture spécifique tient du fait que, pour des raisons architecturales, il n'a pas été possible de détruire le bout de bâtiment concerné afin de reconstruire un bâtiment performant. Aussi, il a été gardé la « coque » extérieure du bâtiment car la façade (sud en particulier) était classée au patrimoine.

On a un bâtiment dans le bâtiment car les parois externes de ces lieux nouveaux ne donnent pas sur l'extérieur mais sur un grand espace vide sous shed (c'est-à-dire dans la « coque externe » existante) (cf. schéma figure 21) Ce shed est donc un espace vide « tampon », non chauffé mais dont un système de ventilation dé-stratifie l'air. Cette configuration d'être isolée des conditions extérieures représente une opportunité pour la plateforme Predis MHI afin de pouvoir étudier exclusivement l'impact énergétique des charges internes.

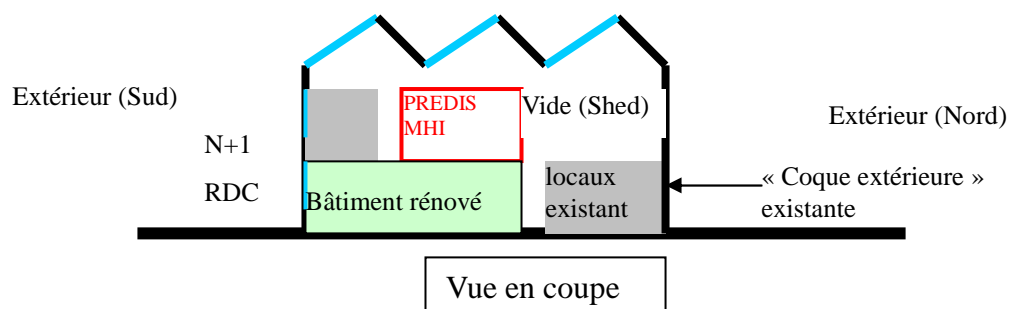


Figure 21 : Schéma en coupe du bâtiment rénové (Habitat tertiaire) dans lequel se situe la plateforme PREDIS MHI



Image 1 : Espace Bureau



Image 2 : Salle Informatique

Ce bâtiment habitat tertiaire qui est rénové de façon performante, est lui-même composé de deux étages : la plateforme Recherche au Rez-de-chaussée et la plateforme MHI au 1^{er} étage. La plateforme MHI est composée d'une salle Informatique en accès libre pour des étudiants (usage représentatif d'un usage de type Enseignement) et d'un Espace Bureau qui est un ensemble de bureaux open space pour doctorants (usage représentatif de type Bureau) (Images 1 et 2), faisant de la plateforme PREDIS MHI un modèle d'usage des bâtiments tertiaire de type Bureaux et Enseignement assez représentatif.

1.3.3 Equipements énergétiques efficaces

Ces salles sont équipées de systèmes énergétiques performants afin d'assurer les fonctionnalités standards. Ainsi, pour le chauffage et la ventilation, une VMC Double Flux est installée et pour l'éclairage artificiel, des tubes néons basse consommation ont été choisis avec un système de dimming (système automatique tenant compte de la luminosité naturelle afin d'adapter la luminosité artificielle à un niveau complémentaire).

En termes de charges électriques, des ordinateurs portables ont été installés dans la salle Informatique car consommant moins d'énergie (pour plus de détails, voir annexe 12)

1.3.4 Gestion technique centralisée et Instrumentation

L'ensemble des équipements est relié à un système de Gestion Technique Centralisée (GTC) qui a pour objet de centraliser les mesures et de commander ensuite les différents équipements connectés (Image 3).

La plateforme PREDIS MHI dispose ainsi d'une instrumentation particulière pour étudier l'usage énergétique : capteurs de température sur chaque paroi, débit-mètres pour la mesure des vitesses d'air du système de ventilation, compteurs électriques pour la consommation de l'éclairage et des charges électriques.

Cette GTC permet à l'exploitant du bâtiment de surveiller le bon fonctionnement du bâtiment (notamment en surveillant la consommation énergétique des équipements) et de pouvoir agir dessus à distance au cas où il y ait des problèmes de fonctionnement (pour plus de détails, voir annexe 12).

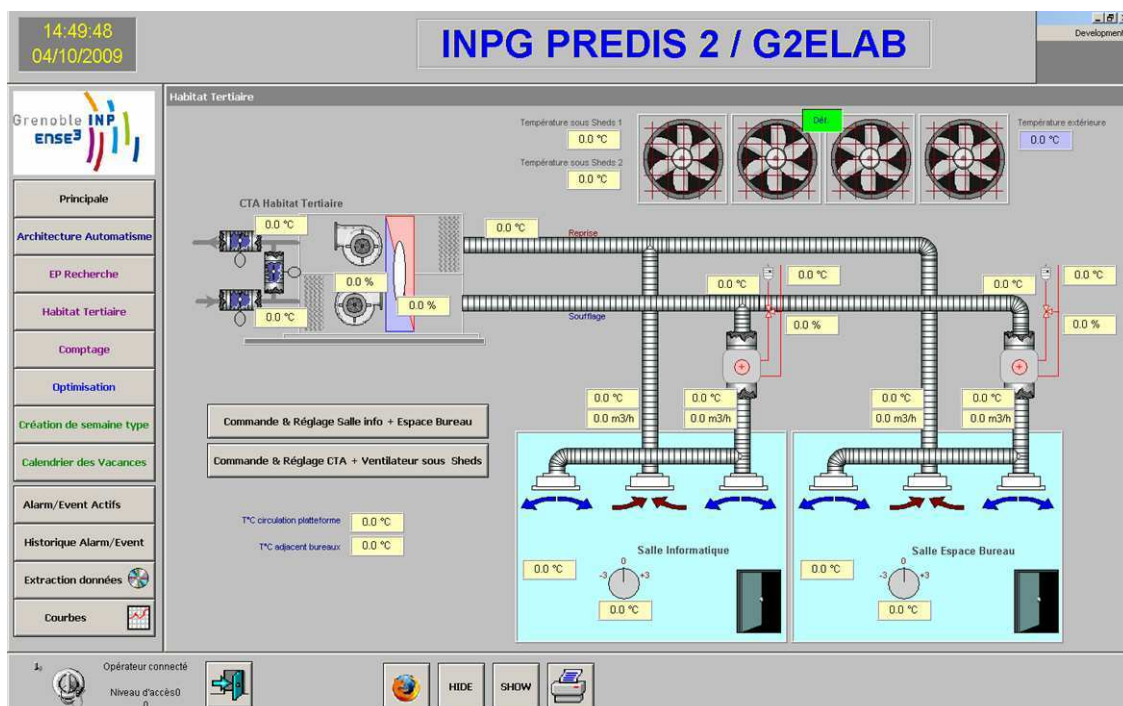


Image 3 : Impression d'écran du système de monitoring de la GTC

2 Retour d'expérience de la plateforme MHI

Le bâtiment a été livré le 1er septembre 2009, date à laquelle le rez-de-chaussée a pu commencer à être opérationnel alors que le 1er étage, la plateforme PREDIS MHI, n'a pu être opérationnel qu'à partir de fin avril 2010.

On examinera le retour d'expérience sous deux points de vue correspondant aux deux principales familles d'acteurs du bâtiment:

- celui des usagers / occupants des salles du bâtiment rénové qui sont les occupants qui vivent dans les locaux concernés. Ils agissent avec les systèmes énergétiques de manière « directe » par différentes IHM. L'utilisateur en tant qu'occupant, en particulier dans les bâtiments tertiaires, se caractérise par ses principaux objectifs qui sont d'obtenir, comme nous le verrons ensuite, ***un bon niveau de confort et d'agir facilement sur son environnement en cas d'inconfort.***

- celui de l'opérateur/ exploitant du bâtiment qui est un usager du système bâtiment. En effet, on peut considérer que l'exploitant agit, utilise de manière « indirecte » le bâtiment au travers des systèmes de commande des équipements telle que la GTC. Dans notre cas, il y a deux types d'acteurs utilisant la GTC avec différents objectifs mais que nous engloberons sous le terme d'exploitant :

- l'opérateur du bâtiment en tant que tel qui réalise la maintenance, d'éventuels changements de commande et contrôle la consommation énergétique des systèmes énergétiques dont l'objectif est donc que le ***bâtiment fonctionne correctement*** (du point de vue fonctionnel)
- l'équipe de recherche travaillant sur la thématique de l'énergie dans le bâtiment dont les objectifs sont ***l'étude de la réduction de la consommation énergétique*** ainsi que l'élaboration de contrôle-commande optimale.

2.1 Problématiques relatives à l'usage : point de vue usager

Comme nous l'avons évoqué précédemment (partie 4, chapitre 1) , on a pu se rendre compte que l'acteur humain, en tant qu'occupant, pouvait avoir des comportements d'usage influençant grandement la consommation énergétique du bâtiment. L'objectif que l'on se donne est d'analyser les usages dans le bâtiment ayant un impact énergétique, en particulier les « mauvais usages » liés à l'inconfort et d'en comprendre les causes et conséquences (énergétiques). Cette étude de l'usage de l'énergie nécessite que l'on puisse connaître le type d'actions et de réactions effectués ainsi que les ressentis physiques des usagers.

Un des moyens pour obtenir ces données est d'effectuer une enquête sociologique qui permet de recueillir, par le dialogue direct avec les occupants, le descriptif de leurs usages.

Le travail d'enquête devra porter à la fois sur les ***ressentis des occupants*** (afin de diagnostiquer s'il y a des situations d'inconfort ou pas), sur les ***réactions à l'inconfort*** ainsi qu'éventuellement les ***avis des occupants sur les systèmes énergétiques*** (ce qui permet de comprendre les réactions). Ce dernier point permet d'avoir un retour des usagers concernant les mesures supposées efficaces mises en place dans le cadre de la procédure HQE qui n'auraient pas atteint leurs objectifs (objectifs de confort et objectifs de réduction de consommation énergétique). Dans le cas d'application de la Plateforme PREDIS, l'enquête que nous avons effectuée a concerné en particulier les occupants de l'espace Bureau, plus facilement mobilisables (avec un profil socioprofessionnel de type « étudiants/jeunes chercheurs »).

Cette enquête a permis d'évaluer les attentes des usagers en terme de confort et de connaître les différents usages de la plateforme qui peuvent être énergivores et qui sont dus à un comportement particulier d'utilisateur (souvent lié à un inconfort)

On notera que compte tenu de la spécificité du bâtiment et des usagers (doctorant travaillant dans le génie électrique), les résultats présentés ici n'ont pas comme valeur d'être un modèle tout à fait généralisable et quantifiable mais nous nous attacherons plus particulièrement à la méthodologie proposée ainsi que sur la forme qualitative des résultats.

2.1.1 Méthode d'enquête exploratoire in situ

La démarche initiée afin de recueillir les données de retour d'expérience s'inscrit dans une démarche de recherche de type sociologique empirique. Bien que l'on n'ait pas eu à disposition des outils d'analyse sociologiques adéquats, nous avons cherché au travers d'une étude exploratoire, de mettre en évidence différents points singuliers liés à l'usage. En effet, on cherche à connaître les ressentis, les impressions et commentaires des usagers à partir de données terrain, d'expérimentations. Ainsi, cette approche ne s'inscrit pas dans une démarche ontologique car les informations recueillies par un questionnaire ne sont l'image que du panel des personnes interrogées et ne représente sans doute pas une image représentative de l'ensemble de la société. Afin de pouvoir obtenir au mieux les informations pertinentes de l'usage, il est nécessaire d'interroger les usagers concernés, de manière in situ pour éviter de nombreux biais sociologiques. Dans notre cas, on a voulu davantage tester notre démarche sur un panel restreint mais nous permettant d'élaborer ensuite des questionnaires qui s'adapteront à d'autres panels spécifiques.

En sociologie, où l'on cherche à caractériser et appréhender les phénomènes sociaux, on dispose d'un certain nombre d'outils permettant de générer le corpus de l'étude effectuée. On y retrouve entre autres les méthodes suivantes afin de collecter des informations comportementales :

- Observation : on enregistre en situation le comportement des usagers par l'intervention d'un enquêteur sur place ou d'enregistrements vidéos
- Questionnaire / sondage : type d'enquête réalisée auprès des personnes au travers d'une feuille de questions ouvertes ou fermées
- Entretien : Interview directe avec la (les) personne(s) sondée(s) autour de questions ouvertes ou fermées
- Traces : différentes traces (consommations, interactions, etc....) permettent de diagnostiquer l'usage. Nous reviendrons au chapitre 5 sur de tels outils.

Ces méthodes sociologiques peuvent être classifiées en deux catégories complémentaires définissant le type d'approche : les méthodes qualitatives et les méthodes quantitatives [COMB, 1996].

- Les méthodes qualitatives s'attachent à apprécier les grandes tendances des phénomènes sociaux et avoir une appréciation en termes de ressentis et de comportements des usagers. On y retrouve les méthodes d'entretien et d'observation.
- Les méthodes quantitatives vont chercher davantage à évaluer de façon numéraire les tendances générales et aboutissent par conséquent à des résultats statistiques. On y trouve notamment les questionnaires.

Le processus d'acquisition de retour d'expérience des usagers en tant qu'occupant de la Plateforme PREDIS MHI s'est déroulé en différentes phases (figure 22).

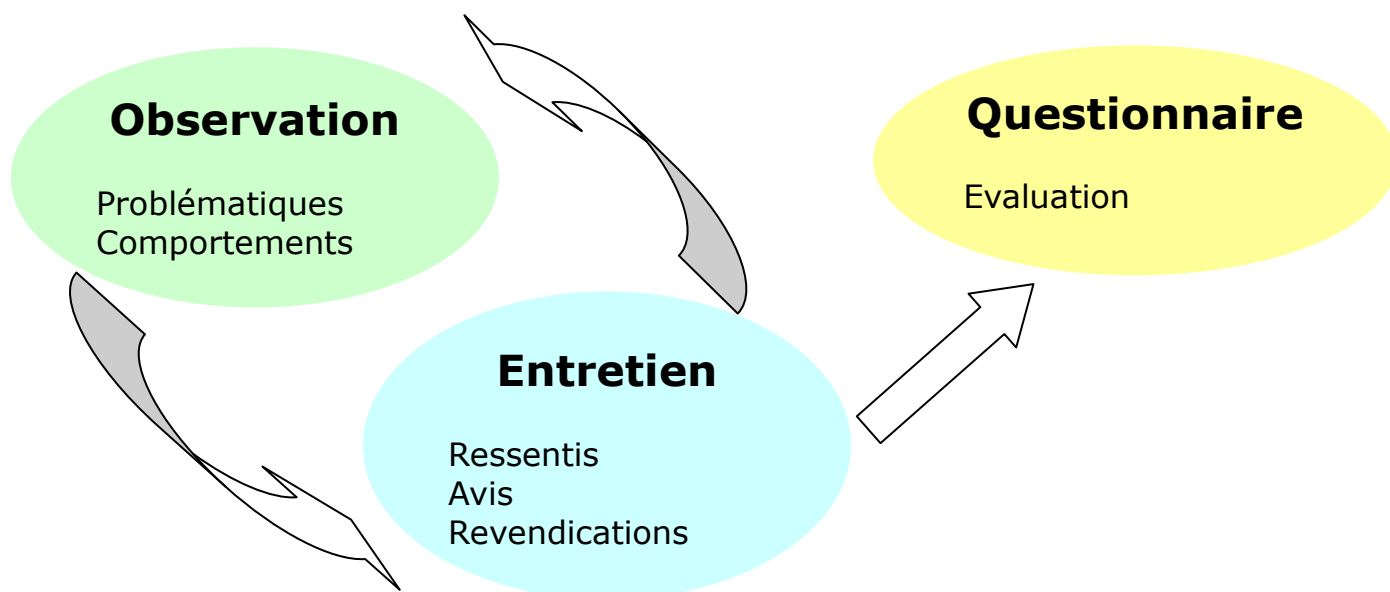


Figure 22 : Processus de recueil de données de retour d'expérience usager de la plateforme Predis MHI

Nous avons mener de part en part cette enquête sociologique afin d'avoir le plus d'informations pertinentes de l'usage de la plateforme : création du questionnaire (annexe 13), analyse des résultats du questionnaire, interrogation des occupants, mesure de consommations et recouplement.

Etant usager propre de la plateforme PREDIS MHI (disposant d'un bureau dans l'Espace Bureau), notre position de juge et partie dans cette enquête nous a permis d'observer et de collecter en temps réel les problèmes d'usage, les impressions et comportements des occupants. Cette pré-observation a permis dans un premier temps de construire de manière itérative les questionnaires (figure 22) puis d'en dégager un questionnaire final générique (annexe 13) mais orienté en fonction des usages déjà relevés. Cette démarche s'inscrit ainsi totalement dans la démarche constructiviste, que nous présenterons plus tard, qui étudie les sujets dans leurs environnements. Dans le cas de l'étude de l'usage, l'expérimentation in situ est obligatoire afin de pouvoir avoir des résultats avec le minimum de biais possible.

Pour les points critiques d'inconfort, on a cherché à diagnostiquer la cause de l'inconfort. Dans certains cas, des études de simulation sur les paramètres en jeu ont été effectuées afin de mieux comprendre les réactions observées. Nous présenterons dans ce qui suit un ensemble des retours effectués par les usagers en tant qu'occupants.

2.1.2 Résultats de l'enquête et analyse sur la plateforme PREDIS MHI

Pour une vision plus globale du retour d'expérience de la plateforme PREDIS MHI, ce questionnaire a donc été donné aux huit occupants de l'espace Bureau ainsi qu'à des élèves usagers de la Salle Informatique (cinq ont répondu) mais des retours d'usage ont également été effectués via des entretiens sur des personnes occupant le rez-de-chaussée du bâtiment rénové où sont des pièces ayant les mêmes caractéristiques que la plateforme MHI (performance énergétique via la rénovation, installations d'équipements énergétiques performants, pilotés par la même GTC, etc...).

On a organisé le retour d'expérience selon le point de vue « système bâtiment » avec la particularité que disposant d'une VMC Double flux, les postes de chauffage, rafraîchissement et ventilation sont regroupés dans le poste CVC (Chauffage Ventilation Climatisation).

2.1.2.1 Architecture et Bâti dans le Confort acoustique et de bien-être

On présentera dans cette partie les problèmes liés à l'architecture ainsi que l'aménagement des salles lors de l'utilisation du bâtiment. On entendra par confort de bien-être, dans cette partie, le confort lié aux propriétés d'usage générés par le lieu (ambiance, décoration, sécurité, aménagement, etc...) sachant que les confort thermiques, aérauliques (qualité d'air) et visuels seront développés ultérieurement (partie 2.1.2.2 et 2.1.2.3 chapitre 2).

De par les résultats (Annexe 14), on s'aperçoit que globalement le bâtiment est satisfaisant du point de vue architectural et aménagement: plus de 70% des réponses jugent le lieu ayant un confort acoustique et de bien-être bon ou très bon sur l'ensemble de la plateforme MHI (figure A1 à A3 annexe 14).

Néanmoins, parmi les remarques et les résultats émergent quelques points d'inconfort liés à des défauts de conception et de mise en œuvre:

- Sur la plateforme PREDIS MHI (voir le plan d'aménagement de l'annexe 10), entre les deux salles, Salle Informatique et Espace Bureau, il y a une cloison mi-vitrée sur laquelle est placée une porte. Or, celle-ci, par un défaut d'installation, ne ferme pas. Cela a de multiples conséquences directes ou indirectes comme la dégradation du confort acoustique au niveau Espace Bureau. Les occupants sont alors obligés de forcer la fermeture de la porte en y appuyant une chaise dessus. Cette réaction met en évidence que *l'appropriation du système (ou de la défaillance du système) par les usagers* peut amener à des solutions originales plus ou moins énergétiquement efficaces.
- Le fait de ne pas pouvoir verrouiller cette porte fragilise la sécurité de l'espace Bureau où les doctorants peuvent amener leurs ordinateurs portables ou des livres. Une telle situation peut conduire à de nouveaux usages tout en installant un inconfort mental ("paranoïa" d'insécurité).
- Le positionnement des ordinateurs portables en Salle Informatique, qui sont fixés sur les tables pour des questions de sécurité, n'est pas pratique pour le travail des étudiants. D'autre part, le mauvais positionnement des ordinateurs par rapport aux bouches d'aération (les bouches soufflent directement sur les élèves) et par rapport au lieu lieu de lecture commun (tableau blanc) provoquant alors des inconforts visuels et aérauliques (voir Annexe 10). Cela renforce le fait que le système bâtiment est complexe et qu'il faut analyser l'impact d'un changement au travers de l'ensemble des confort de l'occupant.

2.1.2.2 Système de Chauffage / Ventilation/ Climatisation (CVC) dans le confort thermique et aéraulique

Confort thermique

Le confort thermique a été perçu comme globalement bon au cours de l'année pour la Salle Informatique (75% des réponses supérieures à 5/10) mais ce jugement est un peu plus critique sur l'espace bureau, qui trouve alors le confort thermique meilleur l'été que l'hiver (plus de 50% des réponses évaluent bon ou très bon le confort d'été). Néanmoins, bien que la notion de confort soit liée à une perception individuelle, il y a eu certaines remarques dont il faut tenir compte :

- En hiver, les périodes où il fait trop froid sont fréquentes ce qui entraîne des comportements des usagers qui mettent un vêtement en plus (Figure A20 de l'annexe 14)

- En été, plus de 50% des occupants estiment souvent subir les périodes de chaud de façon peu supportable (figure A15 de l'annexe 14). Il a été noté qu'un certain nombre de personnes (3 personnes sur 8 selon la figure A20 de l'annexe 14) ont temporairement déménagé afin d'aller travailler dans des pièces ayant la climatisation car il faisait trop chaud sur la plateforme PREDIS MHI ou alors d'autres personnes ont installé un système annexe de rafraîchissement (un ventilateur personnel)
- Lors de jours de surchauffe, les occupants n'ont aucun autre moyen d'action que d'ouvrir les portes (les fenêtres n'étant pas ouvrables et ne donnant pas vers l'extérieur). Le moyen de contrôle existant ne semble pas performant et/ou n'est pas connu des utilisateurs : 40% dans l'Espace Bureau et 80% dans la Salle informatique ignorent le réglage possible de la consigne de température.

Les surchauffes d'été ont été davantage ressenties au niveau de la Salle Informatique lorsqu'il y a eu des cours à 40 personnes par exemple où la température est alors montée de 3°K en 3h, montrant par là même l'inertie thermique assez faible du bâtiment. Par exemple, la mesure de la température les 24 et 25 mai 2009 via la GTC (figure 23) permet d'identifier ce problème de surchauffe lié aux apports internes car alors que pour ces deux journées la température extérieure était quasi-identique, le seul fait de changer le nombre d'occupants (donc l'usage du bâtiment) provoque une variation de température conséquente entre le 24 mai (0 personne) et le 25 mai (25 personnes) dans la Salle Informatique.

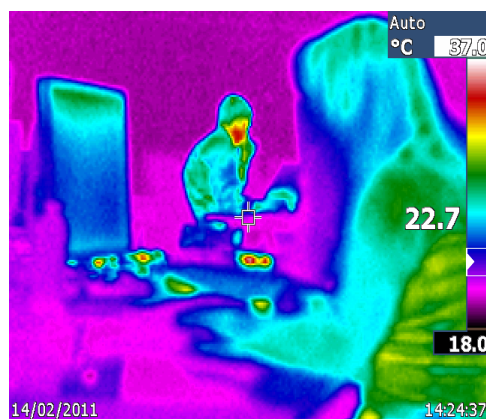


Image 4 : Emission de chaleur par les occupants et les charges électriques de la plateforme

Etude des apports internes et de la surchauffe l'été

Une étude de l'impact des apports internes, que l'on peut retrouver en annexe 15, montre que les apports internes liés à la présence des occupants et leur usage d'équipements électriques qui dissipent également de la chaleur (Image 4), suffisent à la Plateforme MHI à être quasiment autonome du point de vue chauffage (car les apports internes contribuent ici à hauteur de + 80% des besoins de chauffage) [CHEN, 2010]. Cela est dû à une bonne isolation et à ces apports internes qui peuvent se montrer importants. Mais l'inertie étant assez faible, en été, de tels apports internes provoquent les périodes de surchauffes que l'on a vu. Ainsi, on peut voir sur la simulation énergétique dont le résultat est présenté figure 24 que le poste de production de chaleur d'un bâtiment performant du type de Prédix, ne sera pas le système de chauffage mais bien les équipements électriques (ou usages spécifiques) (à noter que les

apports solaires indiqués sont des apports solaires indirects compte tenu de l'architecture de notre bâtiment d'étude).

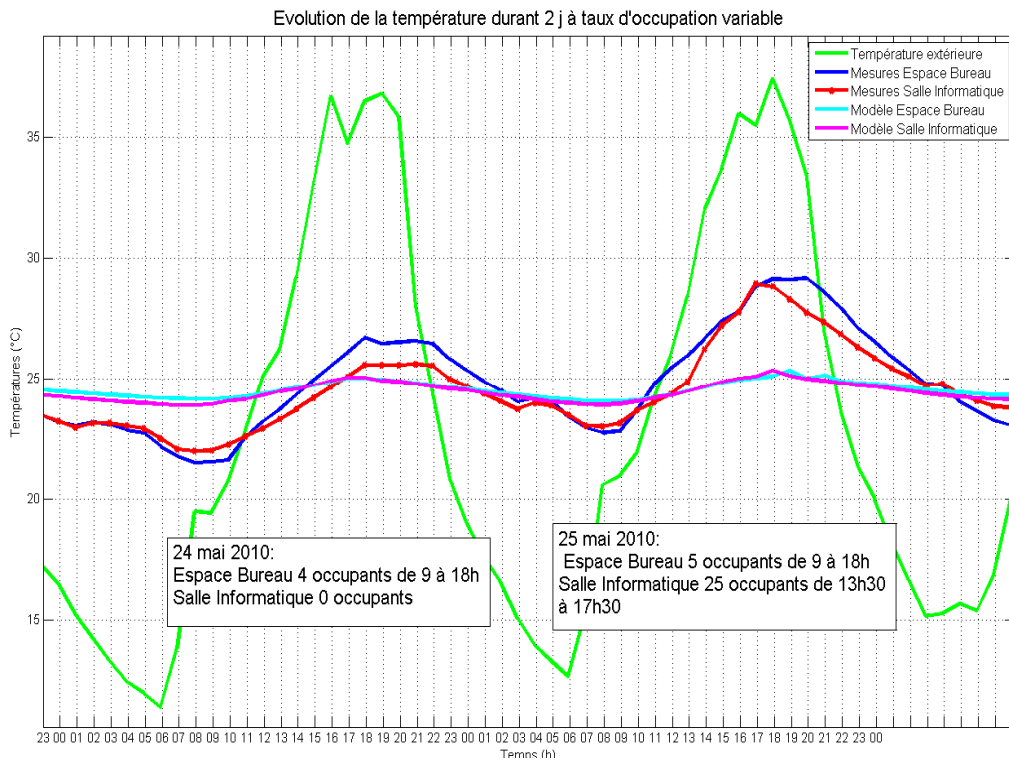


Figure 23 Evolution de la température en Salle Informatique durant 2 jours à taux d'occupation variable

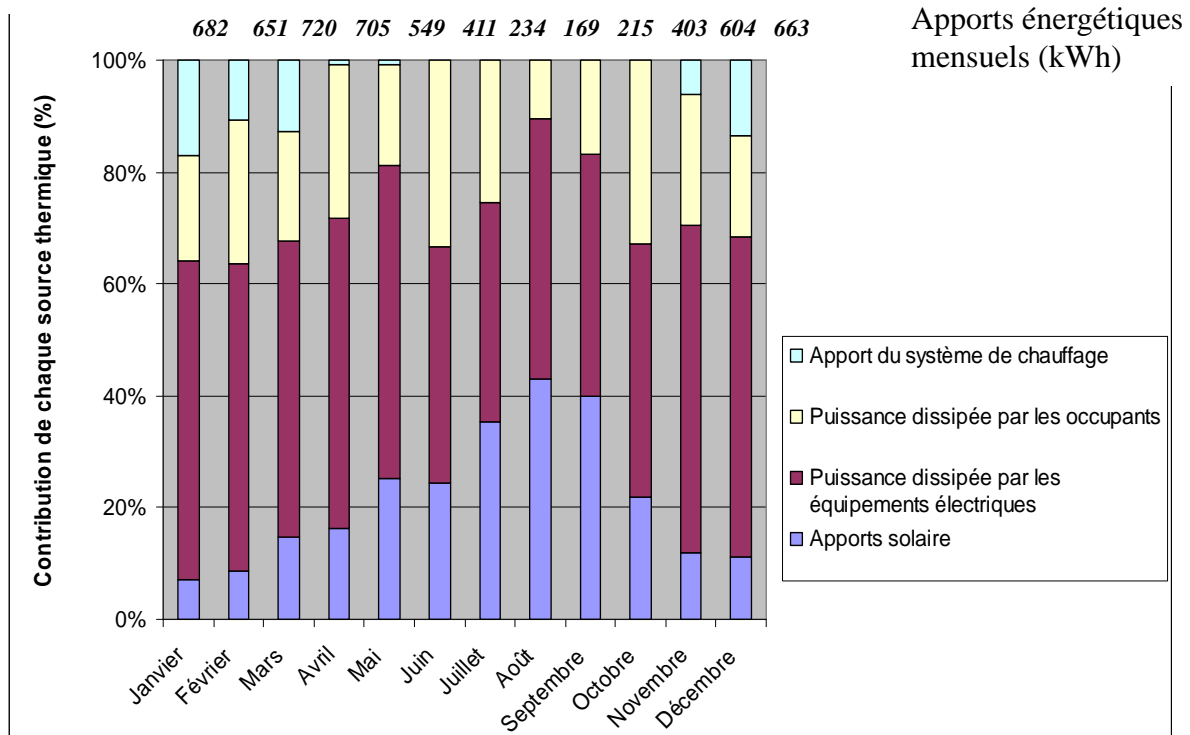


Figure 24 : Répartition des apports de chaleur selon leur source dans la Salle Informatique

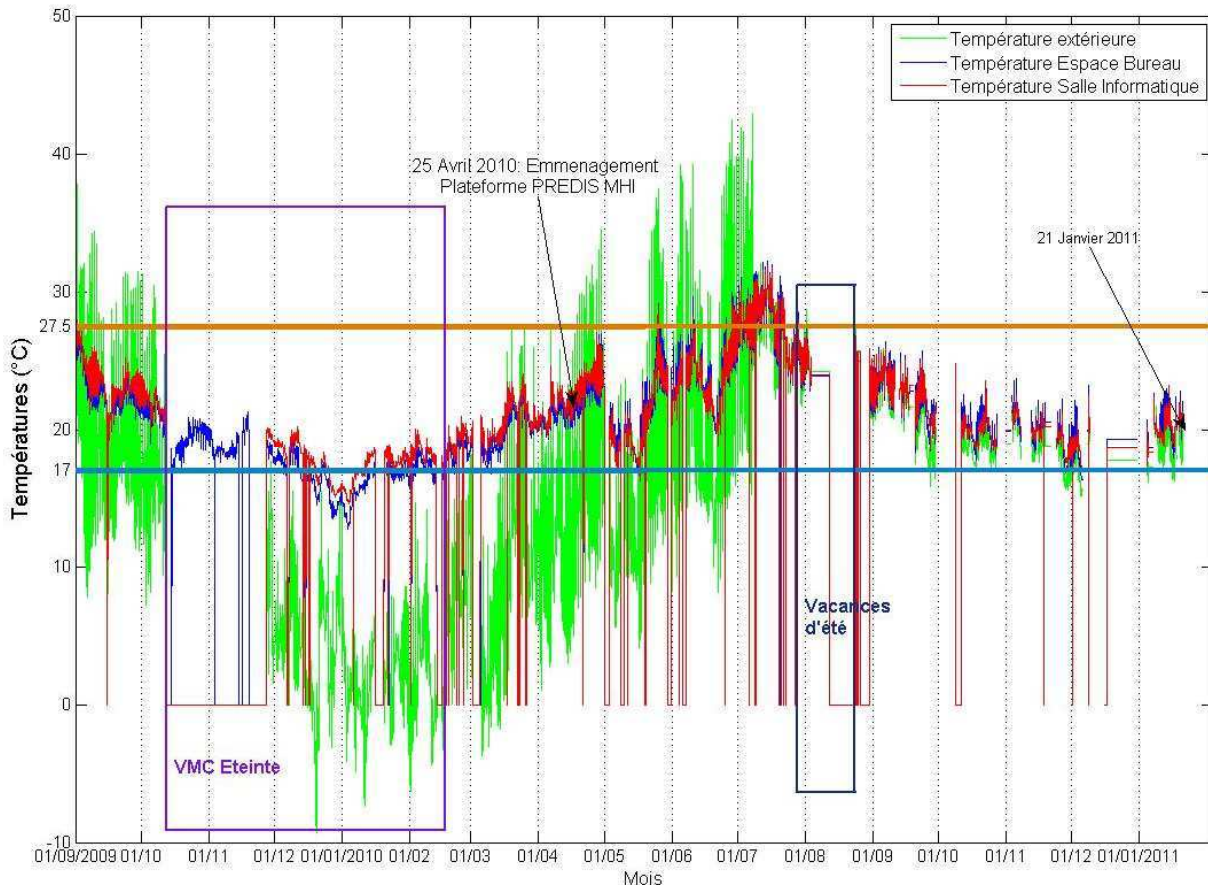


Figure 25 : Evolution de température sur la plateforme PREDIS MHI du 1^{er} Septembre 2009 au 21 Janvier 2011

Si l'on regarde les relevés de températures dans les deux salles de Septembre 2009 à Octobre 2010 (figure 25), on peut constater que la température a été supérieure à 26/27 °C (température limite où l'inconfort thermique apparaît inacceptable d'après la méthode Th CE [CSTB, 2005]) durant tout le mois de Juillet justifiant l'inconfort thermique perçu en été dans l'espace Bureau (figure A15 et A17 sur le système de rafraîchissement en annexe 14) alors que le reste du temps, la température ambiante est restée dans la tranche réglementaire 17/26 °C (la température extérieure ici correspond à celle mesurée en dehors de l'enveloppe dans laquelle est la plateforme MHI).

Il a été estimé un taux de surchauffe d'au moins 80 h pour la Salle Informatique et pour l'espace Bureau 121 heures de surchauffe durant les périodes d'occupation. Ces taux diffèrent grandement de ceux sur lesquels le bureau d'études s'est appuyé (41 heures pour l'espace Bureau) pour justifier le choix d'utilisation d'un système de freecooling afin d'assurer le rafraîchissement. En effet, lors de la conception du rafraîchissement, il avait été estimé que le mode freecooling de la VMC Double flux suffirait mais le bureau d'études avait considéré une inoccupation des locaux durant les mois de Juillet-Août ce qui n'est pas le cas en réalité. Un tel décalage est la cause des insatisfactions sensibles (liées à la température) et aussi à l'utilité même du système (figure A17 de l'annexe 14) et soulève la question de la performance réelle de la solution envisagée.

Nous voyons dans cette problématique des surchauffes qui s'avèrent importantes, que le ressenti des personnes face à un système inefficace dans la réalité (d'ailleurs plus de 80% des personnes souhaitent l'amélioration du système de rafraîchissement dans l'espace Bureau (figure A15 de l'annexe 14)) amène à des usages, ou plutôt *des réactions, qui détériorent*

L'acceptabilité du système (par les occupants) ainsi que l'efficacité énergétique du bâtiment.

A titre d'exemple, un usager des bureaux du rez-de-chaussée a déconnecté manuellement le système de régulation car il ne « supportait pas les réglages pré établis, préférant mettre ceux qu'il jugeait meilleurs » (ce qui a consommé plus au final). Ce phénomène d'inacceptabilité est aggravé par l'impossibilité d'interaction avec le système lors de ces mauvais réglages. Ceci amène donc à des « mauvais usages » énergétiquement inefficaces (quitter la salle implique que pendant ce temps-là, la ventilation fonctionne inutilement; l'installation d'un ventilateur personnel augmente la consommation énergétique...) dont la cause est principalement un problème de conception par une mauvaise prise en compte des apports internes et donc de l'usage.

Confort Aéraulique (qualité d'air)

La plupart des occupants jugent la qualité de l'air globalement bonne (70% estiment un confort supérieur à 5 sur une échelle allant de 0 à 10)

Parmi les retours du questionnaire, on peut donc distinguer certains points singuliers d'inconfort d'usage :

- Le positionnement des bouches mal placé car juste au-dessus des zones de travail, générant un inconfort de sensation de courant d'air, notamment l'hiver quand l'air soufflé est très frais. Ce désagrément est davantage perçu au niveau de la Salle Informatique où les bouches d'aération, de type rectangulaire, soufflent directement sur les personnes assises dessous et ne disposent pas de déflecteurs orientant le filet d'air vers le plafond ou les murs. Ici, nous avons davantage une problématique de ***définition des composantes du confort*** : le concepteur n'a pas totalement pris en compte la sensation de ressenti aux courants d'air.
- Pas de moyen de contrôle des usagers pour contrôler le débit. Cela provoque ainsi des ouvertures de portes pour effectuer un renouvellement d'air lorsque celui-ci n'est pas suffisant ce qui génère des petits courants d'air.

Dans la salle Informatique, l'inconfort dû à la qualité d'air est davantage marqué car le nombre d'occupants est supérieur (40 personnes) provoquant de grandes émissions de CO₂. En effet, il est apparu quelques périodes où les occupants avaient une sensation de gorge sèche ce qui peut s'expliquer par une élévation du taux de CO₂ ainsi que par le fait que l'air soufflé par la ventilation mécanique ne soit pas entièrement propre (encrassement des filtres). La gorge sèche fait d'ailleurs partie des symptômes relatifs au « syndrome du bâtiment malsain » [BURG, 2004]. Là aussi, une des composantes du confort aéraulique (la qualité de l'air en terme de concentration de CO₂) n'est pas prise en compte de manière optimale.

2.1.2.3 Eclairage dans le Confort Visuel

Au regard des résultats du questionnaire, le poste éclairage est celui ayant le plus de retours négatifs, en particulier dans les salles de type bureau.

Au niveau du confort visuel en tant que tel, le bilan est assez mitigé. Il faut souligner que c'est davantage l'apport naturel qui est jugé insuffisant ce qui est lié à la conception architecturale (80% jugent mauvais ou très mauvais cet apport figure A32) plutôt que la puissance lumineuse apportée par l'éclairage artificiel (qui n'est pas exempt de critiques car 70% jugent l'éclairage artificiel mauvais ou très mauvais figure A33)

La configuration des luminaires en 1^{er} jour (Côté extérieur ou vide (figure 27)) et 2nd jour (Côté couloir) n'est pas totalement satisfaisante. En effet, on se rend compte qu'il y a toujours un décalage de niveau d'éclairage entre ces deux rangs de luminaires ce qui est

acceptable en journée mais dès qu'il fait sombre ou nuit (en hiver le matin et soir ou par temps nuageux) on retrouve un décalage de luminosité dans la pièce alors qu'il fait sombre aussi tout autour des bureaux. Il n'y a pas d'adaptation locale entre ces deux zones.

Nous avons donc un système d'éclairage conçu pour être efficace mais qui ne donne pas réellement satisfaction aux usagers en terme de niveau lumineux soulevant un certain nombre de questions : les installations sans dimming ont été réglées par défaut à 400 lux (norme Th C E [CSTB, 2006], pourquoi pas moins? (Comme le préconise maintes fois Olivier Sidler, expert énergétique dans les bâtiments et disposant de nombreux retours d'expérience dans le domaine [ENER, 2005]. Celles avec dimming ont souvent amené des dérogations au niveau lumineux : est-ce dû à un *mauvais réglage technologique* ou à une *sensibilité variable des occupants* (en effet, pour certaines personnes d'une même salle, le niveau d'éclairage suffisait alors que d'autres voulaient une lumière plus intense en ignorant les conséquences énergétiques) ?

Le système d'allumage et de réglage automatique de l'éclairage artificiel est considéré comme mal adapté à l'usage. 100% des interrogés jugent un tel système déficient notamment parce qu'il ne détecte pas les personnes correctement : étant mal réglé, ce système éteint trop souvent les lumières obligeant certains usagers à « secouer les bras » pour se faire détecter et ainsi avoir de la lumière. Nous avons ici une expression claire que la *conception du système n'a pas prise en compte tous les paramètres de l'usage (comme sa localisation)*. La documentation technique du capteur nous indique en effet que la détection de présence se fait par infrarouge selon une configuration spatiale telle qu'indiquée dans la figure 26.

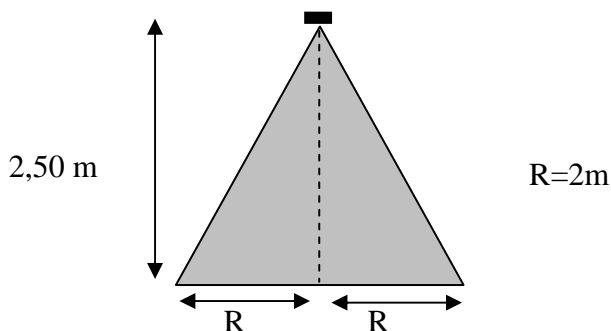


Figure 26 : Vue de côté de la zone de détection du capteur de présence

Il existe, pour ce capteur, deux types de mouvements détectés : celui de la main et celui du corps. Par rapport au schéma d'implantation du luminaire dans l'espace Bureau (figure 27), les zones de détection sont représentées en fonction du type de mouvement programmé.

On peut constater par le schéma de détection des capteurs (figure 27) que les zones de détection ne recouvrent pas effectivement l'ensemble des usagers. Etant donné que l'usage de cet espace bureau est du travail sur ordinateur où l'on a à faire à de petits gestes, c'est la zone de détection de la main qui sera la plus adéquate. Or, on constate qu'il y a quatre personnes qui sont en dehors de ce champ de détection (ceux côté fenêtre correspondant à ceux insatisfait du système de détection).

La problématique de détection de personne et d'allumage automatique est apparue comme critique au niveau des bureaux du rez-de-chaussée car des occupants ont complètement débranché le système automatique afin d'avoir un contrôle total du système. En effet, comme vu précédemment, ce capteur contrôle également les stores provoquant des cycles de fonctionnement désagréables. Nous retrouvons ici l'importance que peut avoir le *contrôle de l'utilisateur sur le système en cas d'inconfort et l'acceptabilité* qui en découlera.

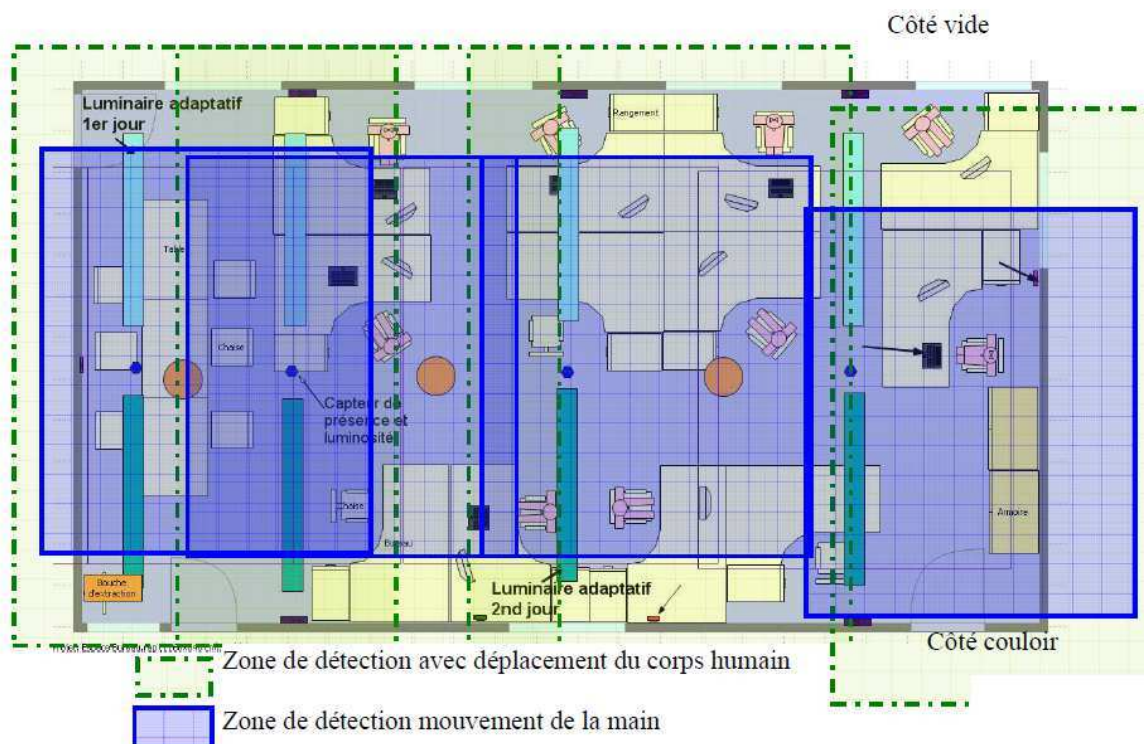


Figure 27 : Zones de détection des capteurs de présence dans l'espace Bureau

Cette réaction est aussi due au fait que l'exploitant (et donc encore moins l'utilisateur) n'a pas de moyen de réglage et que seul l'installateur peut réaliser les changements de sensibilité et de temporisation (si on rajoute à cela que l'inertie du changement de réglage sera longue compte tenu de la lenteur de la procédure de maintenance, sur le temps, les occupants vont de moins en moins accepter de tels désagréments). Le moyen le plus employé pour résoudre temporairement ce problème de détection a été le forçage, en mode manuel, à une valeur de consigne maximale. Cela permet de satisfaire tout le monde hormis la raison première de l'installation d'un tel système : l'économie d'énergie.

2.1.3 Bilan des usages et de la satisfaction de la plateforme MHI

Le bilan de l'usage de la plateforme PREDIS MHI est plutôt mitigé compte tenu des problèmes récurrents comme celui de la détection de présence pour l'éclairage qui amène les usagers à réagir de façon plus ou moins vive aux systèmes automatisés. Il apparaît que le *contrôle des équipements et la dérogation aux consignes* sont deux éléments permettant aux occupants de mieux appréhender le système et ainsi de mieux accepter les gestions d'énergie appliquées.

Nous avons pu voir que la satisfaction des personnes était également (et essentiellement) dépendante de *niveaux de confort physique* (par exemple niveau de température, de luminosité,...). Pour le niveau de confort thermique, le bilan est meilleur pour l'espace Bureau bien que les sensibilités aux températures de chaque occupant soient différentes. En effet, en fonction des cultures, il peut y avoir des disparités au niveau du comportement (un chercheur vietnamien de l'espace Bureau porte souvent un anorak à son poste de travail par exemple et ce quasiment la moitié de l'année car il avait trop froid alors que l'on était toujours supérieur à 20°C). Ce bilan est un peu plus négatif pour le rez-de-chaussée où les périodes de chaud sont mal gérées du fait d'une mauvaise programmation de la chaudière.

Ainsi, et nous le retrouverons au travers du bilan énergétique final, nous avons vu que bien que le bâtiment ait été conçu afin d'être énergétiquement performant, l'usage réel n'est pas exactement celui prévu en phase de conception, ce qui rend des équipements et systèmes mal dimensionnés (climatisation plateforme MHI) ou mal configurés (éclairage) provoquant des degrés d'inconfort et au final une surconsommation énergétique.

Nous pouvons enfin remarquer à ce propos que les usagers en tant qu'occupants de bâtiment tertiaire, sont malheureusement très *peu sensibles à l'impact énergétique de leur actions* et réactions. Cela est causé par la déresponsabilisation de leur consommation : ce ne sont pas eux qui payent donc ils veulent, en tendance, une *satisfaction maximale peu importe ce que cela consomme*. Dans les bâtiments résidentiels, l'occupant étant également payeur aura sans doute d'autres comportements vis-à-vis de l'usage de l'énergie (réalisant un compromis entre satisfaction de confort et coût énergétique).

2.2 Problématiques relatives à l'usage: Point de vue exploitant

Avec le point de vue de l'occupant, on s'est davantage intéressé à l'étude de la cause de l'usage de l'énergie : les comportements des usagers qui interagissent avec le système bâtiment. A présent, selon le point de vue de l'exploitant, nous allons davantage nous intéresser à la gestion énergétique car l'objectif de celui-ci est une *maîtrise de l'énergie optimisée* (car c'est l'opérateur qui paye et non les occupants dans un bâtiment tertiaire) tout en ayant un bâtiment qui *fonctionne correctement* (c'est-à-dire sans dysfonctionnement important afin de réduire les frais de maintenance).

Dans notre cas d'étude, sachant que le bâtiment étudié est également une plateforme de recherche sur l'étude énergétique du bâtiment et la gestion d'énergie, l'exploitant inclura le *groupe de chercheurs*, configurant les différents équipements du système bâtiment et utilisant les mesures effectuées ainsi que l'*opérateur* du bâtiment qui est en charge de la maintenance et du suivi des consommations. De par cette multiplication d'acteurs, les points de vue vont être un peu différents mais les questionnements restent les mêmes : Est-ce que le système bâtiment est énergétiquement efficace ou non ? Quels sont les équipements ou les configurations d'équipements qui ne sont pas économes et comment améliorer l'ensemble du système ?

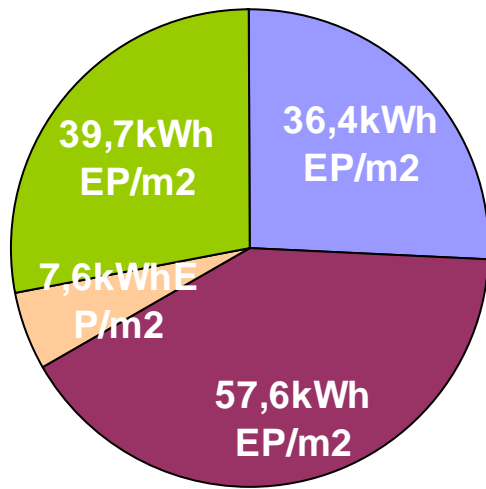
2.2.1 Bilan énergétique de la plateforme PREDIS MHI

Le bilan énergétique est une donnée essentielle pour évaluer la performance énergétique d'un bâtiment. Ceci représente le matériau principal sur lequel s'appuie l'exploitant pour attester ou non de la performance énergétique du bâtiment et diagnostiquer ensuite les postes où une étude plus particulière devra être menée en termes de gestion ou de maintenance afin de réduire la consommation de ceux-ci.

Ici, nous avons réalisé l'étude au bout d'un an d'exploitation afin de faire un suivi énergétique dès la première année (qui est cependant bien souvent l'année de calibrage).

Afin d'établir ce bilan énergétique et de comparer les performances réelles par rapport à la performance prévue par le bureau d'études de conception HQE (Consommation énergétique du poste de chauffage inférieure à 50 kWh/m²/an), on a relevé les informations nécessaires de la GTC en y appliquant quelques hypothèses:

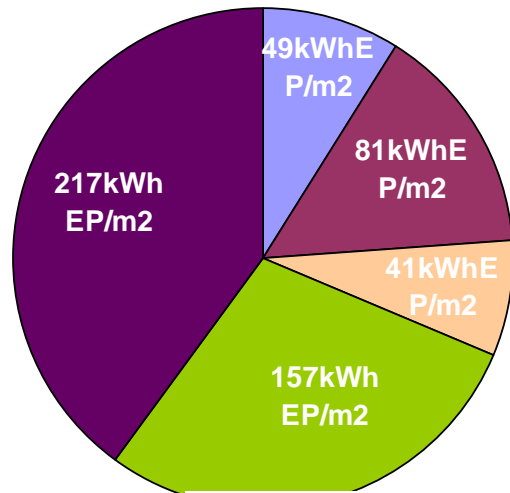
- Interprétation de nom de variable par rapport à la zone censée correspondre (certains noms n'étant pas très clairs, on n'est pas sûr que la variable exprime bien la donnée que l'on souhaite)



Total : 141 kWhEP/m²/an

■ Eclairage ■ Prises Electriques
■ CTA (calories) ■ CTA (Electricité)

Figure 28 : Bilan énergétique sur 1 an Plateforme MHI



Total : 544 kWhEP/m²/an

■ Eclairage Bureaux A et B
■ Prises Electriques Bureaux A et B
■ CTA (Electricité)
■ Electrique hors zone manip, cem et puissance
■ Electrique puissance

Figure 29 : Bilan énergétique sur 1 an Rez-de-chaussée Habitat tertiaire

- Agrégation de différentes périodes de mesures pour compenser les remises à 0 de compteurs d'énergie
- Séparation entre consommations électriques (à laquelle on attribue le coefficient 2,58 pour l'expression en énergie primaire) et la consommation thermique des VMC (exprimée par les calories). Cette dernière énergie thermique (l'eau chaude circulant dans les batterie chaude) étant produite par une chaudière au fioul (extérieure à notre bâtiment et donc à notre étude), nous appliquerons un coefficient de 1 à la quantification de cette énergie pour la ramener en énergie primaire.

Les résultats des figures 28 et 29 présentent ainsi le bilan énergétique au bout d'un an d'exploitation à la fois sur la plateforme MHI et la plateforme Recherche au rez-de-chaussée du bâtiment Habitat Tertiaire.

On peut déjà en tirer un premier bilan **positif** par rapport aux objectifs fixés lors de la conception (consommation énergétique du *poste de chauffage inférieure à 50 kWh/m²/an*) Comme indiqué précédemment, il est difficile de mettre en rapport cette performance avec les objectifs fixée par la RT pour des bâtiments en rénovation de type BBC (consommation des postes Chauffage+ éclairage +ventilation+ECS : 90kWh/m²/an) compte tenu de la spécificité de la plateforme PREDIS MHI (comme par exemple ne pas être en contact direct avec l'extérieur). On étudiera donc davantage les valeurs énergétiques de manière relative que de manière absolue.

En dehors du premier aspect positif qui est que l'on respecte les objectifs HQE, on s'aperçoit que le problème énergétique ne réside pas dans la consommation en chauffage (seul élément pris en compte dans les objectifs HQE) mais bien dans la consommation électrique des appareils. En effet, si l'on regarde la consommation énergétique surfacique de l'ensemble de l'habitat tertiaire (rez-de-chaussée et 1^{er} étage) exprimée en kWhEP/m²/an, on obtient **367 kWhEP/m²/an** où la partie thermique représente à peine 10% de la consommation énergétique.

On se rend bien compte de l'importance capitale du poste de consommation électrique présenté dans le chapitre 1 car celui-ci représente, si on ne prend en compte que les prises électriques, 25 % de la consommation énergétique de la plateforme MHI et 50% de la consommation du rez-de-chaussée (notamment due à d'importantes charges électriques avec la présence d'une salle d'expérimentation d'électronique de puissance). Au-delà des fortes charges exceptionnelles de puissance, il n'est pas étonnant d'observer une domination du poste électrique dans le bilan énergétique compte tenu des usages et profils électriques : beaucoup de charges électriques pas toujours utilisées de la manière la plus efficace qu'il soit (par exemple non-extinction de nombreux ordinateurs lors des pauses) démultiplient l'impact énergétique.

Au rez-de-chaussée, la répartition des postes de consommation fait bien apparaître l'impact des postes d'expérimentations électriques (Poste électricité de puissance figure 29) qui sont des charges de grosse puissances (bancs de puissance, alimentations électronique de puissance) représentant plus de 30% de la consommation totale. De telles charges de type charges ponctuelles sont bien souvent mal ou sous-estimées par les métiers du bâtiment car il est difficile d'appréhender leur usages qui n'est pas permanent. En effet, même en allant voir les usagers, ceux-ci ne sont que peu sensibilisés à la puissance consommée par les appareils de puissances qu'ils utilisent dans le cadre de leurs expériences et à l'impact énergétique de leurs essais techniques. Des travaux seraient intéressants à mener afin de mieux estimer, anticiper et gérer ces types de consommations ponctuelles de puissance.

En dehors de ces charges exceptionnelles, on peut quand même confirmer que l'essentiel de l'énergie consommée au rez-de-chaussée provient de l'usage des équipements électriques (prises électriques+ Electricité hors zone manip).

2.2.2 Analyse de l'impact de l'usage sur la consommation électrique

Si l'on s'attarde sur la consommation des salles Espace Bureaux et Salle informatique (Plateforme PREDIS MHI) qui constituent notre cas d'étude et les Bureaux A et B du rez-de-chaussée, représentatifs de l'usage Bureaux et Enseignement dans le Secteur Tertiaire (figure 30 et 31), on peut se rendre encore plus compte de l'importance de l'usage sur la consommation énergétique.

L'étude des consommations des bureaux A et B nous indique quelques éléments indiquant l'impact de l'usage. On part de l'hypothèse que les deux bureaux disposent du même matériel électrique (deux ordinateurs portables d'une puissance unitaire de 30 W + deux lampes de bureaux de puissance unitaire de 15W).

Au bout d'un an d'exploitation, on remarque un profil de consommation sensiblement différent entre les deux bureaux (figure 30). La différence de consommation s'effectue en particulier sur les prises électriques ce qui peut être due soit au fait que les usagers aient branchés d'autres charges électriques que celles prévues initialement, soit on a à faire à deux profils de consommateurs différents. Compte tenu que les ordinateurs (charges électriques initiales) n'ont pas changé, on peut alors estimer le profil énergétique des consommateurs de chaque bureau à :

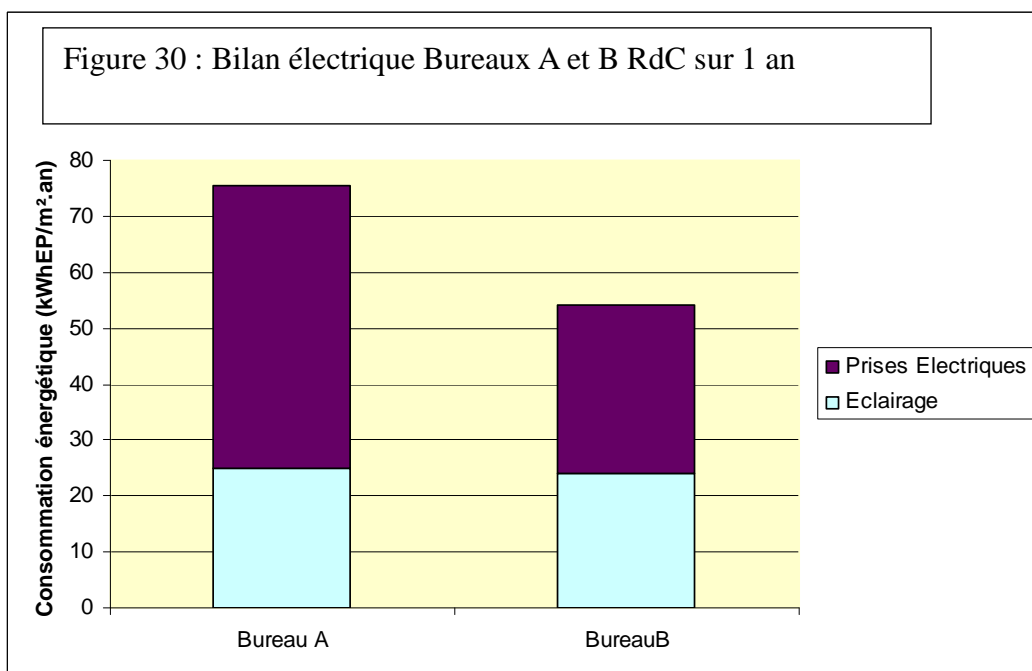
- un bureau énergétivore (bureau A avec une consommation électrique de 74 kWhEP/m²/an)
- un bureau plus économe (53 kWhEP/m²/an) (figure 30).

Bien entendu, il est possible que le temps passé dans chaque bureau par les occupants ne soit pas le même. Mais la simple constatation de la variation du poste de consommation des prises électriques de 40% entre les deux bureaux alors que l'énergie consommée au niveau éclairage est quasiment identique nous questionne sur les attributs de l'usage : Est-ce que ce sont les comportements qui diffèrent (dans ce cas-là une sensibilisation des personnes à l'économie d'énergie suffirait-elle à égaliser les consommations ?) Doit-on imposer une certaine gestion des charges électriques ? Doit-on agir de manière coercitive en tant qu'exploitant pour éviter une dérive trop importante de la consommation électrique (comme le préconisent certains experts [ENER, 2005])? Dans de nombreuses opérations, il a été observé les mêmes symptômes de la sur consommations électrique : soit étant lié à l'éducation et la connaissance des personnes sur le fonctionnement de leurs équipements électriques, soit les branchements effectués ne correspondent pas aux charges électriques prévues.

Sur la plateforme MHI, l'analyse des consommations électriques nous montre de nouveau que l'éclairage mais surtout les charges électriques que sont les ordinateurs, sont les postes les plus consommateurs d'énergie. Cela paraît logique vu que les ordinateurs consomment plus que les éclairages basse consommation. D'ailleurs on peut remarquer que l'on obtient bien une consommation énergétique plus faible en salle informatique. Mais on peut se poser la question si cela peut être imputé à l'installation d'ordinateurs portables ou à un taux d'occupation plus faible ? (Figure 31).

L'ensemble des bilans énergétiques menés sur le bâtiment Habitat Tertiaire soulève un certain nombre de questionnements, qui sont pour la plupart autant de verrous scientifiques associés. En premier abord, on peut se poser la question que l'on a déjà évoquée : est-ce que dans la consommation énergétique il y a une part liée à la technologie et l'autre part liée à l'usage car nous avons vu qu'à configuration égale, la consommation pouvait varier selon l'usage? Si oui, *comment distinguer de manière quantitative et/ou qualitative la part de chacune ?*

Nous détaillerons cela plus tard mais nous pouvons garder pour l'instant à l'esprit l'intuition que nous apporte le bilan énergétique qui est qu'il existe une part de la *performance énergétique qui est liée à l'efficacité technique d'un équipement et une autre part qui est liée à la sobriété énergétique des occupants*. Si on reprend le dernier exemple de la salle Informatique, on retrouve ces deux composantes importantes qui permettraient d'expliquer les différences de consommation énergétique entre des pièces de même type: une **composante de la consommation liée à l'usage** (ici le taux d'occupation de la salle) qui peut faire consommer plus ou moins souvent et une **composante liée à la technologie** (ici l'utilisation d'ordinateurs portables). Ces deux approches rentrent en compte dans le diagnostic même de l'efficacité énergétique de tels bâtiments qui englobent ainsi ces deux composantes.

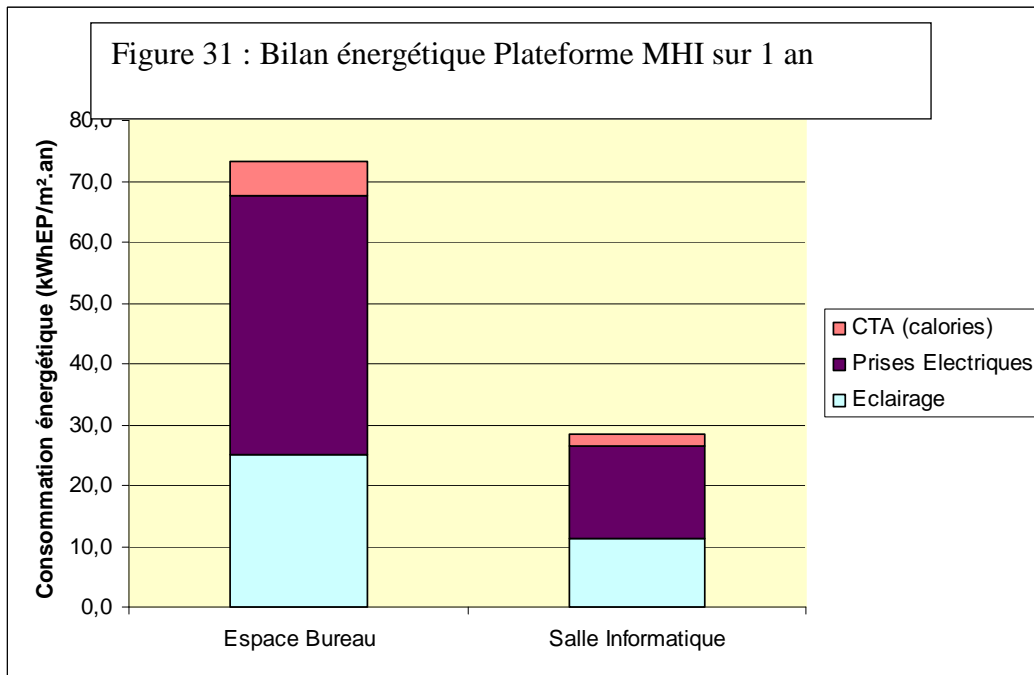


L'étude de l'efficacité du point de vue physique que nous présenterons ultérieurement (partie 1 chapitre 5) permettra de distinguer de manière quantitative l'aspect de l'énergie qui est liée au fonctionnement technique de celle liée à l'usage.

2.2.3 Bilan de la plateforme PREDIS MHI du point de vue exploitant

On peut donc se rendre compte que dans l'ensemble, le bâtiment conçu pour être énergétiquement efficace, n'est pas totalement à la hauteur des espérances malgré la présence d'équipements énergétiques intrinsèquement efficaces à l'origine. Bien que les chiffres bruts du bilan énergétique présentent des résultats conformes aux exigences de conception HQE, cela cache néanmoins certains problèmes de mise en œuvre et éclipsent la part importante de la consommation électrique liée à l'usage.

En effet, par exemple le choix de la VMC double flux a été motivé par la performance technologique. Mais saura-t-on maintenir de telles performances si le bâtiment MHI n'était pas à l'intérieur d'un autre bâtiment? D'autre part, son dimensionnement, sa mise en place, sa mise en œuvre et son pilotage effectif font qu'au final, à l'usage, ce système de ventilation n'est pas aussi efficace qu'espéré puisque l'on consomme plus que nécessaire (voir annexe 18).



Enfin, la plateforme PREDIS MHI dispose d'une GTC assez peu robuste et difficilement configurable. Ainsi par exemple, il est impossible à l'exploitant d'avoir un contrôle sur le réglage de la sensibilité des capteurs de présence qui monitorent l'éclairage artificiel (qui est à l'origine de l'insatisfaction des occupants). De ce fait, on a un système qui consomme plus que nécessaire.

De même pour la configuration de la GTC, la lourdeur de l'interaction avec celle-ci annihile toutes vellétés à l'exploitant de vouloir remettre en question les configurations actuelles afin d'améliorer la gestion énergétique. Ainsi, la complexité du système rebute l'exploitant qui laissera les configurations standard qui ne sont pas forcément adaptées à l'usage réel (comme nous le verrons au chapitre 4).

Au final, on peut considérer que le bilan du point de vue exploitant est globalement satisfaisant car l'on respecte l'objectif de consommation. Mais au niveau de la gestion de l'énergie, c'est-à-dire les moyens mis en œuvre pour mieux consommer (c'est-à-dire pouvoir piloter les différents systèmes énergétiques en vue d'améliorer encore plus l'efficacité énergétique), la satisfaction est assez faible compte tenu de la complexité d'usage de la GTC.

3 Bilan du retour d'expérience et verrous scientifiques liés à l'usage

3.1 Bilan du retour d'expérience de la plateforme PREDIS MHI et enseignements

On a pu voir au travers du retour d'expérience que le fait d'installer des équipements efficaces ne rendait pas forcément la consommation énergétique vertueuse. Si l'on agissait « mal » (ou plutôt de manière différente au « standard » estimé en conception) le bilan énergétique devenait plus important que prévu montrant que c'est bien la part de l'usage qui est la plus variable.

Au travers des deux retours d'expérience selon des points de vue différents (usager en tant qu'occupant et usager en tant qu'exploitant) on peut se rendre compte, dans le cas de la

Plateforme PREDIS MHI, qu'il y a des exigences et objectifs assez distincts, particuliers et contradictoires pour chacun des acteurs.

Pour les usagers/Occupants, l'objectif est d'obtenir *satisfaction à leur confort*, que ce soit un confort d'ambiance (température, éclairage, etc...) ou un confort de service (c'est-à-dire avoir le service au moment voulu comme utiliser l'ordinateur). Ils cherchent également à avoir un système facilement commandable, avoir la main mise sur les réglages automatiques en cas d'inconfort afin de pouvoir réajuster efficacement les équipements qui ne donnent pas le bon niveau de service. L'impact énergétique (de ces niveaux de confort ainsi que des réactions) et l'intérêt économique affectent assez peu les occupants car, comme évoqué précédemment (partie 4.1.1 chapitre 1), ils ne paient pas donc ils ont tendance à consommer plus que de raison.

De l'autre côté, l'exploitant va tout particulièrement s'intéresser à la *consommation énergétique du bâtiment et chercher à minimiser la consommation* grâce à une meilleure gestion (quand cela est possible). Par contre, le rapport à la satisfaction des occupants est assez basique car il n'existe pas de lien direct entre l'exploitant et l'utilisateur. L'exploitant estime juste le confort et donc la satisfaction supposée du lieu de vie au travers de la GTC : en fonction des données mesurées, il peut comparer les consommations par rapport à ce qui est prévu et dire si c'est normal ou pas. On peut d'ailleurs, en passant, remarquer que cette évaluation, sur PREDIS MHI, est biaisée par le fait que la GTC ne donne pas des informations totalement pertinentes sur les paramètres physiques mesurés (température, etc..) compte tenu de la fiabilité des capteurs et de la faiblesse du logiciel de supervision. Donc au final, la satisfaction des occupants est ici simplifiée voire non prise en compte. Afin d'avoir un retour des occupants, il faudrait des moyens mis en œuvre comme des questionnaires ou des espaces où exploitants et occupants pourraient se retrouver.

Ainsi on voit apparaître deux centres d'intérêts issus de l'usage du bâtiment et qui tendent à redéfinir deux approches de l'efficacité même d'un bâtiment:

- Une *approche satisfaction des services effectués*. Dans ce cadre-là, les occupants de la plateforme PREDIS MHI trouvent certains équipements justement inefficaces non pas parce qu'ils consomment beaucoup mais parce qu'ils n'apportent pas le confort désiré. On aura une part de l'efficacité d'un système qui peut être analysée selon le confort que le système procure (c'est lié à la notion de sensation et de qualité de service rendu)

- Une approche *quantitative et d'optimisation technique* de l'énergie consommée. Dans ce cadre-là, l'exploitant aspire à ce que le bâtiment consomme peu d'énergie grâce notamment à des solutions technologiques performantes et ergonomiques. On aura une part de l'efficacité d'un système liée au fait que son fonctionnement ne consomme intrinsèquement pas beaucoup d'énergie électrique.

De manière plus globale, on s'est rendu compte, en l'état actuel des métiers du bâtiment, qu'au final on n'arrivait pas à obtenir des bâtiments qui seront effectivement performants. Au vu des incohérences de conception ou juste de l'ignorance de certaines données sur l'usage qui est pour beaucoup dans l'exploitation du bâtiment, celui-ci n'est, à peine au bout d'un an d'exploitation, pas aussi performant que prévu. Ce cas n'est pas du tout isolé et de nombreuses campagnes de mesures effectuées dans différents types de bâtiments [ENERT, 2005] arrivent aux mêmes conclusions fondamentales :

- Il est déjà difficile avec les outils et les méthodes actuels de pouvoir concevoir et exploiter efficacement les bâtiments. De manière grossière, les méthodes de conception architecturales n'ont pas évolué depuis le moyen âge. Au vu des révolutions énergétiques que l'on aborde Smart grid, Economies d'énergie, etc..) il

est nécessaire de révolutionner les métiers du bâtiment tant du point de vue de la conception (cela va des outils de simulations multi physique plus performants, etc...) et d'exploitation (il y a un problème dans la maintenance des systèmes énergétiques qui sont souvent mal réglés dès le départ et aucun suivi n'est effectué durant toute la vie du bâtiment)

- Il y a également une considérable difficulté à parvenir à des performances énergétiques sans une implication des usagers. Les niveaux de confort paraissent parfois assez décalés vis-à-vis des considérations énergétiques et l'aspect humain est bien ce paramètre qui peut faire varier la consommation du simple au double, dérégler les systèmes énergétiques, etc... Il serait nécessaire qu'il y ait un changement de mentalité où les usagers / habitants ne sont plus de simples consommateurs passifs mais bien des usagers actifs du bâtiment.

3.2 Identification de verrous scientifiques pour la prise en compte de l'usage dans l'efficacité énergétique d'un bâtiment

Les différents retours d'expérience présentés précédemment permettent de soulever un certain nombre d'interrogations concernant le rapport entre l'usage et l'énergie. Nous avons pu déjà voir dans le chapitre 1, au travers de l'étude bibliographique que le rapport de l'humain au système bâtiment était une préoccupation au cœur des investigations scientifiques depuis un certain temps mais ce réel intérêt ne s'est accéléré depuis ces dernières années impulsé par la création de SGEB de plus en plus performants. Aussi, la modélisation de l'usage d'un bâtiment est un des secteurs où davantage de travaux de recherche doivent être effectués.

Mais, au regard de l'analyse globale que nous offre le retour d'expérience PREDIS MHI, des questions aussi fondamentales et générales peuvent émerger tels que : « Qu'est-ce que l'usage dans un bâtiment ? Comment l'identifier ou le décrire ? » Par rapport à cela, nous proposerons une vision de l'interaction Homme/Système bâtiment (partie 2.2.1 d Chapitre 3).

Par rapport à l'énergie consommée, il est également intéressant de connaître quel est l'impact de l'usage sur la consommation énergétique ? Nous avons pu déjà remarquer que l'évaluation de cet impact n'était pas facile car il faudrait distinguer la part de l'énergie consommée liée au fonctionnement intrinsèque du service (c'est-à-dire la part liée strictement à la physique de l'équipement) et la part de l'énergie consommée liée à l'usage.

Compte tenu du rôle central de l'occupant dont le principal objectif est son confort, quels sont les moyens pour davantage intégrer sa satisfaction dans la gestion énergétique ? Est-ce que si l'on augmente la satisfaction des usagers, on consommera moins d'énergie ? Nous analyserons cette problématique par la proposition de définition du concept d'efficacité d'usage énergétique dans le chapitre 3.

Doit-on d'autre part consommer « moins » d'énergie ou doit-on « mieux » consommer l'énergie ? Ainsi se posent les questions relatives à la valeur que l'on apporte à l'énergie consommée. La notion de « mieux » ou de « moins » pose la question également de la référence : mieux par rapport à quoi ? Par rapport à quelle référence ? Comment définir une consommation optimale, une consommation au plus « juste » pour assouvir le service demandé ?

Face au vaste champ d'investigation qu'implique la question de l'usage dans la consommation énergétique d'un bâtiment, nous nous focaliserons davantage sur les problématiques méthodologiques de *comment intégrer l'usage dans le système bâtiment pour réduire la consommation énergétique*. Et nous proposerons des outils offrant la

possibilité de prendre en compte la satisfaction des occupants ainsi que la valorisation de l'énergie consommée.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'expérimentation « grandeur réelle » et « in situ » de l'usage d'un bâtiment que nous avons mis en place au travers d'une plateforme dédiée à l'étude de l'usage énergétique d'un bâtiment tertiaire : la plateforme PREDIS MHI. Nous avons pu voir au travers du retour d'expérience d'un an de la plateforme que l'efficacité énergétique du bâtiment n'était pas totalement satisfaisante : un bilan mitigé au niveau des occupants et également de l'exploitation.

Nous avons pu pour cela mettre en œuvre une étude sociologique sur les usagers visant à faire ressortir les avis aussi bien en terme de niveau de confort qu'en termes d'appréciation sur les systèmes de contrôle. Nous avons pu mettre en évidence l'aspect de satisfaction de confort pour cet usager.

Du point de vue de l'exploitant, nous avons pu voir que malgré une consommation énergétique des postes considérés dans les objectifs HQE ou RT 2005 bâtiment rénové BBC respectée, une grande part de l'énergie consommée était d'origine électrique. Le poste consommation électrique, en plus d'être essentiel dans les bâtiments tertiaires, est intrinsèquement lié à l'action des usagers et ainsi à leurs comportements d'usage ce qui replace l'usage électrique au cœur de l'évaluation de l'efficacité énergétique. Ce point de vue exploitant a pu mettre en exergue l'objectif dit « physique » de l'efficacité énergétique du bâtiment où l'on cherche à réduire la consommation.

Enfin, nous avons pu faire émerger quelques questionnements sur l'étude de l'usage dans le bâtiment et le rapport à l'énergie que nous tâcherons par la suite d'éclaircir en proposant des outils d'études.

Un nouveau concept d'intégration de l'usage dans le bâtiment : l'efficacité d'usage énergétique

Au regard des retours d'expériences présentés au chapitre 2, nous avons pu voir émerger la dimension anthropologique de l'usage, ainsi que son importance dans le bilan énergétique d'un bâtiment tel que la plateforme PREDIS MHI.

Nous verrons dans ce chapitre comment on peut traduire une telle dimension dans la vision globale du système bâtiment. Pour cela, nous reviendrons dans un premier temps sur le concept d'efficacité énergétique, terme abondamment employé dans le langage courant et dans la littérature, en particulier dans le domaine du bâtiment (partie 1).

Nous verrons que derrière ce terme peut être englobé par un certain nombre de notions, rendant plus complexe la clarté du concept d'efficacité énergétique. Ainsi, à partir de cela, nous nous proposerons de définir le concept d'efficacité énergétique d'usage, qui est une dimension plus globale et humaine de l'efficacité, et nous le distinguerons du concept d'efficacité énergétique classique ou « physique » (partie 2). Nous verrons que pour prendre en compte la problématique de l'acteur humain, on devra changer de paradigme épistémologique et se tourner vers l'épistémologie constructiviste. L'analyse de l'usage nous poussera à réfléchir sur la notion de satisfaction dans laquelle nous distinguerons deux composantes : la satisfaction rationnelle et la satisfaction sensible.

Enfin, nous verrons que l'introduction de l'acteur humain dans le système bâtiment amène à redéfinir ce système comme un système bâtiment complexe (partie 3).

1 Distinction entre les différents concepts liés à l'efficacité énergétique

On parle de plus en plus d'efficacité énergétique dans le bâtiment, mais ce concept recouvre différentes facettes. Bien souvent, lors de l'emploi du terme d'efficacité, on utilise également, à tort ou à raison des synonymes comme rendement ou efficience. Nous verrons, au travers de l'étymologie et de leurs définitions dans d'autres domaines, leurs différentes significations et nous nous apercevrons qu'une certaine confusion existe sur les aspects techniques et humains que ces termes intègrent. Ces termes, ainsi que nos propos, étant en rapport avec la dimension « usage », nous analyserons également cette notion au regard de son application dans le bâtiment.

1.1 Etymologie des termes Usage/Rendement/ Efficacité /Efficience

1.1.1 Notion d'usage

Jusqu'ici, nous avons maintes fois utiliser le terme « *usage* ». Dans un souci d'exactitude, il serait bien de définir sur quel matériau notre étude porte. Le terme d' « *usage* » signifie « le fait de se servir de quelque chose, d'appliquer un procédé, une technique, de faire agir un objet, une matière selon leur nature, leur fonction propre afin d'obtenir un effet qui permette de satisfaire un besoin. »[CNRTL^a, 2011]. Cette notion inclut ainsi la caractérisation des différents comportements des personnes réalisant des activités et effectuant des actions sur leur environnement (équipements, systèmes, personnes, etc....). Mais dans le terme usage, il y a également une dimension liée à un objectif : celui de satisfaire ses besoins. Ce n'est ainsi pas juste utiliser un artefact pour une tâche précise mais bien pour satisfaire un besoin *in fine*.

1.1.2 Notion de rendement

Le cœur de notre étude et du concept que l'on propose de définir tourne autour de la notion d'efficacité énergétique. Lorsque l'on parle d'efficacité énergétique, on y associe souvent dans le monde de l'ingénierie, le concept de rendement. Le terme « *rendement* » signifie « Rapport entre une production, un travail et la totalité des valeurs des unités qui permettent de l'obtenir » [CNTRL^b, 2011] lorsqu'il s'agit d'un équipement ou peut également signifier « Production, travail exprimé, de manière implicite ou explicite, par rapport à une unité de référence » [CNTRL^b, 2011] lorsqu'il s'agit d'une personne. On s'aperçoit que selon le point de vue abordé, il y a deux dimensions (une technique et une humaine) qui sont contenues dans ce concept. Nous verrons par la suite que, dans le cadre du système qui nous intéresse et en matière d'énergie, le sens commun en ingénierie du bâtiment emploie davantage la définition technique. On retrouve dans tous les cas la notion de production et de productivité qui est le fait de réaliser un travail souhaité. Néanmoins, il n'y a, par exemple, pas d'indication sur l'utilité de la tâche effectuée par rapport à la satisfaction de la personne et cette notion de rendement **n'intègre que très peu la manière dont on atteint la production** (c'est-à-dire l'usage) si ce n'est au travers d'un chiffrage technique (qui est souvent un pourcentage, comme nous le verrons).

1.1.3 Notion d'efficacité

La notion d' « *efficacité* » est, quant à elle, relative à un « système qui est efficace, offre un effet, une action utile » [LARO^a, 2011]. Un tel terme peut être utilisé soit pour désigner un acteur non humain (une machine, etc....) soit un acteur humain. Dans le cas d'une utilisation « technique », c'est-à-dire associée à un acteur non humain, l'efficacité renverra à la propension du système à effectuer une tâche où la tâche est définie comme étant « *un but*

donné dans des conditions déterminées » [RABA, 1998]. Associée à une personne, c'est un « caractère d'une personne qui produit le maximum de résultats avec le minimum d'efforts, de moyens » [LAROa, 2011]. Une autre définition équivalente attache l'efficacité à « l'utilisation des moyens pour obtenir des résultats donnés, dans le cadre d'objectifs fixés » [JACO, 1996].

L'« *efficacité* » est donc une notion qui est liée à **l'utilité de la tâche effectuée**. Le jugement d'utilité peut se faire à l'échelle sociétale, où l'efficacité d'une tâche pourra par exemple être évaluée par l'argent que cela rapporte par rapport au temps passé / à l'énergie consommée [DEJO, 1995]. Les critères seront alors principalement physiques et traduiront le rendement d'un travail d'une personne, d'une machine, etc. Mais l'utilité peut être également évaluée à l'échelle personnelle où ce jugement correspond au rapport entre la satisfaction procurée par le service rendu via la tâche effectuée et le désir initial de l'utilisateur [EPIC, 2009]. Les critères de jugement seront alors davantage qualitatifs et évalués par rapport à la perception qu'a l'utilisateur du service final. En fonction de l'usage, l'utilité, que ce soit du point de vue technique (relatif alors à la productivité effective du système) ou du point de vue humain, peut être amenée à changer considérablement, ce qui complexifie les étendues de cette notion. Nous reviendrons ultérieurement sur cette appréciation de l'efficacité.

1.1.4 Notion d'efficience

Le terme d'« *efficience* », qui est principalement un anglicisme du terme « *efficiency* », désigne la « *capacité d'un individu ou d'un système de travail d'obtenir de bonnes performances dans un type de tâche donné* » [LARO, 2011]. On retrouve dans cette définition la notion d'utilité d'une tâche (bonne performance ou non) ainsi que celle d'activité (qui est, selon la définition ergonomique, « *la réponse que l'individu met en œuvre pour réaliser une tâche* » [RABA, 1998]). Néanmoins, ce terme d'efficience se distingue de l'efficacité en n'introduisant pas de comparaison par rapport à un effort fourni mais implique davantage une estimation booléenne de l'efficience d'un système / d'une personne (être capable ou non). Le rattachement à l'activité permet de mettre en valeur une fois de plus la dimension de l'usage.

1.1.5 Définitions plurilingues

Un tour d'horizon de la traduction des termes « *efficacité* » et « *efficience* » dans différentes langues nous apporte quelques enseignements sur l'intégration de l'usage dans de tels termes.

Comme nous pourrions le voir par la suite au travers de la diversité des définitions d'« *energy efficiency* » recensées par Patterson [PATT, 1996], l'emploi du terme anglais « *efficiency* » est fréquent et on y fait l'amalgame de ce que renferment les deux concepts français d'efficacité et d'efficience. A titre d'exemple, efficacité et rendement se traduisent « *efficiency* » en anglais, alors que nous avons pu voir que ces deux termes ne sont généralement pas synonymes.

Les termes « *wirksamkeit* » et « *verksamhet* », respectivement en allemand et en suédois, deux langues d'origine germanique, signifient efficacité mais également activité dans le sens où les adjectifs « *wirksam* » et « *verksam* » signifient efficace, actif [HACH, 2011] [NORD, 2002]. Ces termes germaniques incluent donc dans le concept même d'efficacité, l'idée d'activité c'est-à-dire quelque chose se rattachant à l'action effectuée davantage qu'à l'idée de rendement et de performance. On peut remarquer également que les termes « *wirksamkeit* » et « *verksamhet* » incluent comme traduction française la **notion de « vertu »** [LEO, 2011] ce qui renforce la dimension anthropologique et même philosophique que devrait idéalement intégrer la notion d'efficacité. Cette inclusion idiomatique de la notion d'activité et de vertu dans le concept d'efficacité permet de s'interroger sur le contenu et les

limites mêmes de la définition de cette notion ainsi que son utilisation dans le langage courant.

Nous voyons donc que l'étymologie et la définition même des différents termes font apparaître une dimension technique et une dimension humaine qui font écho aux dimensions humaines et techniques de l'usage qui émanaient des retours d'expérience de la Plateforme PREDIS (Chapitre 2). Néanmoins, l'apparition des deux dimensions sous un même terme rend un amalgame assez facile entre les deux approches qui sont différentes mais complémentaires.

1.2 L'efficacité énergétique telle que définie dans d'autres domaines

Le concept d'efficacité énergétique est une notion que l'on retrouve dans différents domaines avec une interprétation qui peut être propre au point de vue adopté mais de manière générale, la notion d'efficacité se rattache à l'idée de faire le plus de choses en sortie du système étudié pour le moins de ressources en entrée [DEJO, 1995].

1.2.1 L'efficacité énergétique vue par l'économie

L'efficacité énergétique est avant tout un rapport entre deux termes et selon la définition qu'en fait l'économiste Patterson [PATT, 1996], cela consiste, de manière générale, **à utiliser le moins d'énergie possible pour produire la même quantité de service ou de données utiles**. On peut s'apercevoir qu'il peut y avoir de nombreuses ambiguïtés dans les définitions de ce qui est « utile » ainsi que la notion de « service » qui peut être interprétée différemment selon le point de vue emprunté. Dans ce sens, deux types de notions d'efficacité énergétique peuvent être différenciés en fonction des indicateurs proposés [PATT, 1996].

- **a) Indicateur Thermodynamique**

Cet indicateur d'efficacité énergétique fait référence à une vision purement thermodynamique du processus étudié. L'étude des potentiels thermodynamiques dans le cadre du premier principe de la thermodynamique, permet d'avoir une définition thermique ou enthalpique de l'efficacité (Equation 1):

$$E_{\Delta H} = \frac{\Delta H_{\text{sortie}}}{\Delta H_{\text{entrée}}}$$

Equation 1

où

$E_{\Delta H}$ = efficacité enthalpique

ΔH_{sortie} = somme de toutes les enthalpies utiles du process

$\Delta H_{\text{entrée}}$ = somme de toutes les enthalpies entrées dans le process

Ce coefficient permet d'avoir une approche quantitative de l'efficacité énergétique car l'on ne prend que la partie « utile » du système que l'on ramène sur l'énergie d'entrée, qui est celle consommée par le système.

Expression du rendement

Le rendement d'un système, qui est un nombre adimensionnel compris entre 0 et 1, est souvent employé en physique et en ingénierie mécanique et électrique, et se retrouve dans ce cadre d'efficacité d'enthalpie comme étant défini par (Equation 2). Ce terme de rendement fréquemment utilisé dans l'ingénierie, est équivalent au rapport thermodynamique car l'énergie utile d'un système est analogue à une enthalpie donc les équations 1 et 2 sont équivalentes.

$$\eta = \frac{E_{\text{sortie}}}{E_{\text{entrée}}}$$

Equation 2

où

η = Rendement

E_{sortie} = Energie utile du système

$E_{\text{entrée}}$ = Energie consommée par le système

On pourra remarquer que dans ces domaines d'application, on confond souvent l'efficacité énergétique d'un système et le rendement de celui-ci.

Prise en compte de la qualité de l'énergie : notion d'exergie

Cette approche de l'enthalpie ne se soucie pas de la qualité de l'énergie utile déployée. Par qualité de l'énergie on fait davantage référence à sa qualité physique, c'est-à-dire par exemple pour l'électricité, qu'on ait le bon niveau de tension, la bonne fréquence, etc. pour le système. Pour prendre en compte cette donnée, le second principe de la thermodynamique intègre d'autres potentiels thermodynamiques (Energie libre, etc.) permettant d'écrire une autre définition de l'efficacité énergétique qui se caractérise alors par rapport à un idéal (Equation 3) :

$$\rho = \frac{E_{\Delta H(\text{actuel})}}{E_{\Delta H(\text{idéal})}} \quad \text{Equation 3}$$

où

ρ = Efficacité énergétique

$E_{\Delta H(\text{actuel})}$ = Efficacité enthalpique actuelle d'un process effectuant une certaine tâche

$E_{\Delta H(\text{idéal})}$ = Efficacité enthalpique idéale d'un process pour effectuer de façon réversible une tâche spécifique par un équipement parfait

On voit ici que l'efficacité énergétique peut être également définie comme un rapport d'efficacité entre le système actuel et ce que serait l'idéal (la théorie bien souvent) formant ainsi un nombre adimensionnel.

L'intégration de la qualité de l'énergie utilisée a donné lieu au concept d'exergie qui permet, entre autres, de mesurer la dégradation de l'énergie causée par les irréversibilités des transferts et des transformations énergétiques [JORG, 2008]. Cette vision exergétique de l'énergie est une première étape vers une vision plus globale de l'efficacité, car elle inclut une dimension aléatoire liée à l'entropie d'un système. Appliquée au système bâtiment, l'exergie traduit le gaspillage d'énergie lié à une perte de qualité de l'énergie : par exemple, si par le vieillissement du matériel, le système est moins performant (par exemple un éclairage moins lumineux car terni) alors l'utilisateur réagira en conséquence (augmentation du niveau de luminosité) sans que ce geste, qui peut être surconsommateur d'énergie, puisse être pour autant considéré comme du gaspillage d'énergie [SAKU, 2010] [YUCE, 2011]. Néanmoins, le point de vue pris en compte dans l'exergie est essentiellement relatif à la physique.

Or la dimension usage, c'est-à-dire comment l'utilisateur humain utilise effectivement cette énergie finale par rapport à ses attentes n'est a priori pas intégrée dans ce terme. Pourtant, par le terme de « qualité » de l'énergie utile, cela peut également englober la qualité du point de vue de celui qui reçoit le service rendu par rapport à ses attentes. Ainsi, dans la terminologie actuelle, cette dimension anthropologique est soit oubliée soit confondue car les termes sont ambigus.

- **b) Indicateur Physico thermodynamique**

Cet indicateur permet d'intégrer la nature de l'usage final qui est fait par le système étudié alors que par la définition précédente on s'intéressait davantage au travail potentiel réalisé. Ainsi, on pourra définir, dans ce cadre, l'efficacité énergétique comme (Equation 4) :

$$\frac{\text{Sortie (W, km, kg, etc...)}}{\text{Energie d'entrée}} \quad \text{Equation 4}$$

La particularité de cette définition est de prendre en compte la spécificité de l'usage final et d'utiliser ainsi l'unité dans laquelle on mesure le phénomène physique qui se rattache au système en question. Par exemple, pour le transport de matière, on pourra exprimer l'efficacité énergétique par la quantité d'essence consommée pour livrer une tonne d'un produit à tel endroit. Un tel coefficient d'efficacité énergétique est, de par ce fait, dimensionnel et possède une unité qui a un sens physique.

On peut remarquer que dans le domaine énergétique du bâtiment, un tel indicateur est utilisé dans les Etiquettes Energie (figure 32) pour caractériser la performance énergétique d'équipements (que l'on présente d'ailleurs sous le terme d'« efficacité énergétique »). La nature même de cet indicateur est identique seul l'ordre du numérateur et du dénominateur peut être interchangé.

Ainsi, pour des équipements domestiques, l'efficacité représentera la consommation énergétique des produits (énergie d'entrée) pour effectuer une tâche qui est conforme à un standard. Par exemple, pour un lave-linge, l'échelle d'efficacité énergétique est établie pour un cycle de lavage à 60°C pour 1kg de linge. L'unité est alors le kWh/kg (qui est l'inverse de la définition physico-thermodynamique du produit (Equation 4) mais qui reprend les mêmes éléments). Pour un lave-vaisselle, on exprimera la consommation énergétique pour laver 12 couverts [CEE, 1992].

Par cette définition économique, que l'on retrouve sous différentes variantes en particulier dans le domaine de l'ingénierie électrique [LE, 2008] et celui de la thermique du bâtiment [CHLE, 2007], on peut se rendre compte qu'une certaine confusion ou manque de précision entoure le concept d'efficacité. En effet, on peut remarquer que l'emploi du terme efficacité énergétique ne fait pas toujours référence à des rapports entre grandeurs physiques. Cela peut désigner de façon générique l'ensemble des mesures et moyens pour économiser de l'énergie (il suffit de constater l'ensemble des préconisations gouvernementales utilisant ce terme pour faire réduire la demande énergétique [UE, 2005]).

Mais dans le domaine du bâtiment en particulier, on fait un amalgame avec la consommation énergétique. En effet, on exprime l'efficacité énergétique des bâtiments en kWhEP/m²/an [RT2005, 2005]. Or ceci correspond au niveau de performance énergétique du bâtiment mettant en œuvre un certain nombre de moyens technologiques et d'ingénierie dans l'objectif de consommer moins. Ainsi, on associe un objectif, un idéal à un tel terme chiffré.

Énergie		Lave-linge
Fabricant		
Modèle		
Économe		A
A		
B		
C		
D		
E		
F		
G		
Peu économe		
Consommation d'énergie kWh/cycle <small>(Sur la base des crédits obtenus pour le cycle blanc 60°C dans des conditions d'usage normales)</small> La consommation réelle dépend des conditions d'utilisation de l'appareil		0.95
Efficacité de lavage <small>A : plus élevé G : plus faible</small>		A B C D E F G
Efficacité d'essorage <small>A : plus élevé G : plus faible</small> Vitesse d'essorage (tr/mn)		A B C D E F G 1200
Capacité (blanc kg)		5,0
Consommation d'eau L		48
Bruit [dB(A) re 1 pW]	Lavage	51
	Essorage	65
<small>Norme EN 60456 Directive 95/12/CE relative à l'étiquetage des lave-linge</small>		

Fig 32 : Exemple d'étiquette Energie

1.2.2 L'efficacité dans le génie industriel

Dans le génie industriel et en ergonomie, on retrouve le terme d'efficacité adjoint à celui d'efficacité afin de définir la performance industrielle d'un procédé [BERR, 2002]. Ainsi, dans les activités d'un process, l'efficacité du processus se rattache à une vision globale et qualitative du process alors que l'efficacité est une notion à portée locale et ponctuelle [AFGI, 1992]. On peut résumer leur positionnement des uns par rapport aux autres par la figure 33.

Notion:	Efficiency	Efficacy	Performance
Devise:	« Doing the right thing »	« Doing the thing right »	“Doing the right thing right”
Portée :	Locale Verticale Quantitative	Globale Horizontale Qualitative	Intégrée

Fig 33 : Efficacité/Efficacy et Performance d'un Procédé Industriel [ALNA, 2000]

On retrouve dans les notions d'efficacité et d'efficience un positionnement vis-à-vis de l'utilité de la tâche effectuée.

Enfin, le terme d'efficience énergétique existe mais est un concept assez peu employé en tant que tel qui exprime la volonté de *minimiser la consommation énergétique d'un équipement tout en maximisant le service rendu par celui-ci*. [WIKIb, 2011] Nous retrouverons cette approche dans le concept d'efficacité d'usage que nous nous proposerons d'établir.

1.3 Bilan de l'étude sémantique et positionnement de notre approche

Nous avons pu voir au travers de l'analyse sémantique des différents termes liés à l'efficacité énergétique, et même dans le terme même d'efficacité énergétique, qu'il existe une certaine confusion concernant les contours de la définition du concept d'efficacité énergétique.

On peut néanmoins en tirer l'enseignement important que le point de vue sous lequel est souvent abordé l'efficacité, et qui est devenu implicite dans le langage courant, est celui attaché à l'économie et à la technique. Dans ce sens, on emploie souvent, à tort, le terme d'efficacité énergétique alors qu'il s'agit en fait davantage du rendement énergétique. Dans l'ensemble des rapports d'efficacité énergétique classiques, ce sont toujours des éléments physiques, quantifiables par une mesure physique, qui constituent ces rapports. On caractérisera par la suite la définition d'efficacité énergétique comme *efficacité énergétique « classique » ou « physique »* l'ensemble de cette terminologie commune. En effet, les éléments constituant ce genre de rapport sont intrinsèquement liés à la nature matérielle de la physique.

Nous avons néanmoins pu voir qu'au niveau étymologique, que ce soit dans la langue française ou dans d'autres langues, la notion d'efficacité s'applique à un espace bien plus général que l'aspect purement technique de la définition scientifique. Cela permet d'en tirer la composante supplémentaire qui est déjà incluse dans certaines définitions, relatives à *l'être humain*, et qui s'apparente à la dimension usage évoquée dans le chapitre 2 lors du retour d'expérience. C'est sur ce dernier terme que nous positionnerons nos travaux, tâchant de faire ressortir cette dimension usage liée à l'humain dans la définition même de l'efficacité énergétique et de voir ce que cette nouvelle approche peut amener d'intéressant.

1.3.2 Distinction et positionnement de l'efficacité d'usage dans la chaîne de valeur énergétique

Nous avons pu voir que l'efficacité énergétique selon le sens commun est davantage la partie de l'efficacité correspondant à l'approche physique du terme. Dans ce cadre, la mise en application de l'efficacité énergétique correspond à un ensemble de mesures que l'on peut mettre en œuvre au cours du processus de transformation de l'énergie afin de maximiser l'énergie utile. En effet, en terme d'utilité de l'énergie, on peut définir une chaîne de valeurs énergétique permettant de positionner les différentes transformations et conversions d'énergie tout au long de son cycle d'utilisation, de sa création/extraction à l'usage final (exemple de la transformation de l'électricité sur la figure 34 montrant une perte d'efficacité totale de quasiment 90%).

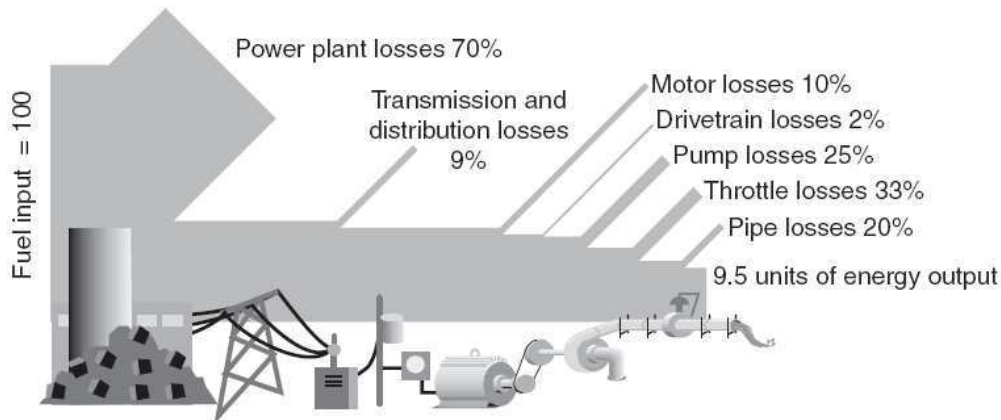


Figure 34 : Représentation d'une chaîne de conversion d'énergie dans l'exemple de l'électricité [LOVI, 2004]

Comme l'illustre la figure 35 [THIEb, 2008], l'efficacité énergétique dite physique s'appliquera sur l'ensemble du processus de transformation réellement lié à la technique : de l'extraction de l'énergie primaire à sa transformation en énergie utile. Actuellement, le reste des mesures de réduction de consommation d'énergie est considéré sous le couvert de la « sobriété énergétique », domaine de l'humain, qui justement nous intéresse par la dimension usage.

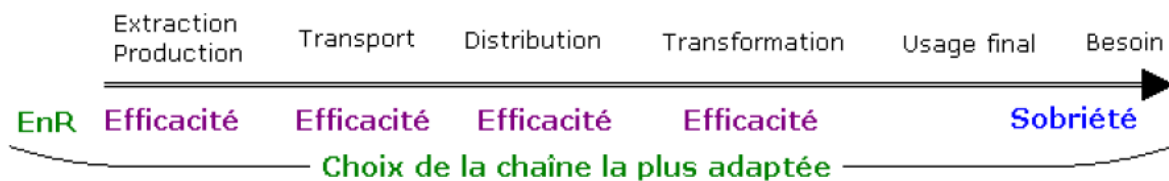


Figure 35 : Structure de la chaîne énergétique et moyens d'actions [THIEb, 2008]

1.3.2.1 Positionnement par rapport à la sobriété énergétique

La sobriété énergétique dans les bâtiments est une composante des mesures préconisées dans l'approche des Négawatts, ce dernier concept étant une unité fictive d'énergie permettant d'évaluer l'économie d'énergie réalisée [LOVI, 1990]. Le calcul de consommation négawatt est en fait une mesure de « non-consommation effective » de l'énergie, permettant, entre autres, de faire émerger les gaspillages d'énergie et d'inciter aux économies d'énergie afin de « faire la même chose en consommant moins ».

En France, la démarche Négawatt, au travers de l'association éponyme, se décline en trois étapes [NEGA, 2006] (figure 36) :

- la **sobriété énergétique**, qui consiste à supprimer les gaspillages et les besoins superflus. Cela fait appel au comportement de chacun pour limiter sa consommation d'énergie. Elle s'appuie sur la responsabilisation de tous les acteurs : du producteur au citoyen en appelant à la vigilance dans les gestes quotidiens.
- l'**efficacité énergétique**, qui permet de réduire les consommations d'énergie pour un besoin donné. Cela consiste à réduire les pertes d'énergie des appareils en augmentant leur rendement. On retrouve ici l'idée d'améliorer la chaîne de conversion et de transformation de

l'énergie précédemment citée qui correspond à la vision technocentrée ou physique de l'efficacité.

- les **énergies renouvelables**, qui répondent à nos besoins énergétiques avec un faible impact sur notre environnement et une gestion décentralisée. En diminuant la consommation au travers de la sobriété et l'efficacité énergétique, cela permet aux énergies renouvelables de répondre durablement aux besoins sans épuiser la planète.

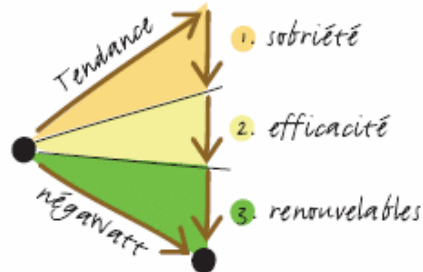


Figure 36 : La démarche Négawatt (Négawatt, 2006)

On trouve ici que l'usage est abordé selon la sobriété énergétique. Selon ce point de vue, il ne s'agit que de considérer l'usage comme une bonne éducation des personnes qui agissent de manière vertueuse en réduisant leur consommation (au détriment de leur confort ?). Mais comme le souligne O. Sidler au travers de divers travaux issus de campagnes de mesures, est-ce que la seule sensibilité environnementale (ou sobriété énergétique) suffit ou doit-on également agir de manière coercitive sur la distribution d'énergie? [SIDL, 2009] Il faut alors sans doute aider les usagers à prendre conscience des phénomènes énergétiques aux usagers grâce à des systèmes persuasifs.

Cette approche de la consommation énergétique introduisant l'acteur humain est riche en enseignement mais en ce qui nous concerne, une telle approche ne tient pas compte de la nature de l'interaction réelle avec les équipements. En ce sens, la notion d'efficacité d'usage se positionne en regroupant les notions de sobriété et d'efficacité énergétique telles que présentées dans la démarche Négawatt.

1.3.2.2 Application des deux approches d'efficacité énergétique sur le génie électrique dans le bâtiment

Au regard des renseignements obtenus lors de l'étude bibliographique et sémantique sur les différentes terminologies de l'efficacité énergétique, on peut appliquer le double aspect de l'efficacité énergétique (physique et usage) aux compétences du génie électrique dans le système bâtiment:

- On peut d'une part améliorer le rendement intrinsèque de l'équipement (correspondant à l'**efficacité partie physique**). Cela correspond à une réduction de la consommation énergétique au point nominal et ceci indépendamment du temps de fonctionnement. L'ingénierie mécanique et électrique en particulier visera à augmenter un tel rendement énergétique. Cela passe par des études d'optimisation électromagnétiques des moteurs [BOMM, 2009], la mise au point de technologies moins énergétivores, un meilleur choix de matériaux, etc. Ces travaux constituent l'essentiel des travaux effectués dans le domaine de la recherche en électrotechnique.
- Le contrôle-commande des différents équipements fait également partie des moyens pour économiser de l'énergie, car un pilotage optimal des équipements vis-à-vis des consignes et de l'usage permet de pouvoir commander au « plus juste » par rapport à la demande de l'usage (donc lié à l'**efficacité partie usage**).

Nous allons ainsi au final porter notre étude sur cette nouvelle approche liée à l'usage et à la dimension humaine en interrogeant la notion même d'usage et d'interaction homme-machine pour reconsidérer la notion d'efficacité énergétique dans un ensemble plus global concernant le rapport entre l'utilisateur et l'énergie consommée.

2 Définition de l'efficacité d'usage énergétique dans le domaine du bâtiment par rapport à l'efficacité énergétique « physique »

Grâce à l'enseignement que nous apporte la sémantique du terme efficacité, nous avons pu distinguer les attributs « techniques » de l'efficacité d'un système par rapport à ses attributs dits « d'usage », liés à l'utilisation humaine du système. Nous avons également pu voir au travers du retour d'expérience que le point de vue de l'utilisateur faisait apparaître une double dimension des attentes soit en terme de satisfaction de service (plutôt point de vue occupant) soit en terme de réduction de consommations énergétiques (plutôt du point de vue exploitant).

Aussi, on peut voir converger de l'étude sémantique et de l'étude expérimentale les deux dimensions de l'efficacité énergétique :

- une dimension *anthropologique (liée à l'acteur humain)*. Cet acteur humain en tant qu'occupant agira de façon plus ou moins efficace dans le sens où il consommera plus ou moins d'énergie afin de satisfaire son propre confort. On intitulera « l'efficacité d'usage énergétique » la composante de cette efficacité énergétique (objet de notre étude)
- une dimension *technique* du bâtiment où l'acteur non humain (système de gestion énergétique) cherchera à réduire la consommation énergétique en améliorant les transformations physiques de l'énergie par les équipements. Cela fait référence à *l'efficacité énergétique physique* telle que nous l'entendrons par la suite.

Nous pouvons illustrer ces deux approches dites « d'usage » et « physique » au travers de l'exemple de l'éclairage dans un espace commun de bureaux comme l'Espace Bureau de la Plateforme PREDIS tout au long de la présentation théorique du concept d'efficacité d'usage énergétique proposé.

Lorsque l'on parle d'un éclairage énergétiquement efficace, en particulier dans les préconisations diverses d'économie d'énergie dans le bâtiment, cette efficacité indiquera la plupart du temps le choix de technologies de luminaires tels que les éclairage par LEDS ou par lampes Fluo compactes. Ainsi par éclairage efficace dans un bâtiment, on va souvent désigner, dans le langage courant, une solution technologique ayant des performances énergétiques bonnes, une solution architecturale maximisant l'éclairage naturel, etc. L'efficacité énergétique technologique ainsi indiquée relève donc davantage d'un effort au point de vue ingénierie à optimiser les procédés électriques, chimiques, etc. qui opèrent lors du fonctionnement du luminaire (voltage de la décharge électrique, utilisation de matériaux particuliers, etc.) [DANN, 2010]. L'objectif est donc bien d'obtenir une luminosité artificielle « maximale » ou plus exactement suffisante pour le confort visuel, pour une consommation électrique minimale ce qui correspond au rendement lumineux de la lampe en question. D'ailleurs, c'est sous cette forme de rapport que l'étiquette Energie sur les luminaires indiquent la performance énergétique des lampes (consommation de la lampe à une puissance de référence fonction simple du flux lumineux exprimé en lumens (linéaire brisée) [CEE, 1992]). Le sens d'efficacité ici employé correspond bien à une vision techno-

centrée⁴ car on s'intéresse à la performance technique à un niveau d'éclairage standard. Nous avons donc à faire à une *efficacité énergétique physique* car essentiellement basée sur les propriétés physiques de l'artefact.

Néanmoins, au regard de l'usage de l'éclairage (comme dans le cas de la plateforme PREDIS), le fait d'installer un équipement lumineux peu consommateur d'énergie électrique ne suffit pas à réduire substantiellement l'énergie consommée. En effet, le fait de ne pas éteindre les lumières lors de l'absence de personnes induit un surplus énergétique. Ce surplus énergétique est donc bien la conséquence d'un comportement humain de consommation, d'usage de l'équipement et est globalement indépendant de la performance énergétique même de l'équipement utilisé. Cette dimension usage est souvent occultée lorsque l'on parle couramment d'un éclairage efficace pour diverses raisons en particulier dues à la complexité de l'usage. Car au-delà de l'allumage ou non de l'éclairage lors de l'occupation, on peut également se poser la question de la localisation de l'éclairage : si je suis seul dans une salle, est-il utile d'éclairer toute la salle ? La question du niveau de luminosité : si je suis à côté d'une fenêtre, ai-je besoin et/ou envie de moins d'éclairage artificiel ? Et si j'utilise l'éclairage à des fins esthétique ou de sécurité, le système doit-il automatiquement éteindre la lumière ? Ces exemples font ainsi apparaître le fait que l'usage même de l'équipement par les usagers, leur appropriation de celui-ci vis-à-vis de leur besoin réel est une dimension pouvant amener à des comportements énergétiques qui ne sont pas forcément énergétiquement « efficaces » si l'on considère le bilan énergétique global. La notion d'efficacité qui permet d'intégrer la dimension humaine sera ce que nous proposerons d'appeler l'*efficacité d'usage énergétique*.

L'intégration dans le système bâtiment de l'humain possédant des données difficilement formalisables telles que la satisfaction, introduit une certaine complexité au système qui nécessite que l'on change d'approche dans l'épistémologie même employée pour décrire les systèmes. Il peut en effet paraître illusoire de vouloir intégrer entièrement la versatilité des usages dépendant de facteurs aussi complexes que l'humeur, l'éducation, les phénomènes sociaux de groupe, etc. Afin de pouvoir intégrer l'acteur humain dans la définition de l'efficacité d'usage, on se placera dans une épistémologie constructiviste que nous allons présenter à présent.

2.1 Propriétés générales du rapport d'efficacité d'usage

2.1.1 Un mythe rationnel

En premier lieu, de par les termes qu'elle implique (des données appartenant au domaine du conscient ou de l'inconscient de l'acteur humain comme nous verrons plus tard, donc des données techniquement et éthiquement non disponibles de façon précise) et les objectifs qui peuvent paraître ambitieux dans lesquels elle s'inscrit, l'efficacité d'usage s'inscrit davantage comme un idéal à atteindre au travers d'un cheminement d'amélioration. Nous verrons par la suite (Partie 3 chapitre 5), au travers de l'exemple des bâtiments à énergie positive, de l'intérêt de la recherche d'un idéal mais non réalisable, qui sera alors considéré comme un mythe rationnel [HATC, 1992]. Dans ce sens, l'objectif n'est pas forcément d'atteindre l'idéal qui, en tant que tel n'est pas forcément atteignable (pour diverses raisons techniques, pragmatiques, de mesurabilité des paramètres que nous présenterons plus tard) mais le fait même d'avoir cet objectif permet de réfléchir et mettre en place un certain nombre d'actions pour pouvoir appliquer les valeurs/les vertus que porte ce concept.

⁴ Par vision techno centrée, on exprime le point de vue de l'ingénierie et des services focalisé sur la technique des équipements. Ainsi, les préoccupations seront basées sur la performance inhérente de la machine plutôt que son utilité / utilisation en relation avec son usager)

2.1.2 L'utilisation d'une épistémologie constructiviste

L'étude de l'usage qui intègre l'acteur humain amène, de par la complexité même de ce dernier (qui est un acteur individualisé, disposant de multiples spécificités complexes le caractérisant telles que son éducation, sa culture, etc. et qui sont autant de paramètres non formalisables et qui influent l'usage), à reconsidérer l'approche scientifique selon laquelle on analyse le sujet. Nous reprendrons ici un point de vue largement présenté dans les travaux de recherche de Frédéric Wurtz sur l'évolution de l'approche scientifique en génie électrique afin d'intégrer des acteurs complexes tels que les acteurs humains en passant d'une épistémologie scientifique dite « classique » à une épistémologie « constructiviste » [WURT, 2008].

L'épistémologie classique cherche à édifier une vérité sur chaque phénomène étudié et ce indépendamment de l'observateur. Compte tenu du fait que l'usage est une connaissance totalement variable (dépendant des cultures, des envies, de la spécificité humaine), un modèle d'usage, ou dans une autre dimension, une fonction de satisfaction globale (comme nous le verrons plus tard dans la quantification de notre concept d'efficacité d'usage), ne peuvent être construits de manière unique, ontologique et être validés par une démarche de vérification expérimentale classique.

Ainsi, l'approche constructiviste [LEMO, 1999] permet d'aborder les problématiques selon l'angle d'hypothèses phénoménologiques et téléologiques (Annexe 16). En cela, on contextualise les connaissances nécessaires pour la construction des modèles par rapport à leur environnement en s'appuyant sur des critères d'effectivité⁵ et d'intelligibilité⁶ des modèles.

Nous pourrions retrouver en annexe 16 une définition plus précise de ces termes avec une présentation des différentes notions caractérisant l'épistémologie constructiviste. Néanmoins, on retiendra de la notion d'effectivité que c'est une recherche de conception basée sur l'objectif que l'on veut atteindre. Le concepteur possède ainsi la liberté d'adapter le concept / le modèle à ses propres objectifs afin que les données en résultant puissent être les plus pertinentes au regard de ses objectifs et ainsi être en mesure d'apporter les éléments nécessaires à une application pratique. Afin d'arriver à de telles prouesses, il est nécessaire que le concept/modèle dispose de certaines propriétés comme l'intelligibilité qui est le fait de pouvoir comprendre facilement l'information transcrite.

Il faut en retenir le fait que dans l'épistémologie constructiviste dans laquelle nous nous situons, **on construit des concepts, des modèles, etc. afin qu'ils soient effectifs, c'est-à-dire qu'ils puissent produire un effet réel et vertueux en vue d'économiser de l'énergie dans notre cas.**

2.2 Proposition de définition du concept d'efficacité énergétique d'usage appliqué au système bâtiment

On se propose de partir des rapports classiques d'efficacité énergétique (efficacité énergétique physique) qui mettent en rapport deux dimensions physiques, et d'aller au delà afin de prendre en considération le côté usage, propre à l'acteur humain et qui correspond à la satisfaction des services, et la consommation énergétique. Nous en retiendrons le même objectif commun final qui est de réduire la consommation énergétique du système.

⁵ Effectivité : Désigne la capacité d'être valides dans certains contextes, pour agir (comprendre, prendre, des décisions, ...) avec un résultat efficace

⁶ Intelligibilité : Désigne la capacité d'aider à la compréhension, à l'aide à la décision pour les acteurs humains

2.2.1 Analyse de l'usage dans les bâtiments

Afin d'intégrer l'aspect usage dans la définition du concept d'efficacité énergétique, on se doit de partir de la raison première de l'utilisation d'un équipement ou d'un système : l'utilisateur cherche à satisfaire ses besoins ou ses désirs par l'usage de cet équipement/système.

2.2.1.a Du besoin à l'action

Sans aller jusqu'à analyser la définition même de ces concepts, on pourra s'appuyer sur les travaux de Maslow (avec la pyramide des besoins illustrée en figure 37) ainsi que sur les traités d'Epicure sur les différentes formes de désirs (tableau 1) pour spécifier ce que nous pourrions caractériser d'« attentes » correspondant à l'expression des besoins et désirs de l'utilisateur d'un équipement ou plus généralement d'un service. On part donc initialement de la formulation d'une demande implicite, formulée dans le domaine du cérébral, dans le sens où de telles attentes appartiennent au monde immatériel des idées.

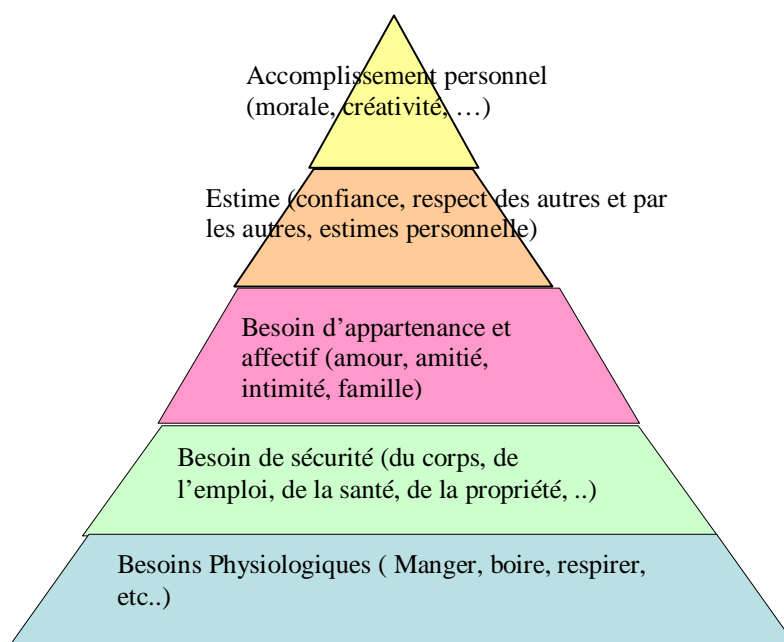


Figure 37 : Pyramide des Besoins [MASL, 1994]

Désirs naturels			Désirs non naturels		
Nécessaires			Simplement naturels	Artificiels	Irréalisables
Pour le bonheur (ataraxie)	Pour la tranquillité du corps (aponie)	Pour la vie (nourriture, sommeil)	Variation des plaisirs, recherche de l'agréable	Ex : Richesse, gloire,...	Ex : Désir d'immortalité, etc.

Tableau 1 : Catégorisation de l'ensemble des désirs de l'être humain [EPIC, 2009]

Ainsi par exemple, étant usager de la plateforme PREDIS, un bâtiment tertiaire, en tant que chercheur, catégorie socio professionnelle caractérisant les fonctionnalités de mon travail, je vais attendre du système qu'il puisse me permettre d'y vivre et d'y travailler dans des conditions optimales durant ma période d'occupation. Ainsi, mes attentes seront, en terme d'éclairage :

- Besoin d'avoir mon poste de travail éclairé à un niveau de luminosité suffisant quand je suis effectivement devant mon poste
- Désir d'avoir une commande proche (si possible individualisée)
- Désir d'avoir recours à l'éclairage artificiel uniquement lorsque l'éclairage naturel est insuffisant

Maintenant, si on se place au niveau résidentiel, les attentes peuvent varier :

- Besoin d'avoir l'éclairage de la chambre restée allumée le temps que j'aie chercher quelque chose dans une autre pièce
- Désir d'avoir une luminosité plus douce à certaines périodes de la nuit
- Pour certaines personnes, besoin d'avoir la lumière du couloir concomitant à la chambre allumée durant la nuit

Cet ensemble d'exemples illustre la diversité et la complexité des attentes que peuvent avoir les personnes auxquelles il faut rajouter les spécificités culturelles des personnes, (liés à l'éducation, la culture, etc...). D'une personne à l'autre les attentes pourront être de nature différente, mais également pour une même personne, celles-ci peuvent varier d'un jour à l'autre.

Au sein du bâtiment, l'utilisateur va avoir un certain nombre d'attentes et souhaits sensibles (nous reviendrons un petit peu après sur cette notion). Cela peut être un niveau de satisfaction physique, faisant appel à ses différents sens, comme le confort thermique, le confort visuel, le confort sonore. Mais cette notion de confort peut être généralisée aux attentes relatives à des services, comme le fait d'obtenir un aliment chaud lors de l'utilisation d'un four à micro ondes, d'accéder à l'information lors de l'utilisation d'une télévision ou d'un ordinateur, etc. Nous reviendrons par la suite sur cet ensemble de perceptions qui peut être généralisé par le concept de « phénomènes » [KANT, 2004].

Ainsi, à partir de ses attentes, qui sont encore au stade de la pensée (consciente ou inconsciente), la personne va alors, au travers d'un processus de décision, concrétiser cela en action afin de satisfaire ses besoins ou désirs. L'action qui est dès lors la traduction dans le monde physique (ou matériel) d'attentes exprimées dans le monde cérébral (ou immatériel), correspondra à l'interaction entre les acteurs humains, ou même non humains⁷, avec les différents équipements du bâtiment.

2.2.1.b De l'action au service

Les actions peuvent être de différentes natures : cela peut être d'imposer une consigne sur un équipement (j'ai le désir d'avoir plus chaud : je décide d'augmenter le thermostat du chauffage) ou de modifier le système actuel (j'installe mon propre radiateur) ou alors une action directe sur l'équipement (j'ai faim : j'ouvre le réfrigérateur pour m'approvisionner en aliment frais). Ces actions sont de l'ordre de l'usage car on peut agir de différentes manières pour exprimer ses désirs. Par exemple : pour l'envie d'avoir un aliment cuisiné conservé au frais, je peux soit le mettre directement au réfrigérateur soit attendre d'abord qu'il refroidisse avant son introduction dans le réfrigérateur. De même, si j'ai froid, je peux soit mettre un vêtement en plus, soit agir sur le système de chauffage. Ainsi il peut y avoir différentes décompositions de l'action pour effectuer une même tâche.

⁷ Le système complexe bâtiment, tel que nous le considérons à présent, correspond à l'ensemble des acteurs humains et non humains : Ces derniers correspondent à l'ensemble des systèmes de contrôle-commande qui agissent sur les équipements et les infrastructures actives et passives effectuant les différents services du bâtiment. (figure 40).

Dans notre exemple sur l'éclairage, si j'ai décidé d'avoir de l'éclairage à mon poste je vais agir sur l'interrupteur d'allumage et si le niveau d'éclairage ne me satisfait pas, je règle la consigne. Ainsi, l'action pourra être également le fait d'une réaction à la perception du niveau actuel de ma satisfaction. Ensuite, pour le même éclairage, je pourrais tout aussi bien utiliser l'équipement de manières différentes, comme mettre au maximum la consigne d'éclairage, oublier de l'éteindre durant mes absences, éclairer une autre zone que mon poste, etc. Tous ces usages annexes sont autant d'actions qui se réfèrent à la même tâche mais dont l'usage est différent.

Les actions peuvent être réalisées aussi bien par un acteur humain (l'occupant des lieux) que par un acteur non humain (système de pilotage/ contrôle-commande). Dans ce dernier cas, on pourra considérer qu'il existe tout de même un rapport avec un acteur humain, mais ce sera de manière indirecte car ne s'agissant alors pas de l'occupant mais du concepteur de la stratégie de contrôle-commande qui réalise l'action.

Par ailleurs, le système technique bâtiment (systèmes actifs et passifs) avec lequel l'utilisateur interagit, est soumis à des flux gratuits (air, soleil, eau), ainsi qu'à des flux payants : flux énergétiques (électricité, fioul, gaz, eau, etc.). Les équipements, en particulier les systèmes actifs (c'est-à-dire, rappelons-le, les systèmes pilotables), ont en effet pour fonctionnalité de transformer et convertir les énergies gratuites ou payantes en service correspondant aux attentes des usagers qui se sont exprimés au travers des actions et consignes (par exemple l'allumage du four à micro-ondes traduit, a priori, l'expression d'une volonté d'avoir un aliment chaud). Durant cette phase de conversion/transformation d'énergie en service (dans le sens où le service permet « de transformer de l'énergie pour répondre à un besoin spécifique de l'utilisateur » [Ha, 2007], ce qui correspond à la définition d'« *energy service* » de Lovins [LOVI, 2004]), il va y avoir une part d'énergie proprement utile qui sera rattachée au service souhaité, ainsi qu'un certain nombre d'énergies non utiles (énergie thermique dissipée, etc.).

Dans le cas de l'éclairage, le système d'éclairage artificiel (par tube fluorescent par exemple), va, à la commande de l'utilisateur via l'interrupteur, convertir l'énergie électrique par ionisation des vapeurs de mercure à basse pression ou de l'argon, en énergie lumineuse (énergie utile entre autre mesurable par le rendement lumineux), mais également en énergie thermique dissipée (énergie non utile).

2.2.1.c Du service à la perception sensible

Les services effectués par ces équipements passifs et actifs peuvent être caractérisés comme des « phénomènes » dans le sens kantien du terme où un phénomène est une « *Chose telle qu'elle apparaît à l'homme, telle que seul l'homme peut la connaître, à travers la structure de son esprit (intuitions pures a priori, catégories)* » [Kant, 1999]. L'utilisateur perçoit alors les phénomènes généraux de l'ordre de l'ambiance (température, humidité, luminosité, ...) du flux d'informations (texte, chiffres, musique, etc.), etc. qui correspondent à autant de services rendus par les équipements du bâtiment (actifs ou passifs).

L'éclairage reçu au poste de travail occupé, le niveau de luminosité qui permet de voir sans éblouir mon objet de travail (l'ordinateur) et ses environs sont les phénomènes que je perçois.

Le service rendu va également engendrer un certain nombre de coûts par le fonctionnement de celui-ci : coût énergétique (en kWh, ou J par exemple pour l'énergie thermique), coût financier, coût environnemental (Rejet de CO2 et autres GES, déchets, etc.) que l'utilisateur va percevoir de manière informelle au travers d'une facture. Ces coûts peuvent être évalués de façon directe (en utilisant la mesure via des compteurs d'énergie) ou

indirecte : par un calcul le long d'une chaîne de conversion (exemple de l'énergie primaire) ou le long d'un cycle de vie d'un composant (en prenant en compte la dégradation du milieu naturel par les polluants, le rejet de GES, l'énergie grise, etc..).

La consommation électrique de l'éclairage va être facturée selon un certain montant (par exemple 0,12 €/kWh) mais l'on pourrait également, par exemple, y associer son impact environnemental en facturant à hauteur de l'énergie primaire utilisée pour obtenir l'électricité ou par rapport à sa contribution à l'effet de serre (avec une unité spéciale : g CO₂/kWh par exemple)

Au final, l'utilisateur perçoit, au travers de ses différents sens, un certain nombre d'éléments : des phénomènes généraux, relatifs aux services effectués par les équipements passifs et actifs, des flux énergétiques utiles, ainsi que des coûts générés par ces composants techniques. C'est en cela qu'il y aurait une perception sensible des phénomènes et informations, car relative à l'emploi des 5 sens.

2.2.1.d De la perception sensible à la satisfaction globale

On se propose de définir la satisfaction globale comme le processus cognitif de l'utilisateur qui va consister à interpréter les différentes perceptions émanant des différents sens et à comparer celles-ci à ses attentes initiales. C'est en cela que la satisfaction de l'utilisateur sera comblée ou non : si le niveau de confort perçu est conforme aux besoins et désirs souhaités, l'utilisateur sera satisfait; dans le cas contraire d'inconfort, l'utilisateur pourra alors réagir (au travers d'une décision puis action) avec l'équipement correspondant. On s'inscrit alors dans un cercle itératif entre l'action et la perception d'un service et ce jusqu'à obtention de la satisfaction.

Dans l'exemple de l'éclairage, le niveau de luminosité est une donnée physique que je perçois et que je peux juger en fonction de mes besoins. En cela si je suis satisfait, il n'en découlera aucune action derrière alors que si je ne suis pas satisfait, je change la consigne d'éclairage.

La chaîne de valeur d'interaction entre l' (les) usager(s) et les équipements actifs et passifs du bâtiment permet de mettre en exergue les deux facettes de la dimension humaine qui ne sont pas prises en compte dans la définition actuelle de l'efficacité : l'usage en tant qu'actions et consignes, et l'usage en tant que perception des services ; correspondant respectivement aux domaines du « bon-être » (ou *rationnel*⁸) et « bien-être » (ou *sensible*⁹) tels que nous les définirons et entendrons ultérieurement (partie 2.3 chapitre 3) (figure 38).

La relation entre ce qui est perçu au final (domaine sensible) et ce qui est décidé ensuite (domaine rationnel) peut être vue selon deux approches :

Point de vue parallèle de la relation perception /décision (figure 38)

Un premier point de vue de la relation entre perceptions et attentes (qui se manifeste par les actions) suppose que la satisfaction globale est construite directement à partir de la

⁸ Par rationnel, on emploiera la définition sa définition encyclopédique (Rationnelle : Qui est fondé sur la raison, qui provient de la raison; qui procède par un raisonnement logique indépendant de l'expérience.) afin de décrire l'ensemble des processus mentaux qui sont de l'ordre d'un raisonnement, ou, en d'autres termes, caractérise une satisfaction ou une action qui est issue d'une réflexion intellectuelle, d'une pensée. On opposera cela au domaine sensible qui est purement réaction physiologique du corps.

⁹ Par sensible, on caractérisera tout ce qui a attrait aux sens, qui découle davantage d'une réaction physiologique que d'une construction mentale.

satisfaction liée à la perception des services (satisfaction sensible). En fonction de celle-ci, l'utilisateur pourra réagir ou non et cela pourra être jugé selon la satisfaction rationnelle. Ce processus est essentiellement linéaire.

Point de vue transversal de la relation perception / action (figure 39)

Un autre point de vue consiste à considérer la relation entre satisfactions globale, sensible et rationnelle comme un processus davantage interne. Cette vision organise les notions d'action et de perception sous forme de « couches de conscience » : il y aura des informations donnant lieu à des processus conscients (c'est-à-dire entraînant à une réflexion) et d'autres donnant lieu à des réactions inconscientes. La différence par rapport au premier point de vue est que l'on peut disposer de perceptions et d'actions de l'ordre du sensible d'une part, et de perceptions et actions de l'ordre du rationnel d'autre part.

Dans cette approche, l'acteur humain est constamment soumis à des phénomènes physiques et l'usage commence donc par la perception des éléments. Ainsi, il va se créer dans un premier temps, dans la strate sensible du système de décision de l'utilisateur, une satisfaction sensible qui permet d'identifier le niveau de confort dans lequel celui-ci se trouve (davantage des données relatives à l'ambiance) : c'est ainsi une évaluation sensorielle à laquelle, en cas d'inconfort, il peut y avoir des réactions physiologiques provoquant des actions indépendantes d'une réflexion quelconque. Par exemple, si on a trop chaud, la réaction sensible correspond au phénomène corporel de sudation qui pourra entraîner ensuite d'éventuelles actions.

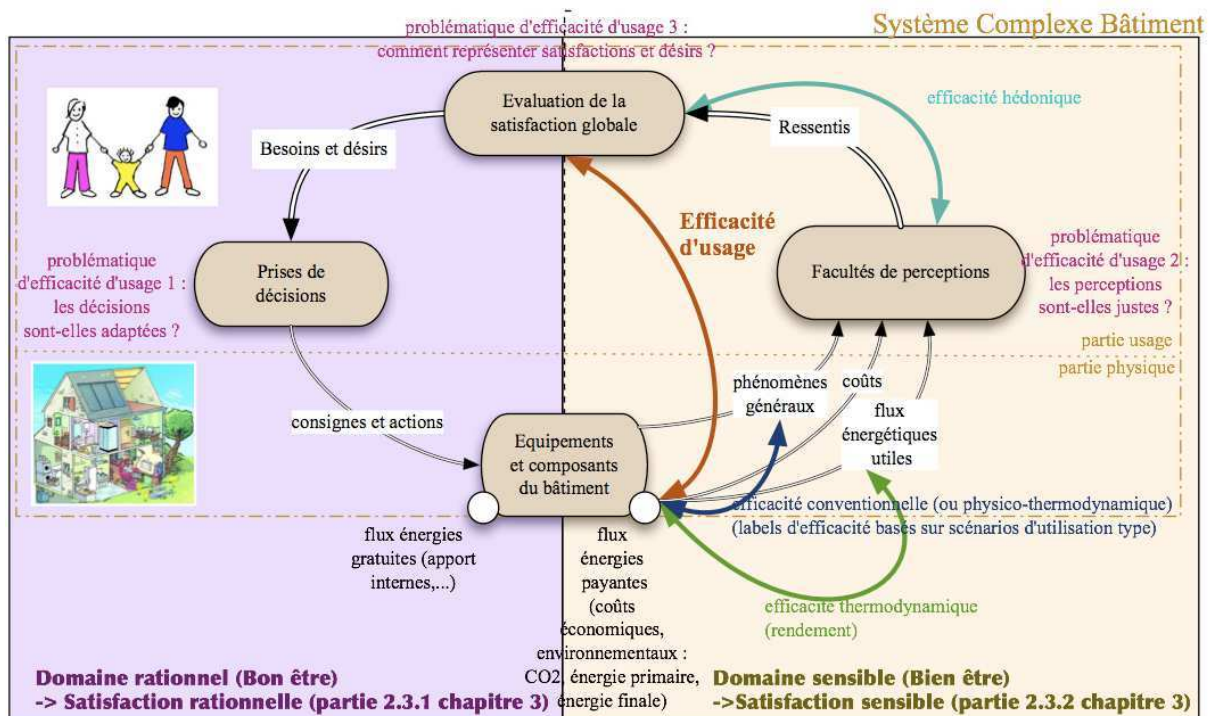


Figure 38 : Diagramme de la chaîne d'interaction Homme/Equipements du bâtiment

Par opposition à ce domaine sensible, lié au corps, il y a le domaine rationnel (ou intellectuel) qui va être le foyer des raisonnements. Il peut y avoir des informations perçues qui seront rattachées au domaine du rationnel, dans le sens où elles auront besoin d'être interprétées afin de pouvoir conduire à une satisfaction particulière (c'est ainsi le cas avec les données informatives comme par exemple le coût lu sur une facture). Elles pourront ensuite engendrer des réflexions visant à formuler des besoins et désirs qui seront ensuite concrétisés en action. Par exemple, si je trouve que la porte du réfrigérateur est ouverte depuis trop

longtemps (ce qui va consommer davantage d'énergie), je peux décider de la fermer immédiatement ou pas.

Ainsi, dans un second point de vue, on pourra avoir les deux notions de satisfaction qui correspondent davantage à des strates cognitives différentes (figure 39).

Par la suite, nous nous inscrirons davantage dans la première vision, où l'on considère que l'on perçoit toutes les données issues de l'extérieur du corps, que l'on interprète celles-ci en fonction de nos besoins et qu'elles conduisent à l'ensemble des actions réalisées le cas échéant pour compenser l'insatisfaction. Cependant, la deuxième approche qui peut apparaître plus généraliste et davantage basée sur les mécanismes psychologiques de satisfaction, pourra à terme être employée afin de prendre plus en compte la complexité de la problématique de l'usage.

2.2.1.e Positionnement des rapports d'efficacité énergétique « classiques »

Dans les diagrammes d'analyse d'usage proposés précédemment (figure 38 et 39), nous avons pu décomposer l'interaction entre l'acteur humain (l'usager) et les artefacts présents dans le système bâtiment. On peut positionner dans ces graphes les concepts d'efficacité énergétique classiques tels que présents dans la littérature et présentés au début de ce chapitre. En effet, on peut considérer que l'efficacité énergétique thermodynamique, qui est la relation entre une grandeur physique de sortie et une grandeur énergétique consommée s'assimile à une relation entre un flux énergétique utile (donc une grandeur physique mesurable de sortie) et un flux énergétique consommé et donc payant. En effet, l'aspect économique implicite de l'efficacité énergétique classique mettra toujours en rapport une grandeur avec un flux d'énergie consommé payant, qui est le dénominateur commun de tous les rapports d'efficacité énergétique.

Système Complexe Bâtiment

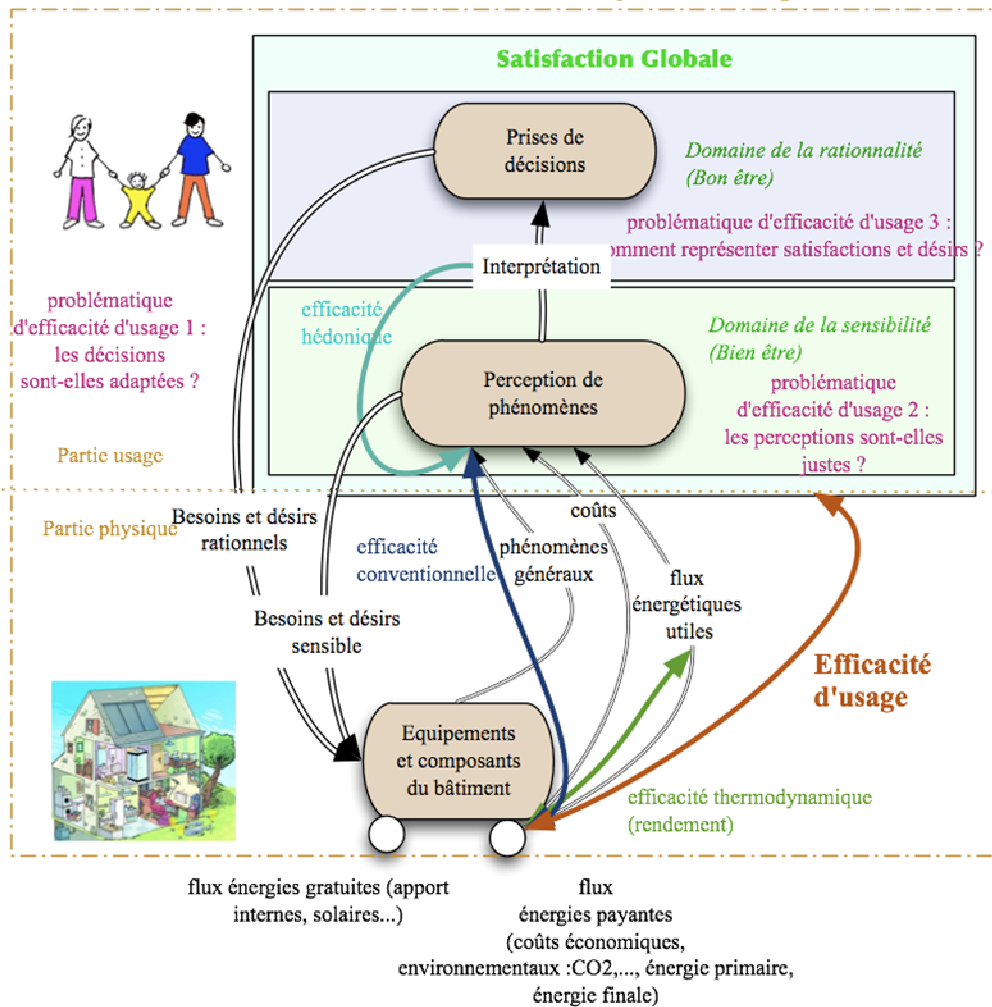


Figure 39 : Diagramme de la chaîne d'interaction Homme/Equipements du bâtiment Point de vue « stratifié »

On retrouve ainsi l'aspect physico-thermodynamique (ou conventionnel comme indiqué dans la figure 38) de l'efficacité énergétique [PATT, 1996] comme la relation entre un service, qui peut être vu comme un phénomène au sens général du terme, et le même flux d'énergie payant.

Enfin, A.Lovins qui a fait également une étude approfondie sur le concept d'efficacité énergétique [LOVI, 2004], présente une forme d'efficacité énergétique que l'on peut retrouver dans notre graphe : l'efficacité hédonique. Celle-ci exprime le rapport qu'il existe entre un service effectué (ou un phénomène si on généralise comme dans la figure 38) et les plaisirs, les sensations procurés à l'acteur humain qui perçoit ce service. C'est en cela que l'on retrouve l'efficacité hédonique entre la perception des phénomènes et leur interprétation mentale dans la figure 38.

2.2.2 Proposition de définition de l'Efficacité d'Usage Energétique (EUE)

2.2.2.1 Définition et objectifs du concept d'efficacité d'usage énergétique

Par l'analyse de l'usage, ainsi que par le retour d'expérience de la plateforme PREDIS dans le chapitre 2, nous avons vu que l'usager en tant qu'habitant va vouloir une satisfaction

maximale de la part des services effectués dans le bâtiment. Dans le même temps, que cela soit du point de vue exploitant (comme dans le retour d'exploitant) ou du point de vue environnemental compte tenu du contexte énergétique que l'on a présenté dans le chapitre 1, on va vouloir que le système bâtiment consomme le moins d'énergie possible. On se propose de définir le concept d'efficacité d'usage énergétique justement en mettant en rapport ces deux volontés d'acteurs humains. Ainsi, **l'Efficacité d'Usage Énergétique (EUE)** est une relation permettant **d'étudier la satisfaction envers un service par l'usage comparé à la consommation énergétique de ce service.**

L'EUE se définit alors par un problème **multi objectifs** où l'on va chercher à *maximiser la Satisfaction Globale* de l'utilisateur tout en *minimisant la consommation énergétique*

La satisfaction globale est un terme général qui est fonction en particulier de deux composantes que l'on a vu émerger de l'analyse de l'usage vue précédemment (figure 38 et 39): l'aspect lié aux actions et l'aspect lié à la perception des services (Equation 5)

Satisfaction _ globale(Actions _ satisfaisantes & Confort _ satisfaisant) Equation 5

Ainsi, on se propose de considérer que l'utilisateur peut être amené à avoir une certaine forme de satisfaction envers l'action qu'il effectue par rapport à ses besoins « sensibles », mais également par rapport à l'utilisation de l'énergie : c'est-à-dire que s'il utilise de manière raisonnée l'énergie, cela contribuera à sa satisfaction. Ce dernier point étant relatif au domaine rationnel, que nous détaillerons ultérieurement (partie 2.3 chapitre 3), on pourra appeler *satisfaction rationnelle* cette composante de la satisfaction globale.

L'utilisateur sera soumis également, au travers de la perception, à une certaine satisfaction de confort qui est alors évaluée par les sens. On pourra appeler *satisfaction sensible* cette composante de la satisfaction.

La consommation énergétique quant à elle représente simplement le flux énergétique physique que l'on peut mesurer grâce à un compteur d'énergie en sortie du système bâtiment. C'est en cela une donnée objective.

2.2.2.2 Proposition de définition mono-objectif d'EUE

Comme nous l'avons présenté précédemment, on propose de définir le concept d'efficacité d'usage énergétique comme une extension des rapports d'efficacité classiques. Or ceux-ci sont bien souvent des rapports mono-objectifs que l'on cherche à maximiser en réduisant la consommation énergétique au dénominateur.

Afin de rendre mono-objectif notre problème d'EUE qui est, par définition, multi-objectifs (afin de s'aligner sur les concepts classiques d'efficacité énergétique), il existe plusieurs moyens [MAGO, 2004] parmi lesquels nous retiendrons deux grandes techniques : la pondération linéaire et le rapport par fraction.

Transformation de problème multi-objectifs en problème mono objectif par pondération linéaire

Dans ce cas de figure, l'objectif unique est une combinaison linéaire des deux objectifs qui définissent l'EUE. La fonction unique EUE à maximiser pourra alors s'écrire telle l'équation 6 et sera obtenue grâce à la maximisation de la satisfaction globale et la minimisation de l'énergie consommée.

$$EUE = \alpha \cdot \text{Satisfaction_globale}(\text{Satisfaction_rationnelle}, \text{Satisfaction_sensible}) - \beta \cdot \text{Energie_consommée}$$

Equation 6

Transformation de problème multi objectif en problème mono objectif par rapport par fraction

L'autre moyen de transformer un problème multi-objectifs en un problème mono-objectif est d'effectuer la division des deux objectifs, expression de l'efficacité d'usage énergétique que nous retiendrons ensuite. Dans ce cas, nous effectuerons une telle division **par analogie** avec les rapports classiques d'efficacité avec **comme dénominateur commun la consommation énergétique et au numérateur une représentation de la satisfaction** [PLOI, 2011].

$$EUE = \frac{\text{Satisfaction_globale}(\text{Satisfaction_rationnelle}, \text{Satisfaction_sensible})}{\text{Energie_consommée}}$$

Equation 7

L'objectif de l'EUE est la **maximisation du rapport présenté par l'équation 6** mais cela est avant tout symbolique, car mathématiquement il suffirait d'avoir une consommation nulle pour rendre le rapport infini, ce qui fait perdre de vue l'intérêt de l'approche proposée. Symboliquement, nous avons alors atteint l'idéal qui est une satisfaction optimale pour une consommation nulle. Pour une application dans le domaine des bâtiments efficaces que nous avons évoqués ou dans les *energy smart buildings*, il ne sera a priori pas possible de façon réelle d'annuler la consommation énergétique. Cette problématique de consommation nulle est une des limites de cette approche mono-objectif mais elle ne devrait pas exister dans les cas réels car correspondant à l'utilisation d'aucun équipement énergétique. Dans la démarche qualitative dans laquelle on s'inscrit, nous chercherons davantage à **maximiser le numérateur en minimisant le dénominateur**.

Afin d'illustrer comment s'applique ce concept, nous allons reprendre l'exemple de l'éclairage. On pourra évaluer l'efficacité énergétique d'usage de cet éclairage par rapport à sa capacité à répondre aux besoins réels des usagers tout en consommant le moins possible. Ainsi, la détection de présence afin d'offrir de l'éclairage juste quand on en a besoin, l'adaptation au niveau de luminosité par rapport à la période de la journée et / ou à l'éclairage naturel, la focalisation de l'éclairage sont autant de processus efficaces d'usage car ils tiennent en compte des spécificités de l'action. Cela pourra ainsi permettre, de faire des économies d'énergie par l'extinction de lumière dans les zones et périodes non occupées, l'abaissement du niveau de luminosité, etc. Mais, pour reprendre le cas des besoins d'éclairage dans le résidentiel par exemple, l'efficacité d'usage inclura également des spécificités liées aux comportements d'usage et aux raisons d'usage comme l'utilisation sécuritaire ou esthétique de l'éclairage artificiel (nous reviendrons un peu plus tard sur ces exemples).

Le rapport EUE, en premier lieu qualitatif, a ainsi pour vocation d'apporter une vision globale sur l'usage énergétique de tout ou partie du système bâtiment pour évaluer quelle est la satisfaction tirée d'un niveau de service effectué par rapport à la consommation énergétique

engendrée. En d'autres termes, en caractérisant l'efficacité d'usage d'un système, on vérifie la capacité effective de ce système à ce que l'énergie consommée serve uniquement à satisfaire les besoins et désirs des usagers.

Définitions des termes composants l'efficacité d'usage énergétique

L'équation 6 de l'EUE fait apparaître un certain nombre de termes et concepts dont la définition dans nos propos revêt une importance particulière.

Définition 2 : La satisfaction rationnelle (SR) se réfère au **bon usage de l'énergie par rapport aux besoins**. Cette satisfaction s'inscrit dans le domaine que l'on se propose de désigner par le néologisme de « *bon être* » car l'objectif est d'étudier si l'on utilise l'énergie (et par corrélation si l'on agit) de manière bonne ou mauvaise par rapport à la sobriété énergétique. Ce jugement de valeur, qui est évidemment subjectif, traduit le fait de juger si l'utilisateur agit de manière économe et suffisante, juste ce qu'il faut par rapport à ses besoins essentiels et non pas de manière excessive. On retrouve ainsi la notion de *suffisance énergétique* déjà évoquée [CALW, 2008], dans le sens où l'on pourra estimer, de façon subjective, la justesse énergétique employée pour effectuer le service. La satisfaction rationnelle associée à ce « bon être » est par définition une satisfaction de l'ordre de la raison, de l'intellect : c'est une satisfaction intellectuelle, vertueuse, liée à la conscience de consommer moins que prévu et d'agir correctement. En cela, c'est donc une extension pour regrouper l'ensemble des satisfactions issues d'une ***réflexion intellectuelle amenant un certain agissement***. On essaiera un peu plus tard d'analyser les questions sous-jacentes de cette approche de la satisfaction (partie 2.3).

Exemple de l'éclairage artificiel : la satisfaction rationnelle sera par exemple l'évaluation de l'utilisation de l'énergie électrique consommée par rapport à son usage. Ainsi, si par exemple, la lumière est allumée quand il y a quelqu'un, l'utilisateur est rationnellement satisfait car l'énergie électrique est bien consommée alors que si l'éclairage reste allumé alors qu'il n'y a personne, la satisfaction rationnelle est nulle car l'utilisateur a conscience d'un gaspillage d'énergie.

Définition 3 : La satisfaction sensible (SS) relève du domaine du « *Bien-être* » dans le sens où l'on s'intéressera davantage aux sensations physiques du corps humain. Dans ce cadre-là, l'utilisateur pourra se sentir bien ou mal en fonction, en particulier, du niveau de paramètres physiques tels que la température ou le niveau d'éclairage. D'ailleurs on parle dans le langage courant de bien-être et de mal-être qui, appliqué au domaine du bâtiment, peuvent être associés à ce domaine sensible en prenant en compte également des émotions et de l'humeur [ANTO, 2007]. En effet, on pourrait y retrouver, notamment dans le cas du « mal être » tous les symptômes liés au bâtiment malsain qui caractérisent l'ensemble des phénomènes physiques à prendre en compte pour que celui-ci soit vivable [BURG, 2004]. En ce sens, la satisfaction sensible se rapporte à ce que l'on désigne dans la littérature et dans le chapitre 2 le *confort humain* [FRON, 2011]. La notion de satisfaction sensible peut être plus générale que le terme de confort prenant en compte des perceptions de phénomènes non physiques (par exemple, le fait d'avoir une machine à laver prête à temps n'est pas forcément considéré comme un confort mais fait partie de la satisfaction sensible). En cela, la satisfaction sensible regroupe l'ensemble des satisfactions issues d'une ***sensation par rapport à un service effectué***. On essaiera un peu plus tard d'analyser les questions sous-jacentes de cette approche de la satisfaction (partie 2.3).

Exemple de l'éclairage artificiel : la satisfaction rationnelle sera par exemple le niveau d'éclairage fourni par les lampes. L'utilisateur peut être plus ou moins satisfait en fonction du

niveau d'éclairage par rapport à son niveau de confort visuel acceptable et pourra ensuite réagir en conséquence ou pas.

2.3 Problématiques de l'efficacité d'usage énergétique

L'efficacité d'usage énergétique, de par la complexité et la subjectivité des termes employés, pose un certain nombre de problématiques qui sont autant de points de discussion sur l'étude de l'usage et de ses conséquences. Néanmoins, l'objectif demeure de cerner la problématique de l'usage et pour cela, il faut concevoir des outils *effectifs*, qui offrent une information utile pour le traitement ultérieur. Nous verrons dans un second temps quelles méthodes et paramètres peuvent permettre d'évaluer les différentes notions de satisfactions afin de les quantifier (au travers de fonctions de satisfaction (Partie 1 Chapitre 4)).

2.3.1 Problématique de la satisfaction rationnelle de l'usage

On se positionne dans le cas d'étude où la satisfaction globale, telle que définie dans l'équation 6, n'est dépendante que de la satisfaction rationnelle la satisfaction sensible étant prise constante.

De par sa définition, l'efficacité d'usage intègre l'usage et dans ce sens, elle conduit à de nombreuses questions sur les décisions qui amènent cet usage, vis-à-vis de leurs consommations énergétiques (problématique 1 figure 38) correspondant aux questions définissant la satisfaction rationnelle d'un artefact : les décisions prises sont-elles énergétiquement justes par rapport aux désirs et besoins réels ? C'est-à-dire, l'usager agit-il de la façon la plus vertueuse par rapport à la consommation énergétique effectivement effectuée ? Traduit-il correctement ses besoins dans la manière d'agir ? Est-ce qu'il n'existe pas d'autres manières d'agir pour le même besoin mais consommant moins d'énergie ?

De tels questionnements permettent de mettre en œuvre une meilleure compréhension des phénomènes énergétiques (les dynamiques de consommation) ce qui permettra en retour de mieux aider les usagers à comprendre leurs propres agissements par le biais d'interfaces persuasives. La satisfaction rationnelle est ainsi l'information qui peut être communiquée à l'usager afin d'évaluer sa propre « qualité d'énergie utilisée ».

Pour reprendre l'exemple de l'utilisation du réfrigérateur, pour la conservation des aliments cuisinés (désirs), ne devrais-je pas attendre que ceux-ci refroidissent avant de les mettre dans le réfrigérateur (action), ce qui permettrait au réfrigérateur de moins consommer (car le gradient de température à refroidir entre intérieur et la denrée alimentaire sera plus faible) ? Une telle action peut être jugée davantage efficace d'un point de vue « satisfaction rationnelle » que de mettre directement des aliments chauds dans ce même réfrigérateur. Aussi, l'efficacité d'usage intègre ***cette dimension de la qualité de l'énergie consommée au regard de l'usage.***

On s'intéressera ici à évaluer rationnellement les actions d'utilisation des artefacts afin de savoir si l'on agit de façon correcte (action n'impliquant pas de gaspillage d'énergie et utilisation d'une énergie suffisante pour effectuer son action) ou non. Une telle évaluation sera ainsi relative à la satisfaction de participation à un acte écologique que l'action peut procurer à l'usager [PAUL, 2008]. De même si l'acteur humain n'est pas l'habitant direct mais le programmeur ou le configurateur des automatismes du bâtiment (dans le cas où l'action est réalisée de manière automatique), on pourra évaluer si la consommation énergétique de la stratégie de contrôle-commande est raisonnable.

La rationalité étant avant tout basée sur des valeurs de jugement sur ce qui est bon ou pas, la satisfaction rationnelle n'est pas universelle mais dépendra davantage de l'individu ou d'un groupe d'individu sur lequel s'applique l'évaluation de la satisfaction. En effet, cette notion est très subjective et il est difficile de trancher de manière drastique. Il faut donc l'aiguiser, l'affiner en s'intéressant à la composante liée à l'effet persuasif. D'ailleurs, doit-on

considérer une simple vision manichéenne de l'utilisation de l'énergie ? Quel est l'acteur « légitime » pouvant définir la satisfaction rationnelle ? L'utilisateur ou le concepteur d'un système ? En effet, les paramètres rentrant en compte seront différents selon les points de vues (aspect financier, aspect environnementale, aspect légal, etc.) Il est dès à présent important de préciser, et nous le rappellerons ultérieurement, que la satisfaction rationnelle **n'intègre pas la dimension de coût**, de valeur économique en tant que telle.

Enfin, fondamentalement, la définition de la satisfaction rationnelle soulève la question de savoir quels sont les paramètres qui l'influencent et la constituent. Pour l'ensemble des questions sur la rationalité, la prise de décision, le jugement, etc. on pourra intégrer différents travaux effectués en psychologie qui s'intéressent depuis longtemps à théoriser de tels processus, et que nous ne détaillerons pas dans nos propos [SIMO, 1947] [AISS, 2003] mais qui permettent de modéliser le domaine de la rationalité et des processus de raisonnement.

De telles approches permettent de modéliser d'une certaine façon le processus cognitif et peuvent amener à reconsidérer certaines interfaces hommes-machines (comme les interfaces persuasives [FOGG, 2002]). Ainsi, si on reprend l'exemple du réfrigérateur, l'objectif de l'efficacité d'usage du point de vue satisfaction rationnelle sera d'optimiser les comportements d'ouverture de porte, d'introduction d'aliments plus ou moins chauds afin de réduire la consommation énergétique du réfrigérateur : on pourrait imaginer alors dans une telle perspective qu'un réfrigérateur puisse signaler à l'utilisateur que celui-ci a ouvert la porte trop longtemps ou est en train de mettre un aliment trop chaud ce qui provoquera une surconsommation énergétique.

2.3.2 Problématique de la satisfaction sensible des services

On se positionne dans le cas d'étude où la satisfaction globale, telle que définie dans l'équation 6, n'est dépendante que de la satisfaction sensible, la satisfaction rationnelle étant prise constante.

Le pendant de la justesse énergétique de l'utilisation, définie dans la satisfaction rationnelle, est la justesse des perceptions de l'utilisateur (problématique 2 de la figure 38): les perceptions des services / phénomènes sont-elles justes par rapport aux désirs, du point de vue énergétique ? C'est-à-dire l'utilisateur a-t-il une perception des phénomènes (correspondant à l'évaluation du *confort*) plutôt exigeante ou est-il flexible ? Ceci pourra avoir de multiples répercussions au niveau de la consommation énergétique. Dans ce sens, quel est le degré de dégradation de confort que l'utilisateur est prêt à accepter afin de réduire sa consommation énergétique ? Par exemple, pour le chauffage, l'utilisateur acceptant une consigne de température l'hiver de 19°C plutôt que de 20°C, quitte à rajouter un vêtement en cas de sensation de froid, afin d'économiser de l'énergie de chauffage, s'inscrira dans une efficacité d'usage meilleure que l'utilisateur qui maintiendrait la consigne à 20°C.

Cette justesse de perception intègre l'acceptabilité de l'utilisateur aux services effectués [CAND, 2010], mais également le contentement de l'utilisateur par rapport à cette perception des phénomènes : Est-ce que ce qui est réalisé correspond à ce que j'attendais ? Si oui, est-ce la solution la plus économe pour satisfaire cette attente ?

Ce sont ainsi ces différentes questions avec l'évaluation du confort, qui constituent la définition de la satisfaction sensible. De même que pour la satisfaction rationnelle, la notion de satisfaction sensible est subjective, dépendant des humeurs et émotions, de la culture, ... On pourra également se poser la question : Qui est le plus légitime à édicter une telle satisfaction ? A priori, l'utilisateur. Mais, comme le souligne O. Sidler, doit-on totalement offrir le confort maximal à l'utilisateur, sous peine qu'il y ait des niveaux d'exigences énergivores ou doit-on le contraindre à un niveau de confort « raisonnable » ? [SIDL, 2010]

En effet, à l'instar de la satisfaction rationnelle, la question de la granularité de définition de la satisfaction sensible se pose aussi : De quoi est composée cette satisfaction ?

Comment définir et évaluer les paramètres la constituant ? Sur ces sujets, nous le verrons au travers des fonctions de satisfaction, davantage d'études ont été effectuées dans la littérature du domaine thermique car on s'y intéresse depuis longtemps aux différentes composantes du confort [WAGN, 2007] [FRON, 2011] [ROUL, 2008]. On y retrouve le fait que les notions de confort sont en particulier composées d'un paramètre physique qui correspond au flux énergétique mesuré (Décibel pour les sons, Lux pour la lumière, etc...) et en fonction du degré de ces paramètres, il y aura plus ou moins de confort et de satisfaction. Les fonctions de satisfaction sensible que nous construirons ensuite (partie 1 Chapitre 4) chercheront à évaluer de tels degrés de satisfaction.

2.3.3 Problématique de l'expression de la satisfaction globale

On cherchera ici à caractériser la dépendance de la satisfaction globale de l'équation 6 vis-à-vis de ses composantes de satisfaction sensible et rationnelle. On peut se rendre compte que la liaison entre satisfaction sensible et satisfaction rationnelle afin de constituer la satisfaction globale n'est pas évidente et sera tout aussi subjective que les satisfactions sensibles et rationnelles elles-mêmes.

La relation entre les deux composantes tiendra davantage dans l'objectif global qui est voulu et la nature des besoins à satisfaire. En effet, dans le bâtiment et le cadre de notre étude, on se positionne sur une satisfaction globale vis-à-vis du fait que les services rendus correspondent aux attentes des usagers et consomment l'énergie raisonnablement. Ainsi l'objectif est la vertu de l'économie d'énergie. Mais il pourrait y avoir des objectifs de la satisfaction globale différents comme l'esthétique d'un équipement, l'aspect politique d'un geste.

Comme exprimées dans les figures 38 et 39, on peut s'interroger sur la relation entre le niveau de service perçu et l'action : est-ce une relation directe et automatique (donc plus facilement modélisable) ou provenant d'une mécanique complexe ? En d'autres termes est-ce que la perception entraîne de façon directe une réaction ou quels sont les mécanismes et les différents paramètres qui influeraient la prise de décision et d'action ?

De tels questionnements sont aussi liés à ceux concernant la représentation des satisfactions et des désirs des usagers. C'est-à-dire, afin de tenir compte de l'usage, comment connaître, faire exprimer les désirs « réels » ainsi que les niveaux de satisfaction. C'est ainsi l'aspect psychosociologique de l'usage qui est interrogé ici afin de connaître les moyens que l'on peut mettre en œuvre pour l'évaluation de la satisfaction en tant que telle.

3 Redéfinition du système bâtiment intégrant l'usage

La mise en place de ce concept d'efficacité d'usage s'emploie donc, comme nous avons pu le présenter, à distinguer la part de l'efficacité énergétique liée à l'usage de celle liée aux performances techniques du système bâtiment (qui en fait est le point de vue couramment employé). Comme présenté dans les premiers chapitres, et de par la nature de la consommation électrique intrinsèquement liée à l'usage, on pourra placer notre approche davantage dans une perspective des bâtiments efficaces et les *energy smart homes* (que nous détaillerons ultérieurement (partie 3 chapitre 5) où l'on souhaite avoir un bilan énergétique le plus positif possible tout en offrant un confort de vie aux habitants. En ce sens, nous nous placerons, comme présenté précédemment (partie 3 chapitre 1) et illustré par la figure 40, dans une vision de Système Complexe Bâtiment (SCB). Ce système bâtiment est un ensemble de composants passifs (enveloppe) et actifs (équipements énergétiques de chauffage, ventilation, éclairage, ...) au sein duquel vivent les usagers de ces derniers. L'usager est donc acteur sur l'ensemble des systèmes énergétiques ce qui nécessite de redéfinir les contours du système bâtiment [ANDE, 2009]

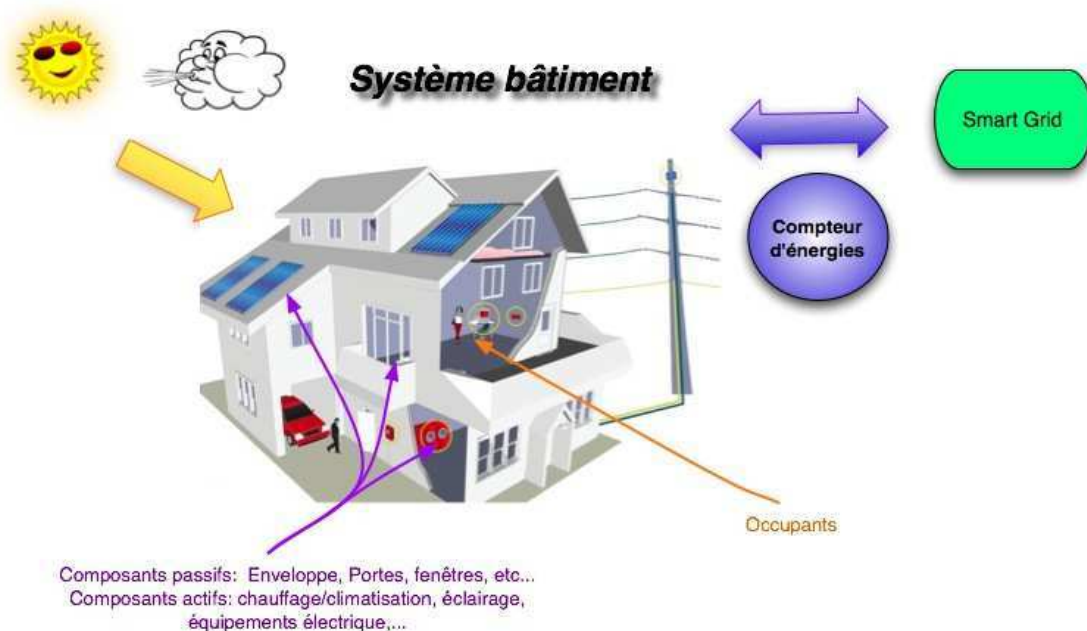


Figure 40 : Le Système Complexe Bâtiment regroupant l'ensemble de la vision smart grid, technique et humaine du bâtiment

Considérant cela, l'utilisateur fait au final bien partie du système bâtiment et donc on proposera une redéfinition de ce système en tant que SCB qui est *l'ensemble architectural dans lequel vivent des habitants et qui est composé de systèmes énergétiques consommateurs et producteurs d'énergie : chauffage, ventilation, éclairage, équipements électriques spécifiques*

Un tel système bâtiment en tant qu'élément du Smart Grid jouera un rôle actif sur le réseau électrique en tant que producteur / consommateur d'énergie [CLAS, 2010]. Aussi, l'EUE pourra avoir des impacts énergétiques aussi bien au niveau intra bâtiment (pour la gestion énergétique interne) qu'au niveau extra-bâtiment (vis-à-vis du réseau électrique). En effet, si la satisfaction globale définie dans l'EUE n'est pas correcte, provoquant ainsi une surconsommation, cela amènera une surcharge sur le réseau et induira cette fois-ci une « insatisfaction » du gestionnaire de réseau électrique.

Conclusion

Nous avons pu voir dans ce chapitre que le terme d'efficacité énergétique était un terme galvaudé par de nombreuses communautés scientifiques et industrielles afin de mettre en avant une certaine technicité des produits étudiés. Ce faisant, le terme d'efficacité a perdu de son contenu par rapport à son étymologie initiale, prenant une connotation technique assez forte puisque dans l'ingénierie classique, l'efficacité énergétique est souvent confondue avec le rendement.

Afin de pouvoir intégrer l'usage et l'acteur humain qui nous sont apparus comme des éléments essentiels dans la définition de l'efficacité énergétique, nous avons proposé de changer de paradigme épistémologique afin d'opérer dans l'épistémologie constructiviste.

On a pu alors dégager, suite à une étude analytique de l'usage (en particulier dans un système bâtiment), le concept d'efficacité énergétique d'usage (EUE) qui venait alors compléter le terme d'efficacité énergétique physique communément employé. Nous avons mis en rapport ce nouveau concept avec l'usage en le définissant comme un rapport que l'on

cherche à maximiser, pour un système ou un équipement donné, entre la satisfaction procurée à l'utilisateur par le service effectué et la consommation énergétique de l'équipement.

L'analyse de l'interaction homme-machine nous a enfin permis de proposer deux composantes principales à la satisfaction globale d'un usager vis-à-vis d'un équipement : la satisfaction sensible (liée au corps) et la satisfaction rationnelle faisant intervenir différents processus mentaux de l'utilisateur. Cette dernière satisfaction est également beaucoup plus malléable : elle aura comme perspective d'informer, d'aider à comprendre les phénomènes énergétiques de consommation d'énergie.

Enfin, nous avons pu voir que cette approche de l'efficacité énergétique qui impliquait l'acteur humain permettait d'étendre la notion de système bâtiment en intégrant l'acteur humain.

Après avoir posé les fondements conceptuels de notre propos, nous allons montrer que l'on peut quantifier de tels concepts afin de les rendre applicatifs et effectifs sur un système complexe bâtiment. On analysera l'intérêt de notre approche aussi bien en phase de conception qu'en phase d'exploitation de système bâtiment. Le but sera alors d'étudier le bénéfice énergétique et de satisfaction du niveau d'intégration de l'usage dans les différentes configurations techniques. L'objectif final est alors de montrer qu'en intégrant de mieux en mieux l'usage grâce à une application locale, écologique¹⁰ adaptée (ou in situ), on sera capable à la fois de réduire la consommation énergétique et d'améliorer la satisfaction globale de l'utilisateur (telle que définie précédemment).

¹⁰ On emploiera le terme écologique dans le sens où l'on tient compte du fait que l'on raisonne au niveau local en tenant compte de l'environnement de l'objet étudié. Cela inclut l'environnement social, économique, biologique... et permet de prendre en compte les éléments extérieurs qui peuvent influencer sur l'objet en question

Application du concept d'efficacité d'usage énergétique comme outil d'aide à la conception de systèmes bâtiment intégrant l'usage : Etude de cas sur la plateforme PREDIS MHI

Après avoir posé les principaux concepts de notre étude, nous allons maintenant chercher à mettre en application ces propos au travers des exemples concrets. Pour cela, nous allons dans un premier temps voir comment on peut quantifier le concept d'efficacité d'usage afin de le rendre applicable. Pour cela, nous proposons une méthodologie de construction des fonctions de satisfaction (partie 1.2) qui sont des éléments essentiels à l'évaluation de la satisfaction sensible et de la satisfaction rationnelle qui composent la satisfaction globale, élément majeur du rapport EUE (partie 1 du chapitre 4).

Compte tenu des limites du rapport mono-objectif de l'EUE, nous profiterons de cette quantification pour proposer un outil de visualisation effectif (le diagramme de compromis satisfaction / coût (ou diagramme d'efficacité d'usage énergétique)) qui permet de traiter directement la dimension multi-objectifs de l'efficacité d'usage énergétique d'un équipement. En effet, dans le diagramme de compromis (que nous présenterons plus en détail dans la partie 1.4), nous proposons de créer un plan ayant pour abscisse le coût (qui est relatif à la consommation énergétique d'un service) et en ordonnée la satisfaction. Cela permet ainsi de traiter de la dimension bi-objective du problème de maximisation de l'EUE qui se traduira par la création de fronts de Pareto qui seront autant de points de compromis entre les deux objectifs de l'EUE.

Dans la partie 1, nous présenterons une méthodologie visant à construire un tel diagramme ainsi que les fonctions de satisfaction (figure 41).

Nous appliquerons un tel processus sur un cas de conception de systèmes énergétiques tels que le chauffage (partie 2 du chapitre 4). Nous retrouverons en annexes 18 et 21 des études comparables réalisées sur le système de ventilation et d'éclairage artificiel.

Enfin, nous intégrerons l'outil diagramme de compromis, qui s'avère être un outil d'aide à la décision, dans une vision plus globale de conception par l'usage de Système Complexe Bâtiment (partie 3 chapitre 4).

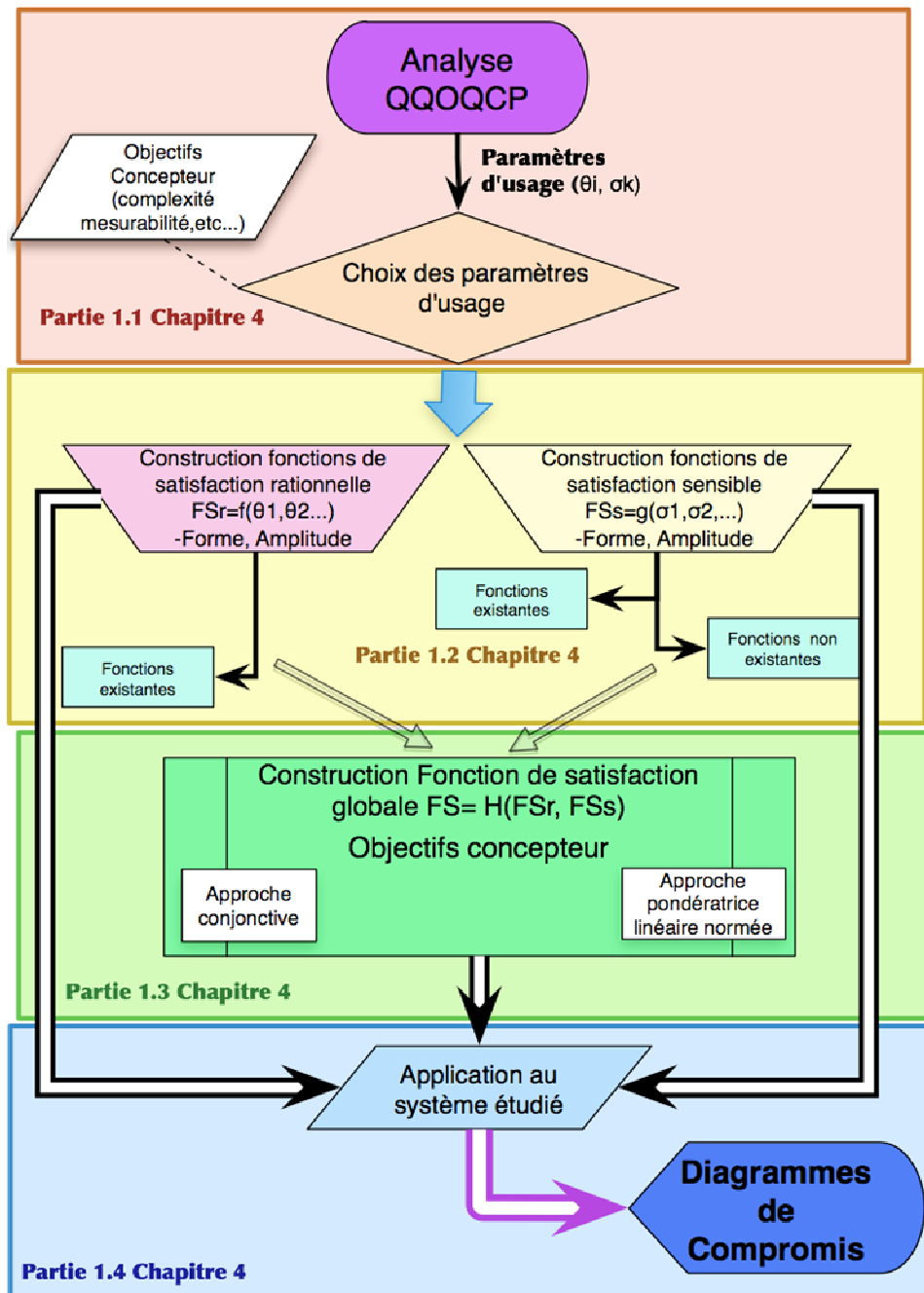


Figure 41 : Méthodologie de construction du diagramme de compromis Coût/Satisfaction

1 Quantification du concept au travers d'un diagramme d'efficacité d'usage

Nous avons pu voir que le concept d'efficacité d'usage énergétique se positionnait au final comme une relation entre une valeur propre à l'humain qui est la satisfaction, et une valeur propre à la technique qui est l'impact sur la consommation d'énergie. Afin de pouvoir appliquer notre concept sur des outils effectifs, il est nécessaire de pouvoir quantifier ces concepts en cherchant à formaliser, quand c'est possible, les éléments constituant l'EUE.

Pour quantifier la notion de coût (ou de consommation énergétique), nous pourrions prendre directement la mesure de ce qui est entendu par ce terme en employant l'unité adéquat : coût financier (€), coût énergétique (kWh), ...

Pour quantifier la notion de satisfaction, nous pourrions utiliser une fonction de satisfaction qui, comme nous le verrons par la suite, est un des éléments clés de la quantification de l'EUE. La fonction de satisfaction est une manière de pouvoir associer à une quantité de service (ou paramètre d'usage) assuré par un équipement dans une certaine configuration, une valeur numérique qui peut varier de 0 à 1 par exemple (voir partie 1.3).

1.1 Identification des paramètres d'usage au travers de l'approche QQQQCP

Nous avons montré auparavant que la satisfaction rationnelle et la satisfaction sensible étaient des notions assez complexes de par leurs aspects subjectifs et difficilement formalisables car de nombreux éléments entrent en ligne de compte dans la définition de la satisfaction. Nous pouvons néanmoins considérer qu'il existe pour chaque satisfaction un ensemble de paramètres qui caractérisent ces satisfactions que nous appellerons par la suite des *paramètres d'usage*.

Les *paramètres d'usage rationnels* (que l'on notera θ) représentent l'ensemble des grandeurs physiques ou non physiques (de type information par exemple) qui définissent la satisfaction rationnelle tandis que les *paramètres d'usage sensibles* (σ) représentent l'ensemble des grandeurs physiques ou non physiques définissant la satisfaction sensible. Nous proposerons par la suite une méthode pour déterminer ces paramètres d'usage (méthode QQQQCP). Néanmoins, il est possible qu'un même paramètre d'usage puisse être à la fois paramètre sensible et rationnel.

Nous reprendrons l'exemple de l'éclairage artificiel pour illustrer cette notion de paramètre d'usage. Nous avons pu voir précédemment que la satisfaction rationnelle de l'éclairage artificiel pouvait correspondre à l'étude de la consommation durant la présence de l'occupant ou non. Ainsi, les deux paramètres d'usage rationnels pourraient être la consommation (ou plutôt la puissance électrique) des lampes et la présence des occupants. Nous avons vu que la satisfaction sensible de l'éclairage correspondait au niveau d'éclairement qui serait alors un paramètre d'usage sensible, mais il pourrait y en avoir d'autres comme le niveau d'éblouissement, le rendu des couleurs...

1.1. Présentation de l'approche QQQQCP

L'usage d'un équipement peut être analysé sous différents points de vues : énergétique, anthropologique,... Afin de caractériser l'interaction entre l'utilisateur et l'équipement qui représente au final les différents paramètres composant les notions de satisfaction évoquées, il est important d'aborder l'usage par une méthodologie d'analyse tant exhaustive que précise.

Objectif de l'approche QQQQCP : Cette méthodologie permet d'analyser l'usage et d'identifier les paramètres d'usage qui composent ensuite les fonctions de satisfaction afin de construire celles-ci.

1.1.1.1 Méthodes d'analyse de l'usage

Dans le monde de l'ingénierie, en particulier dans l'informatique, on retrouve un certain nombre de méthodologies d'analyse et de conception permettant de décrire les étapes de conception d'un logiciel. Cette méthodologie sert de ce fait à caractériser les besoins et à organiser les moyens à mettre en œuvre pour répondre à ces besoins. Aussi, nous retrouverons en particulier dans les outils de cycles de développement de logiciel, les modèles en cascade, les cycles en V [MCDE, 1984], les cycles en spirale [BOEH, 1988] ou des cycles itératifs comme la roue de Deming [SHEW, 1980]. Nous retiendrons dans ces derniers outils leur valeur itérative permettant de réaliser différents cycles d'analyse jusqu'à obtention d'un niveau satisfaisant de l'analyse.

Néanmoins, compte tenu de la nature assez peu formelle de l'usage d'un équipement, il est nécessaire d'utiliser un outil permettant d'investiguer les différents paramètres d'usage (figure 42). L'approche empirique apparaît comme une approche de la construction de la connaissance bâtie à partir de l'observation des phénomènes et des expériences et s'oppose en cela à l'idée d'une connaissance a priori de toute chose [BACO, 1986]. Or, de par la nature même de l'usage, qui est propre à chaque humain, il est difficile de pouvoir connaître a priori les différents usages et leurs caractéristiques mais il est possible de référencer et d'analyser ces usages effectués réellement au travers d'une méthode d'investigation, sous forme de questionnements. Ces questionnements auront alors pour objectifs de décrire l'usage et ses composantes (ou paramètres d'usage) sans forcément en avoir la connaissance de l'usage (dans le sens connaissance scientifique modélisable). Cette approche appelée QQQQCP, que nous allons utiliser par la suite, est donc une heuristique de questionnement qui peut également être itérative sur l'usage jusqu'à définir de manière satisfaisante par le concepteur, le niveau de granularité de définition de l'usage voulu.

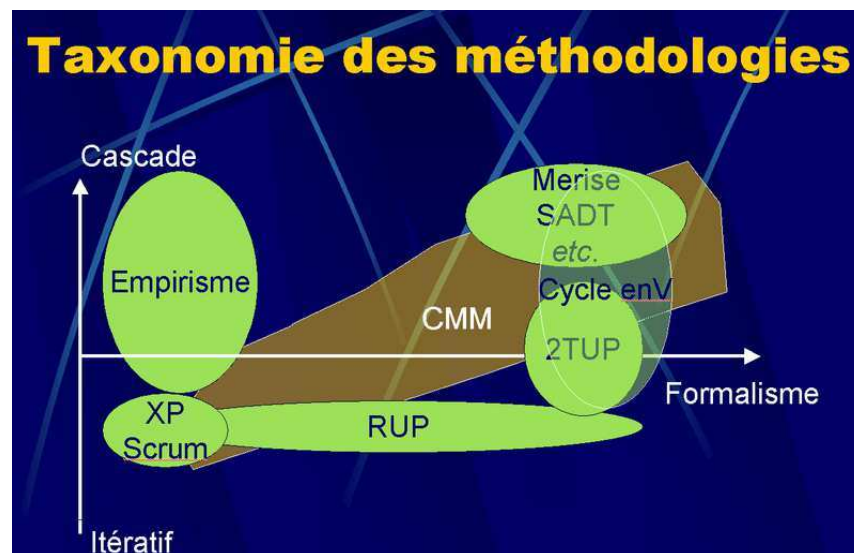


Figure 42 : Taxonomie des méthodologies d'analyse [MOUS,2008]

1.1.1.2 Description de la méthode empirique itérative QQQQCP

L'approche QQQQCP (ou 5W1H en anglais) est un moyen de lister et faire le tour de tous les éléments et paramètres nécessaires et suffisants qui caractérisent l'usage de façon empirique. Cette approche est une méthode employée initialement en rhétorique à l'époque

romaine permettant de formuler l'ensemble des circonstances d'un propos par les questions *Quis, quid, cur, quomodo, ubi, quibus auxiliis* [ROBE, 1946] correspondant aux questions aujourd'hui employées pour l'investigation de faits par exemple : Quoi ? Qui ? Où ? Quand ? Comment ? Pourquoi ? Ce questionnement systématique permet d'avoir sur toutes les dimensions du problème, des informations élémentaires suffisantes pour identifier ses aspects essentiels.

Nous pouvons retrouver dans le tableau 2 des exemples d'interrogations que cela pose.

Lettre	Question	Sous-questions	Exemples
Q	QUOI ?	Quoi, Avec quoi, en relation avec quoi ...	Outil, objet, résultat, objectif...
Q	QUI ?	De qui, Avec qui, Pour qui...	Responsable, acteur, sujet, cible...
O	OÙ ?	Où, par où, vers où ...	Lieu, service...
Q	QUAND ?	tous les quand, à partir de quand, jusqu'à quand...	Dates, périodicité, durée...
C	COMMENT ?	de quelle façon, dans quelles conditions, par quel procédé...	Procédure, technique, action, moyens matériel...
P	POURQUOI ?	Cause, motif, finalité	Justification, raison d'être

Tableau 2 : Liste méthodique et mnémotechnique de l'approche QQQQCP [WIKIc, 2011]

En appliquant ce questionnement systématique à l'analyse de l'usage, nous pouvons entièrement le caractériser en identifiant la nature de l'usage et/ou le but du service (quoi ?), le lieu de l'usage (où), le moment (voire la période de temps) (quand ?), les acteurs en jeu dans le service proposé (qui ?), les moyens mis en place ou la manière d'effectuer l'usage (comment), la raison de l'usage (pourquoi ?). Ces différentes composantes correspondent ainsi aux paramètres d'usage définissant les satisfactions sensibles et rationnelles.

Bien entendu, ces *paramètres d'usage* ne sont pas indépendants entre eux et disposent bien souvent de « sous-questions » générant autant de nouvelles composantes. Ainsi par exemple, nous pourrions tout aussi bien s'interroger sur les usages dits principaux (tels que définis dans le cahier des charges des équipements) que sur les usages secondaires (que sont les usages déviants ou les usages détournés¹¹). Si nous nous en tenons uniquement aux usages principaux, c'est-à-dire à la fonctionnalité et au mode d'utilisation de l'artefact tel qu'imaginé par le concepteur, cette analyse de l'usage permet de définir les paramètres d'usages qui caractérisent les différentes satisfactions et définiront les fonctions de satisfaction associées.

1.1.2 Détermination des paramètres d'usage rationnels et sensibles

1.1.2.1 Paramètres d'usage sensibles (σ_k)

Pour la satisfaction sensible on pourra restreindre le questionnement de l'usage aux questions : Quoi ? Où ? Quand ? En effet, le confort est un jugement réalisé par l'utilisateur **sur**

¹¹ Par usages déviants (ou détournés), nous identifierons les usages réalisés d'un équipement qui ne correspondent pas à la fonctionnalité principale pour laquelle a été conçu cet équipement. Nous retrouverons ainsi les usages où l'utilisateur s'est réapproprié l'équipement en y apportant des modifications physiques afin de satisfaire ses réelles attentes (usage déviant) ou lorsque l'utilisateur utilise l'équipement pour une autre fonctionnalité que celle imaginée initialement (usage détourné)

un (ou plusieurs) paramètre(s) physique(s) (répondant à la question Quoi ? de l'approche QQQQCP) à **un instant donné** (Quand ?) à **l'endroit exact où se situe l'utilisateur** (Où ?). La fonction de satisfaction sensible ne sera donc ensuite construite qu'à partir de ces trois paramètres d'usage sensibles (σ_i avec i correspondant au lieu, au paramètre physique ou au temps)

1.1.2.2 Paramètres d'usage rationnels (θ_j)

Pour la satisfaction rationnelle liée à l'action, on pourra retrouver tout ou partie des questions d'investigation concernant les services exigés qui amèneront à définir un certain nombre de paramètres d'usage rationnels (θ_j) (liste non exhaustive):

- la *nature et la quantité* du service souhaité principalement au travers d'un niveau de consigne (Réponse à la question Quoi ?)

- le *moment* de l'action/de l'utilisation d'un équipement (réponse à la question Quand ?). Ce paramètre d'usage est davantage définissable dans le cas où l'on a un système de contrôle-commande où l'on programmera un usage de manière anticipative ou réactive. Ce paramètre est intrinsèquement lié à l'étude du *lieu* de l'usage (Réponse à la question Où ?) car nous ne pouvons pas utiliser, physiquement parlant, quelque chose en dehors du temps ou de l'espace.

- le temps de réactivité d'un équipement à une consigne donnée (réponse relative à la question Comment?)

- la *manière* d'obtenir la consigne ou le service souhaité (réponse relative à la question Comment?). Par exemple, si j'ai trop froid, je peux augmenter brusquement la consigne afin d'avoir « plus rapidement » de la chaleur ou alors je peux seulement augmenter un peu sachant qu'ensuite dans la journée il fera plus chaud.

- la *raison* d'utilisation (Réponse à la question Pourquoi ?). Comme évoqué précédemment, il y a des usages principaux mais aussi des usages détournés (ou secondaires) d'équipements qui peuvent provoquer une consommation énergétique différente (par exemple, une télévision peut servir de « baby sitter » ou l'éclairage peut être utilisé pour signifier qu'il y a quelqu'un de présent dans une maison).

Enfin, nous distinguerons les informations qu'apporte la question « Qui ? » de l'approche QQQQCP sur le nombre des occupants et / ou leurs identités (en tant que catégorie socioprofessionnelle par exemple). En effet, la donnée du nombre est un élément qui va impacter directement les paramètres physiques des apports internes et est donc liée au domaine sensible mais la prise en compte du « bon nombre » de personnes dans le contrôle-commande d'un équipement peut s'avérer du domaine rationnel. D'autre part, en fonction de l'identité des occupants, leur emploi du temps fait intrinsèquement varier le lieu et le moment de l'usage (voire la manière de l'usage selon l'humeur qu'ils auront).

On tient à préciser que parmi les paramètres d'usage rationnels, ne figure pas le coût énergétique en tant que tel, c'est-à-dire en tant que valeur comptable de l'énergie consommée. L'aspect financier est seulement présent dans la variable qui lui est associée en abscisse du diagramme de compromis mais n'apparaît sous aucune de ses formes dans la définition de la satisfaction rationnelle.

Quelques exemples d'analyse d'usage sur des équipements énergétiques présents dans les bâtiments (tertiaires et résidentiels) sont présentés en Annexe 17. Cela sert d'une part à identifier les composantes des fonctions de satisfaction que nous allons présenter à présent mais cette identification peut également servir à s'interroger sur le niveau d'instrumentation à mettre en place pour obtenir pratiquement de telles informations (amenant alors le concepteur à concevoir par exemple des plans d'instrumentation, des algorithmes de traitement de

données, ...). En effet, si certains paramètres d'usage apparaissent plus ou moins intéressants pour l'analyse de l'usage, le concepteur pourra élaborer une stratégie d'instrumentation visant à étudier la faisabilité de cette instrumentation (en terme de conception de plan, de veilles technologiques sur les dispositifs d'instrumentation existants, etc.). En cela, nous trouvons l'effectivité de la démarche d'identification des paramètres d'usage qui offrent la possibilité d'avoir des matériaux de recherche concrets.

1.2 Construction des fonctions de satisfaction à partir des différents paramètres d'usage

Afin de pouvoir quantifier le rapport EUE, on va être amené indirectement à quantifier également les satisfactions rationnelles et sensibles ce que l'on propose de réaliser au travers de **fonctions de satisfaction (rationnelle (FSr) ou sensible (FSs))**.

La fonction de satisfaction est une fonction mathématique. Ce passage à la mathématique est, malgré l'aspect subjectif des données de sciences humaines, une étape obligée pour quantifier, formaliser et modéliser la satisfaction en vue de son exploitation ultérieure dans la construction du diagramme de compromis (partie 1. 4 chapitre 4) ou dans des algorithmes de gestion énergétique (partie 4 chapitre 5). Cette fonction mathématique sera une fonction multi-variable définie dans le domaine de définition [0,1] où chaque variable correspond à un paramètre d'usage sensible ou rationnel.

On propose que l'élaboration des fonctions de satisfaction corresponde à une échelle de satisfaction où les valeurs limites seraient : totalement insatisfaisantes (valeur 0) à totalement satisfaisantes (valeur 1). Cette échelle de satisfaction est, bien entendu, différente pour chaque usager et en cela, on retrouve le point de vue constructiviste selon lequel on construira au cas par cas les fonctions de manière à ce qu'elles soient effectives.

Ainsi, à partir de l'analyse des paramètres d'usage de chaque équipement effectuée précédemment (partie 1.1.2 chapitre 4), nous pouvons construire les fonctions de satisfaction rationnelle (FSr) et les fonctions de satisfaction sensible (FSs) (Equation 8).

$$FS_R = f(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_j, \dots, \theta_n)$$

Equation 8

$$FS_S = g(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_k, \dots, \sigma_n)$$

θ = paramètre rationnel d'usage

σ = paramètre sensible d'usage

La forme et l'amplitude de telles fonctions dépendront en partie des propriétés de l'équipement et de l'usager (éducation, sensibilité, etc..) mais nous allons donner ensuite quelques méthodes, propriétés et exemples pour l'élaboration de telles fonctions de satisfaction.

Si, au final, on traduit de manière graphique ce que représente une fonction de satisfaction (sensible aussi bien que rationnelle), on peut considérer qu'elle est une fonction injective dépendant d'autant de dimensions qu'il y a de paramètres d'usage (figure 43).

Dans tous les cas, la valeur de la fonction de satisfaction variera avec le temps car l'usage évolue au cours du temps.



Figure 43 : Fonctions de satisfaction rationnelle et sensible multi-dimensionnelles

Aussi, afin de pouvoir limiter la complexité et rendre faisables et effectives de telles fonctions, il sera possible et / ou utile de se limiter à un certain nombre de paramètres pour construire ces fonctions de satisfaction, notamment en fonction de la complexité de mesurabilité des paramètres. Par la complexité de la mesurabilité des paramètres d'usage, on pourra retrouver des éléments concernant la difficulté de la mise en œuvre, l'existence de matériel d'instrumentation, le degré d'intrusion dans l'espace privé des usagers,...

Il est à noter que nos propos et les fonctions de satisfaction proposées n'ont pas vocation à proclamer des vérités ontologiques sur la quantification de la satisfaction mais s'inscrivent davantage dans la vision constructiviste d'études en proposant ainsi une boîte à outils pour créer au cas par cas ces fonctions de satisfaction et le diagramme de compromis par la suite.

1.2.1 Construction de fonctions de satisfaction sensible (FSs)

Nous avons pu voir que la satisfaction sensible était un point de vue plus global de la notion de confort, couramment utilisée dans la littérature scientifique du domaine du bâtiment. Aussi, nous pourrions y retrouver un ensemble de travaux sur la modélisation du confort que l'on peut reprendre pour réaliser les fonctions de satisfaction sensible. Nous pourrions s'inspirer du moins de la méthodologie de création des modèles pour l'appliquer à notre cas. Ainsi, nous présenterons ici, dans le cas où des modèles de fonctions de satisfaction existent, comment les employer et si elles n'existent pas, nous proposerons une méthodologie pour les générer.

1.2.1.1 Fonctions de satisfaction sensible connues créées à partir de modèles stochastiques existants

Il existe dans la littérature un ensemble de travaux permettant de définir le confort d'un service en fonction du paramètre d'usage. On pourra prendre par exemple la modélisation du confort thermique en fonction de la méthode PMV-PPD [FANG, 1972] qui permet de pouvoir donner une loi d'évolution d'insatisfaction par rapport à une température de référence.

Une telle fonction d'insatisfaction (que l'on pourra facilement transformer en fonction de satisfaction dans notre cas (figure 44)) est un modèle stochastique dans le sens où l'allure de la fonction découle de nombreuses interviews de personnes soumises à différents stimuli thermiques.

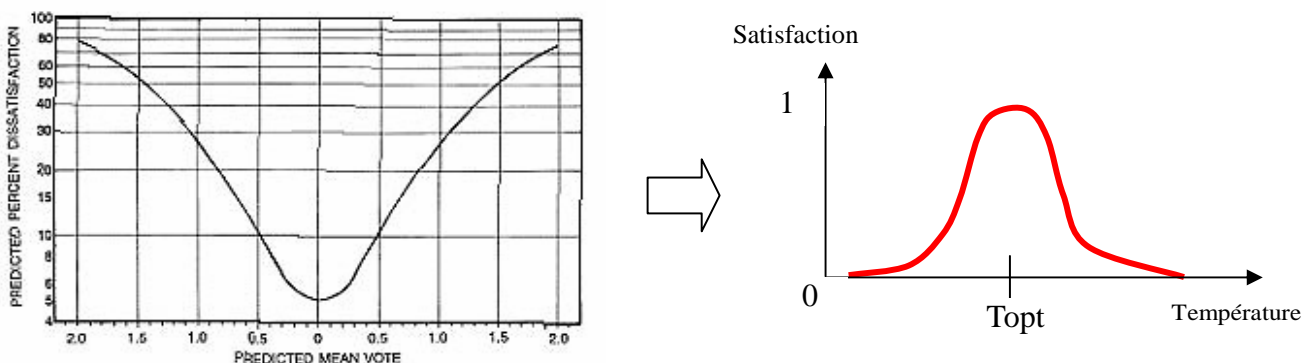


Figure 44 : Exemple de fonction connue de satisfaction : confort thermique à partir d'une courbe PMV PPD

Il existe des travaux similaires sur les autres types de confort relatifs à l'ambiance : modèle de confort sonore [ASTO, 2008], qualité d'air, confort visuel [CHOI, 2009] [LAI, 2009]. Cependant, les modèles sont souvent moins explicites que le PMV-PPD donc nécessiteront un traitement plus lourd. A notre connaissance, de telles approches stochastiques n'existent cependant pas pour l'utilisation des équipements électriques spécifiques, par exemple un modèle étudiant la satisfaction par rapport à un niveau d'hygiène apporté par un lave-linge ou la qualité de l'image et du son émanant d'une télévision.

1.2.1.2 Méthodologie de construction de fonction de satisfaction sensible non existante

Si de tels modèles de fonctions de satisfaction n'existent pas ou ne suffisent pas, le concepteur peut alors construire lui-même ses propres fonctions de satisfaction à partir des paramètres d'usage qu'il aura jugés les plus pertinents. Pour cela, on pourra soit construire une fonction de satisfaction effective à partir des mêmes méthodes qui ont permis de définir les modèles de fonctions de satisfaction existants soit créer sa propre méthodologie afin de concevoir une fonction de satisfaction effective. Ce ne sont que des propositions de méthodologie de conception de fonctions de satisfaction sensible.

A partir des méthodes d'évaluation existantes (Méthodologie statistique)

En reprenant l'exemple du PMV-PPD, il existe différentes phases de la méthodologie que nous proposerons pour créer ces fonctions de satisfaction sensible (que nous appellerons *méthodologie statistique*) :

1. La première étape consiste à **créer une échelle d'évaluation** de la satisfaction du paramètre que l'on veut évaluer (par exemple, le confort thermique a été caractérisé par une échelle de sensation de 7 échelons allant de « très chaud » à « très froid »). Cette échelle doit faire apparaître des sensations car cela est destiné aux usagers qui ressentent le service que l'on étudie.
2. On donne **en même temps cette échelle d'évaluation aux usagers** et on fait **varier le paramètre physique correspondant au service étudié** (la température pour le confort thermique par exemple) en enregistrant en temps réel les variations.
3. Ensuite, on fait **coïncider l'évolution de la satisfaction** enregistrée au travail de l'interview et l'enregistrement de la variation du paramètre physique.
4. Enfin, on agrège les différents questionnaires afin d'**avoir un profil statistique**.

Ainsi, dans de tels modèles, on peut obtenir, par interrogation d'un panel d'usagers, une fonction de satisfaction sensible par rapport à un paramètre physique qui est mesurable. Néanmoins, cela donne un modèle valable autour d'un point de référence qu'il est nécessaire de déterminer (on pourra prendre pour cela par exemple, les valeurs réglementaires de confort visuel, thermique, aéraulique et sonore [CSTB, 2006] [ROUL, 2008])

A partir de l'expertise du concepteur (Méthodologie Experte)

Il est possible au concepteur de créer ses propres fonctions de satisfaction de manière à ce qu'elles soient effectives dans le cadre de l'étude que l'on souhaite mener. Dans ce cas-là, la forme et l'amplitude de la fonction pourront dépendre du paramètre que l'on veut mettre davantage en avant.

Afin d'aider le concepteur à élaborer la forme de la fonction, on pourra utiliser des outils issus de la logique floue qui permet de créer des fonctions définies de façon imprécise sur le sous-ensemble $\{0;1\}$, ce qui correspond au domaine d'existence de la fonction de

satisfaction) [ZADE, 1983]. Aussi la logique floue permet, au-delà des valeurs booléennes *vrai* et *faux* que pourrait vérifier une condition, de décrire des degrés de vérification d'une condition et ainsi décrire des états qui ne sont pas binaires. Les outils, que nous ne présenterons pas plus en détail ici, sont ceux alors relatifs à l'intelligence artificielle tels que les réseaux de neurones, les opérateurs flous...[MA, 2006] [BEHO, 2006].

Néanmoins, pour valider un modèle de fonction de satisfaction élaborée par le concepteur, on pourra effectuer une étude sociologique afin de valider les hypothèses avancées pour la fonction de satisfaction créée. Un exemple sera proposé dans le cas de l'éclairage un peu plus loin (partie 2 chapitre 4) et que l'on retrouvera en annexe 21.

1.2.2 Fonctions de satisfaction Rationnelle (FSr)

De par sa définition même par rapport à la raison et également à la logique, la satisfaction rationnelle pourra être quantifiée au travers de fonctions de satisfaction ayant pour paramètres les différents paramètres d'utilisation identifiés θ . Ces fonctions de satisfaction devront être, dans le contexte constructiviste où l'on se positionne, bien entendu effectives dans le sens où elles vont vers leur objectif final qui peut être une meilleure sobriété énergétique (ce qui est notre cas), une meilleure esthétique, etc. Aussi, le concepteur et / ou l'utilisateur qui aura à formaliser de telles fonctions devra décider ce qui est bon ou mauvais (dans notre cas) en terme de consommation énergétique dans le sens de justesse / suffisance énergétique. On peut à ce propos, retrouver le questionnement d'O. Sidler concernant le fait de savoir, dans un SCB (Système Complexe Bâtiment), quel est l'acteur qui connaît le mieux la justesse énergétique. L'utilisateur ? Le concepteur ? Le gestionnaire ? Qui est le réel expert (s'il y en a) pour juger de cette grandeur qui est obligatoirement subjective ? [SIDL, 2010].

Nous proposerons ici une méthodologie simple de construction de fonction de satisfaction rationnelle basée sur une construction liée à la logique (car rationalité et logique peuvent être équivalentes dans certains cas) mais le domaine de la satisfaction rationnelle faisant appel à des informations hautement subjectives (comme la notion de jugement) au point qu'il n'est pas possible d'apporter une réponse unique et ontologique. Pour des méthodologies plus rigoureuses, nous pourrions se reporter à des travaux de psychologie ou de psychologie sociale qui étudient et modélisent depuis longtemps les processus de jugement, de rationalité et de décision [MARE, 2010] [YAMA, 2008] ainsi que des modèles comportementaux de consommation énergétique [DHOL, 1983].

Proposition de méthodologie de construction de fonction de satisfaction rationnelle (Méthodologie logique)

1. Identifier les paramètres d'usage rationnels liés à l'objectif (de la sobriété énergétique) (par exemple la présence, le coût énergétique ou la puissance électrique, ...)
2. Eriger des règles de jugement de « sobriété énergétique ». Ceci peut être réalisé par un le concepteur expert ou au travers d'interviews sociologiques auprès d'utilisateurs auxquels on pourrait demander de juger différents scénarios de consommation.
3. Réaliser une combinaison logique entre les différents paramètres d'usage en fonction des règles pré-établies. Cela sera la fonction de satisfaction rationnelle. Ainsi par exemple, une fonction de satisfaction rationnelle simple basée sur le gaspillage d'énergie permettant de discriminer les solutions où de l'énergie est consommée alors que le service n'est pas présent / pas utilisé (nous en présenterons un exemple un peu plus tard dans la partie 2).

1.3 Construction effective de la fonction de satisfaction globale

Nous avons signalé auparavant que la satisfaction globale, qui constitue l'un des éléments principaux de l'EUE, avait pour composantes la satisfaction sensible et la satisfaction rationnelle. Il en va alors de même pour la fonction de satisfaction globale (FS) qui sera construite à partir des fonctions FSs et FSr précédemment définies (Equation 9).

$$FS_i = H(FSr_i(\theta_j), FSS_i(\sigma_k))$$

FS_i : Fonction de Satisfaction totale de l'équipement/configuration i

FSr_i, FSS_i : Fonctions de Satisfaction (sensible ou rationnelle)

θ_j = paramètres d'usage rationnels

Equation 9

σ_k = paramètres d'usage sensibles

Nous allons proposer ici quelques méthodologies de construction de cette fonction FS. Comme nous avons pu en discuter précédemment (partie 2.3 chapitre 3), la relation entre le domaine rationnel et le domaine sensible afin de définir la satisfaction globale est difficilement modélisable et formalisable de par le fait que cela provient du domaine de la psychologie. Ainsi, il y a une certaine complexité à la formulation de la fonction de satisfaction qui doit à la fois prendre en compte une multiplicité de paramètres d'usage qui ne sont *pas tous formalisables* (d'où la nécessité de pouvoir créer dans certains cas des estimateurs) et doit respecter des propriétés mathématiques si l'on veut quantifier celle-ci (appartenance à l'espace de définition [0,1], dérivabilité,...). Néanmoins, le but de notre étude est de construire une fonction effective et pour cela on pourra proposer deux approches : l'approche conjonctive et l'approche pondératrice linéaire normée.

1.3.1 Approche conjonctive

Dans cette approche, nous ferons la combinaison des fonctions de satisfaction en utilisant la fonction logique ET (qui correspond en logique floue à un opérateur \top tel que $\top(x, y) \leq \min(x, y)$). On fera pour cela l'hypothèse que les paramètres d'usage (θ_i et σ_i) sont indépendants (Equation 10).

$$FS_i = FSr_i(\theta_j) * FSS_i(\sigma_j)$$

avec

Equation 10

FS_i : Fonction de Satisfaction totale de l'équipement/configuration i

FSr_i, FSS_i : Fonctions de Satisfaction (sensible ou rationnelle)

θ_j = paramètres d'usage rationnels

σ_k = paramètres d'usage sensibles

Le fait d'utiliser l'opérateur ET permet la fusion des deux fonctions de satisfaction FSr et FSs. Cette fusion, du point de vue de la logique floue, correspond au produit [DEST, 2007] des éléments et permet d'obtenir une fonction de satisfaction globale qui sera comprise entre 0 et 1. Une telle opération désavantagera de ce fait, de façon mathématique, les systèmes n'intégrant pas suffisamment l'usage. En effet, si un système étudié n'intègre pas suffisamment l'usage, il lui sera affecté une valeur de fonction de satisfaction faible viendra diminuer la fonction de satisfaction globale.

L'intérêt de cette approche réside autant dans le processus de construction de proche en proche de la fonction de satisfaction globale que dans le résultat final. En effet, ici il est

possible d'ajouter une à une les fonctions de satisfaction dans la composition de la fonction globale et voir ainsi leur impact sur celle-ci. La comparaison de proche en proche permet de juger de l'impact en terme d'efficacité d'usage de la fonction de satisfaction rajoutée.

1.3.2 Approche pondératrice linéaire normée (PLN):

Dans cette approche, on pourra réaliser une combinaison linéaire pondérée des fonctions de satisfaction (Equation 11).

$$FS_i = \frac{a.FSr_i(\theta_j) + b.FSs_i(\sigma_k)}{a + b} \quad \text{Equation 11}$$

avec

FS_i : Fonction de Satisfaction totale de l'équipement/configuration i

FSr_i, FSs_i : Fonctions de Satisfaction (sensible ou rationnelle)

θ_j = paramètres d'usage rationnels

σ_k = paramètres d'usage sensibles

a, b : coefficients de pondération

Le fait d'utiliser l'opérateur de sommation de fonction permet de ne pas discriminer la fonction de satisfaction globale par une valeur nulle de FSr ou FSs. D'autre part, on peut même valoriser l'une de ces 2 fonctions grâce à l'emploi d'un coefficient pondérateur. Cela permet au concepteur de privilégier l'aspect rationnel ou l'aspect sensible de la fonction globale. Enfin, il faudra normer la satisfaction globale afin que celle-ci reste dans l'espace de définition [0,1] (Equation 11).

1.4 Construction du Diagramme de compromis Coût / Satisfaction à partir des fonctions de satisfaction et de la mesure du coût

1.4.1 Construction du diagramme de compromis

Nous avons pu définir au chapitre 3 le concept d'efficacité d'usage énergétique comme un concept multi-objectifs. Nous avons également proposé une expression mono-objectif de l'EUE afin de pouvoir l'étudier en tant que rapport d'efficacité énergétique. Néanmoins, nous avons pu voir que cette approche mono-objectif comportait des inconvénients comme sa valeur infinie en cas d'annulation de la consommation énergétique.

Aussi, nous proposons désormais d'utiliser le **diagramme de Compromis Coût / Satisfaction** qui permet alors de passer de la vision mono-objectif de l'EUE à la **vision multi-objectifs**, conforme à sa définition même. Le diagramme de compromis est un plan ayant pour abscisses le coût (correspondant à la consommation énergétique que l'on avait au dénominateur de l'expression mono-objectif de l'EUE de l'équation 7) et en ordonnée l'évaluation de la satisfaction (correspondant à la satisfaction globale que l'on avait au numérateur du rapport de l'EUE de l'équation 7) permettant dès lors de traduire directement de manière graphique et ainsi quantitative, l'EUE (figure 45).

En effet, dans ce plan, nous positionnerons les couples (Coût/Satisfaction) qui sont définis par leurs coordonnées (X, Y) à partir des valeurs moyennes de la consommation énergétique et des fonctions de satisfaction (aussi bien sensibles, rationnelles que globales) calculées sur la période de temps de l'étude (Equation 12). On remarque que l'on peut en effet étudier soit la satisfaction globale (permettant d'étudier directement l'EUE) mais également on peut employer l'expression des satisfactions sensibles et rationnelles car, comme nous le verrons dans le cas d'application du système de chauffage, le diagramme de compromis peut

se décliner sous la forme de diagramme de compromis Coût / Satisfaction sensible, Coût / Satisfaction rationnelle (ce dernier terme qui est, rappelons-le, indépendant du coût) et Satisfaction rationnelle / Satisfaction rationnelle qui sont autant de représentations graphiques *effectives* car apportant des informations intéressantes.

$$X_i = \frac{1}{T} \int_1^T P_i(t) dt$$

$$Y_i = \frac{1}{T} \int_0^T S_i(t) dt$$

Equation 12

avec

$i = 1..n$: indices des équipements/configurations étudiés

$P_i(t)$ = Consommation énergétique du scénario d'étude de l'équipement i

$S_i(t)$ = Fonction de satisfaction (globale FS, rationnelle FSr ou sensible FSs) de l'équipement

T = Intervalle de temps de l'étude

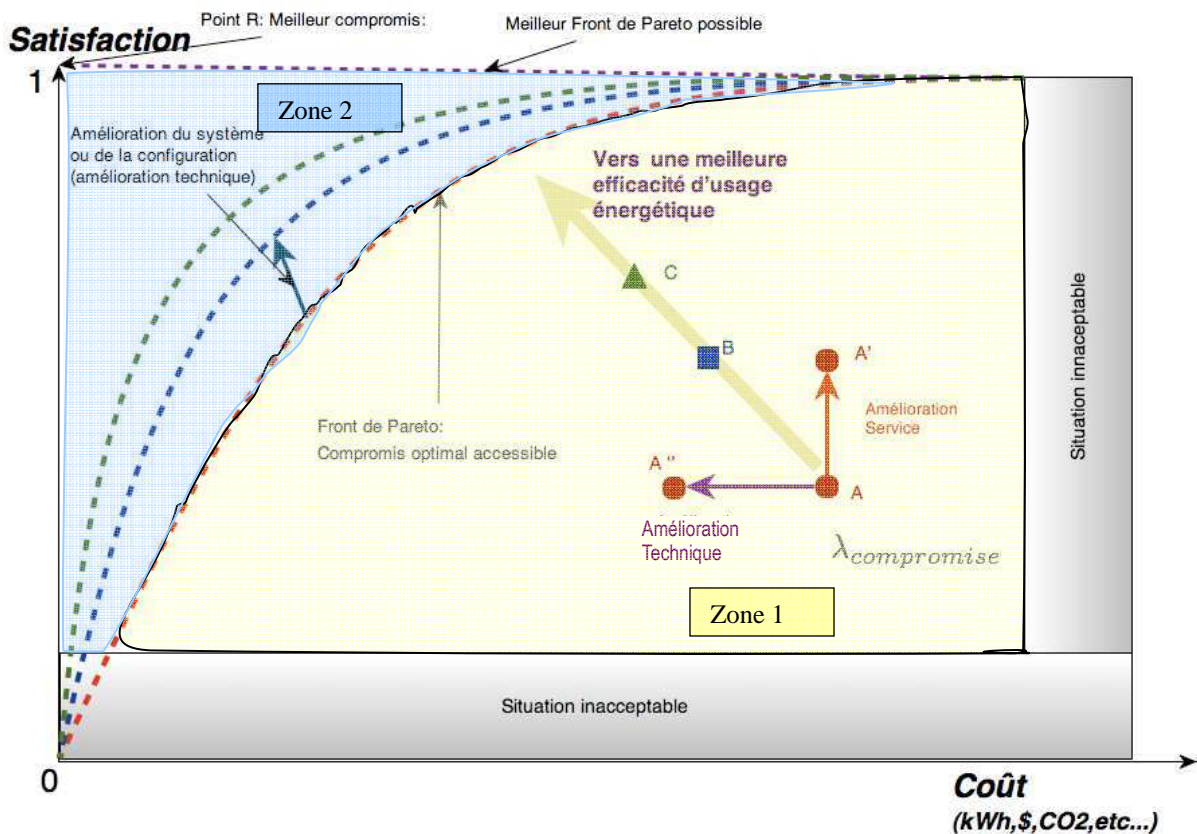


Figure 45 : Proposition de Diagramme de Compromis Coût / Satisfaction théorique [PLOI, 2011]

Ce diagramme Coût / Satisfaction offre la possibilité de visualiser l'intérêt et la philosophie de l'EUE car l'on peut y présenter le fait de maximiser la satisfaction en se déplaçant sur l'axe des ordonnées du diagramme de compromis et le fait de minimiser la consommation énergétique, en se déplaçant sur l'axe des abscisses d'où la possibilité de visualiser l'efficacité d'usage optimal (flèche de la figure 45). Cette représentation graphique du déplacement de point dans ce plan de travail (flèche de la figure 45) est une représentation quantitative de l'aspect qualitatif de l'EUE.

Cet espace (Coût/Satisfaction) permet de mettre en évidence des zones de non-définition où les situations sont inacceptables : en effet, il existe des situations que l'on ne veut pas atteindre à cause de valeurs trop importantes, par exemple on a une limite maximum pour le coût compte tenu du budget que l'on dispose. D'autre part, en tant qu'acteur humain, les études sociologiques sur l'acceptabilité nous informent qu'il existe un palier au-dessous duquel les solutions ne sont pas acceptables et il y aura un rejet de la part des usagers (à déterminer pour chacun).

Le diagramme Coût / Satisfaction est découpé en deux zones où les points définis par les couples (X, Y) de l'équation 11 peuvent évoluer:

- Un espace d'évolution relatif (Zone 1 figure 45) où l'amélioration de l'EUE entre deux points se fait relativement de proche en proche. Un point dominera l'autre (dans le sens de points dominés définis par Pareto [JACQ ,1996]) s'il se situe dans une partie supérieure de la zone, dans le sens de la flèche de « meilleure EUE » (figure 45).

- Un espace d'évolution absolu où les points ne sont plus dominés et forment alors des fronts de Pareto qui représentent les meilleurs compromis entre les deux objectifs Coût et Satisfaction (Zone 2 figure 45).

On illustrera l'utilisation du diagramme de compromis par la conception d'un système de ventilation.

1.4.2 Utilisation du diagramme de compromis dans l'espace relatif (Zone 1)

L'utilisation du diagramme de compromis permet d'évaluer l'EUE pour l'usage d'un équipement qui est une réponse indirecte au degré d'intégration de l'usage de cet artefact. Le couple (X, Y) sera donc en effet une évaluation de l'EUE d'un équipement dans une certaine configuration durant une période donnée (par exemple un point A pour un couple (X, Y) précis (figure 49)).

Si nous améliorons le service, nous améliorons la satisfaction globale car nous aurons offert une meilleure qualité de service, meilleure justesse énergétique, etc. et nous nous déplacerons sur l'ordonnée (point A' figure 45) pour un même coût.

Par exemple grâce à un meilleur réflecteur, une lampe pourra pour la même quantité d'énergie consommée, produire un meilleur éclairage et ainsi améliorer le confort ressenti.

Par complément, en améliorant la technique (point A''), on peut parvenir pour un même niveau de satisfaction, à réduire la consommation (par exemple éteindre les consommations de veille permet de conserver le même éclairage à l'instant voulu mais le bilan énergétique est meilleur). On se déplace alors selon l'abscisse minimisant alors la consommation énergétique. Cela correspond à l'objectif de l'efficacité énergétique physique.

Ainsi, dans ce graphe, on peut situer des *points dominants* ayant une meilleure efficacité d'usage énergétique du moment qu'ils intègrent une composante verticale meilleure (augmentation de la satisfaction), ou une composante horizontale meilleure (réduction de coût/d'énergie à ou une amélioration de ces deux composantes. Ainsi, le point B domine le point A et le point C domine les points A et B car il a une meilleure EUE signifiant par là même que l'usage est mieux intégré tout en réduisant l'énergie consommée.

La direction de l'amélioration va dans le sens où le point optimal (point R) correspond à une satisfaction optimale pour un coût nul. On se déplace ainsi dans le plan de manière relative car on cherchera à améliorer relativement son EUE par rapport à une configuration précédente.

Illustration avec l'exemple de la ventilation. :

Nous pouvons situer dans le diagramme de Compromis différents systèmes de ventilation.

Dans un premier lieu, la ventilation naturelle ne consomme rien donc aura un coût de 0. Si l'on a une « bonne » ventilation, apportant une satisfaction maximale de 1, alors nous pourrions atteindre concrètement le point idéal R.

Dans le cas d'une ventilation mécanique, de par l'introduction d'un moteur, nous ne pourrions pas avoir un coût nul ou sinon cela va dégrader la satisfaction (voir fronts de Pareto) (à moins qu'un système double flux puisse totalement compenser sa consommation énergétique). Dans la zone 1, nous pourrions donc trouver un système de VMC simple flux par exemple qui offre une certaine satisfaction en consommant une certaine quantité d'énergie (point A par exemple). Si l'on choisit d'utiliser une VMC Double flux, qui permet d'améliorer la satisfaction (en particulier satisfaction rationnelle car on est satisfait de récupérer de l'énergie) et de réduire la consommation énergétique, on augmente l'EUE afin d'obtenir le point B qui domine la solution du simple flux (point A).

1.4.3 Utilisation des fronts de Pareto dans l'espace Absolu (Zone 2)

Il existe, pour chaque configuration de système étudié (les points A, B et C étant trois configurations différentes d'un même système), un ensemble de points optimaux de compromis Coût / Satisfaction. Ces points regroupent l'ensemble des points non dominés tels que le décrit Pareto et forment en cela ce l'on appelle des *fronts de Pareto* dans le sens de la frontière de Pareto définie lors de la résolution de problèmes d'optimisation multi-objectifs [MAGO, 2004].

Ces fronts de Pareto proviennent de l'approche d'optimisation de Pareto qui décrit l'ensemble des points de coordonnées (X, Y) pour lesquels on ne peut pas améliorer un objectif (la coordonnée X par exemple en réduisant la consommation énergétique) sans détériorer l'autre objectif (la coordonnée Y du confort). Ainsi, lorsque l'on se déplace dans le diagramme de compromis en améliorant l'efficacité d'usage (points A' et A'' figure 45) du scénario d'usage initial (point A) on ne pourra pas dépasser le front de Pareto correspondant à la configuration du système sans quoi, si l'on augmente un paramètre (coût ou confort), cela va dégrader alors l'autre objectif. En effet, en prenant l'exemple du chauffage avec comme paramètre d'usage la température, si l'on diminue trop les coûts de chauffage (correspondant à diminuer la puissance de chauffe), on peut s'attendre à ce que le confort thermique se dégrade (d'autant plus si la pièce chauffée est mal isolée). De même si l'on veut augmenter la température à un moment donné, cela va engendrer des coûts supplémentaires car nécessite une puissance thermique plus importante.

Chaque configuration du système étudié (correspondant aux trois couleurs rouges bleu vert des points A, B et C de la figure 45) aura donc un front de Pareto de points de compromis optimal. Si l'on considère que la configuration B est meilleure que la configuration A (meilleure du point de vue de l'efficacité d'usage) et que la configuration C est meilleure que la configuration B, on retrouve que les fronts de Pareto tendent respectivement vers une meilleure efficacité d'usage, vers le meilleur front de Pareto possible (figure 45). Celui-ci correspond à l'ensemble de points dominés par le point idéal d'efficacité d'usage (point R). On peut passer d'une courbe de Pareto à l'autre en changeant :

- le système technique : en remplaçant par exemple un type de chauffage par un chauffage moins onéreux
- la formulation de la satisfaction par l'utilisateur: en allant par exemple vers une satisfaction par rapport à la température plus tolérante (utilisateurs acceptant des températures plus basses, ou des niveaux d'exigence et de satisfaction plus bas).

Nous ne traiterons pas ici de la formulation mathématique de ces fronts de Pareto mais cependant, nous offrirons des méthodes de conception des fonctions de satisfaction qui permettraient de construire effectivement ces fronts de Pareto qui représentent les solutions optimales de l'EUE.

Illustration avec l'exemple de la ventilation.

Nous avons vu que l'on pouvait comparer deux types de ventilations mécaniques : VMC simple flux et VMC double flux. Cependant chacune de ces solutions dispose de points limites, des ensembles de points dominés où si l'on souhaite par exemple augmenter la satisfaction sensible, cela induira une augmentation des coûts.

Le but sera de se situer sur cette frontière qui représente les points optimaux de compromis satisfaction / coût.

Au travers des parties suivantes, nous verrons qu'un tel diagramme peut être employé en tant qu'outil d'aide à la décision afin de comparer plusieurs systèmes ou un même système à différentes périodes de temps et de visualiser quels sont les points les plus efficaces d'usage c'est-à-dire intégrant le mieux l'usage.

2 Aide à la conception du système de Chauffage/ Rafraîchissement

Nous avons pu présenter précédemment (Partie 1 chapitre 4) le concept d'efficacité d'usage ainsi que sa traduction de manière quantitative sous forme de diagramme de compromis. Aussi, nous allons appliquer désormais de tels concepts et outils (fonctions de satisfaction et diagramme de compromis) comme aide à la décision lors de la conception de systèmes énergétiques dans le Système Complexe Bâtiment afin d'illustrer nos propos.

En phase de conception du système bâtiment, les décideurs ont un certain degré de liberté sur les équipements étudiés concernant le dimensionnement et la configuration d'équipements (au sens large). On peut dès lors constater, dans ce sens, que les équipements du SCB qui font l'objet de ces études de conception sont des équipements contribuant au « confort d'ambiance » : le **chauffage/rafraîchissement, la ventilation et l'éclairage**. Par confort d'ambiance on entend que cela correspond à l'environnement / l'espace ambiant où se trouvent les habitants et en cela ces habitants perçoivent ce confort au travers de leurs sensations. Ainsi, ces familles d'équipements proposent des services ayant trait aux sens : l'éclairage pour le confort visuel (vue), la ventilation pour le confort aéraulique/qualité d'air (odorat), le chauffage/rafraîchissement pour le confort thermique (tactile). De ce fait, l'élément sensible de la satisfaction sera davantage présent.

Nous pouvons remarquer d'autre part que ces mêmes équipements sont des dispositifs dont l'étude nécessite une étude globale du SCB car ils sont implantés ensuite comme partie intégrante du bâtiment et il est difficile de pouvoir les modifier par rapport à l'usage hormis au travers de leur pilotage, spécifiant par là même le rapport à l'usage. Un tel rapport implique une réflexion d'autant plus importante vis-à-vis de l'usage de la conception de ces systèmes de chauffage/climatisation, ventilation et éclairage.

Objectif de l'outil d'aide à la décision

L'EUE sera appliquée ici en tant qu'outil d'aide à la décision pour la conception de système énergétique dont l'objectif sera ici de comparer différentes configurations (sous forme de stratégies de contrôle-commande/ pilotage) de mêmes équipements en fonction de l'intégration de l'usage. L'objectif du concepteur utilisant un tel outil d'aide à la décision intégrant l'usage sera de déterminer quelles solutions présentent une satisfaction maximale pour une consommation énergétique minimale (donc quelle est la **meilleure solution d'EUE**)

et d'évaluer la robustesse à l'usage si celui-ci est différent de celui prévu par le cahier des charges.

Nous verrons dans cette partie l'application des méthodes, modèles et outils présentés précédemment (Partie 1 chapitre 4), au système de chauffage de la plateforme PREDIS MHI. En tant que système de chauffage/Rafraîchissement, l'aspect du confort d'ambiance qui sera ici étudié est le confort thermique. Une application analogue de la méthodologie proposée a également été appliquée pour le système de ventilation et d'éclairage artificiel dont on pourra trouver en détail les études en annexes 18 et 21. Nous présenterons cependant quelques-unes des étapes de ces deux autres systèmes énergétiques pour appuyer nos propos.

Le cas d'étude sera la Salle Informatique de la plateforme PREDIS MHI. Cette salle présente la caractéristique de disposer d'un nombre variable de personnes. Nous avons mené cette étude sur une année et plus spécifiquement sur une semaine (la semaine du 29 Novembre au 5 Décembre 2010) d'une part pour une meilleure visibilité car une semaine représente la période minimale de temps pour l'étude de l'usage dans un bâtiment et d'autre part car cela correspond à une des rares semaines où nous avons pu disposer de l'ensemble des données réelles pour valider notre approche (notamment due au problème de la fiabilité des informations évoqué au chapitre 2).

2.1 Analyse de l'usage et identification des paramètres d'usage avec l'approche QQQQCP

La première étape du processus consiste en l'analyse de l'usage lié au chauffage et au confort thermique. Si on applique l'approche *QQQQCP* présentée précédemment (Partie 1.1 Chapitre 4), cela permet de définir quels sont les différents paramètres d'usage (annexe 17) mais nous ne présenterons ici que les paramètres d'usage les plus pertinents. On distinguera les paramètres d'usage liés au domaine sensible de ceux du domaine rationnel.

2.1.1 Paramètres d'usage sensible

La satisfaction sensible au niveau thermique se base principalement sur le *niveau de température* qui est la grandeur physique majeure de l'évaluation du confort thermique (exprimée en °C) (Réponse à la question *Quoi?* de l'approche *QQQQCP*). Les exigences en terme de niveau de température peuvent varier en fonction de la journée ainsi que des personnes. On considérera par la suite que toutes les personnes ont le même niveau d'exigence (ou rapport de satisfaction) par rapport au niveau de température et cela constamment au cours du temps.

Le confort thermique est en fait davantage un confort hygrothermique car *l'humidité de l'air* influe grandement sur le ressenti des personnes. Néanmoins, dans notre étude nous nous cantonnerons qu'à la mesure de la température ambiante (au milieu d'une pièce) pour des raisons de modélisation et d'instrumentation.

La satisfaction thermique (ou confort thermique) est bien une évaluation à un instant donné à un endroit donné : celui de l'occupation d'une pièce par un usager donc cela intègre le lieu et le moment de l'usage.

Mesurabilité : La mesure de ce paramètre d'usage est simple puisqu'il existe des capteurs de température d'air ambiant de manière accessible et facile de mise en œuvre.

Avec l'étude des autres systèmes énergétiques du bâtiment que l'on trouvera en Annexes 18 et 21, on remarquera que, comme présentées dans l'approche théorique, les satisfactions sensibles sont caractérisées par des paramètres physiques sur lesquels le confort est défini (taux de CO₂ et COV (Composés Organiques Volatiles) pour la qualité d'air; niveau de luminosité, éblouissement, rendu des couleurs pour le confort visuel) mais nous nous

sommes limités à chaque fois à la mesure et à l'emploi d'un seul paramètre d'usage sensible (taux de CO2 pour le système de ventilation et niveau de luminosité pour l'éclairage).

2.1.2 Paramètres d'usage rationnels

Par rapport à la satisfaction rationnelle du système de chauffage, on s'intéressera aux composantes de l'usage ayant un impact sur le fait que la consommation énergétique soit satisfaisante ou non. On retrouve ainsi comme paramètres d'usage rationnel (liste non exhaustive) :

- la *localisation spatiale et temporelle de l'usage* : où est situé l'usage (l'utilisateur) et à quel moment, (Réponse aux questions *Où ? et Quand ?* de l'approche *QQOQCP*) Il s'agit ici de déterminer quelles sont les zones thermiques où l'occupation est effective. **Mesurabilité** : La mesure de tels paramètres d'usage pourra être réalisée par un capteur de présence (ou de détection de mouvement) avec enregistrement et horodatage permettant de savoir quelle pièce est occupée à quel moment.
- le *nombre de personnes* présentes dans la pièce (Réponse à la question *Qui ?* de l'approche *QQOQCP*). Chaque personne, d'un point de vue thermique, dégage de la chaleur (apport interne thermique) impactant ainsi la température (plus ou moins en fonction de l'efficacité énergétique physique du poste thermique dans son ensemble (enveloppe+système de chauffe)) et par conséquent le confort thermique. La présence de personnes dans une pièce est ainsi une action indirecte sur le système de chauffage mais demeure bien de l'ordre de l'usage (par exemple l'occupation d'une salle de classe ne sera pas la même qu'un bureau).
- la *réactivité du système* par rapport aux actions des usagers (Réponse indirecte à la question *Comment ?* de l'approche *QQOQCP*). Par rapport à l'inconfort, l'utilisateur peut agir directement (forçage consigne) ou indirectement (ouverture porte) sur le système de chauffage ce qui aura des conséquences au niveau énergétique et confort.
- la *raison de l'action* (Réponse à la question *Pourquoi ?* de l'approche *QQOQCP*) permet d'identifier s'il s'agit d'un usage principal ou si c'est un usage secondaire (détourné ou déviant comme nous pouvons l'analyser dans le cas de l'éclairage artificiel (Annexe 20)).

Comme présentés précédemment (Partie 1.1 Chapitre 4), ces paramètres d'usage permettent de définir la fonction de satisfaction rationnelle que l'on va construire plus tard. Dans le cas du chauffage, on a pris un exemple trivial de fonction de satisfaction rationnelle basé sur le gaspillage d'énergie lié à la présence ou non d'occupants dans une pièce lorsque celle-ci est chauffée. Nous n'utiliserons donc que les paramètres d'usage rationnels de localisation spatiale et temporelle de l'usage ainsi que la puissance de chauffe. Nous retrouverons d'ailleurs cette même fonction de satisfaction pour les trois systèmes énergétiques (Chauffage, Eclairage, Ventilation).

Cependant, il est possible d'intégrer des paramètres d'usage plus complexes afin de construire des fonctions de satisfaction plus complètes et donc plus proches de l'usage réel. Néanmoins, cette complexité sort du cadre de notre étude car elle intègre des dimensions de l'ordre de l'étude sociologique pouvant conduire à l'inspection de données privées (par exemple la connaissance de la raison d'un usage est très intrusive dans la sphère privée de l'utilisateur et nécessiterait une procédure d'enquête particulière).

2.2 Construction des fonctions de satisfaction à partir des paramètres d'usage

Nous avons pu voir au chapitre précédent ainsi que dans l'analyse effectuée précédemment (partie 2.1 Chapitre 4) que l'usage thermique du bâtiment, au sens général, dispose de nombreux paramètres permettant de définir les fonctions de satisfaction sensible et rationnelle. Pour notre étude et validation, nous n'utiliserons que quelques paramètres choisis parmi ceux facilement mesurables : la présence de l'occupant et la température.

2.2.1 Fonction de satisfaction sensible

Le paramètre d'usage sensible retenu pour déterminer la satisfaction sensible étant la température ambiante ($\theta_{\text{température}}$), il existe de nombreux travaux sur la modélisation du confort thermique en particulier l'élaboration du modèle PMV-PPD [HOMO, 2011][LIAN, 2005] [YE, 2003].

La sensation de confort peut être évaluée en utilisant une échelle de +3 à -3 autour d'un point optimal [FANG, 1972]. Elle peut être également modélisée par le vote moyen, appelé PMV (Predicted Mean Vote), qui est une appréciation moyenne réalisée sur une population dans un environnement donné (au travers d'un système de questionnaires sociologiques) comprise sur cette échelle de -3 à +3 (Tableau 3).

-3	Très froid	Insatisfait parce que trop froid
-2	Froid	
-1	Frais	
0	Confortable	Satisfait
+1	Tiède	
+2	Chaud	Insatisfait parce que trop chaud
+3	Très Chaud	

Tableau 3 : Sensation de confort thermique : modèle PMV

Le pourcentage prévisible d'insatisfaits, appelé PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied) exprime alors la part des sujets insatisfaits dans une condition PMV donnée. Ainsi, la liaison entre PMV et PPD est obtenue figure 46 [JANG, 2007]. Comme nous avons pu l'évoquer précédemment (Partie 1.2 chapitre 4), nous pouvons transformer ce modèle de critère de confort basé sur le taux d'insatisfaction en une fonction de satisfaction où nous associerons alors aux zones de sensations du modèle PMV des mesures de températures (Pour $PMV = 0$, on suppose $Température = T_{opt}$) (figure 46).

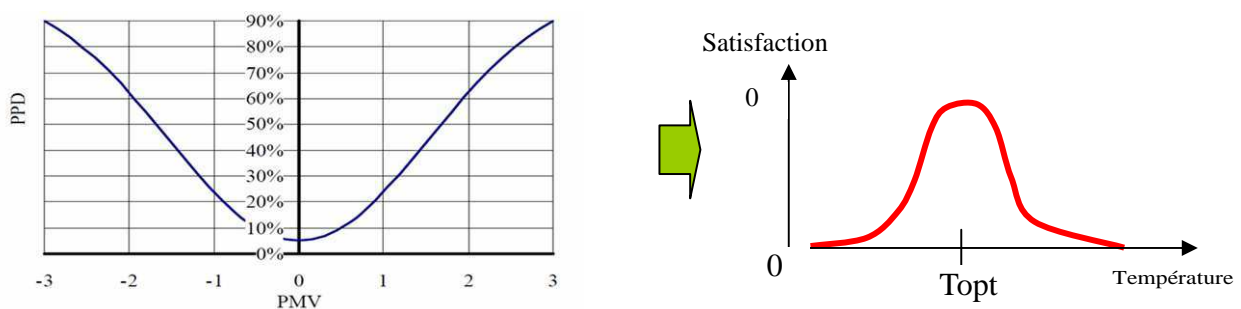


Figure 46 : Du modèle PMV-PPD à la fonction de satisfaction de température du confort

Nous obtenons donc ainsi une fonction de satisfaction sensible de température $FSS_{\text{température}}(t) = f(\theta_{\text{température}}(t))$ en fonction de la température (ou $\theta_{\text{température}}$). Pour des raisons

de simplification permettant une implémentation ultérieure d'un tel modèle dans un SGEB, nous linéarisons cette fonction de satisfaction (figure 47). On obtient alors un profil de satisfaction ayant une satisfaction de 1 pour une température optimale (par ex. $T_{opt}=20^{\circ}\text{C}$ l'hiver et $T_{opt}=24^{\circ}\text{C}$) et deux températures limites symbolisant les bornes d'acceptabilité thermique, qui varieront en fonction des saisons (par ex. $T_{min}=17^{\circ}\text{C}$ et $T_{max}=23^{\circ}\text{C}$ en hiver et $T_{min}=20^{\circ}\text{C}$ et $T_{max}=27^{\circ}\text{C}$ l'été) au-delà desquelles la satisfaction sera nulle (figure 60). Une telle fonction sera effective durant la période d'occupation de la pièce (le lundi de 14 à 16h, le mardi de 14h à 16h, le mercredi de 8h à 10h et le vendredi de 10h à 12h) car le confort thermique est évalué de manière instantanée par l'habitant. En dehors de ces horaires d'occupation, la satisfaction sera de 1 car l'occupant ne sera pas dans la pièce concernée.

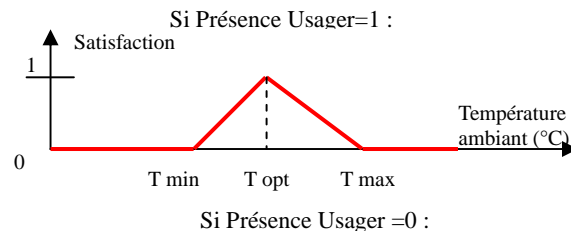


Figure 47 : Fonction de satisfaction sensible thermique $FS_{température}$

Bien entendu, on pourrait complexifier une telle fonction de satisfaction sensible en prenant en compte d'autres éléments du confort thermique comme l'humidité de l'air.

Autres approches et fonctions de satisfaction sensible

Comme évoqué durant la partie théorique, la fonction de satisfaction sensible peut être construite de manière différente en fonction de l'existence de modèle et du degré de mesurabilité des paramètres d'usage sensible en jeu.

Fonction de satisfaction sensible de qualité d'air par un concepteur/expert

Dans le cas de la ventilation, on a construit la fonction de satisfaction de qualité d'air (dont le paramètre d'usage sensible est le taux de CO_2 (θ_{CO_2})) non pas en se basant sur des réglementations (donc une littérature et des modèles existants) mais en la construisant empiriquement. Pour cela, une forme et une amplitude ont été choisies par le concepteur (en tant que concepteur expert) et il a identifié empiriquement les paramètres (paramètres mathématiques comme le coefficient de l'exponentielle voir annexe 17) pour obtenir une fonction effective (figure 48)

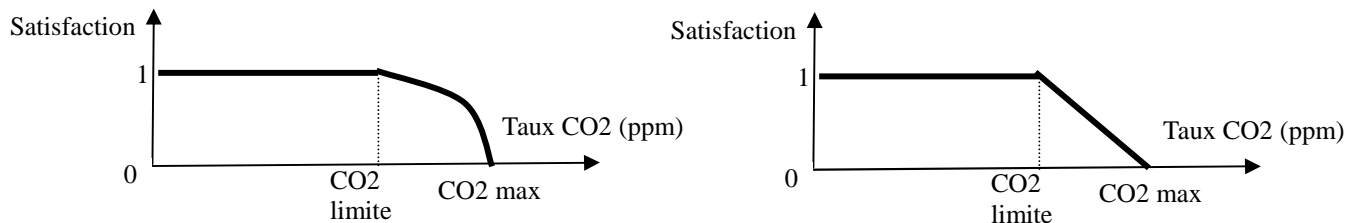


Figure 48 : Fonction de satisfaction CO_2 (exponentielle et linearisée)

Fonction de satisfaction sensible de confort par un concepteur/expert avec interview sociologique

Dans le cas de l'éclairage artificiel, nous avons également construit une fonction de satisfaction sensible de façon empirique mais cette fois-ci à partir d'entretiens avec les usagers à partir d'un questionnaire. Le paramètre d'usage sensible choisi a été le niveau d'éclairage lumineux exprimé en Lux ($\theta_{\text{Eclairage}}$). Dans le questionnaire (annexe 24), il est question de définir les niveaux d'éclairage acceptables ainsi que la forme de la fonction de satisfaction supposée en fonction de l'éclairage lumineux afin au final de déterminer la forme et l'amplitude de cette fonction de satisfaction sensible.

Il en est ressorti, parmi un certain nombre de profils types proposés, une certaine structure de fonction de satisfaction (figure 49) où les différents paramètres (Ecl Opt, etc...) peuvent bien entendu varier en fonction des personnes car ils dépendent de la perception de chacun (plus de détail en annexe 20).

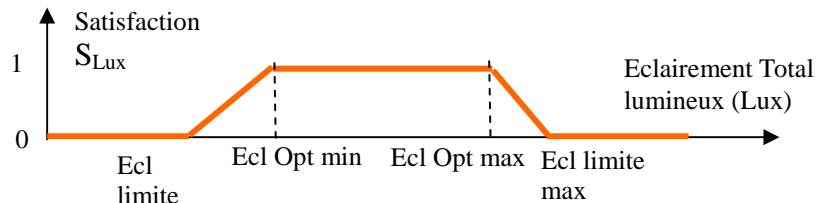


Figure 49 : Fonction de satisfaction Eclairage Lumineux

2.2.2 Fonction de satisfaction rationnelle

Etant donné qu'en phase de conception, le nombre de personnes présentes est souvent standardisé, on supposera qu'il y a 25 personnes présentes durant les périodes d'occupation prévues (par le calendrier (figure 50)) :

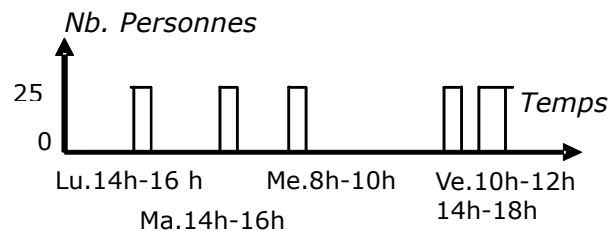


Figure 50 : Scénario d'occupation de la Salle Informatique

2.2.2.1 Fonction de satisfaction rationnelle sur la sobriété énergétique

Pour l'étude de la satisfaction rationnelle, on s'intéressera en particulier à l'étude des gaspillages d'énergie et du fait que les actions sur le système sont satisfaisantes par rapport à cette question du gaspillage d'énergie. En effet, on cherche à analyser si les actions sur le système (dont notamment les actions de configuration du système) font en sorte qu'on consomme la bonne quantité d'énergie au moment et dans des lieux réellement occupés. Les paramètres d'usage rationnels seront donc bien ceux relatifs à *localisation spatiale et temporelle de l'utilisateur* (σ_{habitant}) mais aussi à la consommation énergétique (donnée par le paramètre d'usage de puissance de chauffe ($\sigma_{\text{puissance}}$) et à l'ouverture du bâtiment ($\sigma_{\text{bâtiment}}$)).

Le concepteur peut ensuite construire une fonction de satisfaction rationnelle ($FS_{\text{énergie}}$) privilégiant la consommation d'énergie lorsque la salle est effectivement occupée (figure 50) et pénalisant les périodes de chauffe alors que la salle est inoccupée (Equation 13) (figure 51). Cette fonction est ainsi construite à partir du jugement expert du concepteur qui décide de construire une telle fonction selon sa propre logique de ce qu'il est « juste » de consommer.

$$\begin{cases}
 \text{SI (Presence Usager=1 \& Ouverture Batiment=1) ET Puissance Chauffage>0: } S_{\text{énergie}}=1 & \text{Equation 13} \\
 \text{SI ((Presence Usager=0 \& Ouverture Batiment=1) OU Ouverture Batiment=0) ET Puissance Chauffage=0: } S_{\text{énergie}}=1 \\
 \text{SI ((Presence Usager=0 \& Ouverture Batiment=1) OU Ouverture Batiment=0) ET Puissance Chauffage>0: } S_{\text{énergie}}=0
 \end{cases}$$

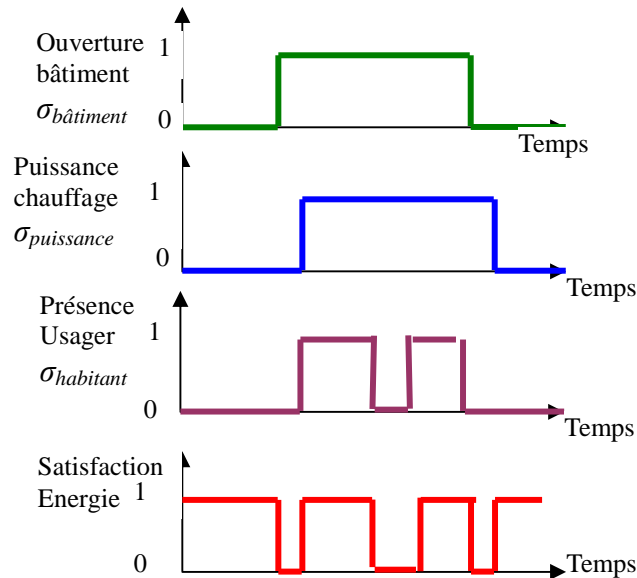


Figure 51 Fonction de satisfaction rationnelle d'énergie $FSr_{\text{énergie}}$

Nous avons également utilisé la même fonction de satisfaction rationnelle pour les autres cas énergétiques (ventilation et éclairage artificiel en annexes 18 et 21).

2.2.2.2 Autres fonctions de satisfaction rationnelle

Nous avons pu voir, dans l'analyse des paramètres d'usage rationnel que l'on pouvait définir d'autres paramètres d'usage et décrire ainsi d'autres fonctions de satisfaction rationnelle davantage complexes. Cette complexité renvoie à la difficulté à mesurer certains paramètres car étant en étroite liaison avec l'intrusion dans la sphère privée des usagers. En effet, il faudra pouvoir estimer jusqu'à quel degré de connaissance pourra-t-on investiguer l'être humain sans aboutir à une instrumentalisation de celui-ci qui pourrait amener à des problèmes de protection des données et d'acceptabilité. Néanmoins, nous pouvons imaginer un certain nombre de fonctions de satisfaction rationnelle qui tiendraient compte d'autres paramètres d'usage rationnels :

- Liés à la réaction des occupants : on peut imaginer une fonction de satisfaction qui serait construite à partir de la détection de réaction à l'inconfort : par exemple s'il y a ouverture prolongée de la porte et / ou de la fenêtre, changement / forçage manuel de la consigne, alors il est probable que le système de chauffage ne soit pas satisfaisant :

$$\text{Si } \text{porte_ouverte} > 5 \text{ min OU } \Delta\text{Changementconsigne} > 0: S_{\text{réaction}} = 0$$

$$\text{Sinon } S_{\text{réaction}} = 1$$

- Liés à l'appréciation d'autres fonctionnalités de l'équipement. Un usager pourrait être satisfait par un service effectué par un équipement qui ne correspond pas à sa fonctionnalité première. Par exemple, l'éclairage artificiel peut être utilisé, outre pour éclairer une zone de travail, comme système de sécurité (laisser la lumière allumée pour manifester une présence) ou comme attrait esthétique (notamment

avec l'utilisation de lampes de couleurs). Dans de tels cas, le fait qu'une lampe soit allumée alors qu'il n'y a personne, n'est pas forcément considéré comme insatisfaisant car c'est une autre fonction de l'éclairage qui est évaluée (sécurité, esthétique, etc.).

2.2.3 Construction de la fonction de satisfaction globale pour le système de chauffage

Comme nous l'avons présenté au chapitre 3, il est également possible de construire une fonction de satisfaction globale qui permet de mettre en relation le domaine sensible et le domaine rationnel de l'usage. Dans notre cas d'étude, nous illustrerons nos propos avec les deux approches présentées auparavant mais compte tenu de la nature hautement subjective de la satisfaction globale, on peut trouver d'autres relations (relation disjonctive [PLOI, 2011], à partir de modèle psychologique [DHOL, 1983],...).

Approche conjonctive : On définit la fonction de satisfaction globale en utilisant la fonction logique ET correspondant à une fusion des 2 fonctions de satisfaction (Equation 14). La fusion de ces fonctions s'effectuera sur une période de temps unique et fixe en multipliant simplement à chaque pas de temps la valeur de chaque fonction de satisfaction. Ainsi, on retrouve que si l'une des deux est nulle, cela annulera malheureusement la fonction de satisfaction globale. Mais nous verrons que c'est le passage entre la fonction FSr (ou FSS) à FS qui peut être effectif en termes d'informations.

$$FS_{i,thermique}(t) = FSS_{i,température}(t) * FSr_{i,Energie}(t) \quad \text{Equation 14}$$

i= indice de la configuration de contrôle-commande du système étudié (tableau 4)

Approche pondératrice linéaire normée : Cette approche peut être employée si le concepteur dispose d'objectifs valorisant certains paramètres plutôt que d'autres tout en conservant un minimum de niveau de satisfaction pour chaque paramètre (Equation 15).

$$FS_{i,thermique}(t) = \frac{a.FSS_{i,température}(t) + b.FSr_{i,Energie}(t)}{a + b} \quad \text{Equation 15}$$

i= indice de la configuration de contrôle-commande du système étudié (tableau 4)

Dans notre cadre d'étude où l'on cherche à aller vers de meilleures solutions et gestes énergétiquement vertueux, on se propose de valoriser la fonction rationnelle par rapport à la fonction sensible en lui attribuant un coefficient de pondération supérieur (a=1 et b=2 par exemple).

2.3 Calcul des fonctions de satisfaction : Application au système de chauffage de la plateforme PREDIS

Une fois les fonctions de satisfaction construites (sensible, rationnelle et globale), l'étude de l'EUE peut avoir lieu en prenant un même système de chauffage (VMC dans le cas de PREDIS) et en comparant différents types de stratégies de contrôle-commande vis-à-vis de leur intégration de l'usage. Il s'agira de vérifier que l'approche de l'EUE est effective, au sens où le diagramme de compromis Coût / Satisfaction proposé et construit, va permettre de positionner et de quantifier relativement pour voir rapidement quelles sont les meilleures solutions pour une meilleure efficacité énergétique d'usage. On jugera de l'effectivité du

diagramme de compromis par le degré d'*intelligibilité* des informations présentées ainsi que la *pertinence* de celles-ci.

2.3.1 Systèmes de contrôle-commande

Les trois types de contrôle-commande que l'on comparera au travers du diagramme de compromis seront différents en terme de loi de commande de la puissance de chauffage vis-à-vis de l'usage :

- Système de chauffage sans régulation thermique (Scénario d'étude n°1 tableau 4) : Dans ce cas, on suppose une puissance de chauffe constante (3000W) durant les heures d'ouverture de la salle : de 8h à 18h du lundi au vendredi
- Système de chauffage avec régulation thermique (Scénario d'étude n°2 tableau 4) : Ici, le système de chauffage dispose d'un thermostat lui permettant de réguler la température en fonction de la consigne de température imposée. Cette régulation permet déjà de prendre en compte une composante de l'usage : les apports internes thermiques des occupants. La consigne de température dans ce cas est de 20°C durant les heures d'ouverture de la salle : de 8h à 18h du lundi au vendredi et de 16 °C en dehors.
- Système de chauffage anticipatif avec régulation thermique (Scénario d'étude n°3 tableau 4) : Ce système reprend les mêmes caractéristiques de régulation et de consigne que le système précédent mais cette fois-ci la consigne de température de 20°C est effective durant les heures d'occupation de la pièce prévues et 16°C le reste du temps. La différence de ce scénario par rapport au scénario 2 tient au fait que l'on appliquera une consigne qu'à l'horaire de l'occupation de la salle et non celui du bâtiment. Pour connaître l'occupation prévisionnelle de la salle on peut soit se reporter au calendrier d'occupation quand il est disponible (dans notre cas), soit modéliser au travers d'une approche stochastique [HALD, 2008] [PAGE, 2007]. Technologiquement, cela pourrait correspondre à la programmation du système de chauffage afin de préchauffer au bon moment les locaux correspondants.

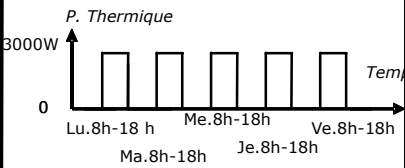
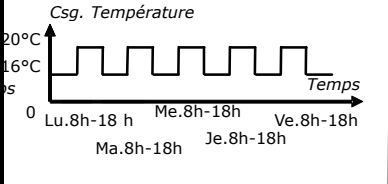
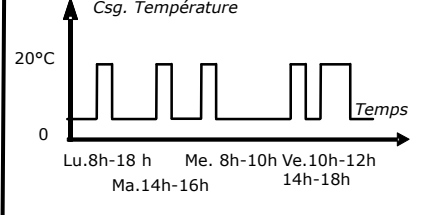
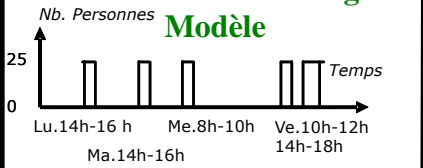
<p>Côntrole-commande de systèmes de chauffage</p> <p>Scénarios d'usage</p>	<p>Sans Système de Régulation</p> 	<p>Avec Système de Régulation</p> 	<p>Système Anticipatif</p> 
<p>Scénario Usage Modèle</p> 	<p>1</p>	<p>2</p>	<p>3</p>

Tableau 4 : Scénarios d'étude pour l'étude d'efficacité énergétique d'usage pour le système de chauffage

Le calcul de l'évolution de la puissance thermique en fonction des différents scénarios est alors effectué par des modèles thermiques (présentés juste après). Aussi, dans le scénario 1, la puissance thermique est une donnée thermique d'entrée du modèle thermique réduit (figure 53) (courbe en bleu figure 52) alors que les puissances thermiques des scénarios 2 et 3 ont été calculées à partir du modèle thermique réalisé sous le simulateur thermique dynamique COMFIE (modèle en annexe 11) (autres courbes figure 52).

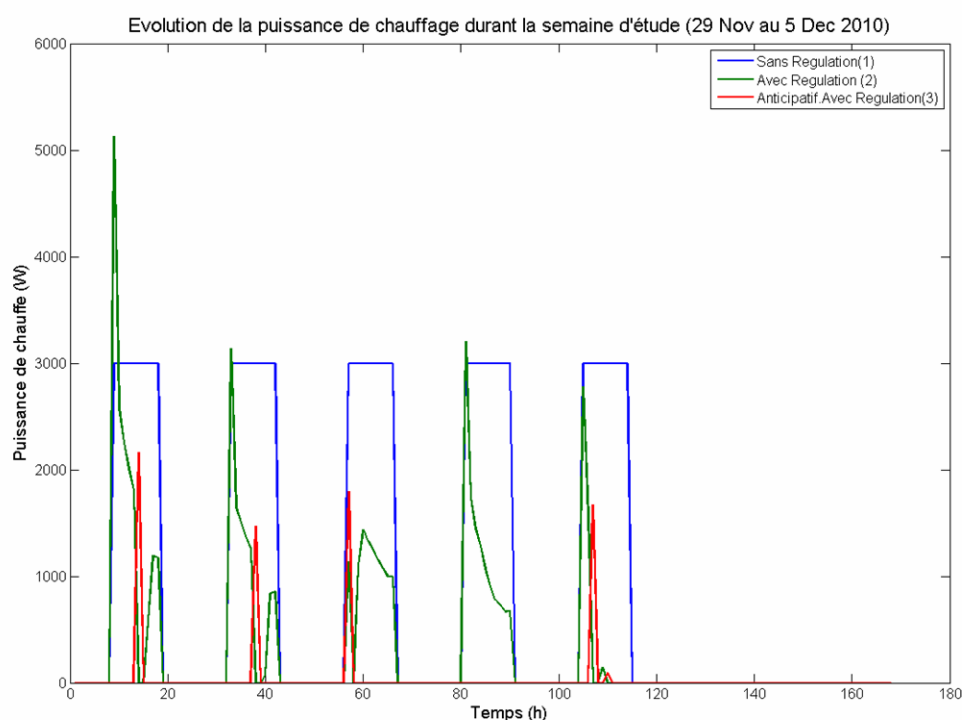


Figure 52 : Evolution de la puissance de chauffage durant la semaine d'étude

2.3.2 Calcul de l'évolution de la température

Il existe deux types de modèles physiques pour le calcul de la température dans une pièce dans lesquels viendront s'implémenter les différents scénarios de contrôle-commande étudiés :

- Le premier modèle, que nous appellerons « modèle complet », est un modèle basé sur un logiciel de simulation thermique dynamique : Comfie Pleaides [PEUP, 1990]. Ce modèle présenté en chapitre 2 permet de simuler l'évolution au cours d'une année, sur un pas de 1h, de la température intérieure ambiante. Ce modèle permet de prendre en compte l'ensemble du bâtiment dans lequel l'étude s'effectue à partir de l'environnement météorologique, des différentes compositions de parois constituant le bâtiment ainsi que des scénarios d'usage définissant à la fois les consignes de température voulues tout comme les scénarios de ventilation et d'apports internes. Nous retrouverons en annexe le modèle COMFIE employé (annexe 11). Ce modèle permet d'obtenir le comportement thermique de la pièce avec un système de chauffage intégrant une régulation de température (Scénario d'études 2 et 3 table 4).

- Le second modèle, que nous appellerons « modèle réduit », est un modèle thermique équivalent thermique [MADS, 1995] [LE, 2008]. Cela permet de simplifier le problème par

rapport au modèle complet et d'être plus léger en termes de temps de calcul et de complexité de définition de modèle en vue d'une intégration dans un SGEB. En effet, un tel modèle a pour contrainte d'être à la fois simple et donner des résultats probants car il est amené à être implémenté dans des algorithmes d'optimisation et de contrôle-commande afin de piloter un ensemble de charge dont des charges électriques. Or, la commande de ces derniers s'effectue à l'ordre de la seconde ou la milli secondes. Aussi, il faudra un modèle thermique qui puisse donner une information de la température rapidement et à un pas de temps aussi faible. Dans ce modèle, nous prenons en compte les flux thermiques apportés par la source de chauffage ainsi que les apports internes (Equation 16) (figure 53) Il est à noter que ce modèle équivalent dispose de composants résistance thermique et chaleur massique, qui sont purement théoriques et n'ont pas une traduction physique immédiate. En effet, par exemple, la résistance thermique R_m de la figure 53 n'est pas une résistance thermique mesurable particulière mais est une combinaison des résistances thermiques réelles de parois, de plancher, etc...dont nous n'approfondirons pas ici.

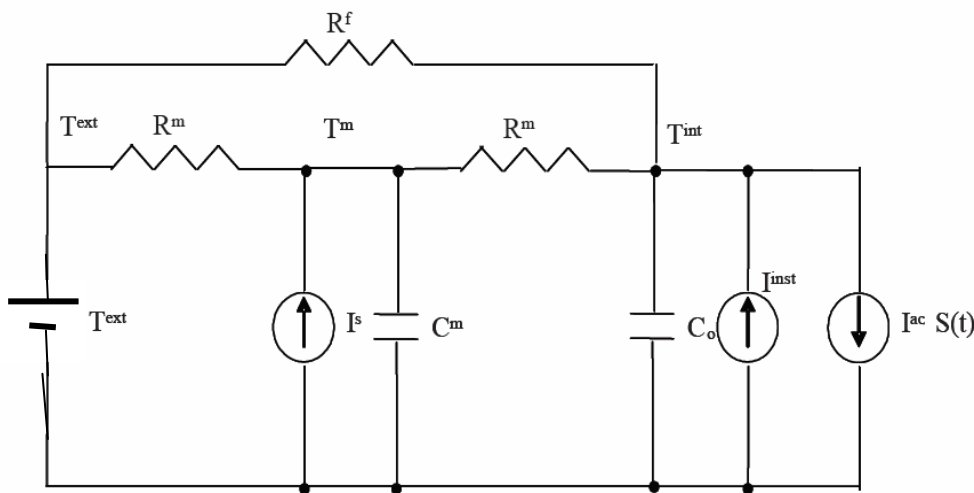


Figure 53 : Modèle équivalent électrique d'une pièce chauffée (Le, 2008)

$$\begin{cases} \frac{dT_m}{dt} = \frac{I_s}{C_m} + \frac{T_{int}}{R_m C_m} + \frac{T_{ext}}{R_m C_m} - \frac{2T_m}{R_m C_m} \\ \frac{dT_{int}}{dt} = \frac{I_{inst}}{C_o} - \frac{I_{ac} S(t)}{C_o} + \frac{T_{ext}}{R_f C_o} + \frac{T_m}{R_m C_o} - \frac{T_{int}}{C_o} \left(\frac{1}{R_m} + \frac{1}{R_f} \right) \end{cases} \quad \text{Equation 16}$$

T_{int} = Température ambiante(°K)

T_m = Température dans les murs (°K)

T_{ext} = Température extérieure (= Température du shed) (°K)

I_{inst} = Apport Internes thermiques (Usagers+appareils électriques+Chauffage) (W)

I_{ac} = Puissance de Climatisation (W)

I_s = Radiation solaire (W)

R_m = Résistance thermique des murs (°K/W)

R_f = Résistance thermique des fenêtres et infiltrations (°K/W)

C_o = Capacité thermique de l'air (J/°K)

C_m = Capacité thermique matériel (des murs , fenêtres,etc..) (J/°K)

Dans ce modèle qui traite originellement d'une pièce située en extérieure, on prend comme température extérieure vue de la pièce, la température de Shed et l'on supposera également l'apport solaire nulle car indirecte dans notre cas. Les apports internes électriques et humains sont calculés en faisant l'hypothèse d'une émission de 80W/personne et une équivalence de production entre 1 W électrique consommée et 1 W de chaleur dissipée.

Nous implémenterons dans un tel modèle le système de chauffage ne disposant pas de régulation de température (Scénario d'étude 1 table 4).

Nous obtenons dès lors l'évolution des températures suivantes où la température a été calculée avec le modèle de la figure 54 pour le premier scénario 1 (tableau 4) (courbe en bleu) et les autres ont été calculées par le logiciel COMFIE (figure 54).

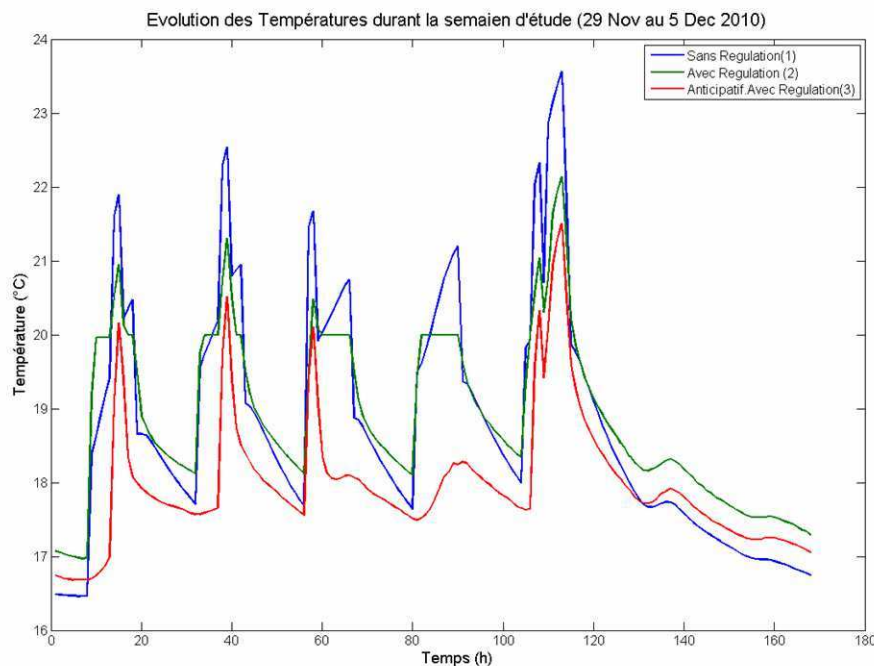


Figure 54 : Evolution des températures en fonction des systèmes de contrôles commande durant la semaine d'étude

2.3.3 Construction des fonctions de satisfaction du système de chauffage de la plateforme PREDIS MHI

Au travers de la conception des stratégies de contrôle- commande et des simulations effectuées, on dispose désormais de l'évolution des différents paramètres d'usages sensible (température) et rationnel (présence usager, ouverture bâtiment et puissance thermique) pour décrire les fonctions de satisfaction associées à chaque configuration (tableau 4). Celles-ci peuvent désormais définir la fonction de satisfaction globale sous les deux approches telles que définies par les équations 14 et 15. Pour l'approche PLN, nous choisirons d'utiliser les coefficients $a=1$ et $b=2$ pour l'équation 15 afin de privilégier la solution consommant l'énergie de manière la plus juste.

On connaît également le coût (l'autre élément de l'EUE) de chaque configuration (tableau 4) au travers de la consommation énergétique que l'on évalue sur la période de temps étudiée. On peut dès lors construire le couple quantifié de l'EUE de chaque configuration étudiée entre satisfaction (grandeur subjective par définition) et coût (grandeur objective) dans le diagramme de compromis Coût / Satisfaction.

2.4 Diagrammes de compromis et prise de décision

Comme indiqué dans la partie 1.4 chapitre 4, afin d'obtenir des couples de coordonnées (Coût/Satisfaction) (ou (X, Y)) dans le plan de compromis Coût / Satisfaction, on choisit la valeur moyenne des fonctions de satisfaction (globale, sensible et rationnelle) et des consommations énergétiques des différentes configurations sur la période de temps étudiée (une semaine).

Comme nous l'avons évoqué précédemment, nous étudierons les trois types de satisfactions (sensible, rationnelle et globale) donc nous aurons trois diagrammes de compromis Coût / Satisfaction qui auront donc en commun les mêmes valeurs d'abscisses car la même consommation énergétique.

2.4.1 Diagramme de compromis de satisfaction rationnelle

Dans un premier temps, nous n'étudierons que la satisfaction rationnelle qui permet de valoriser les stratégies de contrôle-commande économe en énergie. En appliquant celle-ci (équation 11) aux différents profils de puissance de chauffe (figure 55), nous pouvons déjà en tirer des enseignements (ici plutôt triviaux) concernant l'efficacité d'usage de chaque configuration du système de chauffage (figure 55).

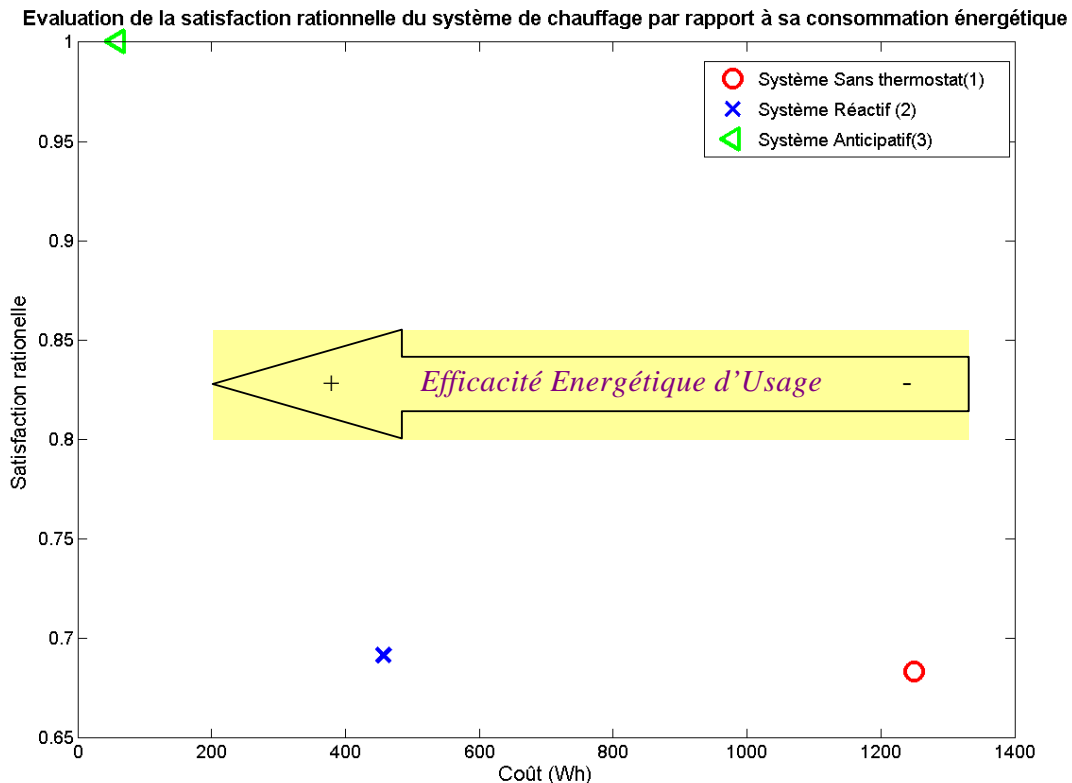


Figure 55 : Diagramme de compromis de la satisfaction rationnelle par rapport au coût énergétique

Nous pouvons ainsi se rendre compte, au travers du diagramme de compromis, que cette fonction de satisfaction discrimine de manière effective les configurations du système énergivore et non économe car la solution du système anticipative (Scénario 3) dispose d'une satisfaction rationnelle moyenne (de 1) supérieure aux deux autres solutions (égales à 0,7). En effet, par sa définition même, le fait d'avoir davantage intégré la définition de l'usage (moment et lieu de l'usage) dans la stratégie de contrôle-commande, cela permet de réduire à la fois les coûts (passant de 1200Wh à 50Wh) mais aussi d'être plus satisfaisant du point de vue rationnel: en effet, on consomme de l'énergie **juste** quand il faut, quand il y a des usagers.

En passant du scénario 3 au scénario 1, on va donc bien vers une meilleure efficacité d'usage énergétique.

A noter que nous retrouvons sur l'axe des abscisses de ce diagramme le paramètre de coût et en ordonnée la fonction de satisfaction rationnelle dont un paramètre (la puissance de chauffe) est lié au coût mais dans la définition de la satisfaction rationnelle, on prend en compte la manière dont est utilisée l'énergie (comment on consomme?) alors qu'en abscisse (le coût), seul l'aspect quantitatif financier de l'énergie consommée est retenu.

2.4.2 Diagramme de compromis de satisfaction sensible

En prenant maintenant l'évolution de température (figure 54), phénomène physique principal du confort thermique, on peut y appliquer la fonction de satisfaction sensible (figure 47) afin de quantifier la satisfaction sensible qu'offre chacune des stratégies de contrôle/commande (figure 56)

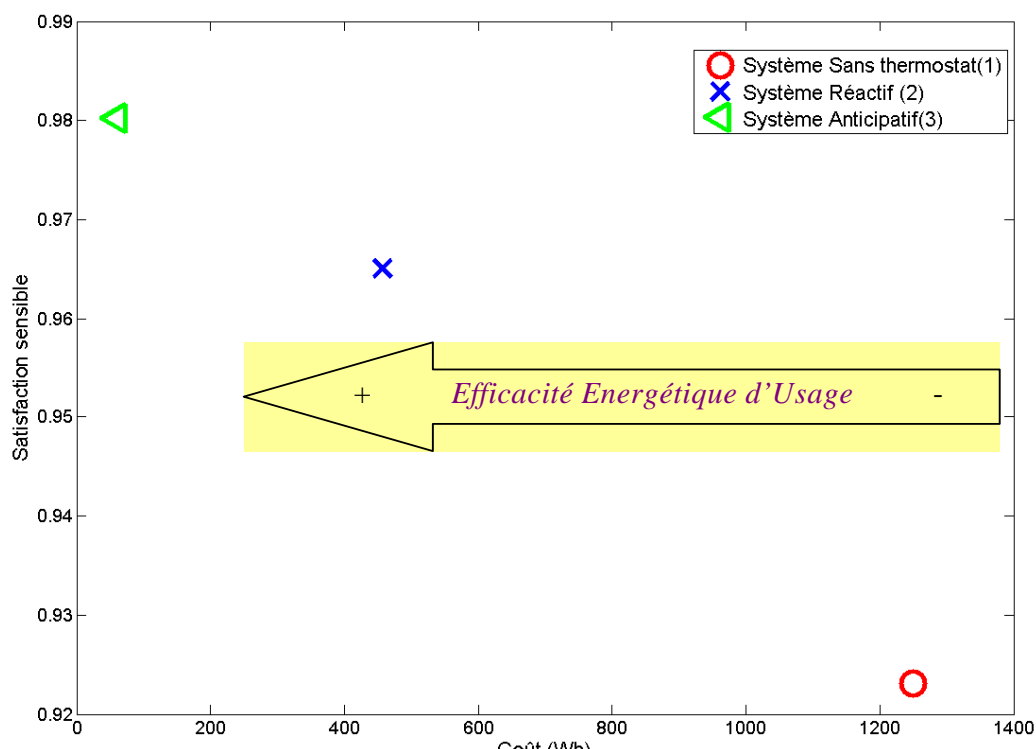


Figure 56 : Diagramme de compromis de la satisfaction sensible par rapport au coût énergétique

Nous nous rendons compte que la solution sans thermostat (Scénario 1 du tableau 4 correspondant au point marqué d'un rond sur la figure 58) est la moins bonne des solutions du point de vue de l'usage car elle est la solution consommant le plus d'énergie (plus de 1200Wh) et en plus offre le moins bon confort thermique ce qui en fait la solution ayant ainsi la moins bonne EUE. Cela s'explique en grande partie par le fait qu'un tel système ne disposant pas de régulation, ne prend pas en compte l'usage sous forme d'apport interne ce qui crée une surchauffe lors de l'arrivée des occupants et dégrade ainsi la satisfaction sensible.

Les deux autres solutions (réactive (configuration 2 du tableau 4) et anticipative (configuration 3 du tableau 4) consomment moins mais on peut s'apercevoir que, du point de vue de la satisfaction sensible, les trois solutions offrent un service quasi-identique (variation de la satisfaction sensible entre 0,92 et 0,98), ce qui, en soi, est une information effective (car ça veut dire que globalement, ils rendent le bon service). Mais, en terme de décision, ce seul

critère de satisfaction n'est pas discriminant pour le choix de technologies. C'est entre autres pour cela que l'on peut étudier la satisfaction globale combinant ces deux satisfactions.

On peut remarquer à ce propos, que l'on n'atteint pas pour la satisfaction sensible, la valeur de 1 ce qui est dû à la construction gaussienne de la fonction de satisfaction sensible (un seul point a une satisfaction de 1).

2.4.3 Diagramme Satisfaction sensible / Satisfaction rationnelle

On peut remarquer dans les deux précédents diagrammes de compromis que ceux-ci ont toujours le même axe d'abscisse (Coût) et seules les ordonnées des diagrammes changent. Aussi, il est possible de tracer le rapport entre satisfaction sensible et satisfaction rationnelle (ce qui constitue une traduction graphique du compromis entre les deux composantes de la satisfaction globale) (figure 57).

De par cette construction adaptée, on retrouvera l'essentiel des renseignements déjà découverts pour la décision sur ce graphe, sachant qu'ici le sens de l'efficacité d'usage sera différent (flèche verte de la figure 57).

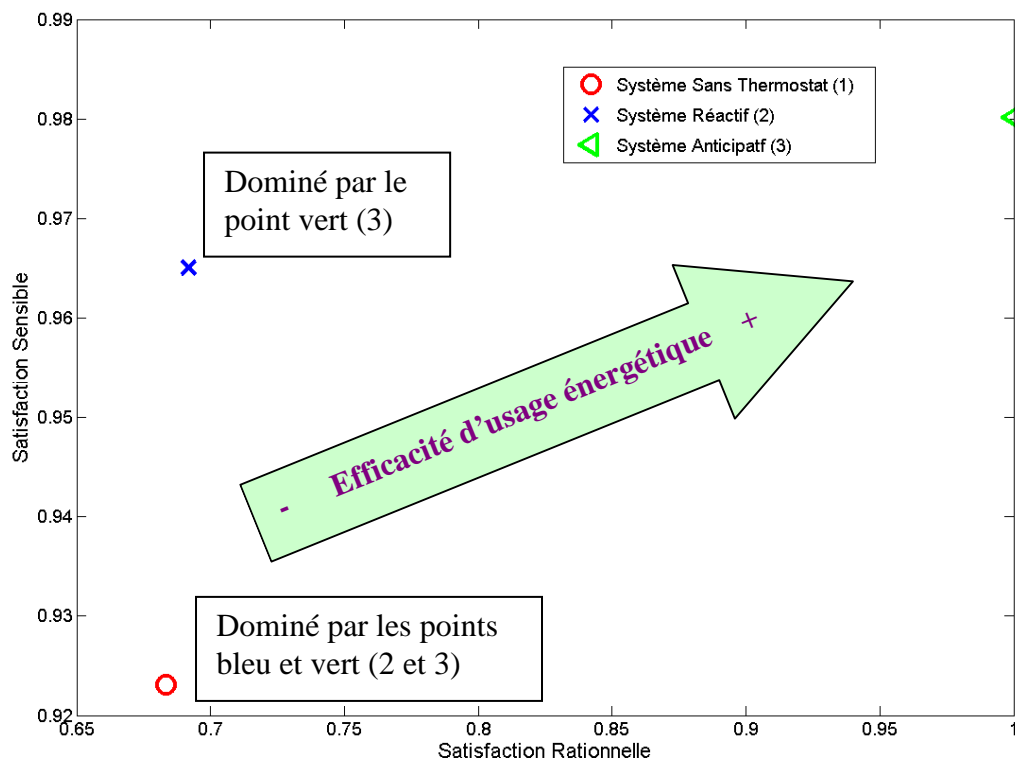


Figure 57 : Diagramme de satisfaction rationnelle/satisfaction sensible

Nous voyons se démarquer plus clairement, de manière plus intelligible, la solution anticipative (3) se positionnant comme offrant la meilleure gestion de l'énergie (le moins de gaspillage énergétique) (satisfaction rationnelle = 1) pour un confort thermique aussi bon que les autres voire meilleur. Ce dernier graphe nous montre une première effectivité de notre approche et du diagramme de compromis car il donne des informations intelligibles et pertinentes : la solution 3 offre plus de satisfaction intellectuelle et sensible car elle intègre mieux l'usage.

On remarquera sur ce dernier graphe que la satisfaction rationnelle est bien différente d'une configuration à l'autre car en effet, le système anticipatif utilise de manière plus juste l'énergie consommée. Cependant, nous pouvons remarquer également une petite différence en

terme de satisfaction sensible entre les différentes configurations ce qui est principalement lié au fait que nous ne disposons pas exactement du même modèle pour le calcul de température entre ces trois configurations expliquant la légère déviance des résultats (entre 0,92 et 0,98).

2.4.4 Diagramme de compromis de satisfaction globale

2.4.4. a Construction avec approche conjonctive

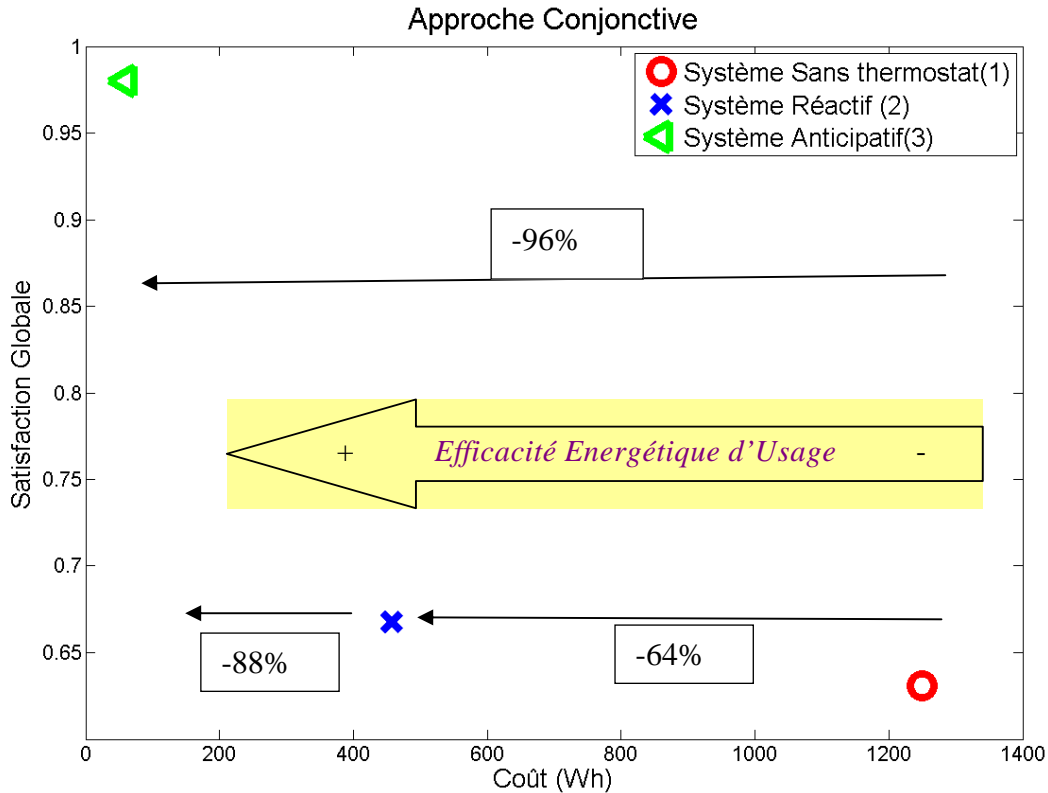


Figure 58 : Diagramme de Compromis de la consommation énergétique /satisfaction globale du système de chauffage de la plateforme PREDIS MHI

En réalisant l'association conjonctive des deux fonctions de satisfaction et en utilisant les valeurs de consommation énergétique et de satisfaction moyenne sur la semaine d'étude (Equation 17), il est possible pour chaque solution de contrôle-commande de tracer un couple (X,Y) dans le plan Coût / Satisfaction globale (figure 58) à partir des fonctions FSs et FSr déjà définies (Equation 13 et figure 47).

$$\left\{ \begin{array}{l} X_i = \frac{1}{T} \int_1^T P_{(i)}(t) dt \\ Y_i = \frac{1}{T} \int_1^T FSS_{(i,Température)}(t) dt * \frac{1}{T} \int_1^T FSr_{(i,Energie)}(t) dt \end{array} \right. \quad \text{Equation 17}$$

Cela permet de faire apparaître de façon immédiate quelles sont les solutions offrant à la fois une efficacité d'usage optimale grâce à une maximisation de la satisfaction sensible et de la satisfaction rationnelle. Comme on pouvait s'y attendre, la solution 3 (Contrôle anticipatif) offre la meilleure efficacité d'usage énergétique en permettant d'économiser plus

de 96% d'énergie par rapport au système basique sans thermostat, tout en offrant la meilleure satisfaction globale (0.96). Cela est dû au fait que cette solution intègre davantage l'usage dans sa définition : intégration de la dimension "nombre d'utilisateurs" par l'aspect système de chauffage régulé qui régule en fonction des apports internes (humains ou non humains); intégration de la dimension "lieu et période" de l'usage grâce à la programmation de la puissance de chauffe permettant de chauffer au "bon" moment.

2.4.4. b Construction avec approche pondératrice linéaire normée (PLN) (a=1, b=2)

Comme pour les constructions de diagrammes de compromis jusqu'à présent, on prend la valeur moyenne des fonctions de satisfaction appliquées au système ainsi que la consommation énergétique correspondant pour former un couple (X,Y) dans le plan Coût/ Satisfaction (Equation 18)

$$\begin{cases} X_i = \frac{1}{T} \int_1^T P_{(i)}(t) dt \\ Y_i = \frac{a \cdot \frac{1}{T} \int_1^T FSS_{(i,Température)}(t) dt + b \cdot \frac{1}{T} \int_1^T FSr_{(i,Energie)}(t) dt}{a+b} \end{cases} \quad \text{Equation 18}$$

avec

$i = 1..n$: indices des scénarios de contrôle commande de systèmes de chauffage (Table 6)

$P_{(i)}(t)$: Consommation énergétique du scénario d'étude (i) au temps t

$FSr, FSS(t)$ = Fonctions de satisfaction rationnelle et sensible du scénario d'étude (i) au temps t

T : Intervalle de temps de l'étude ($T=5 \text{ jours} \cdot 24\text{h}=120$)

a, b = coefficients de pondération

Nous nous rendons compte que nous obtenons (figure 59), tout comme dans l'approche conjonctive, une visualisation immédiate de la solution ayant une meilleure efficacité d'usage : la solution anticipative 3. L'approche PLN est donc bien effective et intelligible car, par la possibilité de pondération des fonctions de satisfaction, nous offrons au concepteur un outil supplémentaire afin de privilégier, de manière plus spécifique, une satisfaction en particulier. Ici, la solution optimale (solution 3) :

- minimise de manière conséquente la consommation d'énergie (-80%)
- et maximise la prise en compte de l'usage en consommant l'énergie de la manière la plus satisfaisante au regard de la satisfaction globale combinant des éléments de satisfaction sensible (le confort est meilleur) et de satisfaction rationnelle (les actions d'utilisation et de configuration du système sont satisfaisantes).

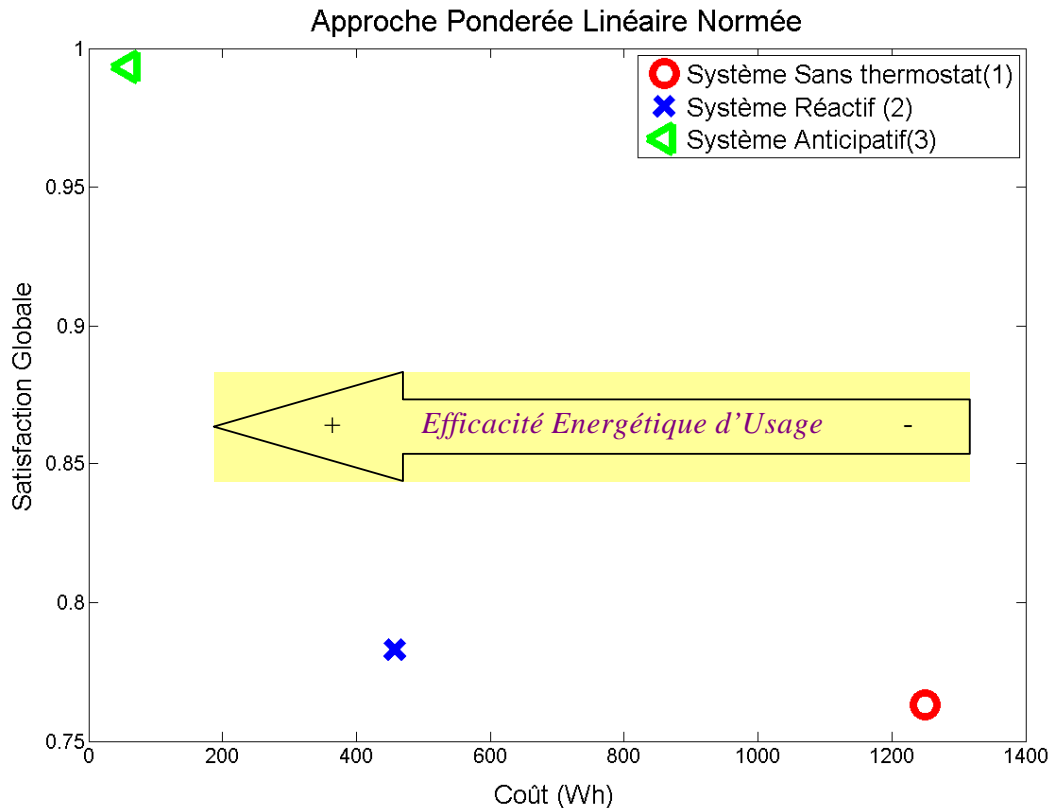


Figure 59 : Diagramme de Compromis Coût /satisfaction globale du système de chauffage de la plateforme PREDIS MHI : déterminée par l'approche PLN

2.4.5 Bilan des diagrammes de compromis et prise de décision

Dans les diagrammes de compromis précédents, nous avons toujours présenté de manière quantifiée, le rapport (ou compromis) entre Satisfaction et Consommation énergétique sous forme de couple de coordonnées dans le plan Coût / Satisfaction.

Cette présentation graphique a permis de valoriser de manière immédiate la solution 3 par rapport aux deux autres stratégies car se situant davantage vers le point d'efficacité d'usage maximal (cf figure 57) dans le sens de l'EUE croissante. Cela témoigne de l'effectivité du diagramme de compromis car il permet d'offrir une information claire et intelligible au concepteur pour prendre une décision sur la solution offrant le meilleur compromis Coût / Satisfaction. Ce concepteur peut ensuite continuer l'étude pour mettre en œuvre cette solution par :

- le choix des équipements et de la stratégie de contrôle-commande (dimensionnement, la programmation de l'algorithme de commande/d'optimisation,...)
- le choix des technologies d'instrumentation et l'élaboration du plan d'instrumentation : installation de capteurs de présence et / ou de compteurs d'occupants à l'entrée de la pièce.

Nous avons pu voir que l'élaboration de chaque diagramme de compromis était indépendamment effective en apportant chacun des renseignements complémentaires :

- Diagramme avec satisfaction rationnelle : permet de valoriser la solution la plus économe

- Diagramme avec satisfaction sensible : permet de valider si toutes les solutions offrent un service perçu comparable
- Diagramme satisfaction rationnelle / satisfaction sensible : permet de mettre en rapport deux fonctions de satisfaction afin d'étudier l'impact de chaque paramètre sur la satisfaction globale
- Diagramme avec satisfaction globale: permet de combiner les deux derniers atouts et en plus, par la pondération d'un élément, permet d'ajouter une sensibilité à la décision finale.

Le concepteur de SCB dispose ainsi au final d'un outil lui permettant de qualifier l'intégration de l'usage du système étudié et pourra intégrer cela dans ses critères de choix finaux (économiques, environnementaux, etc..) et éventuellement au travers d'une méthodologie de conception plus générale intégrant l'usage que nous allons à présent proposer.

Comparaison avec un système réel (plateforme PREDIS MHI)

Dans le retour d'expérience effectué et présenté dans le chapitre 2, nous avons pu voir que le confort thermique du point de vue du chauffage ne présentait pas de problème particulier et que la satisfaction était globalement bonne. Le système actuel de chauffage de la plateforme PREDIS MHI dispose d'un contrôle-commande semblable au scénario d'étude n°2 présenté précédemment (Système Réactif tableau 4). Or, on a pu voir par l'étude que l'on vient de mener sur l'EUE d'un tel système que l'on pouvait encore améliorer le système actuel en allant vers un système de contrôle-commande anticipatif (solution 3) qui nous permettrait à la fois d'augmenter la satisfaction globale (en particulier la satisfaction rationnelle car on utilisera mieux l'énergie) tout en diminuant la consommation énergétique globale.

Gains énergétiques obtenus grâce à l'EUE

Pour cela, il aurait fallu pouvoir avoir la possibilité, dès la conception du système de chauffage, de programmer le planning prévisionnel d'occupation. D'autre part, il aurait fallu équiper la salle informatique de capteurs de présence qui auraient été couplés à la GTC afin d'attester de la présence effective (et donc des apports internes effectifs) et de réagir sur la puissance thermique en fonction. Ainsi, par rapport à notre système actuel, on pourrait économiser jusqu'à **84%** de l'énergie consommée. Ce calcul a été effectué sur une semaine type en Novembre ? Pour des raisons essentiellement de temps de calcul mais également de manque de données réelles, cette étude n'a pas été effectuée pour l'année mais il serait possible de la calculer sur l'année si l'on dispose, en particulier, du planning annuel d'occupation. En terme de satisfaction, on pourrait également gagner en satisfaction, notamment rationnelle, car on utiliserait la puissance de chauffe au moment réel de l'occupation tout en maintenant un niveau de température (donc satisfaction sensible) équivalent. Ainsi, comme présenté précédemment, en intégrant davantage l'usage, on augmente l'EUE.

Dans les autres systèmes énergétiques (annexes 18 et 21), l'intérêt de l'intégration de l'usage dans la conception des stratégies de contrôle-commande permet d'économiser jusqu'à **76%** pour le système de ventilation et **75 %** pour l'éclairage artificiel. Cette intégration de l'usage permet également d'augmenter la satisfaction globale, notamment (encore ici) la satisfaction rationnelle (passage de 0.9 à 1 pour le système de ventilation et passage de 0.7 à 0.83 pour le système d'éclairage artificiel avec approche PLN de la satisfaction globale) car

les solutions optimales permettent de consommer de l'énergie juste au moment effectif de l'usage grâce à des systèmes de détection de l'occupation (tels que des capteurs de présence).

Gains de satisfaction obtenus grâce à l'EUE

Pour le système de ventilation, la satisfaction sensible serait également augmentée grâce à un système de régulation du taux de CO₂ de l'air (ce qui n'est pas disponible à l'heure actuelle sur la plateforme PREDIS MHI) permettant de passer d'une satisfaction sensible de 0.95 à 1 par rapport à la situation actuelle (qui est une configuration semblable au scénario 2 de l'annexe 19). En effet, une régulation de la ventilation en fonction du CO₂ permettrait de ne pas dépasser la valeur limite sanitaire (de l'ordre de 1300ppm), satisfaisant ainsi les usagers. Compte tenu de l'échelle de valeurs de 0 à 1, cette évolution de la satisfaction peut paraître assez faible mais il faut toutes raisons garder sur ce qui est étudié : ici, le taux de CO₂ est juste une donnée de type « seuil d'hygiène » à ne pas dépasser, donc l'évaluation du confort est assez relatif. Cette amélioration du système actuel pourrait s'effectuer par la mise en place d'un capteur de CO₂ couplé à la GTC commandant la VMC Double flux ainsi que l'utilisation de capteur de présence.

Pour le système d'éclairage artificiel, la satisfaction sensible ne changera pas entre la situation actuelle (solution semblable à la solution 5 annexe 23) et la solution optimale (solution 6 annexe 23) car les deux solutions disposent d'un système de dimming offrant le même niveau d'éclairage lumineux. Néanmoins, la satisfaction rationnelle changera (passant de 0.55 pour la solution 5 (solution actuelle de la plateforme PREDIS MHI) à 0.75 pour la solution 6) car cette dernière solution permet d'éclairer exactement à l'endroit précis de l'usage et ainsi, consommer indirectement de l'énergie au « bon » endroit et au « bon » moment. C'est donc bien plus une satisfaction de vertu ou d'éthique (lutte contre le gaspillage d'énergie). Une telle prouesse serait possible soit en disposant davantage de capteurs de présence afin de découper la salle selon le schéma de l'annexe 22 soit en déduisant la localisation de l'usage (par exemple par identification de la consommation électrique des ordinateurs à chaque poste de travail dans ces zones d'éclairage).

Le diagramme de compromis Coût / Satisfaction est donc bien effectif sur la plateforme PREDIS MHI car cela permet de pouvoir comparer les différentes configurations actuelles de systèmes énergétiques avec d'autres configurations hypothétiques intégrant plus ou moins l'usage. Cela permet de juger de l'EUE du SCB et de voir les points d'amélioration (si l'on avait à rénover le système) ou les configurations optimales (si l'on avait eu un tel outil en conception). Cet outil permet aussi d'évaluer la quantité d'énergie que l'on pourrait potentiellement économiser ainsi que de quantifier la satisfaction que l'on pourrait augmenter.

3 Proposition de méthodologie de mise en place du diagramme de compromis dans un processus de conception intégrant l'usage

Nous avons vu précédemment (Partie 2.4 Chapitre 4) l'intérêt du diagramme de compromis Coût / Satisfaction comme outil d'aide à la décision pour le choix de configuration de systèmes intégrant plus ou moins l'usage. Nous avons appliqué cette méthode aux systèmes de chauffage, ventilation et éclairage car ces services offrent des services de confort ambiant, seul type de confort que le concepteur de bâtiment (l'équipe de maîtrise d'œuvre la plupart du temps) puisse dimensionner. Nous allons maintenant présenter

l'utilité d'un tel outil dans une méthodologie de conception plus globale de systèmes de bâtiment performant intégrant l'usage.

3.1 L'efficacité d'usage dans le processus de choix de systèmes énergétiques

La partie que nous venons de voir constitue l'étude de l'usage en conception et permet donc de proposer un élément de décision supplémentaire lors de la conception des systèmes énergétiques du bâtiment.

Aussi, le concepteur disposera par ailleurs, pour effectuer son étude, de documents tels que les plans architecturaux qui seront un élément de dimensionnement de la solution envisagée. Le métier de construction de systèmes bâtiment est d'autre part soumis à de nombreuses normes et réglementations que ce soit du point de vue mise en œuvre ou, en ce qui nous concerne, du point de vue énergétique (RT2012, bâtiment BBC, etc...).

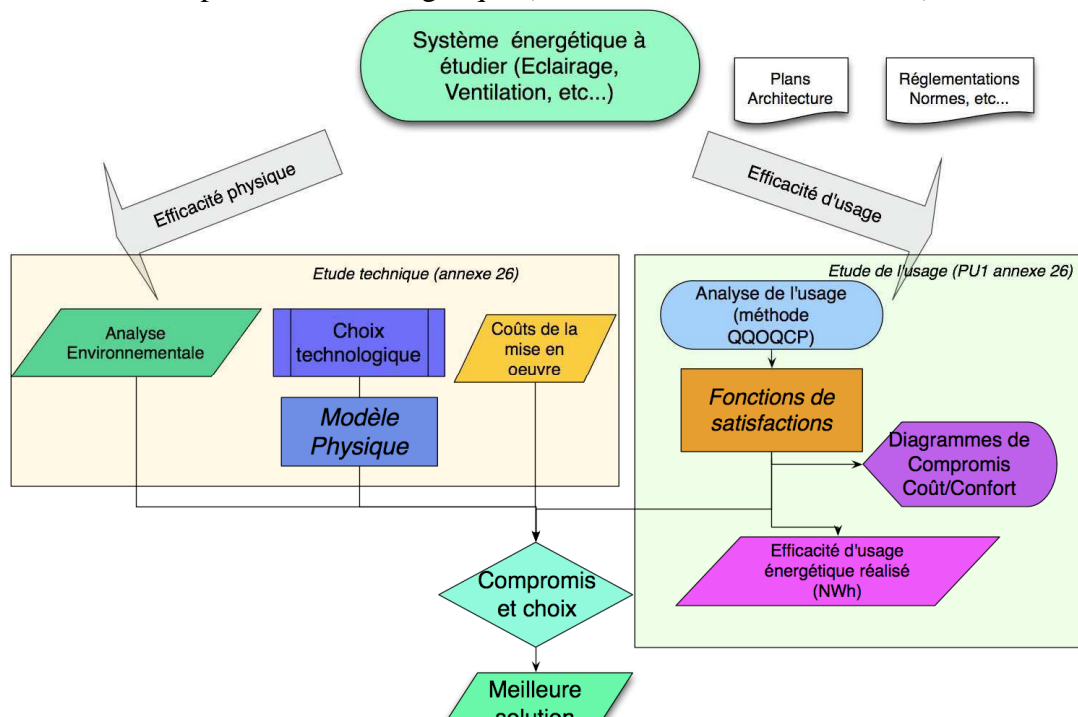


Figure 60 : Le diagramme de Compromis comme un des outils d'aide à la décision finale pour la conception de SCB

Pour atteindre les objectifs énergétiques en prenant en compte les éléments architecturaux, il y aura donc un choix de technologies correspondant à la recherche de l'efficacité énergétique classique. Comme nous l'avons souligné précédemment (partie 1 chapitre 3) cette étude d'efficacité énergétique est techno-centrée et donc ne s'intéresse qu'aux techniques, au système physique (d'où le terme d'efficacité physique (figure 60)). Avec cette approche classique de l'étude énergétique, le concepteur dispose d'un ensemble de contraintes sur les systèmes énergétiques qui influenceront le choix final : l'impact environnemental, les coûts d'installation et de maintenance des équipements,... (Figure 60) mais également une étude fonctionnelle du bâtiment lors de l'étude de l'analyse du cycle de vie.

L'étude de l'usage permet dans ce cadre où le concepteur doit réaliser des choix entre différentes configurations ou différents systèmes, d'apporter la dimension usage en plus des composantes économiques, environnementales, techniques, etc. disponibles par ailleurs avec les outils de conception classique (Equer, etc.). Pour cela, les diagrammes de compromis (avec satisfaction sensible et / ou rationnelle et / ou globale) de l'efficacité d'usage offrent au

concepteur des informations permettant de déterminer quelles solutions intègrent le mieux l'usage. Ainsi, l'efficacité d'usage apparaît comme un critère de choix au même titre que le coût ou l'analyse environnementale qui feront partie d'un compromis global. Aussi on pourrait également intégrer l'ensemble des compromis sur le diagramme de compromis finalement décrit afin de pouvoir étudier les rapports entre les différents paramètres (par exemple le coût d'une solution au regard de la satisfaction engendrée et de son impact environnemental) et de choisir la solution optimale.

Nous avons enfin pu voir que par le choix de technologie, et de stratégies de contrôle-commande intégrant mieux l'usage, nous avons une meilleure efficacité d'usage ce qui se manifeste par une économie d'énergie. Or ce gain énergétique lié à l'usage, au confort, pourrait avoir comme unité des Négawattheure (NWh) [NEGA, 2006] (pour reprendre la logique de la sobriété énergétique) et pourrait faire partie intégrante de prescriptions dans les cahiers des charges de bâtiments performants. En effet, le concept de négawatt caractérise la quantité d'énergie qui est gaspillée, dont l'utilité est nulle ce qui est notre cas, au travers de la satisfaction rationnelle énergétique.

3.2 Méthodologie de conception collaborative de SCB intégrant l'usage : application à la plateforme MHI PREDIS

Comme nous avons pu le voir jusqu'à présent, les bâtiments dits « énergétiquement performants », comme les BEPOS, ne peuvent être effectivement performants et efficaces que si l'on intègre dès leur conception, la dimension usage car elle représente un des paramètres essentiels du SCB. Aussi, la méthodologie de conception de tels bâtiments doit évoluer afin d'intégrer cette dimension.

Le processus de conception classique de bâtiment est, historiquement, davantage linéaire allant de son design à sa construction finale: en schématisant, l'architecte établit les plans, puis les communique aux ingénieurs structure, thermique, électrique qui se les approprient, changent certaines configurations pour y appliquer les équipements « sur étagère » disponibles puis donnent le projet à la réalisation. On remarque désormais, avec l'avènement de bâtiments énergétiquement efficaces et la considération du bâtiment comme un système énergétique à part entière, que la conception doit s'effectuer de façon collaborative entre les différents acteurs de la conception.

Dans ce cadre de conception collaborative, on a pu établir une méthodologie de conception par l'usage de SCB (exemple de la plateforme PREDIS) [CHEN, 2008] (annexe 26).

La première phase consiste en l'analyse taxonomique de l'usage. Nous y retrouvons la même analyse par approche *QQOQCP* telle proposée précédemment (partie 1.1 chapitre 4). Ici cette analyse pourra être effectuée de deux manières possibles en fonction du type d'usage étudié :

- soit par une approche « externe » de l'usage où l'on s'attachera à définir l'usage futur d'un bâtiment (aussi appelé usage projeté). Ceci est en particulier valable lors de la construction d'un bâtiment neuf. Dans ce cas de définition de l'usage, l'étude sera effectuée lors de séance de conception (ou créativité) collaborative rassemblant les différents acteurs du projet : les experts métiers (architecte, bureau d'études, etc.), experts scientifiques (qui ne peuvent intervenir que dans le cadre de projets expérimentaux) mais aussi des usagers. Une telle séance de créativité permettra, au travers d'un processus de génération de créativité bien défini (phase de purge, de divergence, de convergence et de tri d'idées) de faire ressortir un

ensemble d'usages possibles du bâtiment que l'on pourra définir selon les différents axes de la méthode *QOOQCP*.

- soit par une approche « interne » de l'usage où l'on connaît déjà le type d'usage. Ceci est valable en particulier lors de la rénovation d'un bâtiment. On pourra alors analyser l'usage (usage réel) par des procédés d'observations sociologiques comme des interviews in situ et une observation des usages suivie d'un débriefing avec les usagers afin de pouvoir caractériser au maximum l'usage effectué.

Ces deux approches permettent de définir les usages, ce qui permettra, d'une part d'alimenter le processus de construction de l'efficacité d'usage, et d'autre part de déterminer les fonctionnalités effectives du bâtiment afin de pouvoir définir les services appropriés aux usages.

A partir de la définition de l'ensemble des fonctionnalités, nous retrouverons la double approche du SCB que nous avons présentée précédemment (partie 2 chapitre 3): l'étude d'usage et l'étude technique (figure 64). D'une part l'étude de l'usage (correspondant à la problématique de l'usage 1 PU1 de l'annexe 26) aura pour vocation de poser les problématiques liées à l'intégration de l'usage et d'y répondre au travers du diagramme de compromis. D'autre part, l'étude technique, qui consiste au choix des technologies peu consommatrices d'énergie et la mise en œuvre de tels équipements, viendra proposer d'autres contraintes.

L'ensemble de ces deux études permet de finalement établir le cahier des charges global du SCB qui pourra alors être construit en fonction des différentes préconisations élaborées.

La validation des solutions vis-à-vis de l'usage pourra ensuite se faire en phase d'exploitation du bâtiment. Pour cela, on pourra utiliser une approche type « mixte » de l'usage où à partir de différentes traces d'usages (consommations, observations, questionnaires) réalisées dans des lieux d'expérience comme l'appartement DOMUS [DOMUS, 2011] ou la plateforme Usage PREDIS, on pourra établir des scénarios d'usage spécifique. Ces scénarios d'usage permettent de définir le cadre dans lequel on peut tester, en grandeur réelle, les stratégies de contrôle-commande et de gestion énergétique sur des sujets / usagers expérimentateurs. Ces expérimentations permettent, entre autre, de voir quels paramètres d'usage sont plus ou moins pertinents vis-à-vis des notions de satisfactions (rationnelle et sensible) élaborées donc contribuent ainsi à valider les éléments de notre approche EUE.

On peut donc finalement constater que l'efficacité énergétique d'usage peut parfaitement s'intégrer dans des processus de conception de SCB performants. En cela, l'outil d'aide à la décision lors de la phase de conception peut être facilement opérationnel et facile d'utilisation pour l'ensemble des acteurs du système bâtiment.

Conclusion

Nous avons pu, dans ce chapitre, voir comment mettre en application le concept d'efficacité d'usage énergétique sur le SCB. Pour cela, il faut pouvoir concrétiser les concepts énoncés ce que l'on a proposé par l'intermédiaire du diagramme de compromis Coût/Satisfaction qui permet de traiter la dimension multi-objectifs de l'EUE.

Pour arriver à construire un tel diagramme, nous avons introduit en particulier la notion de fonction de satisfaction qui permet de formaliser les notions de satisfactions sensibles et rationnelles préalablement présentées. Aussi, on a pu voir que celles-ci pouvaient

être construites selon l'approche épistémologique constructiviste et qu'elles donnaient alors lieu à une certaine méthodologie de construction.

Nous avons présenté pour cela l'approche QOOQCP qui permet d'identifier les paramètres d'usage qui sont les paramètres dont dépendent les fonctions de satisfaction. A partir de ces paramètres, nous avons vu que l'on pouvait construire de manière effective les fonctions de satisfaction sensible et rationnelle dans un premier temps et la fonction de satisfaction globale dans un second temps. Cette dernière étant fonction des composantes rationnelles et sensibles, sera construite de manière la plus effective possible afin d'atteindre les objectifs visés (sobriété énergétique et acceptabilité des usagers).

Ces différents éléments subjectifs permettent, avec la donnée objective de consommation énergétique d'un équipement, de construire le diagramme de compromis Coût / Satisfaction qui est un plan ayant pour abscisse l'échelle de coût (semblable à la consommation énergétique) et en ordonnée la satisfaction globale (comprise entre 0 et 1). Chaque point de ce diagramme est décrit par une coordonnée cartésienne correspondant à la moyenne de la satisfaction globale et à la consommation énergétique. Cela permet de représenter graphiquement le rapport d'EUE et, en travaillant dans ce plan, de faire apparaître des ensembles de points optimaux (fronts de Pareto).

Nous avons pu ensuite appliquer une telle méthodologie à des cas d'application de systèmes énergétiques tels que le système de chauffage, la ventilation ou l'éclairage artificiel. L'objectif était de comparer différentes solutions de contrôle-commande selon la contrainte de l'efficacité d'usage énergétique au travers de diagrammes de compromis.

Nous avons pu nous rendre compte de l'effectivité du diagramme de compromis du fait que l'on a pu faire émerger de manière évidente une configuration de contrôle-commande qui apparaît comme ayant la meilleure efficacité d'usage. On a pu ainsi montrer que ***plus on intègre l'usage dans les stratégies de contrôle-commande, moins on consommait d'énergie et meilleure était la satisfaction globale du système.*** Le diagramme de compromis s'est donc avéré un outil effectif en tant qu'outil d'aide à la décision en apportant une vision usage.

L'élaboration de ce diagramme en tant que tel permet de se questionner sur l'analyse de l'usage et la construction de fonctions de satisfaction. Une telle démarche est alors productive en termes de matériaux techniques et scientifiques pour la conception de SCB car le processus de construction est tout aussi riche d'enseignement que le résultat final.

Ainsi, la construction du diagramme de compromis permet le choix du matériel d'instrumentation et l'élaboration de plans d'instrumentation grâce à l'analyse de l'usage et l'étude de mesurabilité des paramètres d'usage permettant de faire ressortir les paramètres d'usage les plus intéressants.

Ensuite, les résultats affichés sur les diagrammes de compromis ont comme propriétés :

- d'être intelligibles : on peut lire de façon directe quelle solution est la meilleure du point de vue de l'efficacité d'usage.
- d'être pragmatiques : on arrive à quantifier aussi bien des gains énergétiques occasionnés par le choix d'une technologie que des gains de satisfaction.

Il reste à réaliser une étude économique afin d'apprécier du retour d'investissement concret que l'on obtiendrait par la mise en œuvre de technologies intégrant davantage l'usage. Cet investissement devrait être faible au regard des impacts aussi bien économiques qu'environnementaux que pourraient entraîner à long terme des solutions énergivores.

Enfin, nous avons resitué l'utilisation du diagramme de compromis comme outil d'aide à la décision dans une méthodologie plus générale de conception de SCB intégrant l'usage. Notre approche s'y intègre de manière efficace car elle reprend des données et études déjà effectuées dans ce cadre.

Application de l'efficacité d'usage énergétique au diagnostic et à la gestion d'énergie dans les bâtiments

Nous avons vu précédemment (chapitre 4) que le concept d'efficacité d'usage énergétique pouvait s'appliquer, sous forme de diagramme de compromis Coût / Satisfaction en tant qu'outil d'aide à la décision en phase de conception du système bâtiment. L'objectif était de comparer différents équipements ou différentes configurations d'un même système au regard de l'efficacité d'usage. A présent nous allons étudier l'intérêt de l'EUE en phase d'exploitation d'un bâtiment qui pourra alors être appliqué comme outil d'aide à la sobriété énergétique pour l'usager-habitant d'un logement. On utilisera pour cela le diagramme de compromis Coût / Satisfaction de manière à présenter à l'usager de meilleures actions à effectuer, plus sobres en énergie que son comportement courant, et qui amélioreraient en même temps sa satisfaction globale.

Etude comparative historique de la consommation pour l'analyse de l'usage en phase d'exploitation du bâtiment

En phase d'exploitation, sachant que le système bâtiment est déjà défini, donc les équipements installés déjà choisis, on s'attachera ici davantage à comparer le comportement énergétique pour chaque équipement au cours du temps entre différentes périodes égales d'utilisation. Comme souligné précédemment (partie 2 chapitre 4), en phase de conception, on s'intéresse davantage à des systèmes énergétiques de confort d'ambiance où l'on peut connaître le modèle physique associé aux services d'ambiance au travers des différents domaines scientifiques, alors qu'en phase d'exploitation on s'intéressera davantage aux équipements choisis et installés par les usagers (notamment dans un bâtiment résidentiel) et présentant un rapport particulier d'usage avec l'utilisateur [DESJ, 1996]. Ces équipements sont, pour la plupart, des charges électriques effectuant des services particuliers et contribuant à ce que l'on qualifiera de « *confort fonctionnel* », car ils se différencient en terme de contenu, des services d'équipements de confort d'ambiance. En effet, les services rendus par ces équipements n'agissent pas sur des paramètres physiques de l'environnement de l'usager mais soit ils agissent sur des équipements soit ils apportent des informations.

Ainsi, on pourra inclure dans les équipements de confort fonctionnel :

- ceux qui s'attachent à modifier la propriété physique d'un produit de consommation (par exemple la température des aliments pour le réfrigérateur, la composition moléculaire d'aliments pour les appareils de cuisson, l'hygiène pour le lave-vaisselle et le lave-linge). Ces équipements électrodomestiques sont également appelés *produits blancs* et ce sont des équipements considérés comme indispensables,
- ceux qui fournissent un service de type média (chaîne hifi, télévision etc....). Ces équipements sont appelés *produits bruns* et procurent des activités de loisir,
- ceux qui fournissent un service informatique appelés aussi *produits gris*.

Ces dénominations appartiennent au monde du marketing (en tant que politique du produit) et sont reliées aux notions de déchets blancs, bruns et gris qui caractérisent de manière a priori l'utilité de tels services (ou leur niveau de recyclage en tant que déchets) [UE,2002].

Le rapport à l'usage de ces équipements est également différent des équipements d'ambiance car ici, l'usager va pouvoir davantage être « au contact » avec l'équipement technique, agissant ainsi directement via l'interface « homme-machine » (utilisation de boutons de commande installés sur la machine, interaction avec des éléments de la machine (porte, etc....)).

Taxonomie des charges électriques résidentielles en Other Use Electric (OUE)

Ce rapport à l'usage est défini en particulier en fonction du type de commandabilité que ces équipements intègrent et du modèle physique de chaque appareil. Aussi, selon les fonctionnalités propres de chaque équipement on peut réaliser une certaine taxonomie de modèle physique en fonction du comportement thermique modélisé dans le modèle physique. Aussi An Pham, propose de classer ces charges électriques, également appelées OUE (Other Use Electric), en trois familles par rapport à leur comportement thermique [PHAM, 2011] :

- OUE thermorégulés : la consommation électrique dépend de l'écart de température interne / externe au système et la consigne de commande (par

exemple réfrigérateur, plaque électrique...). Ainsi, la puissance thermique (calorifique ou frigorifique selon le service effectué) sera régulé afin de maintenir à l'intérieur du système une température constante quelque soit la température externe au système.

- OUE à puissance thermique imposée : une part de la consommation électrique dépend de la température de l'élément interne au système (température d'eau par exemple) (par exemple lave-linge, lave-vaisselle). A la différence avec les OUE thermo régulés, ici, l'interface homme-machine est plus élaborée. Le service demandé par l'utilisateur consiste au choix explicite d'un certain mode de fonctionnement qui correspond à une température spécifique alors que dans les OUE thermorégulés le choix de la température est davantage implicite (un réfrigérateur est toujours plus au moins à 4°C). L'autre distinction que l'on pourra effectuer entre ces deux premières familles d'OUE sera à propos de l'élément naturel sur lequel s'effectue le service. En effet, les OUE thermorégulés, agissent directement sur la température de l'air, élément physique très difficile à l'utilisateur à pouvoir contraindre, si ce n'est à une échelle plus globale de la pièce par exemple. Alors que les OUE à puissance thermique utilisent l'élément de l'eau dont la température dépend de l'air mais il y a une certaine inertie de transfert de chaleur entre ces deux éléments. Ainsi les OUE à puissance thermique seront dépendante de manière indirecte à la température externe du système. En effet, l'eau fait partie d'un circuit global de distribution dont la température est la même pour tout un bâtiment alors que l'élément air pour les systèmes OUE thermorégulés est défini de manière locale, dans la pièce.
- OUE à moindre influence thermique : le fonctionnement de l'équipement ne dépend pas de la température interne ou externe (par exemple équipements de médias, appareillage robotiques électroménager, ...)

Comme nous l'avons vu précédemment (partie 1.2 chapitre 4), si l'on veut construire un modèle d'usage et une fonction de satisfaction, il est nécessaire de pouvoir modéliser le système étudié. Or, dans le cas des équipements de confort fonctionnel, les modèles sont difficiles à obtenir pour 3 raisons majeures :

- des informations sur les paramètres d'usage peuvent être difficilement mesurables ou lourdes à instrumenter comme par exemple la quantité d'aliments disponibles dans un réfrigérateur.

- des informations non formelles qui sont liées à l'appréciation de l'objet par l'usage (valeur affective, ...) sont difficilement modélisables car trop subjectives [DESJ, 1996].

- la confidentialité des informations à recueillir. En effet, selon le degré de finesse du modèle voulu, on entre dans la sphère privée voire intime et il n'est pas souhaitable d'entrer dans « l'espionnage » d'activités des personnes pour autant. Ainsi, les composantes relatives à l'acceptabilité et à la propriété privée sont parmi les paramètres très importants.

Compte tenu de ces éléments, il est donc difficile de pouvoir connaître parfaitement le fonctionnement des équipements liés à l'usage. Aussi, on se placera ici dans une configuration dite boîte noire : on ne connaît que les sorties et, éventuellement les entrées du système étudié sans connaître le mécanisme liant ces entrées et ces sorties.

Au final, la difficulté de la connaissance des systèmes soumis à l'exploitation va être, lors du diagnostic énergétique, de pouvoir distinguer l'efficacité physique et l'efficacité d'usage de ces équipements. Nous allons présenter de nouveau ces notions appliquées au cas des équipements en exploitation puis nous tâcherons d'effectuer une analyse d'usage sur quelques équipements électrodomestiques afin d'établir soit des diagrammes de compromis Coût / Satisfaction pour l'exploitation, soit un diagnostic de l'usage par affichage de données.

1 Enjeux et état de l'art du diagnostic d'usage dans les bâtiments

1.1 Différenciation diagnostic efficacité physique et diagnostic efficacité d'usage

Dans la phase d'exploitation des bâtiments, tous les consommateurs d'énergie, que ce soit les usagers finaux dans le cas d'habitat résidentiel ou le cas d'opérateurs du bâtiment pour les bâtiments tertiaires, souhaitent connaître leur consommation et de façon de plus en plus détaillée afin de connaître les postes principaux de consommation et ainsi localiser les postes où se situent des potentiels d'économies d'énergie. Le diagnostic énergétique est ainsi élémentaire dans la gestion d'énergie d'un bâtiment.

Cependant, au regard de l'analyse que l'on a pu faire sur le terme d'efficacité énergétique, l'efficacité énergétique est donc composée de deux composantes : l'EUE et l'efficacité énergétique physique (ce dernier correspondant à l'« use efficiency » de A. Lovins [LOVI, 2004]).

Il est crucial de distinguer ces deux notions d'efficacité physique et d'efficacité d'usage car amalgamer ces deux concepts interdit toute certification. En effet, les systèmes habitations étant occupés, une consommation excessive peut avoir pour explication :

- un défaut dans un équipement ou un vice de fabrication,
- un mauvais usage d'un équipement ou d'un composant du système habitat.

A défaut de pouvoir discriminer ces deux causes possibles, les responsabilités sont diluées : chacun peut accuser l'autre, interdisant ainsi tout recours possible et donc toute certification. Pour résoudre ce problème, il est donc crucial de mettre au point deux outils d'aide à l'analyse de performance énergétique pour chaque équipement et composant du système habitat :

- **un outil de diagnostic de l'efficacité physique** (ou de label), qui soit le plus indépendant possible de l'usage,
- **un outil de diagnostic de l'efficacité d'usage**, qui soit le plus indépendant possible des performances énergétiques des équipements et composants du système habitat.

Cette différenciation a pour objectif la compréhension de la consommation, mais cela peut également, et surtout, servir en conception dans le cadre de financement PPP (Partenariat Public – Privé [NOR003, 2008]). En effet, dans ce mode de financement de projet, notamment lié à des bâtiments énergétiquement performants, la partie privée de ce partenariat aura en charge toute la partie technique du bâtiment. Ainsi la partie privée livre un bâtiment garantissant une certaine excellence énergétique à condition que les usages soient ceux pour lesquels le bâtiment a été calibré. La différence de consommation sera à la charge de la partie publique, se dédouanant ainsi de la partie usage. Or, comme nous avons pu le voir au travers du retour d'expérience pour la plateforme PREDIS MHI (Chapitre 2) l'usage est rarement celui imaginé et il y aura toujours des divergences. Aussi, afin d'affiner les modèles de la partie usage et afin de réduire le coût des charges pris en compte par la partie publique, la

connaissance de la part « physique » et « usage » de l'efficacité énergétique au travers d'outils de diagnostic est essentielle.

1.1. 1 Exemple de cas montrant que la différenciation est nécessaire

Considérons par exemple, un réfrigérateur dont l'étiquette énergie correspond à la valeur A. L'efficacité de label, ou efficacité physique, pour cet équipement est donc excellente. Imaginons maintenant que les utilisateurs du réfrigérateur aient l'habitude d'y stocker des plats encore chauds ou encore que, parfois, ils oublient d'en fermer la porte. Malgré une excellente efficacité de label, l'efficacité d'usage pour ce cas particulier sera faible. Notons qu'il est difficile de définir des références de bon usage dans l'absolu car, par exemple, il peut être voulu par les occupants du lieu de stocker certains plats chauds dans le réfrigérateur pour faire tomber rapidement la température des plats. Dans ce cas, l'efficacité d'usage ne doit pas être pénalisée car cela est conforme aux attentes de confort des occupants.

Cela est lié au caractère relatif de l'efficacité d'usage, qui disqualifie les approches de diagnostic qui s'appuient sur une référence de comportement absolue. Malheureusement, cela recouvre la grande majorité des méthodes de diagnostic.

Considérons maintenant une zone de vie très bien isolée et dotée d'une pompe à chaleur et d'une ventilation double flux. L'efficacité de label en sera certainement très bonne en ne requérant que quelques kWh/m² par année pour maintenir un confort thermique acceptable pour des occupants, sur la base d'un scénario d'occupation défini. Néanmoins, ce composant du système bâtiment peut avoir une très faible efficacité d'usage si les occupants s'imaginent, notamment en hiver, qu'il faut ouvrir les fenêtres pour renouveler l'air intérieur au lieu de laisser la ventilation double flux réaliser sa fonction. Là encore, l'efficacité d'usage est relative aux occupants car ceux-ci peuvent considérer que l'ouverture des fenêtres fait partie de leurs attentes de confort. Le tout est d'avoir conscience des pertes énergétiques induites par de telles exigences et de les assumer.

1.2 Enjeux du diagnostic de l'efficacité d'usage énergétique en exploitation

L'enjeu de l'EUE en phase d'exploitation est de pouvoir analyser et informer l'utilisateur si les équipements sont « bien » utilisés, conformément d'une part à la configuration du système et d'autre part à leurs attentes afin de pouvoir concevoir des systèmes de gestion énergétique plus « intelligents ou intuitifs ». S'il y a une différence entre ce qui serait bien (ce qui est prévu par les modèles) et ce qui est fait réellement, la problématique est déjà d'évaluer la marge énergétique que l'usage implique. S'il y a un surcoût énergétique, est-ce que l'utilisateur accepte ce surcoût ou pas ? Ce surcoût évalué est-il lié à un mauvais usage ou alors est-il consciemment choisi car l'utilisateur aura voulu, à un instant donné, une autre satisfaction que celle proposée par la SGEB ?

Nous pourrions nous interroger par la suite sur les multiples compromis auxquels sera confronté l'utilisateur au cours de l'exploitation du système bâtiment et nous proposerons des outils qui permettront d'aider à l'expression de ces compromis.

Le diagnostic d'usage (ou le diagnostic d'efficacité d'usage) a alors pour objectif, dans un premier temps, de discerner les modes de consommation « anormaux » et d'analyser s'il s'agit effectivement d'un mauvais usage. Dans ce cas, soit l'utilisateur corrigera son usage (grâce à un affichage de l'information par exemple), soit la SGEB sera capable par reconnaissance de pattern d'usage, de déterminer s'il s'agit bien de mauvais usages. Par exemple, en analysant l'usage si l'on voit qu'un ordinateur fonctionne et qu'il n'y a aucune

activité ni présence de l'occupant, le SGEB pourra mettre en veille prolongée automatique l'ordinateur.

Cette dimension du contrôle d'un « bon » usage se rapporte à la satisfaction rationnelle que nous avons présentée auparavant. Aussi, en phase d'exploitation on s'intéressera davantage à la construction de *fonctions de satisfaction rationnelle discriminant le mauvais usage énergétique*.

1.3 Etat de l'art des outils de diagnostic

Les systèmes conçus et fabriqués par l'homme (véhicules, avions, réseaux de télécommunications, usines...) sont de plus en plus complexes. Cette complexité est due au grand nombre de composants constituant ces systèmes.

Malgré les besoins de sécurité, la réduction des coûts d'exploitation et la maîtrise de la disponibilité des équipements, ces systèmes ne sont pas à l'abri de défaillances. C'est pourquoi les activités de surveillance, de diagnostic (détection, localisation, identification de défaillances), de réparation ou de reconfiguration sont très importantes. Ces activités permettent de détecter et de localiser les défauts, de minimiser le temps de réparation, et de fournir un diagnostic fiable et facilement interprétable malgré la complexité des équipements.

Dans ce contexte, de nombreuses approches ont été développées, en vue de la détection de défauts et du diagnostic, par différentes communautés de recherche en automatique. Le projet Plumes [YASS, 2011] a permis de recenser et de classer, de manière générale, les différentes méthodes en 5 familles : méthodes à base de modèles, à base de reconnaissance de formes, à base de réseaux bayésiens, à base de cas, et des méthodes à base d'arbres de décision :

- Les méthodes à base de modèles considèrent un modèle de comportement du système basé sur des principes physiques fondamentaux. Ces modèles peuvent être de type quantitatif exprimés sous forme d'équations mathématiques (contraintes) ou bien de type qualitatifs, exprimés par exemple sous forme de relations logiques [WILL, 1975] [FRAN, 1996] [ISER, 2004]. Ces méthodes présentent l'avantage de ne nécessiter aucune connaissance préalable des défauts ou symptômes possibles. Elles s'appuient uniquement sur la vérification de la consistance entre le comportement réellement observé du système et le comportement attendu de ce système.
- Les méthodes à base de reconnaissance de formes [DUBU, 2001] visent à identifier les zones d'un espace de valeurs qui correspondent à des états défaillants. Il y a généralement de forts recouvrements entre ces zones. Cela montre bien que, dans le cas général, il existe plusieurs diagnostics possibles et qu'il est illusoire de penser obtenir directement la bonne explication d'un système de diagnostics automatiques. L'approche par reconnaissance de formes ne présente pas d'obstacle à la garantie des résultats. Si les zones sont correctement délimitées, il est possible d'établir avec certitude si l'on se trouve ou non dans un état anormal et, si des états défaillants ont été modélisés, d'obtenir la liste des états défaillants modélisés qui sont compatibles avec les observations. Cette approche présente néanmoins l'inconvénient de ne s'appliquer qu'à des systèmes statiques (sans mémoire).
- Les méthodes à base de réseaux bayésiens sont des méthodes probabilistes qui peuvent aider à faire le diagnostic [PEAR, 1988]. Elles constituent un outil important pour le diagnostic des systèmes [DELIC, 2002]). D'une part,

elles permettent de construire un modèle de bon et de mauvais fonctionnement du système, ce qui permet de chercher les diagnostics sans disposer d'un historique de pannes. D'autre part, ces réseaux bayésiens permettent de prendre en compte les probabilités de défaillance *a priori* des composants. Ils permettent aussi de calculer facilement les probabilités de défaillance *a posteriori* des composants, c'est-à-dire avec les observations.

- Les méthodes à base d'arbre de décision consistent à construire un arbre à questions successives. Selon la réponse, cet arbre peut être construit et il permet de réaliser le diagnostic.
- Les méthodes à base de cas consistent à enregistrer dans une base de connaissances les effets observés des défauts qui se sont produits dans le passé. Puis, lorsque un fait anormal se produit, on cherche des cas similaires dans la base de connaissances pour trouver les diagnostics possibles.

Nous verrons par la suite que ces méthodes, issues du génie industriel, peuvent être mises en application pour diagnostiquer les défauts résultant du mauvais fonctionnement des équipements énergétiques (diagnostic d'efficacité énergétique physique). Nous essayerons par la suite de nous attacher plus particulièrement sur la manière de diagnostiquer les défauts résultant du « mauvais » usage des équipements énergétiques.

Nous avons indiqué précédemment que les équipements électriques dont les services constituent les différents confort fonctionnels, pouvaient, au même titre que les équipements ambiants, être analysés par l'approche *QOQCP* afin de déterminer les paramètres d'usage.

- Du moment où il sera possible de mesurer tout ou partie des paramètres d'usage des équipements, on pourrait construire des fonctions de satisfaction et ainsi construire des diagrammes de compromis. Dans ce cas, ce sera l'utilisateur - concepteur qui pourra formuler et construire les fonctions de satisfaction effectives.

- Dans le cas contraire où les paramètres d'usage sont difficiles à obtenir, on propose d'utiliser la méthode de diagnostic par affichage des données. Dans ce cas, ce sera l'utilisateur - lecteur qui construira alors cognitivement ses propres fonctions de satisfaction (qui ne seront alors pas formalisées mais simplement issues d'un processus mental) afin d'évaluer sa satisfaction globale.

2 Le diagramme de compromis comme outil d'aide à la sobriété énergétique des usagers pour des systèmes facilement modélisables : application à des appareils électriques domestiques

Dans le cas où l'on dispose d'informations mesurables, ou estimables, de l'usage, on peut créer des fonctions de satisfaction (sensibles ou davantage rationnelles), qui pourront être re-adaptées et redéfinies par les usagers afin de s'adapter au mieux à la réalité, d'estimer la satisfaction globale de l'équipement. On se propose alors d'appliquer de telles fonctions de satisfaction sur une période de temps définie (une semaine) et de comparer des intervalles de temps entre eux (la journée) afin d'étudier l'évolution de l'usage et, par analyse, la sobriété de l'usage et ainsi inciter à de meilleures pratiques.

- Dans le cadre de la recherche de l'augmentation de la composante rationnelle de la satisfaction globale, on cherchera à inciter l'utilisateur à de meilleures pratiques. Pour cela, il s'agira de comparer l'usage réel d'un équipement à celui tel qu'il devrait être si l'équipement était « bien utilisé ». A condition, encore une fois, de connaître ce

qu'est « bien utilisé » mais qui peut être analysé au travers de l'analyse des paramètres d'usage. Ce modèle d'usage de la « bonne utilisation » peut dans un premier temps, correspondre au modèle d'usage élaboré à la conception de l'équipement étudié. La différence entre la consommation réelle et celle du modèle peut faire (ré)agir l'utilisateur dans le sens d'une meilleure sobriété et / ou mettre à jour le modèle d'usage.

- Dans le cadre de la recherche d'une augmentation de la composante sensible de la satisfaction globale, on pourra chercher à optimiser le service procuré par l'équipement en question. Etant donné que ce paramètre est fortement lié à l'aspect technologique du fonctionnement même de l'appareil, on ne traitera pas cela en détail ici (par exemple, augmenter le niveau d'hygiène fourni par un lave-linge peut faire intervenir des paramètres tels que la qualité de la lessive, la vitesse de rotation du tambour, la qualité de l'eau, etc...).

2.1 Mise en oeuvre de l'expérimentation dans le cadre l'étude de l'EUE lors de l'exploitation de bâtiment

Compte tenu de la spécificité des paramètres d'usage des équipements étudiés, il a été choisi de faire une étude exploratoire de l'usage sur soi-même afin d'avoir la liberté de pouvoir se contraindre à un rituel.

2.1.1 Conditions d'expérimentations exploratoires in situ

Ainsi, pour l'expérimentation du réfrigérateur et du lave-linge, ceux-ci ont eu lieu dans un appartement de type T2, avec un seul utilisateur. Ces deux appareils électriques étaient situés dans une même pièce, dont on considérera que la température de l'air ambiant était régulée jour et nuit à 19°C.

La campagne d'investigation a duré une semaine durant laquelle, pour l'opération du réfrigérateur, seule la taille et le poids des aliments ont été prélevés car ce sont les seules données prélevables avec une instrumentation basique disposée dans les foyers (une balance et un mètre). Cette immersion dans le quotidien d'une personne ainsi que la procédure expérimentale de l'étude de l'usage peut, de ce point de vue, être du registre du constructivisme car on choisit de créer un modèle dans son environnement naturel d'usage avec les moyens d'instrumentation présents dans ce lieu de vie. Ainsi, on a un modèle totalement construit sur mesure, à un niveau de granularité des données à la hauteur d'une part de la précision des moyens d'instrumentations disponibles et des informations volontairement indiquées par l'utilisateur. En effet, on supposera véridiques toutes les informations recueillies lors de l'expérimentation mais nous serons conscients du nombre de biais qui peuvent être générés par ce type d'expérimentation exploratoire. Ainsi, on retiendra en particulier l'aspect qualitatif des résultats présentés ici et l'on gardera en tête le fait que la précision des résultats est au regard de la finesse des informations disponibles par rapport à l'usage réel.

Pour l'étude de l'usage de l'ordinateur, seule la mesure électrique de l'équipement a été effectuée sur un certain nombre de postes informatiques. Cette mesure est nettement moins exigeante et intrusive pour l'utilisateur final et nous verrons que l'on peut néanmoins en tirer un certain nombre d'enseignements.

2.1.2 Modélisation constructiviste pour le diagnostic de l'usage

On peut voir, par la mise en oeuvre de l'étude de l'usage sur des appareils davantage « fonctionnels » (équipements électrodomestiques offrant un service fonctionnel et non pas une ambiance) que la nature même de l'usage est d'une complexité nécessitant une description du modèle de l'usage dans son environnement. Il est nécessaire pour cela de tenir compte et de préciser la nature des données disponibles, leurs finesses, leur mode de collecte ainsi que les marges d'erreurs possibles.

En effet, le modèle de l'usage constructiviste est un modèle ayant comme propriété de pouvoir se définir en fonction des données disponibles que ce soit en quantité qu'en qualité. L'ingénierie classique, avec des modèles ontologiques, génère des modèles qui ne seront reproductibles que sous les mêmes conditions expérimentales et avec l'ensemble des données d'entrée connues. Or avec l'acteur humain, de tels modèles sont dépassés car la complexité de lu comportement humain fait qu'il n'y aura pas deux situations identiques. Cette complexité de l'intégration de l'acteur humain est une opportunité pour pouvoir considérer selon une approche différente les systèmes énergétiques en interface directe avec les acteurs humains.

L'approche constructiviste se retrouve ainsi naturellement dans le fait que les modèles seront élaborés pour un équipement particulier, dont l'usage est défini par des paramètres aussi complexes que la localisation de l'équipement, la culture de l'utilisateur, l'interaction sociale, etc... Un tel modèle pourra être reconfigurable et adaptable selon le type et la qualité des données d'entrée du modèle. Il y aura alors des compromis à trouver entre la qualité des données exploitables d'une part et la capacité de collecte de l'information en accord avec les usagers d'autre part.

2.2 Analyse de l'usage et des paramètres d'usage avec l'approche QQQQCP: Exemple du réfrigérateur

Si l'on applique la méthode *QQQQCP* aux équipements du confort fonctionnel (annexe 17), on peut se rendre compte que les paramètres d'usage sont très fins et sont des données pas toujours physiques (données émotionnelles, cognitives...). Comme précédemment (partie 2.1 Chapitre 4), une analyse des différents paramètres de l'usage doit être effectuée et nous déclinerons une telle analyse sur trois exemples, dont chacun est représentatif d'une famille d'OUE : le réfrigérateur (pour les OUE thermorégulés), le lave-linge (pour les OUE à puissance thermique imposée) et l'ordinateur (pour les OUE à moindre influence thermique), ces deux derniers cas d'application étant traités en annexes 27 et 28.

Pour le réfrigérateur, la fonctionnalité première est de pouvoir maintenir au frais des aliments, pour des raisons d'hygiène.

Conditions d'expérimentation

L'expérimentation menée sur le réfrigérateur a consisté en l'étude de l'usage d'un réfrigérateur de 110 litres installé dans la cuisine d'un appartement privé, habité par une seule personne, durant une semaine entière de Mars. Le réfrigérateur est de classe énergétique A et dispose d'un compartiment freezer (que nous ne considérerons pas car il est resté fermé tout au long de l'expérimentation). La personne ayant une activité professionnelle en semaine, les principales horaires d'interaction avec le réfrigérateur seront le matin, avant 9h et le soir après 17h30.

Il a été demandé à l'utilisateur en question de noter les différentes actions réalisées sur ce réfrigérateur durant la période de l'expérimentation.

2.2.1 Paramètres d'usage sensibles

Ainsi l'objectif du service (réponse à la question *Quoi ?* de l'approche *QOOQCP*) qui correspond au paramètre d'usage définissant la satisfaction sensible est :

La *température des aliments présents et sortants* (donc une propriété physique d'un objet qui doit être maintenu à un certain niveau) que l'on peut connaître avec un capteur de température placé au niveau de chaque produit.

Mesurabilité : Données difficiles à obtenir pour chaque aliment (hormis par l'installation d'une caméra thermique ou autre mais dont nous ne disposons pas) mais facile à connaître pour la température de l'enceinte.

On remarquera ici, que dans l'exemple du réfrigérateur, la température des aliments et le fonctionnement même du service dépendent de manière importante de la température ambiante où se situe le réfrigérateur. Compte tenu de la durée de l'expérience présentée ici (une semaine), on considérera la température ambiante comme constante. De même, on supposera que la consigne de température (correspondant au niveau de froid souhaité par l'utilisateur) sera également constant et à son niveau par défaut afin d'établir une température interne de 4°C.

2.2.2 Paramètres d'usage rationnels

Par rapport à l'usage réalisé sur le réfrigérateur, il existe un certain nombre de paramètres d'usage rationnels définissant l'usage d'un réfrigérateur et dont peut dépendre la satisfaction rationnelle :

- La *fréquence et la durée d'ouverture de la porte* qui s'avère, pour l'utilisateur, une des seules manières d'agir avec le réfrigérateur (réponse à la question *Comment ?* de l'approche *QOOQCP*). **Mesurabilité :** Cette donnée pourrait être évaluée en plaçant un capteur de contact de porte.
- Le *nombre d'occupants* qui pourront affecter le nombre d'ouvertures de porte ainsi qu'indirectement la période de l'usage (réponse à la question *Qui ?* de l'approche *QOOQCP*). Par exemple, si dans une famille de personnes travaillent et d'autres sont au foyer, il y aura plus d'activités du réfrigérateur le soir que le midi.
- La *nature des aliments entrant en terme de capacité thermique* (réponse à la question *Quoi ?* de l'approche *QOOQCP*). Ainsi, en fonction de la température et de la masse des aliments introduits dans le réfrigérateur, celui-ci consommera davantage pour ramener l'équilibre thermique dans l'enceinte de la chambre froide d'autant plus que les aliments seront chauds (par rapport à la consigne de 4°C) ou de masse importante. **Mesurabilité :** On peut désormais s'apercevoir qu'un tel paramètre d'usage est très difficile à mesurer ou alors nécessitant une instrumentation lourde (caméra thermique par exemple) Néanmoins, la masse des aliments sera plus facilement mesurable à l'aide d'une balance par exemple.
- Le besoin d'utiliser le réfrigérateur (réponse à la question *Pourquoi ?*) peut être pour la conservation des aliments (car à 4°C, les bactéries ne se développent pas) caractérisant ainsi un besoin d'hygiène mais il peut y avoir d'autres raisons comme le rafraîchissement de denrées (notamment utilisé l'été) [ROTH, 2008]

On se rend compte ainsi, en construisant le modèle d'usage regroupant alors la définition des satisfactions que celui-ci s'avère être complexe à réaliser par la difficulté de mesure de certains éléments (mesures de la température des aliments et de la masse volumique trop compliquées).

Nous avons pu mener une expérimentation permettant de mettre en oeuvre notre approche par création de fonctions de satisfaction rationnelle en ne prenant que le *paramètre d'ouverture de porte et le paramètre du poids des denrées*, car ce sont les seuls paramètres facilement mesurables (nécessitant juste un stylo pour noter les différents mouvements de denrées entre l'intérieur et l'extérieur du réfrigérateur) et les seuls paramètres dont nous avons une information.

On pourrait prendre en compte les autres paramètres d'usage mais la difficulté de mesurer peut amener à choisir préférentiellement d'autres types d'outils pour le diagnostic comme l'affichage direct des données. Cela consiste à donner et à afficher directement les consommations énergétiques d'OUE et laisser les usagers les interpréter et créer leurs propres jugements. On peut faire une analogie avec la création de fonction de satisfaction rationnelle car dans ce cas là, la satisfaction rationnelle ne sera pas formalisée explicitement comme dans notre approche, mais sera créée mentalement par l'utilisateur.

2.3 Construction des fonctions de satisfaction et des diagrammes de compromis

Dans l'expérimentation que nous nous proposons de réaliser afin d'étudier l'intérêt de l'EUE en exploitation sur l'exemple du réfrigérateur, nous avons dû nous limiter, à cause du degré de complexité des données, à la mesure de la satisfaction rationnelle liée à *l'ouverture de la porte et à la variation de denrées alimentaires* (correspondant au poids des denrées). Nous n'avons pas défini donc de satisfaction sensible dans le cas présent donc on aura satisfaction globale égale à la satisfaction rationnelle.

La fonction de satisfaction présentée ici n'est alors qu'un des exemples de fonctions possibles, ayant été construite de manière empirique en fonction de l'expérience du concepteur et / ou de l'utilisateur. Il sera ensuite possible de complexifier de telles fonctions semblables de satisfaction en prenant en compte davantage de paramètres d'usage et en les combinant. On pourra également utiliser la logique floue pour définir une loi d'évolution de telles fonctions de satisfaction comme nous avons pu le présenter dans la partie 1.2.1 du chapitre 4 [ZADE, 1973].

2.3.1 Fonction de satisfaction rationnelle pour le réfrigérateur

La fonction de satisfaction rationnelle S_{porte} que nous avons choisie de construire en tant qu'utilisateur- concepteur concerne l'utilité de l'ouverture de la porte. Ainsi, on s'intéressera dans ce cas à savoir si lorsque l'on a ouvert la porte, on a « bien » agi avec le réfrigérateur, ce qui se traduit par une variation de quantité de denrées alimentaires (figure 61) correspondant à une variation de la masse volumique de l'intérieur du réfrigérateur (où l'on comptabilise la masse des produits solides alors que dans le fonctionnement du réfrigérateur, on aurait pu prendre la capacité thermique de l'air à l'intérieur du réfrigérateur) (Equation 19). Nous avons choisi le paramètre de masse volumique afin de pouvoir prendre en compte à la fois de la capacité thermique des aliments mais également tenir compte du volume fini disponible dans l'enceinte du réfrigérateur. La masse volumique des aliments a été évaluée en notant le poids et la taille des aliments entrants et sortants. On a alors l'utilisation des deux paramètres d'usage rationnels : l'ouverture de la porte et le poids des aliments.

Si Ouverture _ porte = 1 ET Variation _ Denrées = 1 : $S_{porte} = 1$

Si Ouverture _ porte = 1 ET Variation _ Denrées = 0 : $S_{porte} = 0$

Sinon Si Ouverture _ porte = 0 $S_{porte} = 1$

Equation 19

Bien entendu, cette expérimentation est fastidieuse à effectuer en réalité mais il serait possible, à la place, d'installer un système de balance dans ou sous le réfrigérateur afin de voir s'il y a une variation de masse ou pas et de juger ainsi de l'entrée ou sortie de denrées alimentaires ou non.

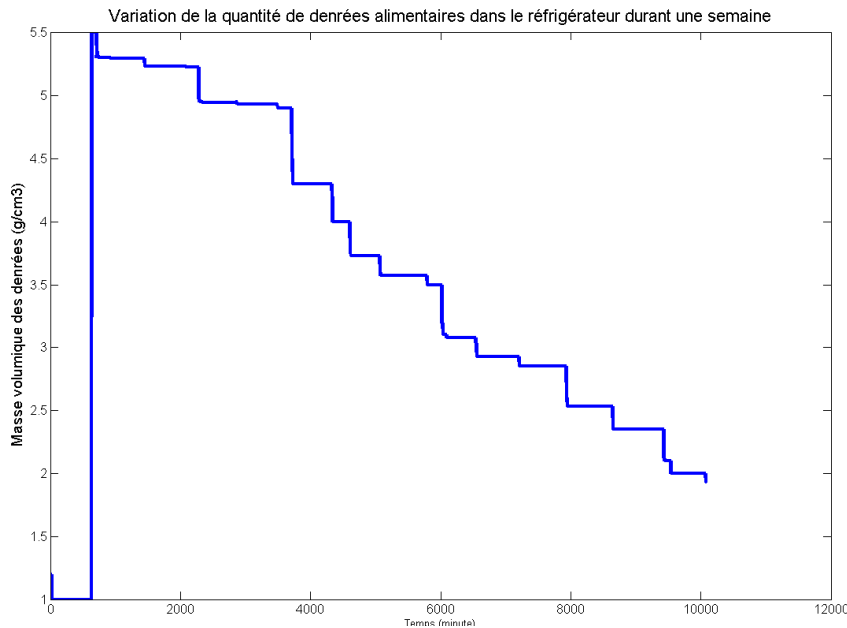


Figure 61 : Evolution des denrées alimentaires présentes dans le réfrigérateur

Une telle fonction de satisfaction permet ainsi de pouvoir diagnostiquer *a posteriori* si l'utilisateur a « bien » utilisé le réfrigérateur, c'est-à-dire s'il n'a pas laissé la porte du réfrigérateur ouverte trop longtemps par rapport à ce qui est juste nécessaire. En effet, on considère que l'utilisation de la porte du réfrigérateur est correcte si la denrée alimentaire a varié (c'est-à-dire que l'on a ajouté ou enlevé des aliments, ce qui dure quelques secondes). S'il n'y a eu aucune variation de masse (donc de denrées alimentaires), la porte du réfrigérateur reste ouverte pour rien. Nous avons donc bien ici construit une fonction de satisfaction rationnelle *effective* car elle permet de pouvoir nous informer concrètement sur la sobriété de nos gestes.

2.3.2 Diagramme de compromis de la satisfaction rationnelle.

On propose ici dans un premier temps d'aider à la sobriété énergétique l'utilisateur en lui présentant comment se situe son usage par rapport à ses propres autres usages durant la semaine ou par rapport à un usage optimal (construit à partir d'un modèle et d'un calcul d'optimisation).

On a pu réaliser l'étude sur une semaine et on peut donc tracer jour après jour la valeur moyenne de la consommation énergétique et de la fonction de satisfaction S_{porte} (figure 62). On précise que dans cette expérimentation, une journée sera définie entre 8h30 et 8h29 le lendemain car l'expérimentation a commencé à 8h30 le premier jour. On a réalisé ce graphe selon la même méthode que dans la partie 1 du chapitre 4, en définissant le couple (X, Y) du diagramme de compromis Coût / Satisfaction (Equation 19).

$$\begin{cases} X_i = \frac{1}{T} \int_1^T P_{(i)}(t) dt \\ Y_i = \frac{1}{T} \int_1^T FSR_{i,porte}(t) dt \end{cases} \quad \text{Equation 19}$$

P_i = Puissance consommée par le réfrigérateur au jour i

$FSR_{i,porte}$ = Fonction de satisfaction rationnelle de l'utilité de l'ouverture de porte au jour i

T = Période d'étude (24h)

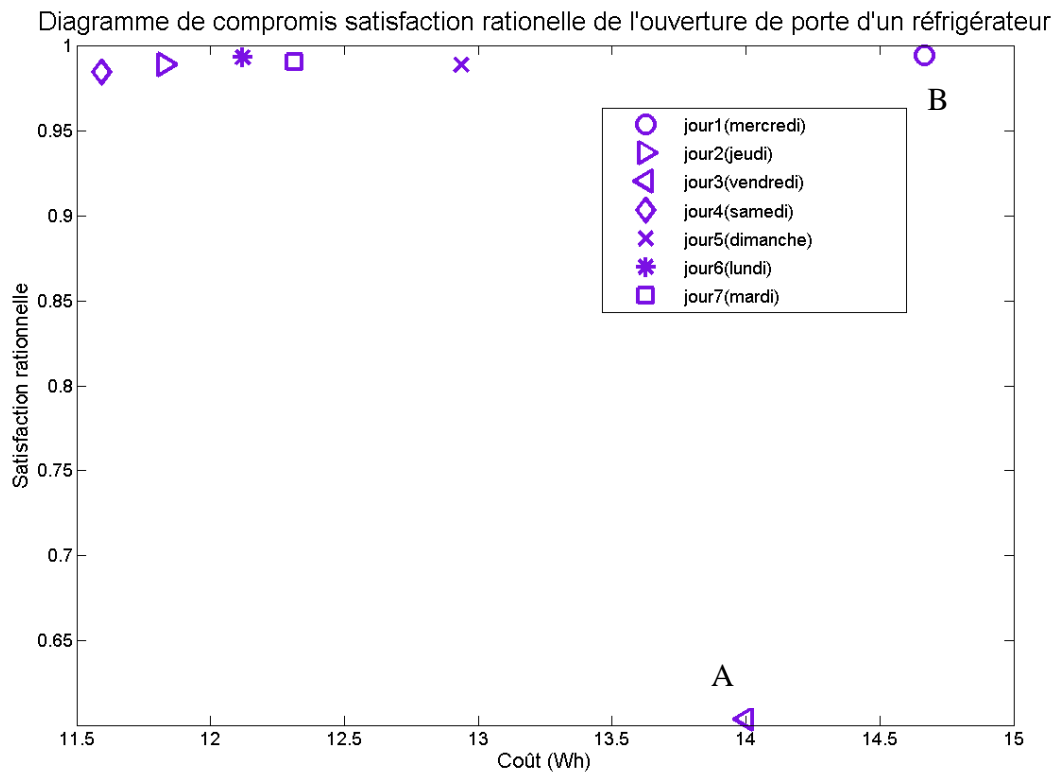


Figure 62 : Diagramme de compromis satisfaction rationnelle d'un réfrigérateur

On distingue en premier lieu des journées qui sont davantage dominées par une solution optimale (journée du samedi). On peut considérer que le point défini par cette journée qui domine les points définis par les autres journées est un scénario d'usage optimal car on utilise mieux le réfrigérateur (satisfaction de 0.98) en consommant le moins.

On peut dans un second temps analyser la cause des points dominés et en particulier les points « *sur dominés* » (points A et B figure 62).

On peut voir d'emblée qu'une journée se démarque par une satisfaction moindre et une surconsommation par rapport aux autres jours: le vendredi (point A de la figure 62). En effet si on s'intéresse maintenant à la cause de cette baisse de satisfaction, on se rend compte que le réfrigérateur durant la période du vendredi midi au samedi matin a eu la porte mal fermée ce qui a provoqué une surconsommation énergétique et ainsi une dégradation de la satisfaction.

Une telle surconsommation peut être repérable en analysant le relevé de consommation électrique (figure 63) qui représente la puissance électrique consommée pour chaque minute en fonction de l'heure de l'enregistrement dans la semaine. Sur ce graphe présentant directement les mesures électriques (et nous reviendrons par la suite sur l'intérêt

d'un tel affichage), on voit apparaître les cycles de fonctionnement du réfrigérateur (cycles de fonctionnement de 12 minutes espacés plus ou moins longtemps en fonction de l'usage du réfrigérateur. On repère ainsi deux zones (Zone 1 et Zone 2) où la consommation énergétique est supérieure. On peut voir que la zone 1 correspond à période où la porte est restée ouverte, générant effectivement une surconsommation.

Zone 1 : Ouverture prolongée de la porte

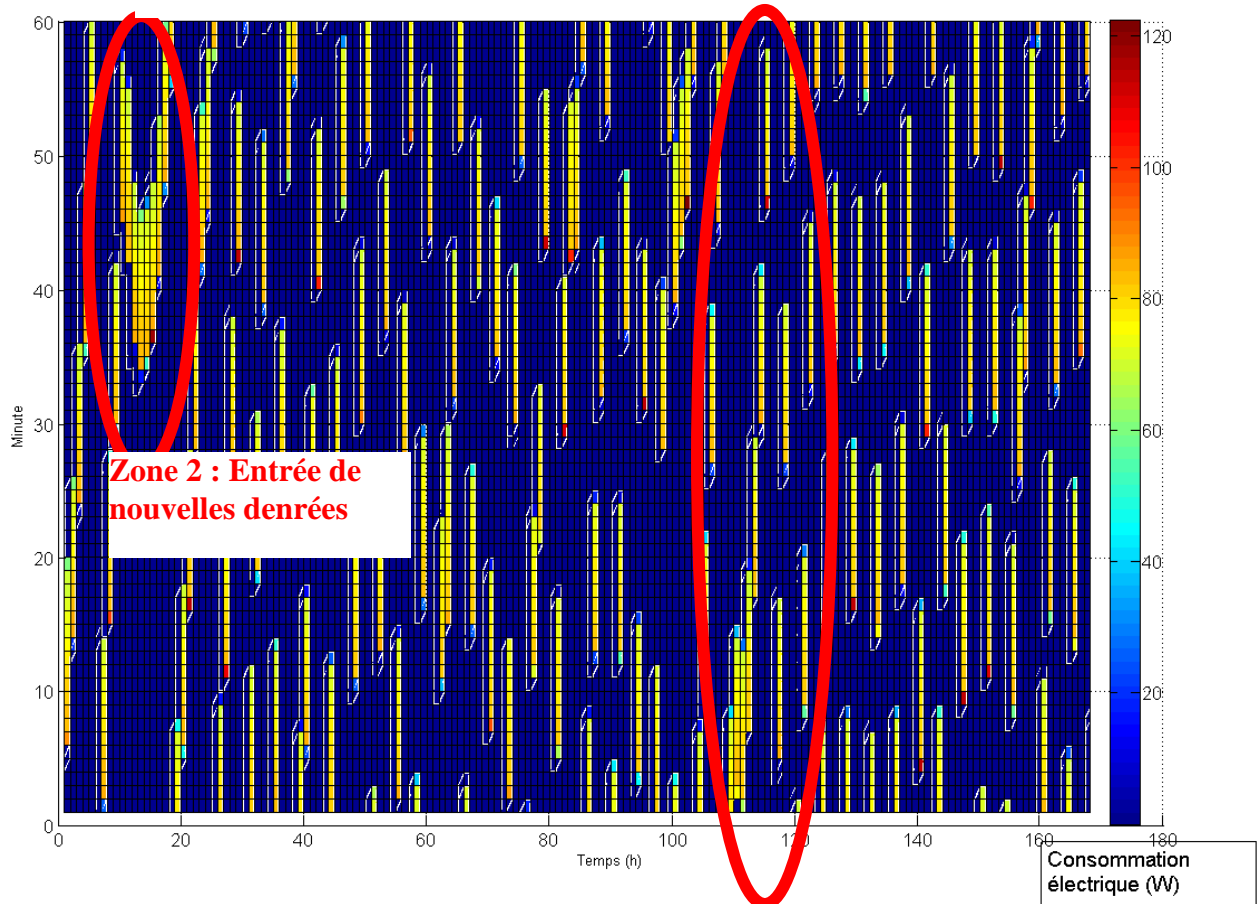


Figure 63 : Graphe des puissances maximales de la consommation électrique du réfrigérateur

On repère sur ce graphe une deuxième zone de surconsommation (zone 2) liée à l'introduction de nouvelles denrées alimentaires, perturbant ainsi l'équilibre thermique du réfrigérateur. Or cette deuxième zone de surconsommation liée à l'usage est bien repérable sur le diagramme de compromis (point B de la figure 66). On peut, en analysant l'historique de l'introduction de denrées (figure 65) se rendre compte que ce point singulier correspond au premier fait d'usage que de nouvelles denrées ont été introduites dans le réfrigérateur. Celles-ci ajoutant de la masse à une température supérieure de celle dans l'enceinte du réfrigérateur, provoquent une surconsommation énergétique le mercredi.

Cependant, on peut se rendre compte que notre fonction de satisfaction rationnelle ne pénalise pas cet usage car on a ouvert utilement la porte pour y introduire de nouvelles denrées.

Notre fonction de satisfaction et notre approche de l'EUE est donc effective car elle permet de discriminer des situations où l'usage est mauvais (point A de la figure 63) des situations où l'usage est correct (point B figure 63) :

- La situation A consomme de l'énergie et n'est pas satisfaisante du point de vue rationnel car on gaspille de l'énergie.

- La situation B consomme de l'énergie mais c'est pour la « bonne cause » (lié à une entrée de denrée qui est le service que souhaite avoir l'utilisateur »).

Les autres points semblent plus ou moins bons en EUE car consomment moins et sont aussi bons en terme de satisfaction rationnelle.

Nous avons donc pu voir qu'il est possible de construire des fonctions de satisfaction effectives qui permettent de pouvoir faire ressortir les mauvais usages (porte ouverte longtemps) ou du moins faire émerger les périodes où la consommation est supérieure à celle attendue par le modèle car due à un usage différent. Il s'agira ensuite de se demander (dans le cadre de la définition du SGEB que l'on verra par la suite) de quelle manière les algorithmes de contrôle-commande doivent prendre en compte la variation de l'usage : ces systèmes doivent-ils automatiser les équipements, quitte à fermer automatiquement le réfrigérateur dans le cas présent, ou simplement avertir du potentiel mauvais usage ?

Couplage avec Diagramme de compromis

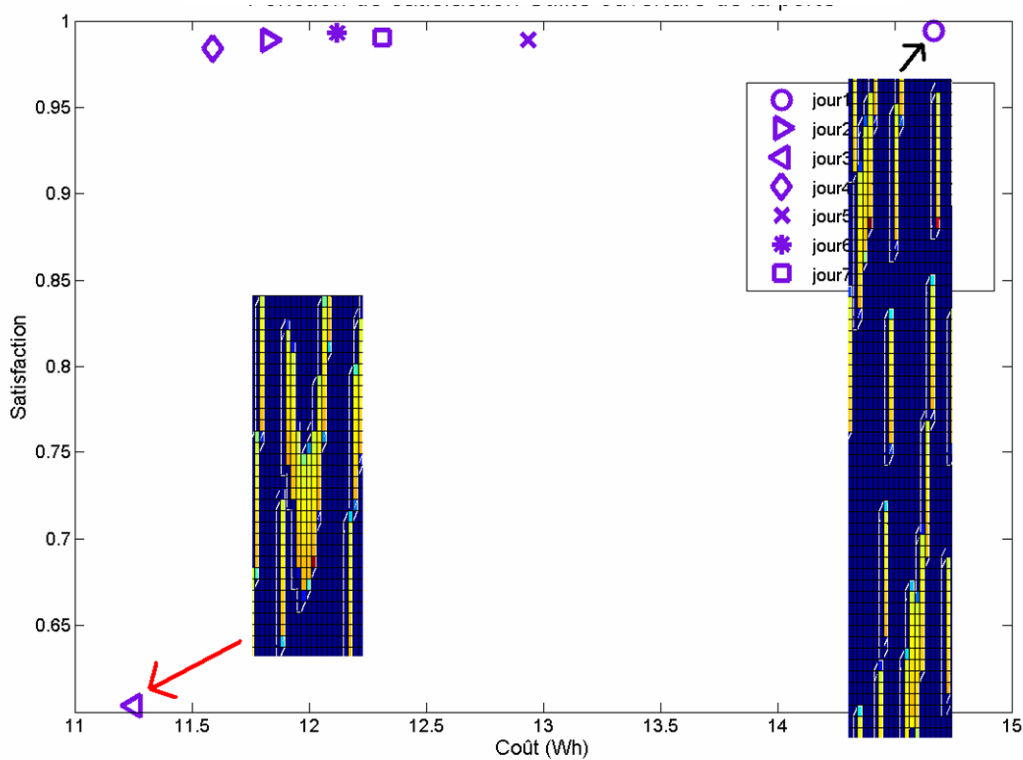


Figure 64 : Exemple d'affichage d'EUE pour un OUE tel que le réfrigérateur précisant les points singuliers de mauvais usage

Compte tenu que l'on dispose de différents graphiques pouvant exprimer de manières différentes l'EUE, on peut obtenir une plus grande intelligibilité des données sur l'usage en couplant ces différentes représentations graphiques.

Dans le cas du réfrigérateur, on a pu mettre en évidence de manière effective qu'il y avait des usages anormaux, non satisfaisants (dus à l'ouverture intempestive de la porte). L'utilisateur peut ensuite juger ces points pour voir si effectivement il y a eu satisfaction ou non et ainsi des bons usages ou non. L'interface pourra alors se présenter comme un indicateur de

couleur visant à mettre en évidence les points (supposés) de mauvais usage et ensuite, libre à l'utilisateur de « cliquer » sur les points en question pour afficher et déterminer la cause du mauvais usage (par exemple figure 64). Dans ce cas, on pourra mixer l'affichage par points dans le diagramme de compromis et l'affichage brut d'information.

Un tel diagramme couplé apporte ainsi l'ensemble des informations nécessaires à l'usager pour diagnostiquer son usage et voir s'il est prêt à faire des compromis entre le service et le gaspillage d'énergie. Il permet de situer dans le plan Coût satisfaction la semaine de consommation d'un service (celui du réfrigérateur ici) et d'apporter automatiquement aux points « détectés » comme singuliers (car une consommation ou une satisfaction se détachant de la moyenne) un affichage complémentaire : celui des données brutes, afin de s'apercevoir ce qu'il s'est passé ou contrôler que ce qui a été détecté est vraiment un point singulier ou pas. Ca sera à l'utilisateur de juger de la pertinence des informations et d'en faire bon usage.

En cela, ce dernier graphique est bien effectif car il permet d'atteindre les objectifs de l'efficacité d'usage énergétique en aidant à une meilleure sobriété énergétique.

2.3.3 Application à d'autres OUE

Dans le cas de l'ordinateur et du lave-linge, qui sont deux autres équipements électriques appartenant à d'autres types d'OUE, on propose de situer l'EUE de l'usager par rapport à des scénarios extrêmes et optimaux afin de pouvoir guider l'utilisateur vers un profil de consommation plus vertueux (voir annexes 27 et 28).

Application au lave-linge

On a ainsi proposé, par exemple pour le lave-linge, de comparer l'utilisation de cet équipement par rapport à une utilisation standard calibrée par le cahier des charges de l'équipement. Ainsi par exemple, un lave-linge peut varier, entre autres, en usage selon la quantité de linge nettoyé.

Aussi, on pourra construire une fonction de satisfaction rationnelle du lave-linge par rapport à la quantité de linge effectivement introduite dans le tambour de la machine à laver (figure 65). On supposera alors qu'à consommation égale de la machine, plus une quantité de linge sera lavée, meilleure sera la satisfaction car on aura utilisé à son maximum la machine (satisfaction maximale pour la quantité de linge prévu (P Opt)). Néanmoins si l'on surcharge la machine à laver, cela peut fatiguer à terme la machine et même casser celle-ci (au-delà d'un poids maximum P Max)

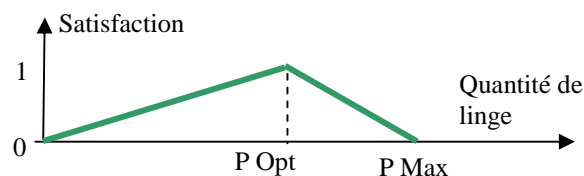


Figure 65 : Fonction de satisfaction du l'utilisation du lave-linge

On pourra retrouver en Annexe 27 le résultat de l'étude de l'EUE sur ce cas mais on pourra en retenir qu'ici on a construit une fonction de satisfaction effective car elle permet de situer le comportement réel de l'usager par rapport à un comportement supposé (standard) de la machine et *d'inciter alors l'usager à utiliser davantage le lave-linge comme il a été prévu* (pour 5kg) afin que le lave-linge consomme juste ce qu'il faut, sans surconsommation.

Application à l'ordinateur

On a proposé, dans le cas de l'ordinateur de *comparer le profil de consommation réelle de l'utilisateur (sur une semaine) par rapport à d'autres profils de consommateurs fictifs: un consommateur énergivore (n'utilisant jamais le mode de veille de l'ordinateur) et un consommateur sobre (utilisant tout le temps le mode de veille de l'ordinateur).*

On avait en effet pu déterminer que l'utilisation de la veille était un paramètre d'usage rationnel permettant de créer une fonction de satisfaction rationnelle valorisant l'usage de ces veilles.

Dans ce cas, le diagramme de Compromis Coût / Satisfaction permet à l'utilisateur, par une visualisation assez simple, de se situer par rapport à ces deux profils de consommateurs extrêmes. On l'incite alors implicitement à aller vers le profil de consommateur le plus sobre car ainsi :

- il pourra économiser de l'énergie,
- il aura une meilleure satisfaction globale (en particulier rationnelle car il pourra se satisfaire de ne pas avoir gaspillé de l'énergie et de contribuer ainsi à la "chasse aux gaspillages": éteindre les ordinateurs durant la non utilisation de ceux-ci est bien un geste éco citoyen.

Cette démarche de l'EUE est encore une fois effective car elle offre l'opportunité à l'utilisateur d'agir de manière plus sobre en lui proposant des alternatives à son comportement actuel. (plus de précision en annexe 28 sur cette étude).

2.4 Bilan du diagramme de compromis d'un équipement en exploitation

Nous avons pu voir dans les quelques exemples précédents que l'on pouvait construire des fonctions de satisfaction (davantage de l'ordre du rationnel que du sensible lié principalement au degré de complexité de la mesure) effectives dans le sens où elles offriraient à l'utilisateur / concepteur des outils intéressants pour réaliser un diagnostic de l'usage de son produit. En effet, on a pu identifier les paramètres d'usage à mesurer (par exemple pour le réfrigérateur, les paramètres d'énergie, d'ouverture de la porte, le poids du frigo,..) pour définir les fonctions de satisfaction ce qui amène à concevoir un ***système d'instrumentation particulier*** (utilisation d'un capteur de porte, utilisation d'une balance pour les aliments, etc..).

D'autre part, on peut imaginer que le diagramme de Compromis Coût / Satisfaction pourrait être une IHM en lien direct avec l'utilisateur - lecteur permettant de monitorer, comprendre et corriger son usage et son coût de l'énergie. En effet, les diagrammes de compromis Coût/Satisfaction offrent la possibilité ***d'évaluer l'EUE du comportement actuel*** de l'utilisateur et ***également de l'améliorer vers de meilleures pratiques***. Par la présentation de profil standard ou de profil économe, on lui offre ainsi des alternatives de comportement vers une sobriété de comportement (et une amélioration de l'EUE) lui permettant de ***satisfaire son souhait d'être davantage un écocitoyen en terme de consommation énergétique***.

Ainsi, on pourrait proposer un système d'affichage qui propose, à partir des paramètres d'usage identifiés et mesurés (ou estimés), de construire et d'afficher directement sur l'équipement en question (réfrigérateur, lave-linge, ordinateur, etc..) le diagramme de compromis Coût / Satisfaction où l'utilisateur pourrait :

- Choisir les paramètres de la fonction de satisfaction rationnelle,
- Visualiser la valeur de son EUE en temps réel dans le diagramme de compromis
- Faire ressortir en clair les usages singuliers,

- Comparer à d'autres alternatives proposées par le SGEB (tel G-HomeTech présenté dans la partie 3).

Il est donc important d'arriver à faire passer le « message » de sobriété énergétique et pour cela, on pourra se baser sur les travaux effectués dans le domaine de l'informatique et de l'apprentissage au travers des TIC (Technologie de l'Information et de la Communication). Il existe entre autres des modèles permettant de faciliter l'apprentissage (modèle de Rasmussen [RASM, 1986]) ainsi que des procédures permettant d'évaluer l'utilisabilité d'une Interface Homme-Machine (IHM) [BRANG, 2003]. L'utilisation d'interfaces persuasives [FOGG, 2002] pourrait aider, dans ce sens, les occupants à prendre conscience des phénomènes environnants et à formuler leurs satisfactions sensibles et rationnelles.

3 Système G-HomeTech : un système de gestion énergétique intégrant l'utilisateur pour les energy smart homes

Nous avons pu voir dans ce chapitre, au travers de quelques exemples d'équipements électriques, que la démarche d'efficacité d'usage énergétique pouvait être intéressante également en phase d'exploitation du bâtiment. En effet, on peut employer le diagramme de compromis Coût/Satisfaction comme outil d'aide à la sobriété énergétique dans le sens où l'on offre la possibilité à l'utilisateur à changer son comportement en allant vers un comportement plus vertueux et l'on propose des stratégies de gestion énergétique optimisée en terme de satisfaction et d'économies d'énergie. Mais en raisonnant au niveau du système bâtiment, l'intérêt de tels outils est de pouvoir être intégrés à un système de gestion énergétique du bâtiment (SGEB) afin que ce soit ce système qui gère l'ensemble des charges du bâtiment et qui puisse offrir ces possibilités à l'utilisateur.

Aussi, dans cette dernière partie, nous présenterons comment l'approche d'efficacité d'usage énergétique peut être intégrée et impacter des systèmes de gestion énergétique du bâtiment qui pilotent le bâtiment. Nous prendrons pour cela l'exemple d'un des logiciels de supervision d'energy smart homes qui est G-HomeTech. Ce rapprochement entre SGEB et EUE est naturel car les objectifs sont communs : rendre agréable la vie de l'habitant en utilisant le moins d'énergie possible. Nous verrons que l'approche de l'EUE permet d'apporter, en particulier, la dimension de la satisfaction rationnelle au système de gestion.

Dans un premier temps, nous allons présenter le concept des « energy smart homes » qui, par leur vocation d'être des bâtiments maximisant le confort en réduisant la consommation énergétique par un pilotage intelligent des charges énergétiques, sont une illustration concrète (mais à l'étape encore de projet) du concept d'efficacité d'usage énergétique.

3.1 Présentation des « energy smart homes »

Dans le contexte énergétique que l'on a pu définir dans le chapitre 1, les bâtiments à Energie positive (BEPOS) font partie du futur paysage énergétique français et mondial. Mais pour atteindre un bilan énergétique positif d'un bâtiment, il ne suffit pas de produire plus d'énergie qu'il n'en consomme mais cela doit passer par une gestion « intelligente » de l'énergie. Intelligente dans le sens de distribuer l'énergie afin d'assurer les fonctions de confort et de services au moment où les usagers le souhaitent. L'objectif de tels bâtiments est ainsi de **maximiser les services rendus tout en minimisant leur consommation énergétique**. C'est ainsi également une gestion globale entre production et consommation qui intègre la gestion optimale des flux énergétiques du bâtiment (voir figure 68).

3.1.1 La place de l'idéalisation du concept de BEPOS

Néanmoins, on peut s'interroger sur la pertinence et la légitimité du concept de bâtiment à énergie positive dont la terminologie même fait débat car dans quel sens doit-on comprendre « énergie positive »? En prenant quoi en compte ? [LEYS, 2010] En effet, au regard des expériences telles que la tour Elithis, où les maîtres d'œuvre estampillent leurs projets du tampon "énergie positive" en se basant sur des simulations et non sur des mesures de consommation réelles, la valeur de cette terminologie est ébranlée avec la considération des usages (voir partie 4.1 du chapitre 1).

Finalement, le concept BEPOS n'est peut-être pas complètement réalisable mais aura au moins été ce que A. Hatchuel appelle un mythe rationnel [HATC, 1992]: un objectif, dont on ne peut pas affirmer à l'instant t qu'il est complètement atteignable, mais dont on peut argumenter qu'il est possible qu'il le soit. Une telle perception en tant que mythe rationnel permet surtout de mobiliser des forces (d'ingénierie, de conception, de normalisation, des organisations, des usagers, ...) dans un sens effectif (aller dans la bonne direction).

Ainsi, on peut en effet argumenter qu'au jour d'aujourd'hui il n'est pas certain que le BEPOS soit complètement atteignable dû à des aléas technologiques (incertitude sur les technologies de stockage,...) ou des aléas de fonctionnement (usages,...). Mais il est rationnel de penser aux concepts que soulève la définition d'un BEPOS car il est avéré qu'un bâtiment voit passer sur l'année un flux d'énergie naturelle supérieur à ses besoins [PVGIS, 2010]. En tout cas la perspective de BEPOS mobilise la communauté scientifique, industrielle et même gouvernementale au regard du nombre de projets prototypes de bâtiments à Energie positive [LENO, 2010] ainsi que l'évolution de la réglementation thermique (RT) qui prévoit qu'à partir de 2020 les nouvelles constructions soient globalement à énergie positive sur l'année.

Enfin, en terme de vulgarisation scientifique, le concept est parlant pour les usagers qui pourront alors identifier la performance énergétique de tels bâtiments et les inciter inconsciemment à une sobriété énergétique accrue.

En visant le BEPOS, on mobilisera au moins toutes ces entités pour notamment imposer le concept d'efficacité d'usage énergétique et faire développer des solutions qui pourraient l'exploiter comme des systèmes de gestion d'énergie « intelligente » qui équiperont alors ce que nous appellerons les « energy smart homes ».

3.1.2 Positionnement des « energy smart homes »

A l'heure actuelle, comme nous avons pu le voir succinctement auparavant (partie 2 chapitre 1), des concepts de bâtiments aux terminologies et consonances semblables émergentes dont les objectifs sont cependant différents selon les points de vues abordés : médical dans le cas d'aide à la personne pour personnes âgées [CHAN, 2009] ou sous forme de bâtiment intelligent (« *intelligent building* ») dont l'objectif est de maximiser le confort des occupants en offrant un maximum de services, distribués la plupart du temps, au travers de la zone de vie [CLEM,1997] [WIGG, 2002]. L'objectif de ces bâtiments intelligents est donc bien de rendre la vie plus facile, les gestes plus efficaces en anticipant les attentes des occupants [WONG, 2005] mais ne fait généralement pas référence à une préoccupation énergétique.

Les bâtiments intelligents reprennent alors dans une vision plus globale l'ambition des solutions domotiques en y introduisant une intelligence ambiante, où par *intelligence ambiante* il s'agit de créer des services et des dispositifs capables de répondre à des besoins individuels, collectifs et sociétaux [ISTAG, 2003]. La vision d'ubiquité des activités et de l'usage que les systèmes d'intelligence ambiante intègrent, apporte une analyse de l'usage nécessitant une anticipation et prédiction des tâches effectuées [INTI, 2006].

Les *energy smart homes* se positionnent dans un niveau de complexité supérieur par rapport aux bâtiments intelligents, car non seulement on implémente la volonté d'intégrer les désirs et besoins des occupants au travers de dispositifs d'intelligence ambiante, mais on cherchera à optimiser la consommation énergétique par rapport à ces mêmes services intelligents. On est alors bien dans la concrétisation du concept de l'efficacité d'usage.

Ainsi, le projet Mavhome, par exemple, s'inscrit dans cette logique où l'on cherche à maximiser le confort des habitants en minimisant le coût d'exploitation [DAS, 2002]. Le type de bâtiment visé est équipé d'un ensemble de capteurs permettant de connaître les différents états et valeurs des paramètres physiques du SCB et d'un ensemble d'actionneurs / contrôleurs permettant d'agir sur les composants de ce système. Pour arriver à un système efficace du point de vue usage, un SGEB doit piloter les différentes charges et sources relatives au SCB, en fonction des données recueillies par ailleurs afin d'optimiser les flux énergétiques [HA, 2007] (Figure 66). Nous verrons par la suite, au travers de l'exemple d'un gestionnaire d'énergie intelligent (projet G-HomeTech) comment se structure le pilotage énergétique du SCB afin d'intégrer l'usage.

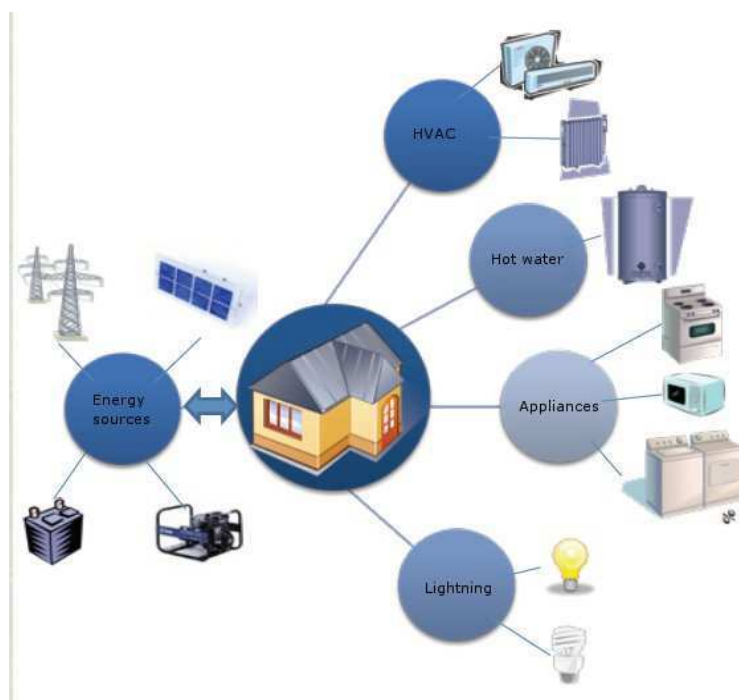


Figure 66: Structure globale d'une *energy smart homes*

Nous pouvons donc retenir que les *energy smart homes* sont un *moyen technologique de mettre en œuvre le concept d'efficacité énergétique*.

3.2 Présentation d'un exemple de logiciel de gestion énergétique dans les energy smart homes : G-HomeTech

Le projet G-HomeTech a pour vocation de proposer un gestionnaire d'énergie dans l'habitat de type *energy smart homes* présenté précédemment qui prenne en compte les attentes et spécificités des usagers. On pourra trouver un descriptif plus complet de ce logiciel en annexe 30 et nous nous intéresserons davantage à son fonctionnement afin de voir comment y implanter des outils et méthodologies élaborés au travers de l'approche efficacité d'usage énergétique.

Principe de fonctionnement de G-HomeTech

Dans les SGEB de style G-HomeTech, la gestion d'énergie peut se résumer en un problème d'optimisation entre les flux de consommation et de production d'énergie en prenant en contrainte des critères de coût (CO2, prix, Kwh,..) et de confort des occupants. Le problème d'optimisation (présenté dans la figure 68) voit donc en entrée :

- les flux énergétiques gratuits, issus des données météorologiques,
- l'énergie disponible en fonction du contrat énergétique établi avec le fournisseur d'énergie mais également à partir de l'énergie stockée,
- les flux financiers tels le prix de l'électricité du réseau ou le crédit CO2 sur le marché du carbone,
- les flux de consommation qui correspondent aux services que doivent effectuer les équipements. Dans ce cadre, le système de gestion dispose de modèles de la demande qui sont définis par une caractéristique temporelle (la durée et la date d'exécution souhaitée) et une caractéristique de quantité énergétique (puissance consommée maximale, énergie consommée) [HA, 2007] ; de modèles de satisfactions définis par une fonction de satisfaction qui est exprimée entre 0 et 1 (figure 67) et des modèles de consommation des appareils.

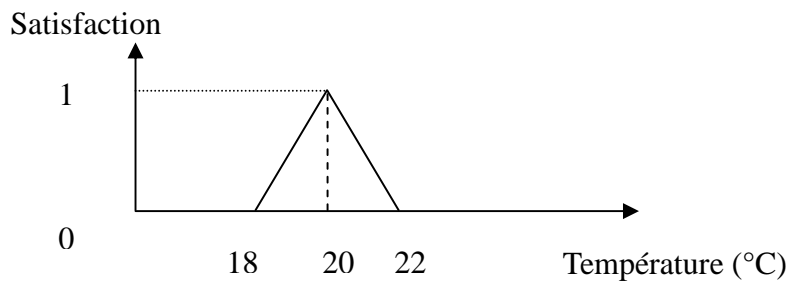


Figure 67 : Exemple de fonction de satisfaction pour le confort thermique

A partir de ces données, le SGEB va chercher des stratégies de gestion des différents équipements pilotables connectés à ce système afin de respecter les critères de coût et de confort. Un planning prévisionnel de consommation d'énergie va d'abord être construit afin d'anticiper (avec une anticipation de 24h) l'usage des différents équipements. Ensuite, dans une période en temps réel, le SGEB pourra réadapter ses stratégies de gestion (aspect réactif) en fonction des données d'usage réel mais également en fonction de la configuration du SCB réel à l'instant donné (météo, puissance disponible, variation de la demande,..).

Problème d'optimisation

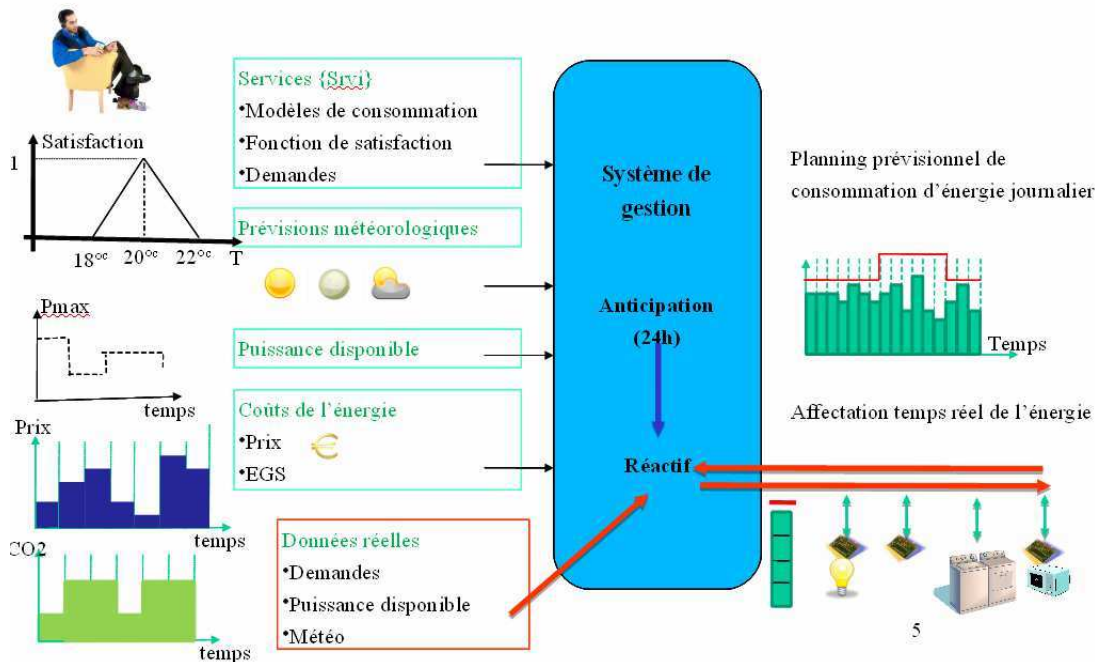


Figure 68 : Problème d'optimisation d'un système de gestion d'énergie

3.3 L'efficacité d'usage appliquée au système de gestion d'énergie G-HomeTech

La vocation première de l'efficacité d'usage énergétique était de concevoir mais aussi de gérer de façon plus vertueuse les SCB en vue d'économiser de l'énergie. En cela, on se place dans le cadre d'étude du logiciel G-HomeTech qui se positionne comme un logiciel mettant en œuvre de façon technologique certaines approches présentées ici, en particulier la fonction de satisfaction qui provient initialement de travaux ayant initiés G-HomeTech (Projet Multisol). Néanmoins, nos travaux ont permis de s'intéresser plus particulièrement à la fonction de satisfaction et nous avons élaboré une approche complémentaire qui pourrait dès lors être intégrée dans G-HomeTech en étendant le champ de définition de la fonction de satisfaction actuelle (relative au confort thermique). L'approche de l'EUE en exploitation, comme présentée dans ce chapitre 5, permettrait également d'intégrer de nouvelles charges électriques (les OUE) et de diagnostiquer leurs usages.

3.3.1 Amélioration des fonction de satisfaction dans les algorithmes de calcul

Par rapport aux différents algorithmes d'optimisation et de pilotage qu'intègre G-HomeTech, on retrouve une approche de la définition des fonctions de satisfaction qui est similaire à celle présentée par nos travaux de par le fait que l'on s'est basé en partie sur les travaux de Long Ha, qui se retrouvent dans G-HomeTech [HA, 2007].

On retrouve ainsi une même volonté d'optimiser le rapport d'efficacité d'usage (Equation 20).

$$\lambda_{\text{EfficacitéUsage}} = \frac{\text{Satisfaction}(\text{Satisfaction}_{\text{rationnelle}}, \text{Satisfaction}_{\text{sensible}})}{\text{Coût}}$$

$$\lambda_{\text{GHomeTech}} = \frac{\text{Satisfaction}(\text{Satisfaction}_{\text{sensible}})}{\text{Coût}} \quad \text{Equations 20}$$

Implémentation de la fonction de satisfaction rationnelle

Néanmoins, dans l'algorithme actuel de ce logiciel de gestion énergétique, lorsque l'on analyse ce qui est entendu par satisfaction (Equation 20), celle-ci n'intègre que ce que l'on a appelé satisfaction sensible. Ainsi, un premier apport de nos travaux serait **d'implémenter dans les algorithmes d'optimisation la logique de satisfaction rationnelle** afin de pouvoir trouver des solutions de pilotage de charges qui à la fois fournissent le confort physique des usagers (satisfaction sensible) et le confort mental /vertueux (satisfaction rationnelle).

Nous avons pour cela proposé des méthodologies de conception de fonctions de satisfaction rationnelle ainsi que des exemples (partie 1.2 chapitre 4) qui permettraient de réaliser cela. Cela amènera alors à construire la satisfaction globale (telle que nous avons pu également le proposer dans la partie 1.2. du chapitre 4) afin de considérer désormais dans G-HomeTech la satisfaction comme globale et non juste la satisfaction sensible.

Complexification des modèles de fonctions de satisfaction

Quand on en vient à étudier les fonctions de satisfaction intégrées dans G-HomeTech, on se rend compte que seuls quelques paramètres d'usage ont été retenus rendant simplistes ces fonctions de satisfaction.

Pour la satisfaction sensible, par exemple pour le confort thermique, seul le paramètre d'usage sensible de température a été pris en compte dans G-HomeTech. Or nous avons montré que la satisfaction sensible est multidimensionnelle (par exemple pour le confort d'ambiance thermique, on peut prendre en compte l'humidité, la qualité, d'air, etc..) donc on pourrait complexifier les fonctions de satisfaction sensible en tenant **compte de ces autres paramètres physiques** afin de s'approcher plus facilement du confort réel et effectif au niveau des usagers.

Afin de bien connaître les paramètres d'usage pouvant définir les fonctions de satisfaction, nous avons proposé pour cela l'approche QOOQCP (partie 1.1 chapitre 4) qui permet d'identifier justement les différents paramètres d'usage ainsi que de la façon de construire les fonctions de satisfaction appropriées (Partie 1.2 chapitre 4).

De même, pour la dimension Coût dans le rapport d'efficacité d'usage, celui-ci ne signifie que le coût économique dans G-HomeTech. Alors qu'au travers du point de vue SCB, on a vu que l'on pouvait étendre ce concept à toutes les formes de coûts aussi bien matériels qu'immatériels : effort psychologique, coût environnementaux (exprimés en taux de CO2 rejeté, etc..).

Extension d'application à la gestion d'OUE à moindre influence thermique

Nous avons enfin pu voir que l'on pouvait appliquer la logique de fonction de satisfaction également sur des équipements électriques « non contrôlables » selon G-HomeTech. Nous avons même proposé via l'élaboration du diagramme de Compromis Coût/Confort, de construire des profils d'usagers sobres afin de guider les usagers vers une meilleure pratique. Ces scénarios de meilleures pratiques pourraient être calculés et générés justement par le SGEB car il dispose de l'ensemble des données nécessaires pour proposer des alternatives de comportements énergétiques. Ainsi, l'introduction d'une fonction de

satisfaction rationnelle permettrait *d'étendre le domaine d'application* de G-HomeTech principalement en tant que *conseiller d'utilisation* (en affichant l'information de potentiels gaspillages d'énergie via le diagramme de compromis) et, dans une moindre mesure, le pilotage de ces charges (par exemple éteindre directement les appareils en veille non utilisés).

3.3.2 Un complément à l'affichage décisionnel de gestion énergétique

Le système G-HomeTech, en tant que logiciel de gestion énergétique du SCB interagit avec les usagers du bâtiment. Il leur propose, au travers d'un IHM convivial (la convivialité étant un des paramètres essentiels pour rendre le « message » plus effectif [FISC, 2007] [WOOD, 2006]) un certain nombre d'informations et de commandes possibles concernant leur consommation énergétique (instantanée et historique), la satisfaction globale supposée, les conditions extérieures. Indirectement, ces outils amènent l'utilisateur à réaliser des compromis entre les charges électriques, la production locale d'énergie et la nécessité de certains services.

Il serait possible d'ajouter à l'affichage actuel une représentation des solutions de pilotage optimisées, sous forme d'un diagramme de compromis tel que nous les avons présentés. Cela aurait pour intérêt de comparer différentes solutions futures de gestion en fonction des satisfactions supposées, qu'elles apporteraient. Aussi, on propose à l'utilisateur d'être un minimum acteur de la construction de l'efficacité d'usage en l'impliquant dans la variation des paramètres d'usage et le jugement de la satisfaction globale. Ainsi, l'interface IHM pourrait se présenter sous forme de curseur représentant les contraintes principales du système : coûts et différentes formes de confort. Il sera possible alors, en modifiant un des paramètres lié à une notion de satisfaction (comme par exemple les coefficients de pondération de la fonction de satisfaction globale), de voir l'impact sur le coût et la satisfaction globale. Cela revient à *rendre paramétrable la définition des fonctions de satisfaction et voir l'impact sur le diagramme de compromis*. Cette interactivité avec l'utilisateur permettrait à celui-ci de juger au mieux l'EUE de son usage actuel et de pouvoir l'améliorer en conséquence.

Ainsi, l'IHM de G-HomeTech pourrait incorporer le diagramme de compromis comme *visualisation de l'EUE de l'utilisateur entre son profil actuel et un profil idéal sobre* afin d'inciter celui-ci à se diriger vers davantage de sobriété. Si l'information pour construire de tels diagrammes n'est pas entièrement disponible, l'IHM pourra proposer au minimum la visualisation d'historiques des consommations afin de pouvoir avoir une interprétation plus efficace des gaspillages d'énergie. Cela permettrait d'inclure dans la gestion énergétique, des équipements électriques qui avaient été mis à l'écart compte tenu de leur non contrôlabilité (les OUE).

Conclusion

Nous avons pu voir au travers de ce chapitre que l'efficacité énergétique d'usage pouvait être utile en phase d'exploitation en effectuant un diagnostic de l'usage. Dans ce cadre, l'approche d'efficacité d'usage permet d'analyser l'usage d'équipements électriques tels que les OUE et de faire émerger les mauvais usages de ceux-ci. Nous avons pu voir que le diagramme de compromis opérait alors comme outil d'aide à la sobriété énergétique aux usagers en les incitant à adopter des comportements énergétiques plus vertueux. On s'est en effet appuyé sur le fait que la connaissance de sa consommation énergétique ainsi que la proposition de meilleures pratiques inciterait l'utilisateur à davantage de sobriété.

Enfin, nous avons affirmé que le diagnostic d'usage ferait partie d'une étape importante pour une meilleure gestion énergétique des *energy smart buildings* qui peut être réalisée au travers de systèmes de gestion d'énergie « intelligents ». Nous avons présenté

succinctement à ce propos un exemple de projet de logiciel (G-HomeTech) offrant un tel service et s'inscrivant dans une approche de la consommation énergétique semblable à l'efficacité d'usage. En cela, nous avons proposé d'intégrer l'efficacité d'usage énergétique sur cette technologie applicative au travers de la conception de son algorithme en particulier. La démarche de l'EUE est tout à fait compatible avec des SGEB tels que G-HomeTech car ils ont les mêmes objectifs de maximisation de la satisfaction globale en minimisant la consommation énergétique du système bâtiment dans son ensemble. Pour cela, nous avons proposé de pouvoir compléter l'algorithme actuel avec l'introduction de fonctions de satisfaction rationnelle ou la complexification des fonctions de satisfaction actuelles par la méthode QQQQCP.

Nous avons pu voir qu'il serait ensuite possible d'intégrer le diagramme de compromis Coût/Satisfaction dans l'IHM du SGEB afin de proposer des comportements et pilotages alternatifs allant vers une meilleure efficacité d'usage énergétique du SCB.

Nous avons finalement pu même proposer une concrétisation de nos travaux sous forme d'application concrète possible à mettre en place dans les SGEB ou directement sur le OUE.

On peut enfin s'interroger sur la liaison forte et dépendante qu'il existe entre la satisfaction rationnelle et la sobriété. La consommation et la prise de conscience de celle-ci sont des phénomènes intrinsèquement dynamiques. Nous avons pu simplifier leur expression en les rendant statiques mais une propriété essentielle de la satisfaction rationnelle est sa dynamicité compte tenu que l'humain évolue au fur et à mesure de l'information qu'il perçoit et de son « éducation » c'est-à-dire son évolution intellectuelle au cours du temps. On peut comprendre alors tout l'intérêt et le poids de l'information qui sera restituée aux occupants / exploitants. La nature même des informations définira alors une certaine satisfaction rationnelle qui aboutira à une certaine interprétation et configuration du système. L'analyse de l'information persuasive et rationnelle est l'un des enjeux de la « communication énergétique » dans les bâtiments.

Conclusion générale et Perspectives

Conclusion de la thèse

Nous avons cherché au travers de nos travaux à apporter un point de vue particulier sur un domaine encore en construction : la sociotechnique dans le bâtiment. Ce domaine consiste à étudier l'interaction Usager/bâtiment et ceci a été effectué du point de vue énergétique (en particulier en fonction de la consommation électrique). Nous avons pu voir en effet que dans les bâtiments actuels mais encore plus dans les futurs bâtiments de type BBC et BEPOS qui se profilent, la consommation électrique et sa gestion seront les éléments principaux pour obtenir l'excellence énergétique visée.

Or nous avons pu maintes fois démontrer, que ce soit au travers des retours d'expérience qu'au niveau théorique, que la consommation électrique était intrinsèquement liée à l'usage et donc aux comportements des usagers au sein du SCB. Nous avons pu en déduire que si l'on souhaitait améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments, il fallait intégrer l'usage et changer de point de vue dans le mode de perception de l'usage du bâtiment.

C'est pour ces raisons que nous avons proposé de définir le concept d'efficacité d'usage énergétique qui permet de reconsidérer le concept d'efficacité énergétique classique en l'abordant du point de vue acteur humain. On l'a défini pour chaque équipement ou système énergétique comme un rapport multidimensionnel, multi-objectifs entre la satisfaction du service et la consommation énergétique du même équipement/système. L'emploi de notions aussi générales que la satisfaction nous a amené à en définir 2 composantes particulières par rapport à l'usage : la satisfaction sensible et la satisfaction rationnelle.

Ces propos ont la particularité de s'inscrire dans l'épistémologie scientifique constructiviste dont nous avons rappelé les grands principes. En tant que tel, nous avons insisté sur le fait que la présence de l'acteur humain dans le SCB ne permet plus d'aborder la problématique de l'usage selon le paradigme épistémologique ontologique mais davantage en cherchant à construire des concepts et outils adaptés afin qu'ils soient effectifs.

Afin de valider et d'illustrer nos propos, nous avons proposé de quantifier les concepts énoncés au travers notamment de la construction de fonctions de satisfaction permettant de formuler une donnée informelle. Cela nous a permis de construire un diagramme de compromis Coût / Satisfaction qui est la traduction directe graphique de l'efficacité d'usage car il met en rapport satisfaction et coût énergétique.

Nous avons présenté l'utilité d'un tel diagramme en phase de conception de systèmes énergétiques en tant qu'outil d'aide à la décision. Au terme de l'étude sur 3 systèmes énergétiques (chauffage, ventilation, éclairage artificiel) nous avons pu attester de son effectivité car on voyait apparaître de manière immédiate la solution ayant la meilleure efficacité d'usage.

Une étude analogue a été effectuée en phase d'exploitation du bâtiment où le diagramme de compromis a pu être alors employé comme outil d'aide à la sobriété énergétique sur des OUE. On a pu voir qu'en exploitation la construction de fonctions de satisfaction n'était pas toujours évidente à définir et qu'il fallait parfois employer des outils moins intrusifs à l'intimité (comme l'affichage de données) pour évaluer les gaspillages d'énergies.

Enfin, nous avons pu présenter un logiciel de gestion d'énergie du bâtiment (G-HomeTech) auquel on a rapproché nos travaux et proposer des pistes d'amélioration afin d'intégrer davantage l'usage.

Perspectives

Le contenu même la thèse s'attache à analyser différents concepts et apporter des points de vue et approches transversaux. En tant que tel, il y a des positionnements qui sont discutables et des questions qui restent rémanentes et peuvent être approfondies à l'avenir grâce justement à un travail de coopération avec les Sciences Humaines.

Affinement des fonctions de satisfaction par une coopération avec les sciences sociales

En effet, la sociologie, en particulier, dispose d'outils ainsi que des études qui s'inscrivent naturellement dans l'étude de l'usage et pourraient être appliqués au Système bâtiment afin d'affiner les modèles et méthodologies proposés ici.

En particulier, on traite ici de notions de satisfactions, données évaluables et informelles, que l'on cherche à quantifier et à formaliser. Aussi, par exemple on a pris le parti de considérer la fonction de satisfaction rationnelle comme étant une fonction qualifiant en particulier la « qualité de la consommation énergétique » afin de voir si l'usage consomme de façon vertueuse. Or l'étude du gaspillage d'énergie s'effectue par rapport à une consommation de référence. Nous avons supposé que la consommation standard était la consommation nominale mais est-ce réellement celle-ci ? Comment pourrait-on définir une telle consommation standard ?

Un travail plus approfondi avec des équipes de psychologie sociale permettrait certainement d'affiner les paramètres d'usage les plus pertinents et influents afin de construire les fonctions de satisfaction, en particulier les fonctions de satisfaction rationnelle.

De manière générale, on s'est attaché à prendre des exemples simples et triviaux pour évaluer l'effectivité du concept proposé, en ne dépassant pas la bi-dimension dans le nombre de paramètres pris en compte. Bien évidemment, les systèmes énergétiques étant plus complexes, on se situera dans des dimensions supérieures et on sera soumis alors résoudre des optimisation multi objectifs. De nombreuses méthodes existent déjà dans la résolution de problèmes multi objectifs qui pourraient être employés. Reste d'abord à réussir à formaliser au cas par cas le problème d'optimisation.

Formalisation des fronts de Pareto et intégration à G-HomeTech

Dans la présentation du diagramme de Compromis (partie 1.4 chapitre 4), nous avons présenté le concept de front de Pareto qui expriment l'ensemble des points optimaux de compromis entre les fonctions objectifs de coût (réduction de la consommation énergétique) et de satisfaction (maximisation de la satisfaction globale). Nous n'avons pas formulé mathématiquement le problème d'optimisation qui permettrait de tracer de tels fronts mais il serait possible, à partir notamment de la formulation des fonctions de satisfaction proposées, de compiler celles-ci dans des logiciels d'optimisation tels CADES.

G-HomeTech étant un gestionnaire énergétique, il génère des problèmes correspondant à une situation donnée, utilise un optimiseur pour les résoudre, extrait les solutions et les applique en les adaptant aux situations réelles constatées. Il serait possible de calculer ces fronts de Pareto au travers d'un optimiseur externe et de les présenter à l'utilisateur sous forme de différentes alternatives possibles de contrôle-commande. En effet, G-HomeTech disposant de l'ensemble des données du bâtiment (mesures physiques), il est possible de combiner celles-ci en tant que paramètres d'usage pour former les fonctions de satisfaction adéquates. Ensuite, on pourra, au travers d'une IHM interactive et attrayante, présenter à l'habitant des points de fonctionnement particuliers sur les fronts de Pareto entre satisfaction et coût, qu'il aura loisir de choisir où il veut se situer.

Affichage de diagnostic d'usage sur les équipements électriques

Enfin, comme nous avons pu le présenter dans le cas du réfrigérateur, il serait possible d'imaginer un ensemble de systèmes d'affichage qui présenterait l'historique des consommations et analyserait les points singuliers de surconsommation afin que l'habitant puisse avoir conscience de tels problèmes de consommation liés à l'usage. Il suffirait pour cela, de travailler avec les constructeurs d'équipements électrodomestiques par exemple, afin que leurs appareils soient équipés d'instrumentations non intrusives ni encombrantes, mesurant les paramètres d'usage adéquats (poids des denrées, température des produits, etc.). On pourrait alors reconstituer des fonctions de satisfaction théorique et présenter un diagramme de compromis, tel que nous l'avons vu, directement sur l'IHM classique de l'équipement. Cependant, il faudra bien apprécier les limites de l'acceptabilité des habitants à de tels ajouts technologiques (pouvant être assez réfractaires dans certains cas [ROTH, 1998]).

Bibliographie

Articles, Livres et Rapports

[ABRA, 2002] Abras, S. Pesty S., Ploix S., *et al*, Maîtrise de la consommation d'énergie en domotique par un système multi-agents, Conférence LMO : *L'objet-Conférence LMO*, [en ligne], Août 2002, Disponible sur <<http://magma.imag.fr/publications/papers/Abras-Pesty-Ploix-Jacomino-06.pdf>> (Consultée le 10 Septembre 2011)

[AISSi ,2003] Aïssani, Y., *La Psychologie Sociale*, Paris: Armand Colin, 2003, 222p.

[AFGI, 1992] Association Française de Gestion Industrielle, « Evaluer pour évoluer, les indicateurs de performance au service du pilotage industriel », *ouvrage collectif AFGI*, Octobre 1992

[AFNOR, 2000] AFNOR, Norme AFNOR NF294, Article 2 du décret n°2000-1153 du 29 novembre 2000 relatif aux caractéristiques thermiques des constructions modifiant le code de la construction et de l'habitation et pris pour l'application de la loi n° 96-1236 du 30 décembre 1996 sur l'air et l'utilisation rationnelle de l'énergie

[AICVF, 1992] Association des Ingénieurs Climatique, Ventilation et Frigorifique, Conception et calcul des installations de ventilation des bâtiments et des ouvrages, *Collection des guides de l'AICVF*, PYC Edition

[AIE, 2010] Agence International de l'Energie, Key World Energy Statistics 2010, *Rapport annuel*, [en ligne], Paris.
Disponible sur <http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2010/key_stats_2010.pdf> (Consultée le 15 Juillet 2011)

[ALNA, 2000] Al-Najjar B, Alsyouf I., Improving effectiveness of manufacturing systems using total quality maintenance, *Integrated Manufacturing Systems*, Juillet 2000, Vol. 11 No. 4, p.267 – 276

[ANDE, 2009] Andersen R.V., Toftum J., Survey of occupant behaviour and control of indoor environment in Danish dwellings, *Energy and Buildings*, Janvier 2009, Vol. 41, No. 1. p. 11-16

[ANTO, 2007] Antoine P, Poinso R., Congard A., Évaluer le bien-être subjectif : la place des émotions dans les psychothérapies positives, *Journal de Thérapie Comportementale et Cognitive*, Décembre 2007, Vol. 17, No. 4, p. 170-180, 2009

[AQME, 1995] Association Québécoise pour la Maitrise de l'Energie, Critères de confort et de qualité de l'air dans les édifices à bureaux, janvier 1995, 14 pages.

[ARKI, 1997] Arkin H., Paciuk M., Evaluating intelligent buildings according to level of service systems integration, *Automation in Construction*, Septembre1997, Vol.6,No 5-6, p.471-479

- [ASTO, 2008] Astolfi A, Pellerey F., Subjective and objective assessment of acoustical and overall environmental quality in secondary school classrooms, *Journal of the Acoustical Society of America*, Janvier 2008, Vol 123, No.1, p. 163-173
- [AYDI, 2002] Aydinalp M. Ugursal I., Ismet V., *et al.* Modelling of the appliance, lighting, and space-cooling energy consumptions in the residential sector using neural networks, *Applied Energy*, 2002, Volume 71, No. 2, p. 87-110
- [BACO, 1986] Bacon F., *Novum Organum*, Livre I, paragraphe 95. Paris: PUF, 1986, 349 p. ISBN: 978-2130394419
- [BAIG, 1991] Baig A, Achter P, Mufti A., A novel approach to estimate the clear day global radiation, *Renewable Energy*, Vol 1, No.1, p.119–123
- [BAUD, 1968] Baudrillard, J., *Le système des objets, la consommation des signes*, Paris : Denoël-Gonthier, 1968, 232 p.
- [BEER, 2007] Beerepoot M., Beerepoot N., Government regulation as an impetus for innovation: Evidence from energy performance regulation in the Dutch residential building sector, *Energy Policy*, Octobre 2007, Vol.35, No.10, p. 4812-4825
- [BEHO, 2006] Běhounek L., Cintula P., Fuzzy logics as the logics of chains, *Fuzzy Sets and Systems*, 2006, Vol.157, No.5, p. 604-610
- [BERR, 2002] Berrah L., *L'indicateur de performance. Concepts et applications*, Toulouse:Cépaduès, 2002, 170 p., ISBN : 978-2-85428-567-3
- [BOEH, 1988] Boehm B.W., A Spiral Model of Software Development and Enhancement, *IEEE Computer*, Août 1986, Vol. 21, No.5, p. 61-72
- [BOMM, 2009] Bommé E., *Modélisation et Optimisation de Machines Électriques Discoïdes à Double Entrefer*, Thèse de doctorat : Electricité : INP Grenoble, 2009,164 p.
- [BOUR, 2006] Bourgeois D., Reinhart C., Adding advanced behavioural models in whole building energy simulation: A study on the total energy impact of manual and automated lighting control, *Energy and Buildings*, Juillet 2006, Vol.38, No.7, p.814-823
- [BRANC, 2004] Branco G., Lachal B., Gallinelli P., Weber W, Predicted versus observed heat consumption of a low energy multifamily complex in Switzerland based on long-term experimental data *Energy and Buildings*, Juin 2004, Vol. 36, No. 6, p.543-555
- [BRANG, 2003] Brangier E., Barcenilla J. (2003), *Concevoir un produit facile à utiliser - Adapter les technologies à l'homme*, Paris : Editions d'Organisation, 260 p, ISBN : 2-7081-2900-7
- [BURG, 2004]Burge PS., Sick building syndrome. *Occup Environ Med*, 2004, Vol.61, No.2, p 185-90.
- [CAEL1998] Caelen J., Analyse d'activité Installateurs, *Rapport de livrable Projet Novadis*, 1998

[CALW, 2010] Calwell C., Is efficient sufficient? The case for shifting our emphasis in energy specifications to progressive efficiency and sufficiency, *Rapport d'activités du groupe de travail European Council for a Energy Efficient Economy*, [en ligne], 2010, Disponible sur : < http://www.eceee.org/sufficiency/eceee_Progressive_Efficiency.pdf> (Consultée le 15 Juillet 2011)

[CAND, 2010] Candido C., de Dear, R.J., Lamberts R., *et al.*, Air movement acceptability limits and thermal comfort in Brazil's hot humid climate zone, *Building and Environment*, Janvier 2010, Vol. 45, No. 1, p. 222-229

[CAPA, 1994] [Capasso, A.](#), [Grattieri, W.](#), [Lamedica, R.](#), *et al.* (1994) A bottom-up approach to residential load modelling, *IEEE Transaction on Power Systems*, Mai 1994, Vol 9, No.2, p. 957 - 964

[CARR, 1998] Carre S., *Outil de conception architecturale pour l'éclairage naturel/artificiel. Application a la synthèse d'image pour la prise en compte des notions de confort*, Thèse de doctorat : Informatique, Université Rennes 1, 1998, 161 p.

[CEE, 1992] Communauté Economique Européenne, Directive 1992/75/CEE, Indication de la consommation des appareils domestiques en énergie et en autres ressources par voie d'étiquetage et d'informations uniformes relatives aux produits, [en ligne], 22 septembre 1992, Disponible sur :< <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:31992L0075:fr:HTML>> (Consultée le 20 Octobre 2010)

[CEREN, 2007] Centre d'Etudes et de Recherche Economiques sur l'énergie, Suivi du parc et des consommations d'énergie, 2007. Cité dans le Rapport Bâtiment de l'ademe [en ligne] Disponible sur < <http://www2.ademe.fr/servlet/getBin?name=D199DB4F63EC2F0B02A706671367CC231302179711154.pdf>> (Consultée le 10 Octobre 2011)

[CHAN, 2008] Chan M., Estève D., Review of smart homes : present state and future challenges, *Computer methods and programs in biomedicine*, Juillet 2008, Vol. 91, No. 1, p. 55-81

[CHAN, 2009] Chan M., Smart homes. Current features and future perspectives, *Maturitas*, Octobre 2009, Vol.64, No.2, p. 90-97

[CHEN, 2008] Chenailler H., *Conception par l'usage appliquée à la problématique de la gestion énergétique électrique dans le bâtiment*, Rapport de stage de Master Recherche : Electricité, INP Grenoble, 2008

[CHEN, 2010] Chenailler H, Wurtz F., Ploix S., et al., Etude pour quantifier la part des apports internes dans bâtiment tertiaire BBC. Application au bâtiment de PREDIS, Conférence IBPSA : *International Building Performance Building Simulation Association France*, Moret-sur-Loing, [en ligne] 9-10 Novembre 2010 : papier 96, Disponible sur < http://hal.archives-ouvertes.fr/docs/00/54/03/45/PDF/Article_chenailler_IBPSA_2010.pdf> (Consultée le 20 Octobre 2011)

[CHLE, 2008] Chlela F., *Développement d'une méthodologie de conception de bâtiments à basse consommation d'énergie*. Thèse de doctorat: Génie Civil, Université de La Rochelle, 2008, 302p.

[CHOI, 2009] Choi JH, Aziz A, Loftness V. Decision support for improving occupant environmental satisfaction in office buildings: The relationship between sub-set of IEQ satisfaction and overall environmental satisfaction, Conférence ICHB, *9th International Conference Healthy Buildings*, Syracuse, USA, 2009: papier 747.

[CIRI, 2009] Ciriza V., Donini L., Durand J.-B., Girard S., User-friendly power management algorithms, [en ligne], Septembre 2009, Disponible sur: < <http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00412509/fr/>> (Consultée le 10 Juillet 2011)

[CITEPA, 2010] Centre Interprofessionnel Technique d'Etudes de la Pollution Atmosphérique, Rapport d'activités 2010, Rapport annuel, [en ligne], 2010, Disponible sur: < <http://www.citepa.org/publications/rapport%202010v34-1.pdf>> (Consultée le 10 Octobre 2011)

[CLAR, 2004] Claridge D., Abushakra, B., Haberl J., et al., A., Electric Diversity Profiles for Energy Simulation of Office Buildings. *ASHRAE Transactions*, [en ligne], 2004, Disponible sur < <http://pioneer.netserv.chula.ac.th/~satch/research/Electricity-diversity-profiles-09-2003%5B1%5D.pdf>> (Consultée le 10 Octobre 2011)

[CLAS, 2010] Clastres C., (2010) Les réseaux intelligents. Régulation, investissement et gestion de la demande électrique, *Cahier de recherche n°39*, [en ligne], 2010, Disponible sur : < http://hal.archives-ouvertes.fr/docs/00/53/98/18/PDF/CR39-2010_CC_smartgrids.pdf> (Consultée le 10 Octobre 2011)

[CLEM, 1997] Clements-Croome T.D.J. (1997) What do we mean by intelligent buildings? , *Automation in Construction*, Vol.6, p. 395– 399.

[COCH, 2009] Cochet Y., *Antimanuel d'écologie*, Paris :Bréal, 2009, 312 p., ISBN : 978 2 7495 0845 0

[COMB, 1996] Combessie P., *Prisons des villes et des campagnes. Etude d'écologie sociale*, Paris : de l'Atelier – Ouvrières, 1996, 239p.

[CRAW, 2001] Crawley D.-B., Lawrie L. K., Winkelmann F.C. et al., (2001). Energy-Plus: creating a new-generation building energy simulation program, *Energy and Buildings*, Avril 2001, Vol. 33, No. 4, p.443–457

[CSTB, 2006] Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, Méthode Th-CE 2005. Version 7.3, [en ligne], 2006, Disponible sur < http://www.rt-batiment.fr/fileadmin/documents/RT2005/pdf/Methode_Th_CE.pdf > (Consultée le 10 Octobre 2011)

[DANN, 2010] Danny H.W. Li, Cheung KL, Wong S.L., et al., An analysis of energy-efficient light fittings and lighting controls, *Applied Energy*, Février 2010, Vol. 87, No. 2, p. 558-567

[DARB, 2006] Darby S, The effectiveness of feedback on energy consumption, *Review for defra of the literature on metering, billing and direct displays*, 2006, [en ligne], Oxford, United Kingdom, Disponible sur: <<http://www.eci.ox.ac.uk/research/energy/downloads/smart-metering-report.pdf>> (Consultée le 15 Juillet 2011)

[DAS, 2002] Das S., Cook L.J, Bhattacharya A. , *et al.*, The Role of Prediction Algorithms in the MavHome Smart Home Architecture, *IEEE Wireless Communications (Special Issue on Smart Homes)*, Décembre 2002, Vol. 9, No. 6, pp. 77-84,

[DEJO, 1995] Dejours C., *Le facteur Humain*, Collection « Que sais-je ? ». Paris : P.U.F, 1995, 127 p., ISBN : 978-2-13-058228-1

[DELC, 2002] Delcroix, V., Piechowiak, S., Rodriguez, J.,(2002). Computing diagnosis with higher posterior probability using bayesian networks, Conférence IPMU: *International Conference on Information Processing and management of Uncertainty in Knowledge based-system*.Annecy, 2002, p. 45–51.

[DESJ, 1996] Desjeux D., Berthier C., Jarrafoux S., *et al.* (1996) *Anthropologie de l'électricité: Les objets électriques dans la vie quotidienne en France* . Paris : Harmattan,1996 , 220 p., ISBN: 978-2738441089

[DGEMP, 2003] Direction Générale de l'Energie et des Matières Premières, Les Définitions utilisés par l'Observatoire de l'Energie, [en ligne], 2003, Disponible sur : <http://www.territoire-energie.fr/Sources_pdf/donnees%20de%20base.pdf> (Consultée le 15 Octobre 2011)

[DEST, 2007] Desterckel S., Chojnacki E., Une méthode de fusion possibiliste basée sur les sous-ensembles maximaux cohérents, *Preprint of the paper presented at the LFA 2007 conference*,[en ligne], 2007, Disponible sur : <http://sdestercke.free.fr/papers/LFA07_DesDubCho_Preprint.pdf> (Consultée le 15 Octobre 2011)

[DHOL, 1983] Dholakia R. R., Dholakia N., Fuat firat A., From social psychology to political economy: A model of energy use behaviour, *Journal of Economic Psychology*, Septembre 1983, Vol. 3, No. 3-4, p. 231-247

[DUBU, 2001] Dubuisson, B.,. *Diagnostic, Intelligence Artificielle et reconnaissance de formes*. Paris : Hermès Lavoisier, 2001, 286 p., ISBN: 978-2-7462-0249-8

[EMEL, 2011] Emelionoff (2011) Prospective des modes de vie urbains et facteur 4. Colloque CNRS : *8^{ème} Colloque Interdisciplinaire CNRS* [en ligne], 2011, Disponible sur <<http://energie.cnrs.fr/2011/PROMOV.pdf>> (Consultée le 20 Septembre 2011)

[ENERG, 2007] EnergyStar, Introduction to Energy Star Specification Development, Conférence Internationale *European Community Energy Star Technical Working Group Meeting*, Ispra, 30 Novembre 2007

[ENERT, 2005] Enertech, Technologies de l'information et éclairage - Campagne de mesures dans 49 ensembles de bureaux de la Région PACA, *Rapport Final*, [en ligne], 2005, Disponible sur: <

<http://www.enertech.fr/pdf/60/consommation%20eclairage%20bureautique%20bureaux.pdf>>
(Consultée le 10 Octobre 2011)

[EPIC, 2009] Epicure, *Lettre à Ménécée*, Paris:Flammarion, 2009, 109 p., ISBN : 978-2080712745

[FANG, 1972] Fanger P.O., (1972), *Thermal comfort analysis and applications in environmental engineering*, Thèse de doctorat: Environnement, Danmarks Tekniske Hojskole, 1972, 244 p.

[FISC, 2007] Fischer C., Consumer feedback: a helpful tool for stimulating electricity conservation, Conference SCORE: *SCP cases in the field of food, mobility, and housing: Workshop of the sustainable consumption research exchange network*; Juin 4–5, 2007, Paris, Chapitre 31.

[FOGG, 2002] Fogg, B.J., *Persuasive Technology: Using Computers to change what we think and do*, Burlington: Morgan Kaufmann, 2002, 312 p., ISBN: 1558606432

[FOGG, 2009] Foggia G., *Pilotage Optimal de Systeme Multi-sources pour le Batiment*, Thèse de doctorat : Electricité, INP Grenoble, 2009, 197p.

[FRAN, 1996] Frank P., Analytical and qualitative model-based fault diagnosis - a survey and some new results, *European Journal of Control*, 1996, Vol. 2, p.6–28.

[FRON, 2011] Frontczak M., Wargocki P., Literature survey on how different factors influence human comfort in indoor environments, *Building and Environment*, Avril 2011, Vol. 46, No.4, p. 922-937

[GIEC, 2007] Groupe d'experts Intercontinental sur l'Evolution du Climat, Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième *Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat* [Équipe de rédaction principale, Pachauri, R.K. et Reisinger, A. (publié sous la direction de~)], [en ligne], 2007, 103 p., Disponible sur : < http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr_fr.pdf> (Consultée le 15 Juillet 2011)

[HA, 2007] Ha, D.-L., *Un système avancé de gestion d'énergie dans le bâtiment pour coordonner production et consommation*, Thèse de doctorat: Automatique-Productique, INP Grenoble, 2007, 180 p.

[HAAS, 1998] Haas R., Auer H., Biermayr P., The impact of consumer behavior on residential energy demand for space heating, *Energy and Buildings*, Avril 1998, Vol. 27, No. 2, p. 195-205

[HALD, 2008] Haldi F., Robinson D., On the behaviour and adaptation of office occupants, *Building and Environment*, Décembre 2008, Vol. 43, No. 12, p. 2163-2177

[HATC, 1992] Hatchuel A., Weil B., *L'expert et le système*, Paris : Economica, 1992, 264 p., ISBN : 2-7178-2250-X

[HACH, 2011] *Dictionnaire Hachette Bilingue français allemand*, Paris : Hachette, 1670 p. ISBN : 2012805426

[HAVE, 2002] Havenith G., Holmér I., Parsons K., Personal factors in thermal comfort assessment: clothing properties and metabolic heat production, *Energy and Buildings*, Juillet 2002, Vol. 34, No. 6, p. 581-591

[HOMO, 2011] Homod RZ, Mohamed Saharia KS, Almurib HAF, *et al.*, RLF and TS Fuzzy model identification of indoor thermal comfort based on PMV/PPD, *Building and Environment*, Septembre 2011, doi: 10.1016. Article en cours d'impression

[HOUD, 1969] Houdeville L., *Pour une civilisation de l'habitat*, Paris : Ouvrières, 1969

[HQE, 200] Haute Qualité Environnementale, *Norme NF294 : Maison individuelle et maison individuelle associée à la démarche HQE*, [en ligne], 2011, Disponible sur : <
<http://archive.wikiwix.com/cache/?url=http://www.marque-nf.com/appli.asp?NumAppli=NF294&title=Norme%20NF294%20HQE%20Maisons%20individuelles>> (Consultée le 30 Septembre 2011)

[INTI, 2006] Intille S., Larson K., Munguia Tapia E., Using a Live-In Laboratory for Ubiquitous Computing Research, Conférence PERVASIVE : *Pervasive Computing*, Berlin 2006, Vol. 3968, p. 349-365

[ISER, 2005] Isermann, R., Model-based fault detection and diagnosis-status and applications, *Annual Reviews in Control*, 2005, Vol. 29, No. 1, p. 71-85

[IZAR, 2006] Izar J.L., L'inertie dans le bâtiment : Principe de superposition, *Présentation Ecole d'architecture Marseille-Luminy*, [en ligne], 2006, Disponible sur : <
<http://www.planete-sciences.org/enviro/archives/rnste6/ateliers/habitat/inertie-thermique.htm>> (Consultée le 05 Mars 2011)

[JACO, 1996] Jacot J.H., Micaelli J.p., *La performance économique en entreprise*, Paris : Hermès, 1996, 222 p., ISBN : 978-2866015664

[JACQ, 1996] Jacquemin A., Tulkens H, *Fondements d'économie politique*, Bruxelles : De Boeck, 1996, p. 213-215.

[JANG, 2007] Jang, M.S., Koh C.D., Moon I.S., Review of thermal comfort design based on PMV/PPD in cabins of Korean maritime patrol vessels, *Building and Environment*, Janvier 2007, Vol.42, No. 1, p. 55-61

[JEON, 2010] Jeong J.-W., Choi A, No S.-T., Improvement in demand-controlled ventilation simulation on multi-purposed facilities under an occupant based ventilation standard, *Simulation Modelling Practice and Theory*, Janvier 2010, Vol. 18, No. 1, p. 51-62

[JORG, 2008] Jørgensen S.E, Exergy, *Encyclopedia of Ecology*, p. 1498-1509

[KANT, 2004] Kant E., *Critique de la Raison Pure*, Analytique des principes, chapitre III, Paris : PUF, 7^{ème} ed. Quadrige, Juillet 2004, 584 p., ISBN : 978-2130545583

[KIM, 2007] Kim S.-Y , Kim J.J.,.The impact of daylight fluctuation on a daylight dimming control system in a small office, *Energy and Buildings*, Août 2007, Vol. 39, No. 8, p. 935-944

[LAI, 2009]Lai ACK, Mui KW, Wong LT, Law LY. , An evaluation model for indoor environmental quality (IEQ) acceptance in residential buildings, *Energy and Buildings* , Septembre 2009, Vol. 41, No.9, p.930-936

[LE, 2008] Le K., *Gestion optimale des consommations d'énergie dans les bâtiments*, Thèse de doctorat : Electricité, INP Grenoble, 2008, 1995p.

[LE, 2010] Le X. H. B., Ploix S., Abras S.,*et al.*, Simulating inhabitant behaviour to manage energy at home , Conférence IBPSA : *International Building Performance Building Simulation Association France*, Moret-sur-Loing, 9-10 Novembre 2010 : papier 96

[LEBE, 2009]Lebègue E., La maquette numérique au service de la construction et de l'aménagement Durable. *Présentation Club Technique de la Gazette des Communes*,[en ligne], 26 mai 2009, Cité de l'architecture et du patrimoine, Paris, Disponible sur : < <http://www.slideshare.net/lagazette.fr/eric-lebgue-la-maquette-numrique-au-service-de-la-construction-et-de-lamagement-durable>> (Consulté le 10 Juillet 2011)

[LEMO, 1999] Lemoigne J.L., *Les épistémologies constructivistes*, Collection « Que sais-je ? », Paris : PUF, 1999, 128p. , ISBN : 2 13 0469943 3

[LENO, 2010] Lenoir A., Etat de l'art des bâtiments à énergie positive en France, Conférence IBPSA : *International Building Performance Building Simulation Association France*, Moret-sur-Loing, 9-10 Novembre 2010, : papier 99

[LEYS, 2010] Leysens E., Bâtiment à énergie positive : une notion à éclaircir, *Journal le Moniteur*, [en ligne] Ed. 20 Avril 2010, Disponible sur : < <http://www.lemoniteur.fr/195-batiment/article/a-suivre/701713-batiment-a-energie-positive-une-notion-a-eclaircir>> (Consultée le 20 Juillet 2011)

[LIAN, 2005] Liang J., Du R., Thermal Comfort Control Based on Neural Network for HVAC Application, Conférence IEEE : *IEEE Conference on Control Applications*, Toronto, 28-31 Août 2005 : p. 819 – 824.

[LINDEL, 2006] Lindelöf D., Morel N., A field investigation of the intermediate light switching by users, *Energy and Buildings*, Juillet 2006, Vol. 38, No.7, p.790–801.

[LINDEN, 2006]van der Linden A.C., Boerstra A.C., Raue A.K., *et al.*, Adaptive temperature limits: A new guideline in The Netherlands: A new approach for the assessment of building performance with respect to thermal indoor climate, *Energy and Buildings*, Janvier 2006, Vol. 38, No. 1, p. 8-17

[LISUN, 2007] LI Sun Environnement, *Cahier des exigences environnementales : Opération Prédic/G2ELAB*, Document interne, Rédigé par H. Girard, 2007

[LOPES, 2005] Lopes L., Hokoi S., Miura H., *et al.*, Energy efficiency and energy savings in Japanese residential buildings—research methodology and surveyed results, *Energy and Buildings*, Juillet 2005, Vol. 37, No. 7, p. 698-706

[LOVI, 1990] Lovins, AB, The negawatt revolution. Conférence: *Across the Board The Conference Board*, New York, 18–23 Septembre 1990.

[LOVI, 1996] Lovins A.B., Twelve transitions, eight improvements and one distraction, *Energy Policy*, 1996, Vol. 24, No. 4, pp. 331-343.

[LOVI, 2004] Lovins A.B., Energy Efficiency, Taxonomic Overview, *Encyclopedia of Energy*, Vol. 2, p.383-401

[MA, 2006] Ma J., Chew S., Xu Y., Fuzzy logic from the viewpoint of machine intelligence, *Fuzzy Sets and Systems*, Mars 2006, Vol. 157, No.5, pp. 628-634

[MADS, 1995] Madsen H., Hoist J., Estimation of continuous-time models for the heat dynamics of a building, *Energy and Buildings*, Mars 1995, Vol. 22, No 1, p. 67-79

[MAGO, 2004] Magot D., *Méthodes et outils logiciels d'aide au dimensionnement. Application aux composants magnétiques et aux filtres passifs*. Thèse de doctorat : Electricité, INP Grenoble, 2004, 213 p.

[MAHD, 2008] Mahdavi A., Mohammadi A., Kabir E., *et al.*, Occupants' operation of lighting and shading systems in office buildings, *Journal of Building Performance Simulation*, 2008, Vol.1, No 1, p. 57–65.

[MAND, 2006] Mandallena C., *Elaboration et application d'une méthode d'évaluation et d'amélioration de la qualité environnementale de bâtiments tertiaires en exploitation*. Thèse de doctorat : Mécanique, Université Bordeaux 1, 2006, 264 p.

[MARE, 2010] Maréchal K. (2010) Not irrational but habitual: The importance of “behavioural lock-in” in energy consumption, *Ecological Economics*, Mars 2010, Vol. 69, No. 5, p. 1104-1114

[MASL, 1994] Maslow A., *Religions, Values, and Peak Experiences*, Londres: Atlantic Books, 1994, 143 p., ISBN: 978-0140194876

[MASO, 2010] Masoso O.T., Grobler L.J., The dark side of occupants' behaviour on building energy use, *Energy and Buildings*, Février 2010, Vol. 42, No. 2, p. 173-177

[MCDE, 1984] McDermid J., Ripken K., Life cycle support in the ADA environment, *ACM SIGAda Ada Letters*, Vol 3. , No.1

[MEDAD, 2006] Ministère de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de la mer, Le plan climat de la France, *Mise en oeuvre du Grenelle Environnement*, [en ligne], 2006, Disponible sur : < http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/09003_PLAN_CLIMAT.pdf> (Consultée le 10 Juillet 2011)

[MEDAD, 2010] Ministère de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de la mer, La consommation finale d'électricité par secteur en 2010. *Données statistiques* [en ligne], 2010, Disponible sur : < <http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/>>

durable.gouv.fr/energie-climat/intermediaire/consommations-secteur.html> (Consultée le 06 Juin 2011)

[MONN, 2010] Monnier G., *Histoire de l'architecture*, Collection « Que sais-je? », Paris : PUF, 2010, 128 p., ISBN : 978-2-13-058268-7

[MORA, 1931] Morand P., *1900*, Paris : Les Editions de France, 1931, p.64

[MORO, 2000] Moro M., *Programmation des bâtiments. Méthodologie et cas pratiques*, Paris : Eyrolles, 2000, 448 p., ISBN : 2-212-06822-0

[MOUS, 2011] Moustier C., Cours de gestion de projet, [en ligne], 2011, Disponible sur : http://fr.wikipedia.org/wiki/Cycle_de_d%C3%A9veloppement (Consultée le 18 Juillet 2011)

[MULL, 1998] Mullaly C., Home energy use behaviour: a necessary component of successful local government home energy conservation (LGHEC) programs *Energy Policy*, Décembre 1998, Vol. 26, No.14, p. 1041-1052

[MULT, 2003] Multon B., Geraud, O., Robin G., Ressources énergétiques et consommation humaine d'énergie. Techniques de l'Ingénieur, D3900.

[NEGA, 2006] Association Negawatt, Scénario négaWatt 2006 pour un avenir énergétique sobre, efficace et renouvelable, Document de synthèse, [en ligne], Décembre 2005, Disponible sur : <http://www.negawatt.org/telechargement/Scenario%20nW2006%20Synthese%20v1.0.2.pdf> > (Consultée le 15 Juillet 2011)

[NICO, 2002] Nicol J.F. , Humphreys M.A., Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings, *Energy and Buildings*, Juillet 2002, Vol. 34, No.6, p.563–572.

[NOR001, 2008] Loi n° 2008-735, Contrats de partenariat, [en ligne], 28 juillet 2008, Disponible sur : < <http://www.legifrance.gouv.fr/affichLoiPubliee.do?idDocument=JORFDOLE000018113280&type=general> > (Consultée le 20 Octobre 2011)

[NORD, 2002] Nordstedts, *Franska fickordbok francais-suedois*, Stockholm : Nordstets, 2002, ISBN : 9172271752

[ONU, 1998] Organisation des Nations Unies, Protocole de Kyoto à la convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques, *Rapport de ratification*, [en ligne], 1998, Disponible sur : < <http://unfccc.int/cop3/resource/docs/cop3/kpfrench.pdf> > (Consultée le 16 Juillet 2011)

[OWEN, 1988] Owen, J. & Wilhite, H., Household energy behavior in Nordic countries: an unrealized energy saving potential. *Energy*, Décembre 1988, Vol. 13 No. 12, p. 853-859.

[PAGE, 2007] Page J., *Simulating Occupant Presence and Behaviour in Buildings*, Thèse de doctorat: Environnement naturel, physique et construit, EPFL Lausanne, 2007, 134 p.

- [PAGE, 2008] Page J., Robinson D., Stochastic simulation of occupant presence and behaviour in buildings. Conférence IBPSA: *10th International Conference of the International Building Performance Simulation Association*, Pékin, 3-6 Septembre 2007: p.365
- [PARS, 2002] Parsons K.C., The effects of gender, acclimation state, the opportunity to adjust clothing and physical disability on requirements for thermal comfort, *Energy and Buildings*, Juillet 2002, Vol. 34, No. 6, p. 593-599
- [PATT, 1996] Patterson, M., What is energy efficiency? Concepts, indicators and methodological issues, *Energy Policy*, Mai 1996, Vol. 24, No. 5, p. 377-390.
- [PAUL, 2008] Paul W.L., Taylor, P.A , A comparison of occupant comfort and satisfaction between a green building and a conventional building, *Building and Environment*, 2008, Vol. 43., No 11, p.1858–1870
- [PEAR, 1997] Pearl, J., *Probabilistic reasoning in intelligent systems : network of plausible inference*, Waltham: Morgan Kaufmann Publishers, 1997, 574 p. ISBN: 978-1558604797
- [PEUP, 1990] Peuportier B., Blanc-Sommereux I., Simulation tool with its expert interface for the thermal design of multizone buildings, *Solar Energy*, 1990, Vol.8, p.109-120.
- [PHAM, 2011] Pham D.-A. , *Modélisation statistique des autres usages électriques*. Rapport de Master Recherche : Electricité, INP Grenoble, 2011
- [PLAT, 1999] Platon, *Menon*, 86d3-89e9 ; 95a6-96d1, Paris : Flammarion, 1999, 350 p., ISBN : 978-2080704917
- [PLOI, 2003] Ploix S., Touaf, S., Flaus, J.,(2003). A logical framework for isolation in fault diagnosis. Conférence SAFEPROCESS: *5th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes*. Washington, 9-11 Juin 2003,[en ligne]: papier 142, Disponible sur: < <http://b-dig.iie.org.mx/BibDig/P05-0657/pdf/files/papers/142.pdf>> (Consultée le 20 Octobre 2011)
- [PLOI, 2011] Ploix S. Jacomino M., Smart Grid and Renewable Energy: a new role for homes and offices but also new issues for research, Conférence SDEWES: *6th Dubrovnik Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*, Dubrovnik, 25-29 Septembre 2011: papier 498
- [POQU, 2008] Poquet G, Dujin A., Pour les ménages, la recherche du confort prime encore sur les économies d'énergie, *Crédoc N°210*, [en ligne], Mars 2008, Disponible sur : < <http://www.credoc.fr/pdf/4p/210.pdf>> (Consultée le 20 Juin 2011)
- [PREB, 2004] Programme de Recherche et d'Expérimentations sur l'Energie dans le Bâtiment, [en ligne], 2004, Disponible sur:< <http://www.prebat.net/>> (Consultée le 17 Septembre 2011)
- [QUEN, 2011] Quenard D., Bernier J.-C. et al., *La chimie et l'habitat*, Paris : EDP Sciences, 2011, 292p., ISBN : 978-2-7598-0642-3

[RABA, 2002] Rabardel P., Carlin N., Chesnais M., *Ergonomie: concepts et méthodes*, Toulouse : Octarès, 2002, 178 p., ISBN : 978-2906769458

[RASM, 1986] Rasmussen J., *Information processing and human-machine interaction: an approach to cognitive engineering*, New York: Elsevier Science Ltd, 1986, 230p. ISBN: 978-0444009876

[RIVA, 2005]. Riva G., Vatalaro F., Davide F., *et al.*, *Ambient Intelligence: from Vision to Reality*, IOS Press, [en ligne], 2005, Disponible sur <
http://www.vepsy.com/communication/book5/04_ami_istag.pdf> (Consultée le 20 Octobre 2011)

[ROBE, 1946] Robertson D. W., A Note on the Classical Origin of 'Circumstances' in the Medieval Confessional, *Studies in Philology* , 1946, Vol.43, No.1, p.6-14

[ROTH, 2008] Rothensee M., User Acceptance of the Intelligent Fridge: Empirical Results from a Simulation, *Lecture Notes in Computer Science*, 2008, Vol. 4952, p.123-139

[ROUL, 2008] Roulet C. A., Conditions de Confort et logement Sains. *Cycle Construction et Energies*, [en ligne], Mai 2008, Disponible sur: <
<http://www.enrdd.com/Documents/Architecture%20responsable%20et%20developpement%20durable/roulet2008.pdf>> (Consultée le 10 Octobre 2011)

[RT 2005, 2005] Réglementation thermique des bâtiments, Direction générale de l'Urbanisme, de l'Habitat et de la Construction. Décret n°2006-592, Caractéristiques thermiques et à la performance énergétique des constructions, JO du 25 mai 2006, [en ligne], 24 mai 2006, Disponible sur <
<http://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000000242000&dateTexte=>> (Consultée le 20 Octobre 2011)

[RUZZ, 2008] Ruzzenenti F., Basosi R., The role of the power/efficiency misconception in the rebound effect's size debate: Does efficiency actually lead to a power enhancement?, *Energy Policy*, Septembre 2008, Vol. 36, No. 9, p. 3626-3632

[SAKU, 2010] Sakulpipatsin P., Itard L.C.M., van der Kooij H.J, et al., An exergy application for analysis of buildings and HVAC systems, *Energy and Buildings*, Janvier 2010, Vol. 42, No. 1, p. 90-99

[SHEW, 1980] Shewhart W. A., *Economic Control of Quality of Manufactured Product*, Milwaukee: American Society for Quality Control, 1980, 501p., ISBN: 978-0873890762

[SIDL, 2009] Sidler O. Guide de la Maîtrise de la Demande d'Electricité dans le secteur résidentiel, Rapport de synthèse, [en ligne], 2009, Disponible sur : <
<http://www.enertech.fr/pdf/47/Maitrise%20demande%20electricite%20residentiel.pdf>> (Consultée le 15 Octobre 2011)

[SIDL, 2010] Sidler O. Le rôle de l'électricité dans les bâtiments sobres en énergie, Séminaire : *Rencontres PREBAT* , Chambéry,[en ligne], 31 Mars 2010, Disponible sur :<
<http://www.enertech.fr/pdf/38/electricite-et-batiments-a-energie-positive.pdf>> (Consultée le 20 Octobre 2011)

[SIMB, 2009] SIMBIO, Etude de définition, [en ligne], 2009, Disponible sur : < <http://www.simbio.fr/>> (Consultée le 16 Octobre 2011)

[SIMO, 1976] Simon H.A., *Administrative Behavior. A study of Decision-Making Processes in Administrative Organization*, Free Press, 1976, 364 p., ISBN: 978-0029289716.

[SO, 1999] So A.T.P, A.C.W. Wong, K.C. Wong, A new definition of intelligent buildings for Asia, *Facilities*, 1999, Vol. 17, No.12/13, p.485 - 491

[SOES, 2008] Service de l'Observation et des Statistiques, Bilan de l'énergie 2008, *Cité dans le Rapport Bâtiment de l'Ademe* [en ligne] Disponible sur < <http://www2.ademe.fr/servlet/getBin?name=D199DB4F63EC2F0B02A706671367CC231302179711154.pdf>> (Consultée le 10 Octobre 2011)

[SOES, 2010] Service de l'Observation et des Statistiques, Bilan énergétique de la France pour 2009, *Cité dans le Rapport Bâtiment de l'Ademe* [en ligne] Disponible sur < <http://www2.ademe.fr/servlet/getBin?name=D199DB4F63EC2F0B02A706671367CC231302179711154.pdf>> (Consultée le 10 Octobre 2011)

[SORR, 2008] Sorrell S, Dimitropoulos J., The rebound effect: Microeconomic definitions, limitations and extensions, *Ecological Economics*, Avril 2008, Vol. 65, N°3, p. 636-649

[STUM, 1997] Stum, K., Mosier, R., Haasl, T., Energy management systems, *Rapport Technique*, Portland Energy Conservation Inc, [en ligne], 1997, Disponible sur: < http://www.peci.org/documents/PECI_PracticalGuide1_0302.pdf> (Consultée le 08 Octobre 2011)

[TANI, 2008] Tanides C.G, Estimation of stand-by energy consumption and energy saving potential in Argentine household, *Energy for Sustainable Development*, Décembre 2008, Vol. 12, No. 4, p. 76-80

[THIE, 2008a] Thiers S., *Bilans énergétiques et environnementaux de bâtiments à énergie positive*, Thèse de doctorat : Energétique, Mines de Paris, 2008, 255p.

[THIE, 2008b] Thiers S., Peuportier B., Thermal and environmental assessment of a passive building equipped with an earth-to-air heat exchanger in France , *Solar Energy*, Septembre 2008, Vol. 82, No. 9, p. 820-831

[UE, 2005] Parlement Européen, Livre vert sur l'efficacité énergétique, Commission européenne, [en ligne], 22 Juin 2005, Disponible sur http://europa.eu/legislation_summaries/energy_efficiency/127061_fr.htm (Consultée le 18 Septembre 2011)

[UE, 2007] Communication de la Commission du 10 janvier 2007 intitulée: « Limiter le réchauffement de la planète à 2 degrés Celsius - Route à suivre à l'horizon 2020 et au-delà » Bruxelles

[UE, 2002] Parlement européen et du conseil, Directive 2002/96/CEE, Déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE), [en ligne], 27 janvier 2003, Disponible sur : <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2003:037:0019:0023:fr:PDF> (Consultée le 20 Octobre 2011)

[VRIN, 2007] Vringer K., Aalbers T., Blok K., Household energy requirement and value patterns, *Energy Policy*, Janvier 2007, Vol. 35, No.1, p. 553-566

[WAGN, 2007] Wagner A., E. Gossauer E., C. Moosmann C., *et al.*, Thermal comfort and workplace occupant satisfaction—Results of field studies in German low energy office buildings, *Energy and Buildings*, Juillet 2007, Vol.39, No.7, p.758–769

[WIDE, 2009] Widén J., Nilsson A.N., Wäckelgård E., A combined Markov-chain and bottom-up approach to modelling of domestic lighting demand, *Energy and Buildings*, Octobre 2009, Vol. 41, No. 10, p. 1001-1012

[WIGG, 2002] Wigginton M., J. Harris, *Intelligent Skin*, Oxford: Butterworth-Heinemann, 2002, 176 p.

[WILL, 1975] Willsky, A., A survey of design methods for failure detection systems, *Automatica*, 1975, Vol.12, p.601–611.

[WOOD, 2006] Wood G., Newborough M., Energy-use information transfer for intelligent homes: Enabling energy conservation with central and local displays, *Energy and Buildings*, Avril 2007, Vol. 39, No. 4, p. 495-503

[WONG, 2005] Wong J.K, Li H., Wang S.W., Intelligent building research: a review, *Automation in Construction*, Janvier 2005, Vol. 14, No.1, p.143– 159

[WURT, 2008] Wurtz F., *Conceptions de la conception pour le génie électrique de l'approche « Objets –Savoirs – Méthodes – à l'approche « Systèmes – Connaissances – Compétences - Organisations »* Rapport de HDR : Génie Electrique, INP Grenoble, 2008, 188p.

[YAMA, 2008] Yamamoto Y., Suzuki A., Fuwa Y., *et al.* (2008) Decision-making in electrical appliance use in the home, *Energy Policy*, Mai 2008, Vol. 36, No.5, p.1679-1686

[YASS, 2011] Yassine A., Ploix S., Méthodes d'analyse diagnostique pour les systèmes habitation, *Compte rendu d'avancemen*, Projet PLUMES

[YE, 2003] Ye G., Yang C., Chen Y., *et al.*, A new approach for measuring predicted mean vote (PMV) and standard effective temperature (SET*), *Building and Environment*, Janvier 2003, Vol. 38, No.1, p. 33-44.

[YUCE, 2011] Yucer C.T., Hepbasli A.(2011) Thermodynamic analysis of a building using exergy analysis method, *Energy and Buildings*, Février-Mars 2011, Vol. 43, No. 2-3, p. 536-542

[ZADE, 1983] Zadeh L., A fuzzy Set theoretic approach, *Journal of Semantics*, Décembre 1983, Vol 2.

Pages Internet

[BOUR, 2010] Bourgogne Bâtiment Durable, Démarche QEB – HQE, [en ligne], 2011, Disponible sur : <<http://www.bourgogne-batiment-durable.fr/fr/bourgogne-batiment-durable/tout-sur-la-qeb/demarche-qeb-hqe.html>> (Consultée le 15 Juin 2011)

[CEA, 2003] Centre de l’Energie Atomique- Energies Alternatives, L’Energie pour quoi faire?, [en ligne], 2011, Disponible sur : <http://www.cea.fr/jeunes/themes/l_energie/la_production_d_energie/l_energie_pour_quoi_faire> (Consultée le 12 Septembre 2011)

[CNRTL_a, 2011] Centre National de Recherche Textuelles et Lexicales, Définition du terme « Usage » Dictionnaire lexicographique, [en ligne], 2011, Disponible sur :< <http://www.cnrtl.fr/definition/usage> > (Consulté le 15 Juillet 2011)

[CNRTL_b, 2011] Centre National de Recherche Textuelles et Lexicales, Définition du terme « Rendement » Dictionnaire lexicographique, [en ligne], 2011, Disponible sur :< <http://www.cnrtl.fr/definition/rendement> > (Consulté le 15 Juillet 2011)

[DOMUS, 2011]Logiciel et Systèmes Intelligents, *Plateforme de test pour la domotique*, [en ligne], 2011, Disponible sur :< <http://www.carnot-lsi.com/notre-offre/batiment-intelligent/offres/domus> >(Consultée le 10 Septembre 2011)

[ENERZ, 2011] Enerzine, Article sur les smart grids, [en ligne], 2011, Disponible sur: <http://www.enerzine.com/14/8562+les-smart-grids-ou-reseaux-intelligents+.html> (Consultée le 20 Septembre 2011)

[LARO_a, 2011] Dictionnaire encyclopédique, Définition du terme « efficacité »[en ligne], 2011, Disponible sur : <http://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/efficacite> (Consultée le 16 Octobre 2011)

[LARO_b, 2011] Dictionnaire encyclopédique, Définition du terme « efficacité »[en ligne], 2011, Disponible sur : <http://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/efficacite> (Consultée le 16 Octobre 2011)

[LEO, 2011] LEO, Définition Wirksam, Dictionnaire Allemand, [en ligne], 2011, Disponible sur :< <http://dict.leo.org/frde?lp=frde&lang=de&searchLoc=0&cmpType=relaxed§Hdr=on&spellToler=&search=wirksam>> (Consultée le 20 Octobre 2011)

[NOVE, 2011] Novethic, Définition de l’électricité spécifique, [en ligne], 2011, Disponible sur : < <http://www.novethic.fr/novethic/v3/le-glossaire.jsp?id=135443>> (Consultée le 20 Octobre 2011)

[PVGIS, 2010] Photovoltaic Geographical Information System, *Données d’irradiation solaire*., [en ligne], 2010, Disponible

sur :<http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps/radmonth.php?lang=en&map=europe> (Consultée le 20 Octobre 2010)

[WIKIa, 2011] Wikipédia, *Article Bâtiment*, Dictionnaire encyclopédique participatif,[en ligne], 2011, Disponible sur :

http://fr.wikipedia.org/wiki/B%C3%A2timent_%28construction%29(Consultée le 10 Septembre 2011)

[WIKIb, 2011] Wikipédia, *Article Efficience énergétique*, Dictionnaire encyclopédique participatif,[en ligne], 2011, Disponible sur : <
http://fr.wikipedia.org/wiki/Efficience_%C3%A9nerg%C3%A9tique> Consultée le 21 Février 2011.

[WIKIc, 2011] Wikipédia, *Article Méthode QQQQCP*, Dictionnaire encyclopédique participatif,[en ligne], 2011, Disponible sur :<<http://fr.wikipedia.org/wiki/QQQQCP>> (Consultée le 10 Septembre 2011)

ANNEXES

ANNEXE 1 : DEMARCHE HQE DANS LE CADRE DE PREDIS	180
1.1 Analyse des thèmes environnementaux HQE dans le processus de conception	181
Architecture	182
Chauffage/ rafraîchissement.....	182
Ventilation	184
Eclairage.....	185
Equipements Bruns et Blancs.....	186
1.2 Observations sur la phase de conception de la plateforme PREDIS MHI	186
Pertinence des Préconisations HQE	186
ANNEXE 2 : ORGANISATION DES THEMES ENVIRONNEMENTAUX DANS LA DEMARCHE HQE	187
ANNEXE 3 : APPORTS INTERNES ET DEMANDES SPECIFIQUES	189
ANNEXE 4 : PLAN ARCHITECTURAL REZ-DE-CHAUSSEE	190
ANNEXE 5 : MODELE ARCHITECTURAL COMFIE PLEIADES DE LA PLATEFORME PREDIS MHI- REZ-DE CHAUSSEE	192
ANNEXE 6 : SCHEMA DE PRINCIPE VENTILATION REZ-DE-CHAUSSEE	194
ANNEXE 7 : PLAN VENTILATION REELLE REZ-DE-CHAUSSEE.....	196
ANNEXE 8 : ETUDE FACTEUR DE LUMIERE DU JOUR PLATEFORME EP RECHERCHE.....	198
ANNEXE 9 : PLAN ECLAIRAGE REZ-DE-CHAUSSEE	200
ANNEXE 10 : PLAN D'AMENAGEMENT ET DE PLACEMENT DES CAPTEURS SALLE INFORMATIQUE	202

ANNEXE 11 : MODELE THERMIQUE ETUDE PREDIS MHI : REZ-DE-CHAUSSEE	204
ANNEXE 12 PROCESSUS DE CONCEPTION ET DESCRIPTION DE LA PLATEFORME MHI	206
12.1 Démarche HQE de la Conception du bâtiment	206
12.2 Description du Système Bâtiment « Plateforme PREDIS MHI »	207
12.2.1 Architecture et descriptions des pièces	207
12.2.2 Gestion Technique Centralisée et Systèmes énergétiques	207
12.2.3 Occupants	211
ANNEXE 13 : QUESTIONNAIRE DE SATISFACTION USAGERS ESPACE BUREAU	212
ANNEXE 14 : RESULTATS DU QUESTIONNAIRE DE SATISFACTION DE LA PLATEFORME PREDIS MHI	219
ANNEXE 15 : SIMULATION DE LA SURCHAUFFE LIEE A L'USAGE	230
ANNEXE 16 : TERMINOLOGIES DE L'EPISTEMOLOGIE CONSTRUCTIVISTE	234
ANNEXE 17 : ANALYSE DE L'USAGE D'UN BATIMENT	235
ANNEXE 18 AIDE A LA CONCEPTION DU SYSTEME DE VENTILATION.....	238
18.1 Analyse de l'usage aéraulique et étude de la mesurabilité des paramètres d'usage.....	238
18.2 Construction de la fonction de satisfaction globale à partir des fonctions de satisfaction de chaque paramètre d'usage.....	239
18.2.1 Fonction de satisfaction sensible de la qualité de l'air	239
18.2.3 Fonction de satisfaction Rationnelle aéraulique.	240
18.2.4 Fonction de satisfaction globale du confort aéraulique	240
18.3 Application au Système de ventilation.....	241
18.3.1 Stratégies de contrôles commande étudiées	241
18.3.2 Détermination du coût énergétique.....	241
18.3.3 Evolution du taux de CO2	242

18.4 Analyse des résultats et prise de décisions.....	243
18.4.1 Diagramme de compromis sur la satisfaction globale.....	244
18.4.2 Autre présentation de la satisfaction globale.....	245
18.4.3 Bilan des diagramme et prise de décision.....	246
ANNEXE 19 : SCENARIOS D'ETUDE POUR LE SYSTEME DE VENTILATION	247
ANNEXE 20 : GRAPHES D'EVOLUTION DU TAUX DE CO2	248
ANNEXE 21 : AIDE A LA CONCEPTION SYSTEME D'ECLAIRAGE ARTIFICIEL	249
21.1 Analyse de l'usage et étude de la mesurabilité des paramètres d'usage du confort visuel.....	249
21.2 Construction de la fonction de satisfaction globale à partir des fonctions de satisfaction de chaque paramètre d'usage.....	251
21.2.1 Satisfaction sensible de l'éclairage lumineux.....	251
21.2.3 Fonction de satisfaction rationnelle.....	252
21.2.4 Fonction de satisfaction globale du confort visuel	252
21.3 Application au système d'éclairage artificiel de l'Espace Bureau.....	252
21.3.1 Systèmes de contrôle-commande	253
21.3.2 Consommation énergétique des luminaires	254
21.3.3 Modélisation Eclairage naturel.....	255
21.4 Analyse des résultats et prise de décisions.....	261
21.4.1 Diagramme de compromis des satisfactions sensible et rationnelle	261
21.4.2 Bilan des diagrammes de compromis.....	265
ANNEXE 22 : DECOUPAGE DE L'ESPACE BUREAU EN ZONES D'ECLAIRAGE	266
ANNEXE 23 : SCENARIOS D'ETUDE POUR LE SYSTEME D'ECLAIRAGE ARTIFICIEL	267
ANNEXE 24 : LE CONFORT VISUEL DANS L'ARCHITECTURE BIOCLIMATIQUE.....	268
ANNEXE 25 : QUESTIONNAIRE SUR LE CONFORT LUMINEUX ET L'ECLAIREMENT LUMINEUX ARTIFICIEL.....	269

ANNEXE 26 : METHODOLOGIE PROPOSEE POUR LA CONCEPTION PAR L'USAGE DE LA PLATEFORME PREDIS	270
ANNEXE 27 ETUDE DU DIAGNOSTIC D'USAGE SUR LE CAS DU LAVE-LINGE.....	271
27.1 Analyse de l'usage et étude de la mesurabilité des paramètres d'usage du lave-linge	271
27.2 Fonctions de satisfaction rationnelle pour le lave-linge	271
ANNEXE 28 : ETUDE DE L'EFFICACITE D'USAGE EN EXPLOITATION POUR L'ORDINATEUR	274
28.1 Analyse de l'usage et étude de la mesurabilité des paramètres d'usage de l'ordinateur.....	274
28.2 Fonctions de satisfaction rationnelle pour l'ordinateur	275
28.3 Diagramme de Compromis Coût/Satisfaction rationnelle	276
ANNEXE 29 DETERMINATION DE LA PRESENCE D'UN USAGER EN FONCTION DE SA CONSOMMATION ELECTRIQUE POUR UN OUE A MOINDRE INFLUENCE THERMIQUE (EXEMPLE DE L'ORDINATEUR)	278
ANNEXE 30 : PRESENTATION SUCCINCTE DE G-HOMETECH.....	279

Annexe 1 : Démarche HQE dans le cadre de PREDIS

Comme nous avons pu le voir succinctement dans le chapitre 1, la démarche Haute Qualité Environnementale (HQE) est un processus de réflexion lors de la conception de bâtiment permettant d'établir un tableau de bord d'exigences environnementales sur un certain nombre de points. L'association HQE présente dans les termes suivants une telle démarche [HQE, 2010] :

« La démarche HQE vise à améliorer la qualité environnementale des bâtiments neufs et existants, c'est-à-dire à offrir des ouvrages sains et confortables dont les impacts sur l'environnement, évalués sur l'ensemble du cycle de vie, sont les plus maîtrisés

possibles. C'est une démarche d'optimisation multicritère qui s'appuie sur une donnée fondamentale : un bâtiment doit avant tout répondre à un usage et assurer un cadre de vie adéquat à ses utilisateurs. La démarche HQE comprend trois volets indissociables :

Un système de management environnemental de l'opération (SME) où le maître d'ouvrage fixe ses objectifs pour l'opération et précise le rôle des différents acteurs.

14 cibles qui permettent de structurer la réponse technique, architecturale et économique aux objectifs du maître d'ouvrage (cf. Chapitre 1)

Ces 14 cibles concernent:

- Relation harmonieuse des bâtiments avec leur environnement immédiat,
- Choix intégré des procédés et produits de construction,
- Chantier à faible nuisance,

- Gestion de l'énergie,
- 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,

- Qualité sanitaire des espaces,
- Qualité sanitaire de l'air,
- Qualité sanitaire de l'eau

Des indicateurs de performance

Ces trois volets constituent le référentiel générique de la démarche HQE formalisé dans trois documents normatifs : les normes NF P01-020-1 et XP P01-020-3 et le guide d'application (GA) P 01 030.

Principes de la démarche HQE :

- Les objectifs sont fixés par le maître d'ouvrage dans le cadre de son programme.
- Le système de management permet de mobiliser l'ensemble des acteurs pour atteindre les objectifs.
- Aucune solution architecturale et technique n'est imposée : le choix est justifié et adapté au contexte.
- La création d'un environnement intérieur sain et confortable tout en limitant les impacts environnementaux est recherchée.
- Les performances sont évaluées. »

Dans le cas de la Plateforme PREDIS, compte tenu des problématiques dans lesquelles elle s'inscrit, les exigences environnementales se portent davantage sur les sujets relatifs à la gestion énergétique et au confort des habitants ce qui a abouti à privilégier un certain nombre de cibles par rapport à d'autres (Annexe 2). Chacun des thèmes retenus dans le projet a alors été hiérarchisé selon trois niveaux par l'AMO HQE:

- Base: correspond à un niveau de traitement réglementaire et/ou couramment mis en œuvre dans d'autres opérations similaires
 - Performant : traduit un souhait d'amélioration des performances par rapport au cadre réglementaire et/ou à la pratique courante du Maître d'Ouvrage.
 - Très Performant : traduit les priorités du Maître d'Ouvrage pour l'opération. Les thèmes associés à ce niveau de traitement devront faire l'objet d'efforts de conception particuliers permettant une amélioration significative des performances environnementales obtenues.
- On peut désormais observer, de par la définition même des termes employés dans la démarche, qu'il existe un niveau de complexité par rapport aux exigences environnementales mais au-delà de cela on peut se questionner sur les critères de performance évoqués ici. Il n'y a pas ou peu d'indications sur la définition de « performance ». Ici, la performance est considérée comme une comparaison entre une situation existante (ou réglementaire) et une configuration à améliorer.

1.1 Analyse des thèmes environnementaux HQE dans le processus de conception

Dans notre vision systémique du bâtiment, on retrouve un certain nombre de thèmes de la démarche HQE (Annexe 2) relatifs à l'architecture, à l'enveloppe (thème 6 à 10, 15, 16 et de manière connexe, les thèmes 42 et 43), au système de chauffage/rafraîchissement (thèmes 17, 18 et de manière connexe, les thèmes 42 et 43), la ventilation (thème 21 et de manière connexe 47), l'éclairage (thème 20 et de manière connexe 45,46) et les équipements blancs et bruns (thèmes 22 et 23). L'autre aspect qui se dégage est ce qui est relatif à l'humain en particulier les notions de confort (thèmes 42 à 49) ou l'intégration des habitants (thème 1) qui correspond à l'élément « Occupant » du système bâtiment.

Dans cette partie, nous analyserons les préconisations émises par l'AMO HQE au regard de l'aspect énergétique et usages ; et verrons pour chaque point leurs traitements par les acteurs concernés dans le projet durant les autres phases du processus de conception. Nous nous attacherons à ne présenter que les principales exigences environnementales mettant en exergue les particularités liées à la performance énergétique. Pour plus de détails, on pourra se reporter au cahier des exigences environnementales du projet [LI SUN, 2007].

Architecture

Préconisations HQE

L'atelier visant le choix des techniques, procédés et matériaux s'inscrit dans une logique principalement environnementale. En effet, il est demandé à avoir des matériaux au maximum respectueux de l'environnement (utilisation de structure en bois) et des occupants du point de vue hygiénique. Du point de vue de l'isolation, un effort minimum de mise en conformité avec la RT2000 est demandé. Pour cela, des solutions techniques sont évoqués (comme double peau intérieure) et des valeurs limites pour le choix des équipements d'isolation et menuiseries est fixé (coefficient de transmission thermique U parois extérieures $<0,33 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$, U fenêtres $< 1,7 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$, Isolation de l'enveloppe Ubat $<0,7 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$). Les préconisations typiquement architecturales afin de bénéficier des apports naturels ont davantage attiré à la bioclimatique dont nous ne développerons pas ici.

Etude en phase d'esquisse et APS

Les bureaux d'architecte, d'études structure et d'études Bois ont pu travailler autour de plans de masse afin de définir les espaces qui seront créés et distinguer les parois soumises à rénovation ou celles qui seront nouvellement construites. La définition des espaces a alors pu être effectuée en fonction également de la fréquence d'occupation de ces salles définis par le maître d'ouvrage (Annexe 2)

Les documents provenant de cette étude sont les plans architecturaux présentés en annexe 4

Chauffage/ rafraîchissement

Préconisations HQE

Le poste de chauffage et de rafraîchissement fait à la fois l'objet d'efforts du point de vue architectural (utilisation de matériaux à forte inertie pour réduire les besoins de climatisation, isolation performante pour la réduction des besoins de chauffages, etc...) et également à la mise en place de systèmes de chauffage et de climatisation pour compléter les besoins de chaud ou de froid. L'objectif est en terme de système de chauffage une consommation en énergie utile $< 50 \text{ kWhEP.m}^2$.

Parmi les points remarquables de cette partie, il apparaît une exigence de gestion de l'intermittence et de la modulation de la fourniture en fonction des besoins (régulation multizonales). D'autre part, il est demandé à la conception technique de prendre en compte la possibilité de fonctionner dans certaines zones à des horaires ou des périodes où la plupart des activités sont arrêtées via des dispositifs de redémarrage d'installations de chauffage. Une attention particulière a été portée aux locaux à occupation intermittente ou très aléatoire.

Pour le rafraîchissement, aucun équipement n'a été souhaité sauf si justification comme le local serveur, privilégiant une solution architecturale telle que la ventilation naturelle. Néanmoins, il est suggéré que des modélisations thermiques dynamiques permettront de valider la

stratégie de confort thermique. Le nombre d'heures d'inconfort (où la température est supérieure à 27,5°C durant les périodes d'occupation) doit être inférieur à **40 heures**.

Etude en phase Esquisse /APS et APD

Le bureau d'études Fluides étant en charge de l'étude de consommation énergétique afin d'obtenir le confort d'hiver et le confort d'été. Pour cela, une simulation thermique dynamique a été réalisée sous le logiciel de simulation thermique dynamique COMFIE Pleiades.

Le modèle thermique intègre le modèle architectural employé pour cette étude peut être retrouvé en annexe 5, la modélisation de composition des parois correspond aux hypothèses relatives à l'étude du chauffage ainsi que des scénarios de chauffage, de ventilation d'occupation et de puissance dissipée. Nous présenterons ici les modèles utilisés par le Bureau d'études pour l'étude de la plateforme PREDIS MHI (Tableau 5) et en annexe 3 ceux du projet PREDIS dans son ensemble.

Etage	Zones thermiques	Périodes d'activité des scénarios	Chauffage /Rafraîchissement	Ventilation	Occupants	Puissance dissipée
RDC	Plateforme EP Recherche	7h à 19h	Inoccupation : 17°C Occupation : 20°C	18 m ³ /h/personne	20	25 PC: 100W /poste Machine Zone manip : 2kW Eclairage: 7W/m ²
R+1	Salle Informatique Industrielle	7h à 19h	Inoccupation : 17°C Occupation : 20°C	18 m ³ /h/personne Double flux coefficient d'échange 0,7	20	20 PC fixe : 100W Éclairage: 7 W/m ²

Tableau 5: Scénarios de simulation thermique dynamique lors de la phase de conception APS

Résultats de la simulation thermique en phase de conception:

L'étude effectuée par le Bureau d'études Fluide en cette phase de conception a permis d'évaluer les besoins énergétiques de chauffage (3,4 kWh/m².an pour la Plateforme EP Recherche et 15,1 kWh/m².an pour la Salle Informatique Industrielle) répondant ainsi à la consigne de consommation de 50 kWhEP/m² ainsi que d'évaluer le temps d'inconfort l'été (température dans la Salle Informatique Industrielle **ne dépassant pas 28°C durant plus de 41h**) respectant également la limite édictée dans les préconisations HQE. Nous verrons par la suite au travers du retour d'expérience les réalités de ces mesures.

Le bureau d'études Fluides a donc rédigé pour la phase DCE un document (Cahier des Clauses techniques particulières. Lot 11 : Chauffage-Ventilation-Sanitaire-Plomberie-Climatisation) décrivant de manière précise la réalisation technique telle qu'elle devrait être mise en œuvre (raccordement hydraulique, etc..) mais n'est exprimé de manière succincte (donc libre d'interprétation) ou alors simplement omis les informations relatives au contrôle-commande et régulation en fonction des besoins, la mise en place de capteurs permettant une gestion des équipements par rapport à l'usage.

Ventilation

Préconisations HQE

Des solutions architecturales peuvent être mises en place, comme la ventilation naturelle, mais sinon des dispositifs comme des Ventilations Double flux, permettant une récupération de l'énergie (rendement supérieure à 70%) et donc source d'économie d'énergie.

On retrouve également des exigences concernant la gestion de l'intermittence et de la modulation en fonction des besoins. D'autre part, l'optimisation de la consommation électrique des ventilateurs sera recherchée et le système devra pouvoir être arrêté en période prolongée d'inoccupation. Il est recherché à avoir une consommation des moteurs $P < 0,22 \text{ W/m}^3\cdot\text{h}$. Enfin, les débits seront adaptés aux besoins, sans surdimensionnement.

Etude en phase d'esquisse et APS

En terme d'étude spécifique d'écoulement de fluides le bureau d'études Fluides n'a pas communiqué d'études spécifiques hormis le modèle de ventilation effectué sous COMFIE. Ces études sont probablement basées sur l'expérience du bureau d'études mais n'est pas en rapport avec une réelle étude via des modèles CFD (études de l'écoulement des fluides). Le bureau d'études a mis au point un synoptique de fonctionnement du système de ventilation /chauffage par Ventilation Mécanique Contrôlée (VMC) double flux (Annexe 6). En effet, conformément aux exigences environnementales, l'emploi d'une VMC double flux a été préféré afin d'effectuer les fonctions de chauffage, rafraîchissement et de ventilation.

Etude en phase APD

A la suite du synoptique permettant de valider le schéma de fonctionnement du système ventilation, la mise en place finale du système ventilation avec le placement des capteurs permettant de mesurer différentes grandeurs qui seront traitées par un système Gestion Technique du Bâtiment (GTB) a été effectuée (Annexe 7). Adjoint à cela, il a été également rédigé un document concernant les lots techniques appropriés à destination des entreprises. Nous nous pencherons ici en particulier sur la partie GTC qui a fait l'objet d'un document particulier. En effet, en terme de mesure de données et de contrôle des équipements (en particulier la VMC double flux), il a été choisi une structure sous forme de GTB afin de remonter les données des différents capteurs et de contrôler les actionneurs adéquats.

Par rapport aux exigences environnementales, le bureau d'études Fluides détermine en ces termes les fonctionnalités que devront réaliser la GTB :

« Programmers conditionnelles et temporelles avec pilotage en temps réel des différents appareils de :

- chauffage
- . ventilation
- . climatisation
- . éclairage
- .Stores extérieurs

Surveillance centralisée des défauts d'alarmes techniques.

Surveillance et signalisation centralisées des équipements techniques.

Programmer le fonctionnement de divers circuits en fonction des créneaux horaires des conditions d'occupation des locaux.

Contrôler et archiver les températures des locaux, les mesures de puissance.

Elaborer un bilan énergétique.

Supervision GTB avec plans graphiques dynamiques. »

Une telle description globale a donc ensuite été fournie aux entreprises, accompagnée bien entendu de spécificités techniques (protocole de communication, réalisation de l'interface etc....) mais les prescriptions par rapport aux réglages des équipements et la gestion de l'énergie vis-à-vis des usages n'ont pas été détaillées. Cela pourrait s'apparenter à une politique de l'autruche : c'est une politique qui court vite, une politique qui fait des gros œufs, c'est tout (Karadoc, Kaamelott).

Eclairage

Préconisations HQE

Une utilisation optimale de l'éclairage naturel a été requise.

L'objectif est d'avoir un confort visuel ne permettant pas un éblouissement des occupants. Pour cela, il est préféré des parois claires (facteur de réflexion : plafond > 0,7 ; 0,4<murs<0,7 ; 0,2<sols<0,4). D'autre part, le Facteur de Lumière du Jour¹² (FLJ) a été déterminé au travers d'une étude d'accès à la lumière (via un logiciel d'éclairage naturel DIAL – Europe) pour la salle de classe et salle informatique : FLJ >2% sur 60% de la surface ; et pour les salles spécialisées TP, science : FLJ >1,5% sur 60% de la surface. On retrouvera l'ensemble des modèles employés en 8.

Pour l'éclairage artificiel, la gestion de l'intermittence et de modulation de l'éclairage en fonction des besoins doit être respecté : asservissement à l'éclairage naturel, détection de présence dans hall d'accueil, éclairage extérieur sur sonde crépusculaire. Les technologies d'éclairage artificielles seront des lampes faible consommation, dont la puissance installée <0,03 W/m².lux, et l'efficacité lumineuse > 85lm/W ou des ballasts à cathode chaude avec possibilité, le cas échéant d'éclairage par LED.

Phase Esquisse/APS/APD

¹² Le Facteur de Lumière du Jour est le rapport de l'éclairement intérieur reçu en un point du plan de référence (généralement le plan de travail ou le niveau du sol) à l'éclairement extérieur simultané sur une surface horizontale en site parfaitement dégagé. Il est exprimé en %

Comme mentionnée dans les préconisations HQE, une étude préliminaire sur les Facteur de Lumière du Jour a été menée sur les différentes salles afin de déterminer le potentiel d'éclairage naturel. Néanmoins concernant l'éclairage artificiel, aucune étude particulière n'a été effectuée. En effet, le bureau d'études Fluides qui s'est chargé de concevoir l'architecture du système d'éclairage (annexe 9) s'est principalement basé sur son expérience métier et donc il est alors difficile de distinguer la raison du choix de type de capteurs ainsi que leurs positionnements. Nous verrons par la suite comment de telles configurations sont en liaisons étroites avec l'usage.

Equipements Bruns et Blancs

Seule la préconisation de faire une recherche d'appareils les moins consommateurs possibles est ici effectuée par l'utilisation d'équipements dotés d'une efficacité énergétique de classe A+ ou A++ quand un tel étiquetage est disponible. Aucune autre mise en œuvre n'a été réalisée, préférant mettre de côté tout usage spécifique pouvant nécessiter une gestion particulière (Postes informatiques, serveurs, etc.)

1.2 Observations sur la phase de conception de la plateforme PREDIS MHI

Au travers de ces différentes phases de conception et des réalisations faites dans les études réalisées sur chaque partie du système bâtiment, on peut désormais relever un certain nombre de points qui semblent critiques du point de vue énergétique et/ou par rapport aux usagers et qui feront résonance avec les problèmes rencontrés durant le retour d'expérience.

Pertinence des Préconisations HQE

Nous avons déjà pu voir que les exigences environnementales étaient classifiées sous des termes de niveaux de « performance » qui ne faisaient référence à aucune base de comparaison ni de définition claire par rapport aux objectifs souhaités. Parmi les objectifs que l'on peut avoir, nous pouvons en retrouver deux principaux qui transparaissent au travers des titres mêmes des thèmes abordés par la méthode HQE avancé : une performance énergétique visant à avoir un système consommant le moins d'énergie possible et une acceptabilité des occupants par rapport à leur « confort de vie ».

En effet, parmi les cibles et thèmes apparaissant dans le cadre de la démarche HQE (Annexe 2), on peut remarquer qu'un certain nombre de thème s'intéresse à réduire la consommation énergétique par l'emploi même du terme « Economie d'énergie » au sein de la cible au titre évocateur d' « approche énergétique » (thèmes 14 à 34). Le choix des techniques et matériaux (thèmes 6 à 10) est relatif à une ingénierie plutôt technique visant à utiliser un matériel en particulier. Dans cette dimension d'ingénierie visant l'optimisation énergétique des process, les exigences font la plupart du temps l'objet d'un chiffrage et d'une limite à ne pas dépasser (Besoins de chauffage < 50 kWhEP/m².an)

D'autre part, d'autres thèmes ont plus rapport à la personne, se souciant du confort des occupants comme l'attestent les thèmes de la cible au nom évocateur de « Confort et santé à l'intérieur du bâtiment (thèmes 42 à 50). Dans ce cadre-là, un certain nombre de préconisations porte sur le contrôle-commande et la gestion des équipements en fonction des besoins, de l'occupation. De telles préconisations font référence à des réglages, des configurations du système permettant de prendre en compte l'usage. Cette dimension usage, en rapport avec l'importance de la part de l'usager, est fondamentale dans nos propos. Bien que cela ait été pensé à la conception, nous verrons au travers du retour d'expérience que malheureusement peu des exigences ont été mises en œuvre et respectées et nous verrons par la suite comment mieux redéfinir cet aspect et le mettre en application dans les systèmes de gestion futurs.

Annexe 2 : Organisation des thèmes environnementaux dans la démarche HQE

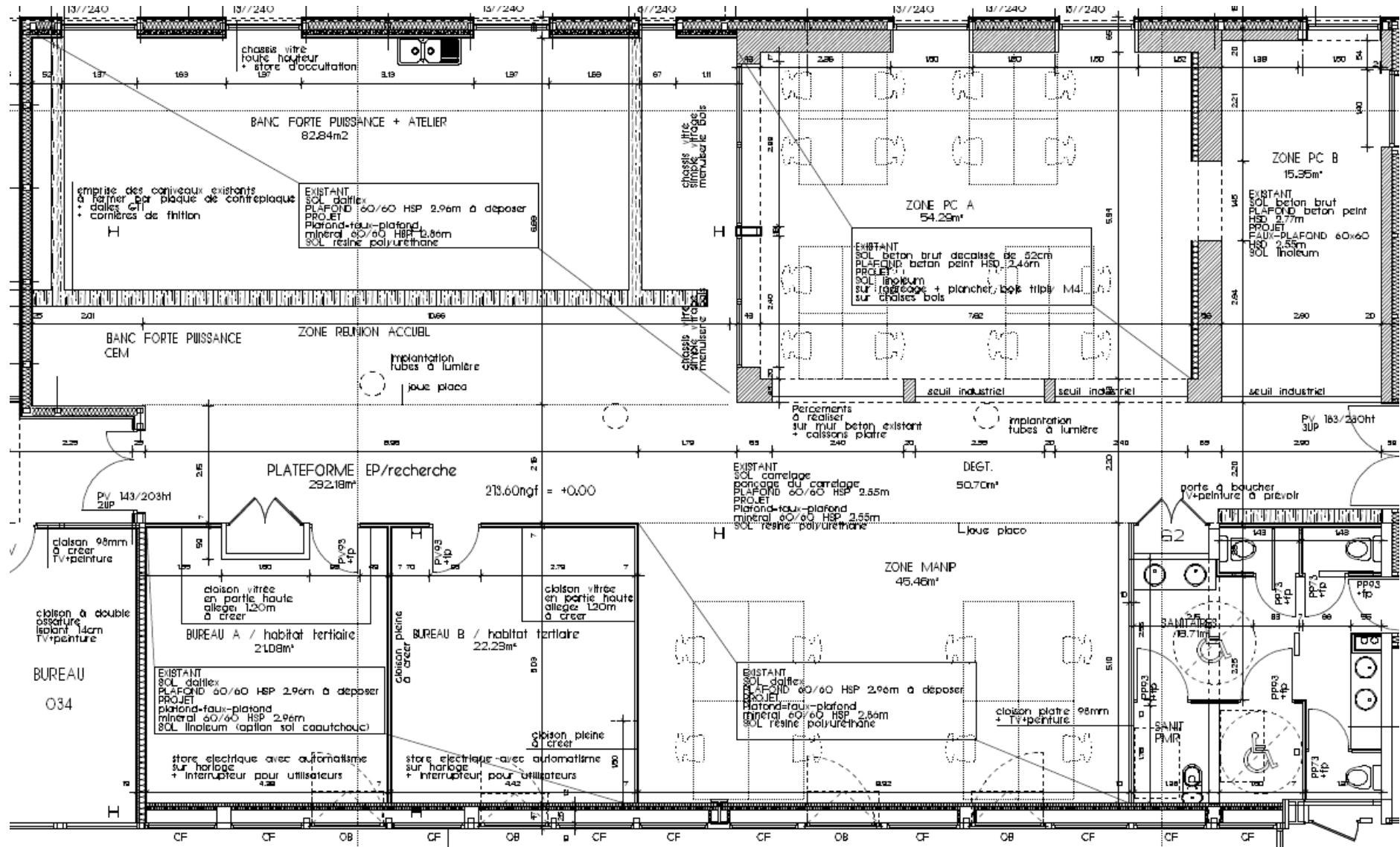
N° thème		Niveau de performance			
		Très performant	Performant	Base	Sans objet
Atelier 1: Relations harmonieuses du bâtiment avec son environnement immédiat		X			
1	Respect de ceux qui vont vivre avec le bâtiment		X		
2	Dialogue avec le site			X	
3	Conception des espaces plantés			X	
4	Droit des riverains		X		
5	Transports et déplacements urbains	X			
Atelier 2: Choix des techniques, procédés et matériaux de construction			X		
6	Choix des techniques, produits et matériaux		X		
7	Technique, produits, matériaux: économie d'énergie et de ressources, du berceau à la tombe		X		
8	Technique, produits, matériaux : risques sur la santé		X		
9	Techniques, produits, matériaux en œuvre: risque sur l'environnemental			X	
10	Adaptabilité du bâtiment			X	
41	Entretien, maintenance		X		
Atelier 3: Approche énergétique		X			
14	Economie d'énergie	X			
15	Isolation de l'enveloppe	X			
16	Solarisation du bâtiment		X		
17	Economie d'énergie pour le chauffage	X			
18	Economie d'énergie pour le rafraîchissement et la climatisation	X			
19	Economie d'énergie pour l'eau chaude sanitaire		X		
20	Economie d'énergie pour l'éclairage	X			
21	Economie d'énergie pour la ventilation		X		
22	Economie d'énergie pour l'électroménager		X		
23	Economie d'énergie pour les autres usages		X		
24	Energies renouvelables: énergie solaire		X		
25	Energies renouvelables: énergie éolienne				X
26	Energies renouvelables: bois énergie				X
27	Energies renouvelables: valorisation des déchets				X
28	Energies renouvelables: énergie hydraulique				X
29	Energies renouvelables: géothermique				X
30	Cogénération	X			

31	Couche d'ozone	X			
32	Pluies acides	X			
33	Effet de serre	X			
34	Déchets radioactifs	X			
Niveau de performance					
N° thème		Très performant	Performant	Base	Sans objet
Atelier 4: Gestion de l'eau					
36	Economie d'eau potable			X	X
36	Récupération des eaux de pluie		X		
37	Gestion eaux pluviales à la parcelle			X	
Atelier 5: Gestion des déchets et des effluents					
38	Systèmes d'assainissement innovants		X		X
39	Gestion des déchets ménagers				X
40	Gestion des déchets d'activité		X		
Atelier 6: Confort et santé à l'intérieur du bâtiment					
42	Confort thermique d'hiver		X		
43	Confort thermique d'été	X			
44	Confort acoustique	X			
45	Confort visuel	X			
46	Eclairage naturel		X		
47	Ventilation pour la qualité de l'air et le confort olfactif		X		
48	Confort et santé des occupants: risques chimique et biologiques		X		
49	Confort et santé des occupants: risques dus à la radioactivité et aux ondes électromagnétiques		X		
50	Qualité de l'eau			X	
Atelier 7: Organisation et déroulement d'un chantier à faibles nuisances					
11	Déconstruction et gestion des déchets de déconstruction		X		
12	Chantier: nuisances, pollutions, risques santé et environnement			X	
13	Chantier: déchets de chantier			X	

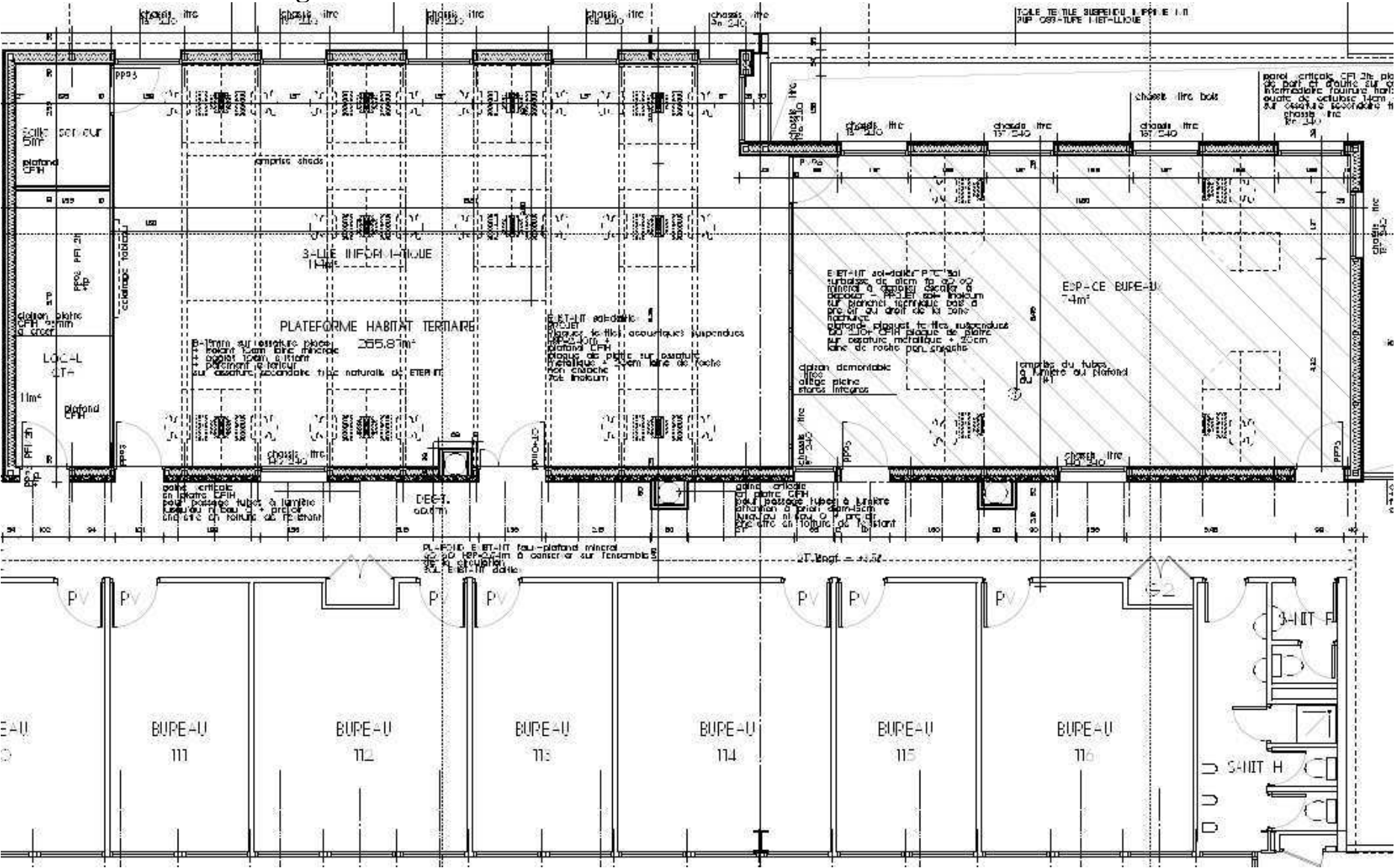
Annexe 3 : Apports internes et demandes spécifiques

	Nb postes	Fréquentation	Apport énergétique interne (kW élec)	Eclairage	Traitement acoustique	Air comprimé	Eau	Traitement électrostatique	Autres besoins
Plateforme « Electronique de puissance Formation »	14 postes formation	30 pers de début déc à mi juin	20 kW	400 à 500 lux par poste Eclairage par zone	Oui sur l'ensemble de la plateforme Des mesures de niveau sonore de l'existant vont être réalisées	Oui	Non	Non	Prises Ethernet isolées
Plateforme « Electronique et instrumentation associés »	16 postes formation 5 postes CMS	30 pers de début oct à fin mai	6,4 kW	1500 lux par poste CMS 800 lux par poste formation Eclairage par zone	Non	Oui	Oui	Réalisé au niveau des postes mais prise en compte globalement sur la plateforme	1 – Besoin d'une ventilation spécifique pour les fumées de soudage de la zone formation et des postes CMS 2 – Agencement de l'espace en 2 zones de cours
Plateforme « Image et Signal pour l'Energie et l'Environnement »	17 postes formation	30 pers de début oct à début juin	6 kW	400 à 500 lux par poste Eclairage par zone	Non	Non	Non	Non	Ventilation à dimensionner pour confort thermique d'été
Plateforme « Automatique, instrumentation et signaux »	27 postes formation	50 pers de début oct à début juin	30 kW	400 à 500 lux par poste Eclairage par zone	Oui pour la zone procédés thermiques	Oui	Oui	Non	
Espace associatif C'VELEC		Bureau : 5 pers Réunion 20 pers d'oct à juin pour les étudiants	Bureau : 1 kW Zone électronique : 2,5 kW Garage : 10 kW	Zone électronique : 800 lux par poste	Non	Non	Oui	Non	1 – Garage : hauteur sous plafond = 4,50 m 2- Ventilation et confort thermique d'été et d'hiver pour l'étage
Plateforme « Usages de l'énergie »	10 postes	25 pers	5kW élect	400 à 500 lux par poste Eclairage par zone	Non	Oui	Oui	Non	

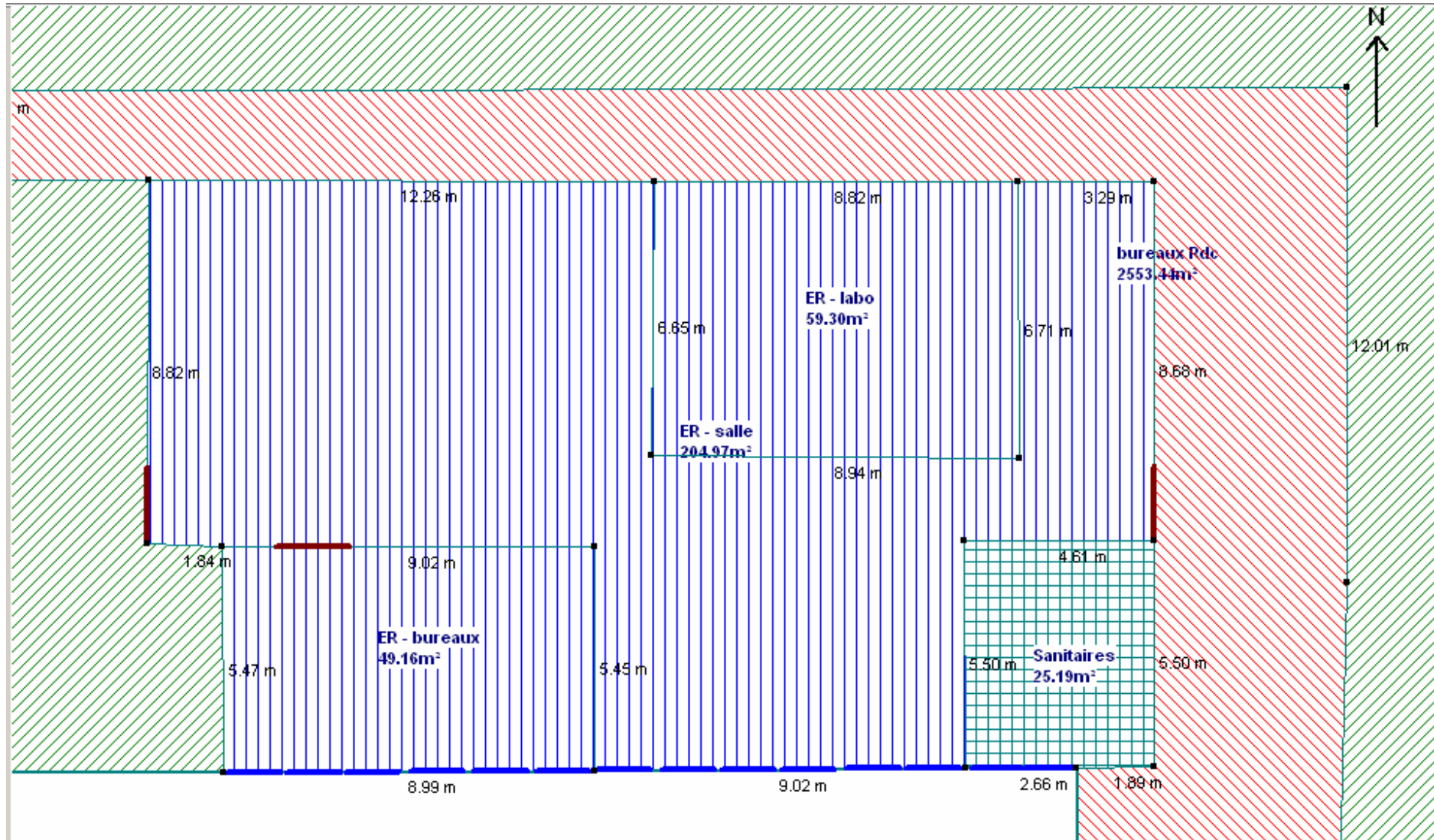
Annexe 4 : Plan architectural Rez-de-chaussée



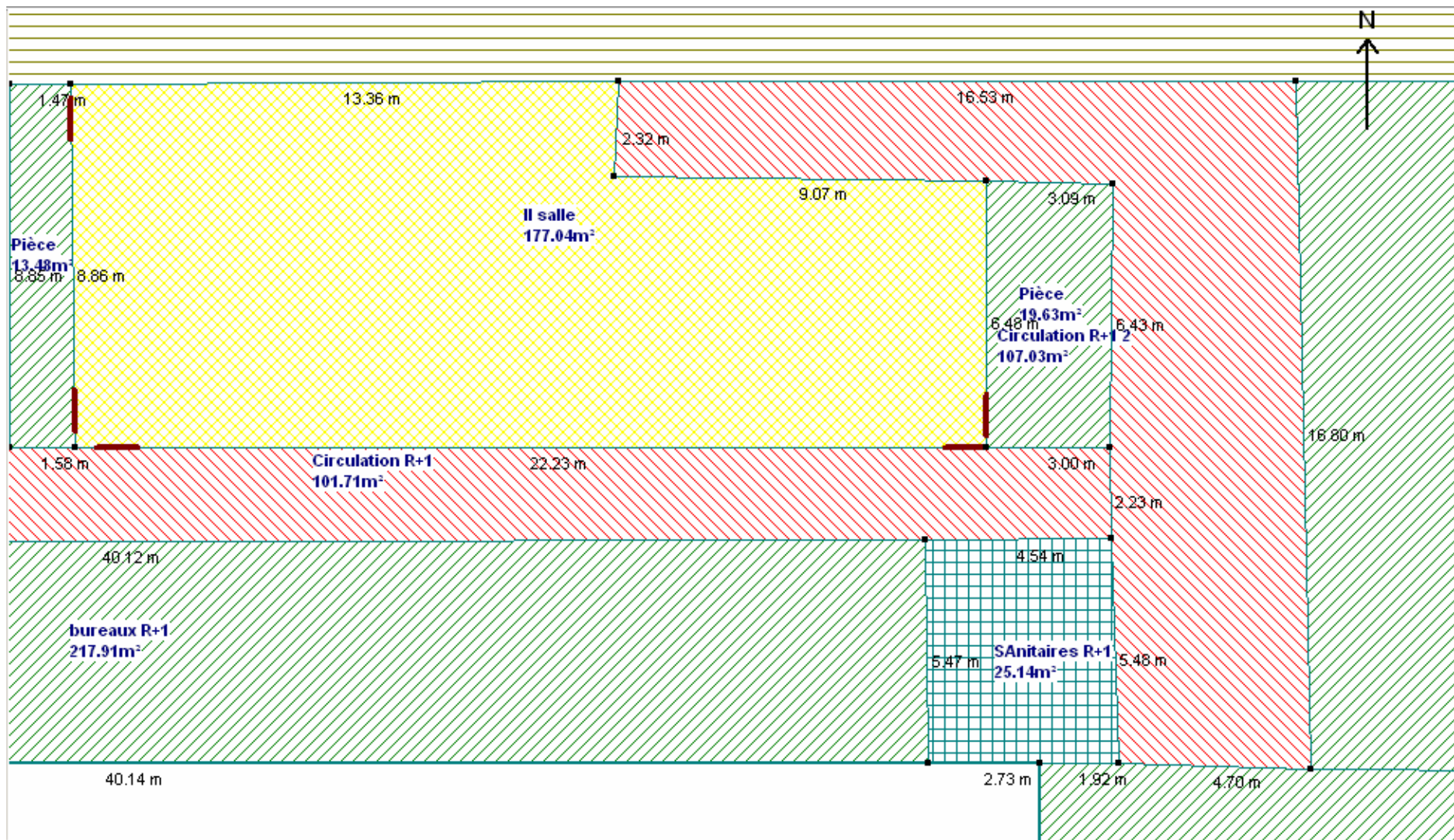
Plan architectural 1^{er} étage



Annexe 5 : Modèle Architectural COMFIE Pleiades de la Plateforme PREDIS MHI- Rez-de chaussée



Modèle Architectural COMFIE Pleiades de la Plateforme PREDIS MHI- 1^{er} étage



Annexe 6 : Schéma de Principe Ventilation Rez-de-chaussée

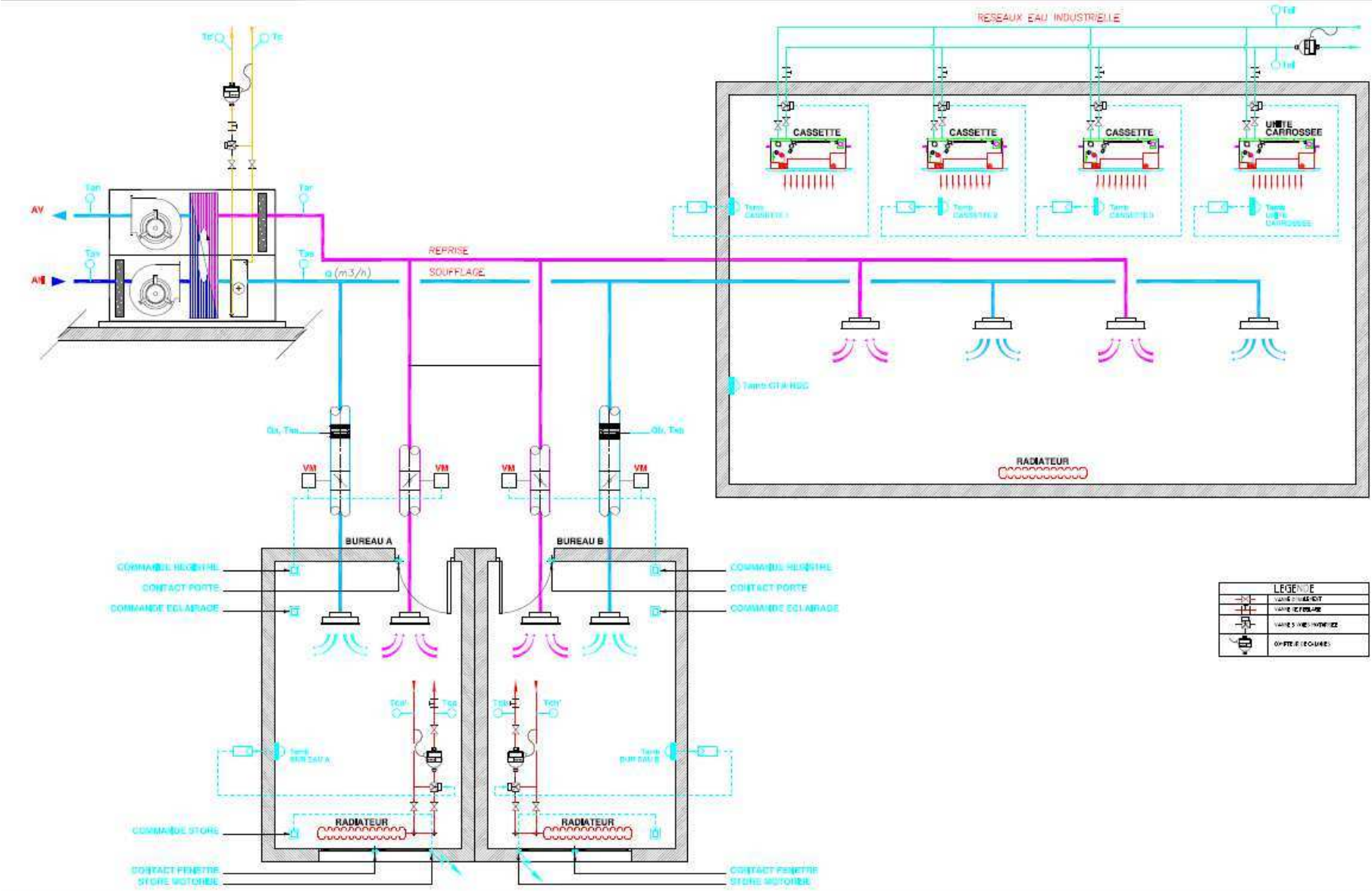
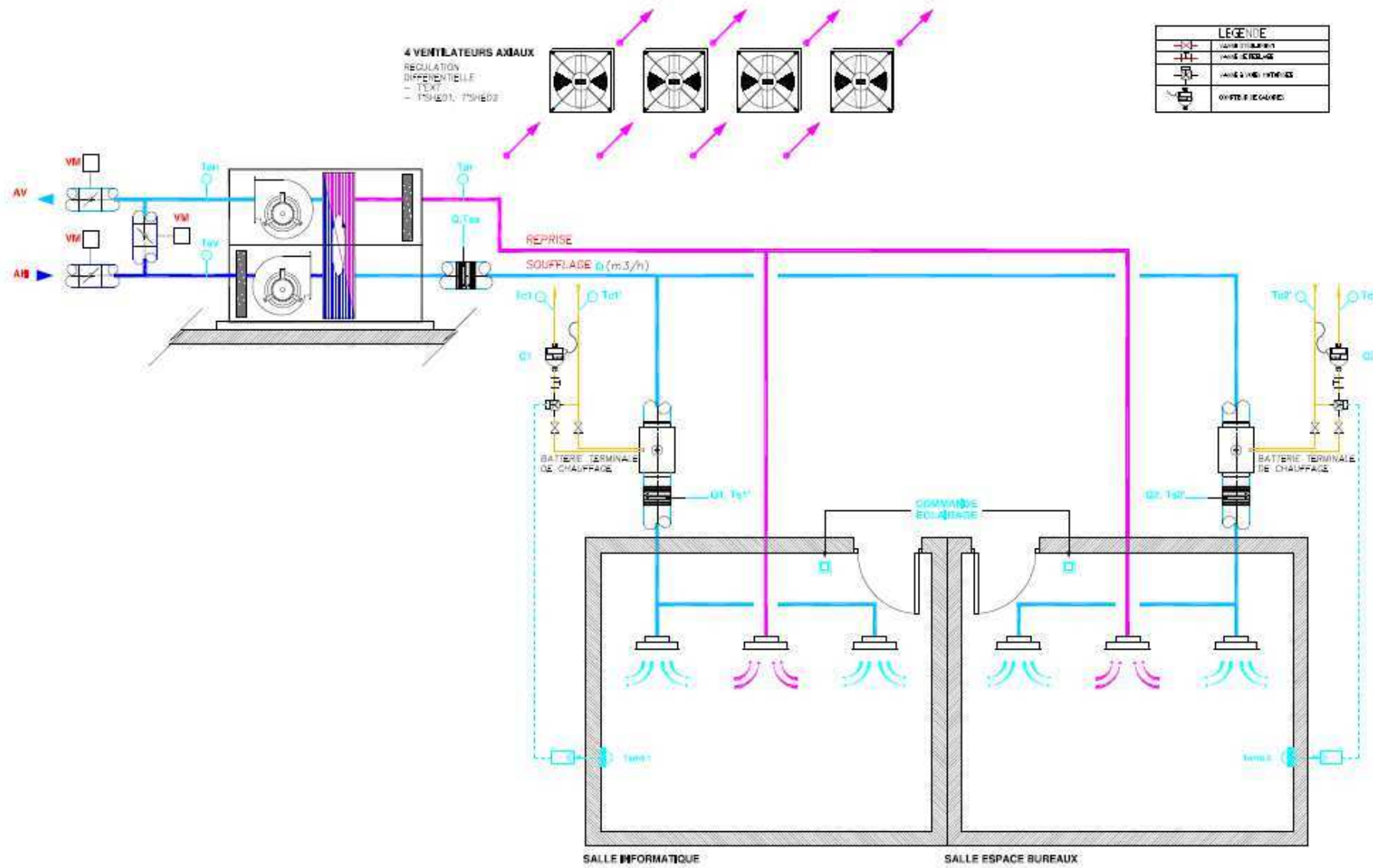
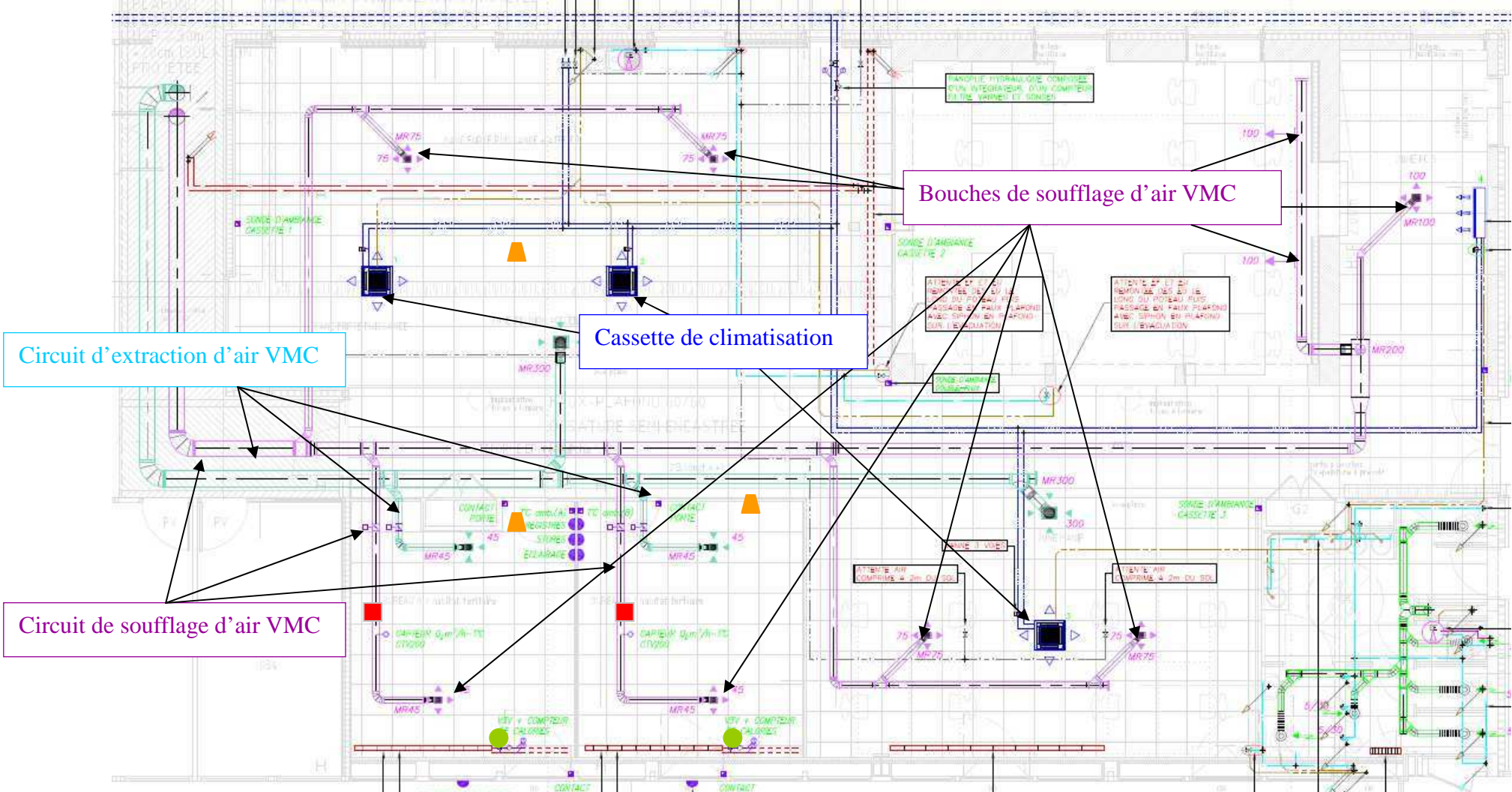


Schéma de Principe Ventilation 1^{er} étage



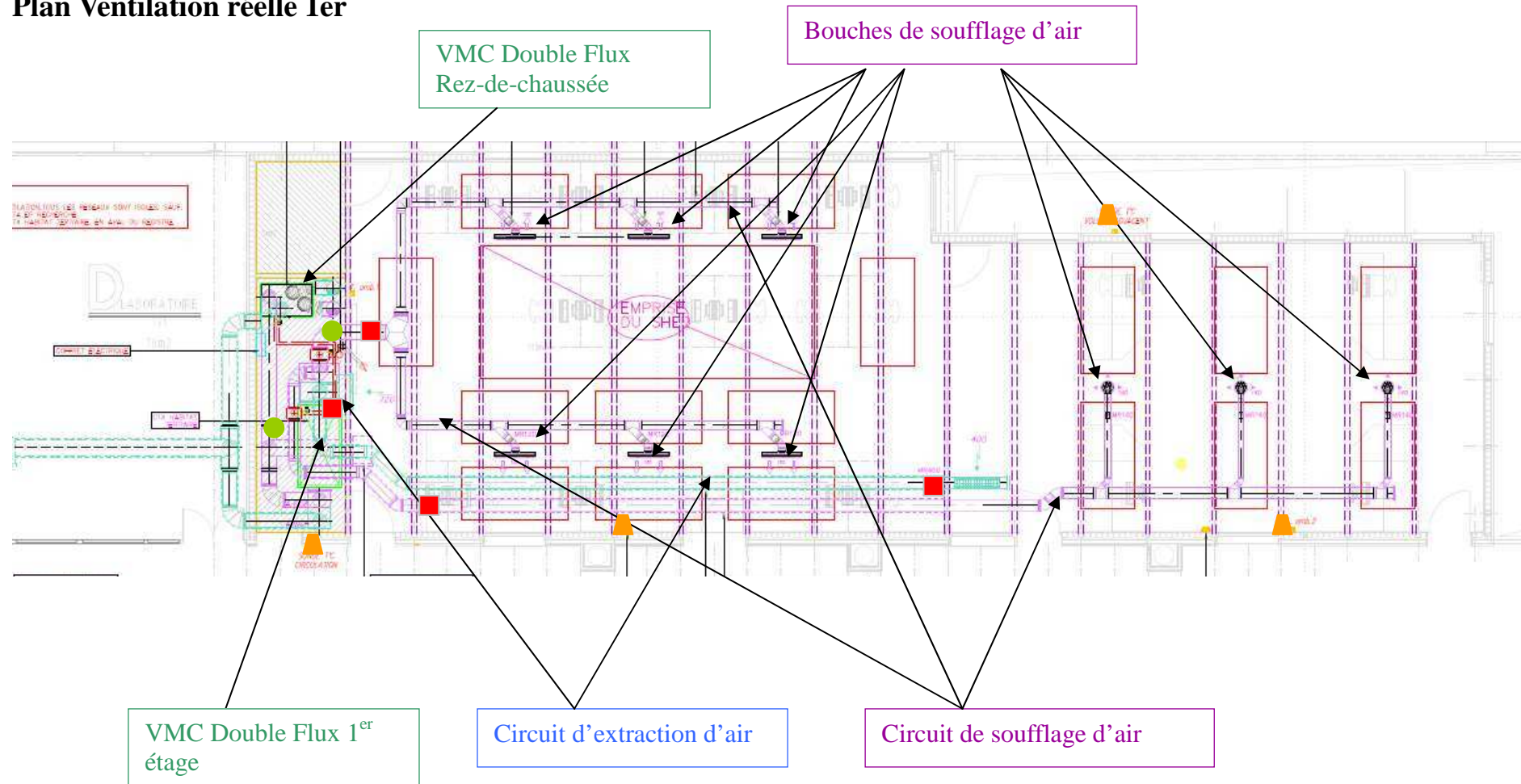
Annexe 7 : Plan Ventilation réelle Rez-de-chaussée



- Liste des capteurs :
- | | |
|------------------------------------|-----------------------------|
| Sonde de température d'air ambiant | Calorimètre |
| Sonde de débit d'air | Contacts Fenêtres et Portes |

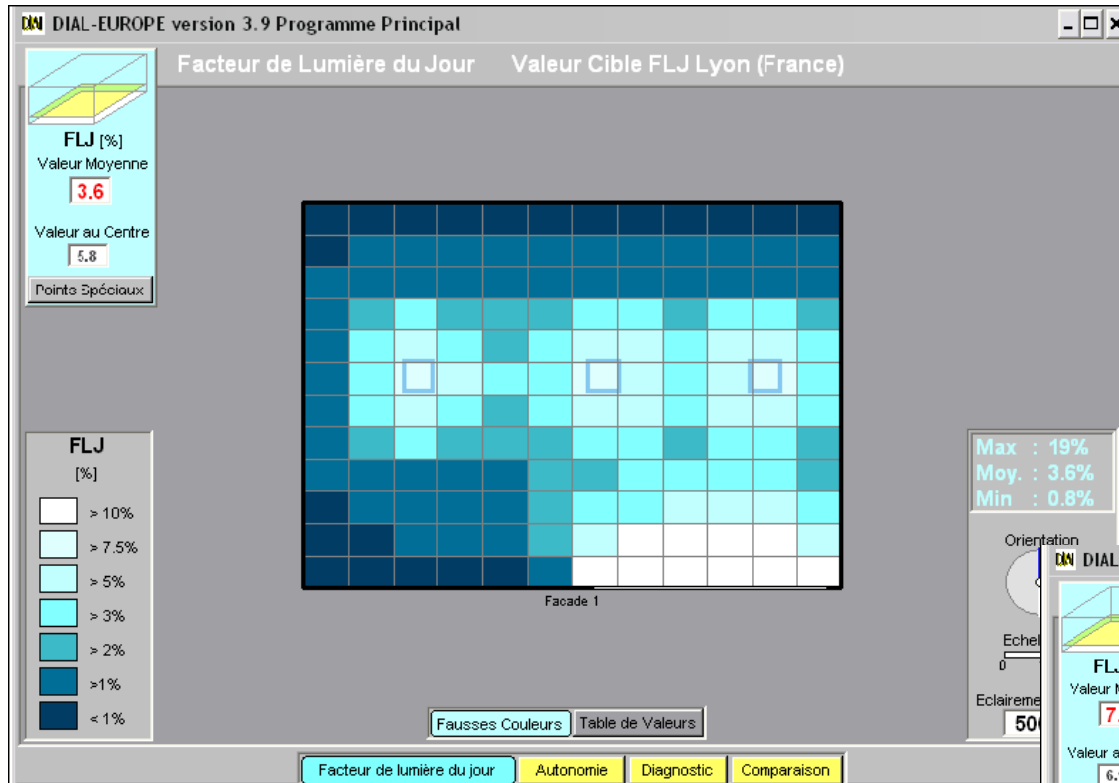


Plan Ventilation réelle 1er



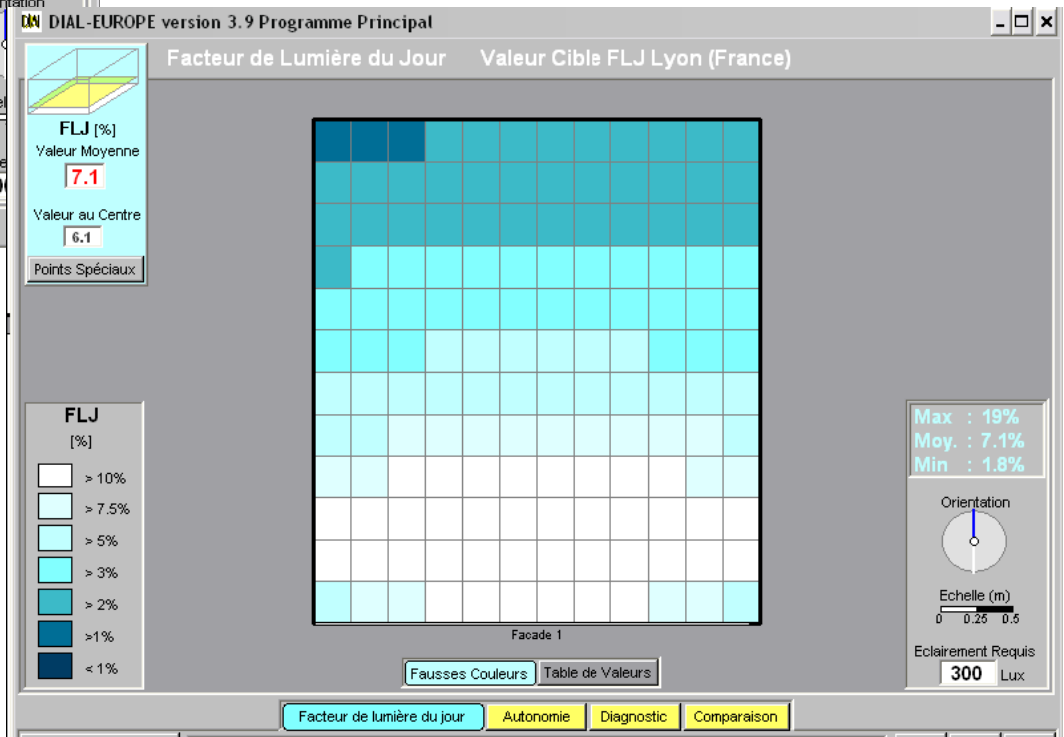
- Liste des capteurs :
- ▲ Sonde de température d'air ambiant
 - Sonde de débit d'air
 - Calorimètre

Annexe 8 : Etude Facteur de lumière du Jour Plateforme EP Recherche

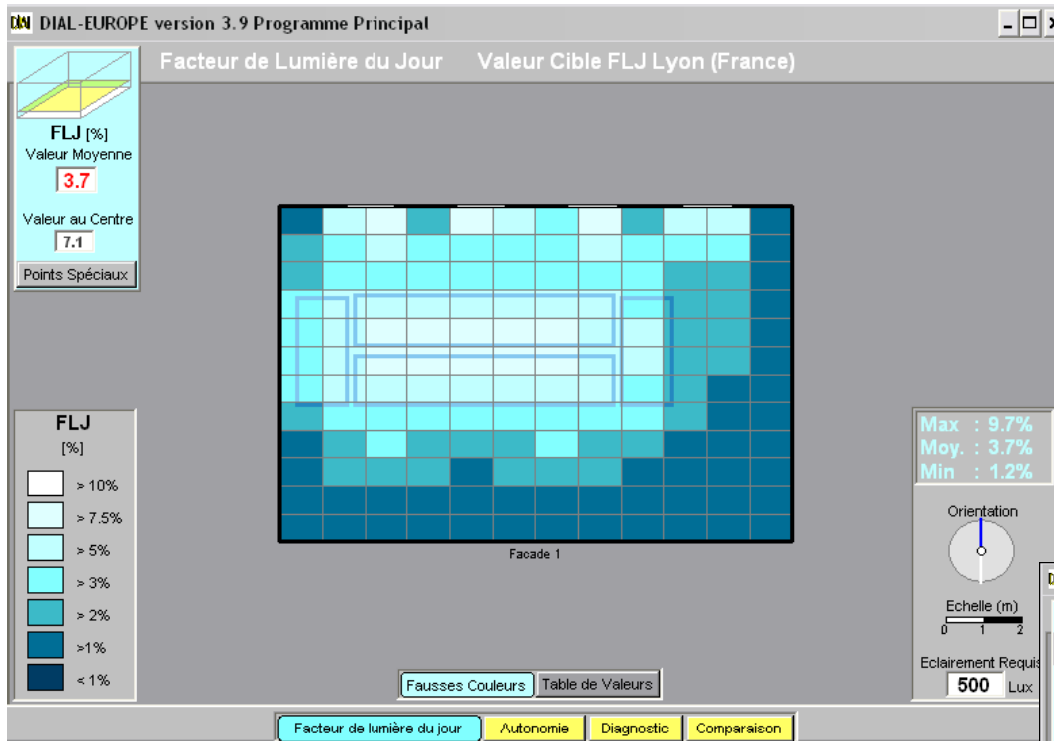


Zone TP

Bureaux Rez-de-chaussée

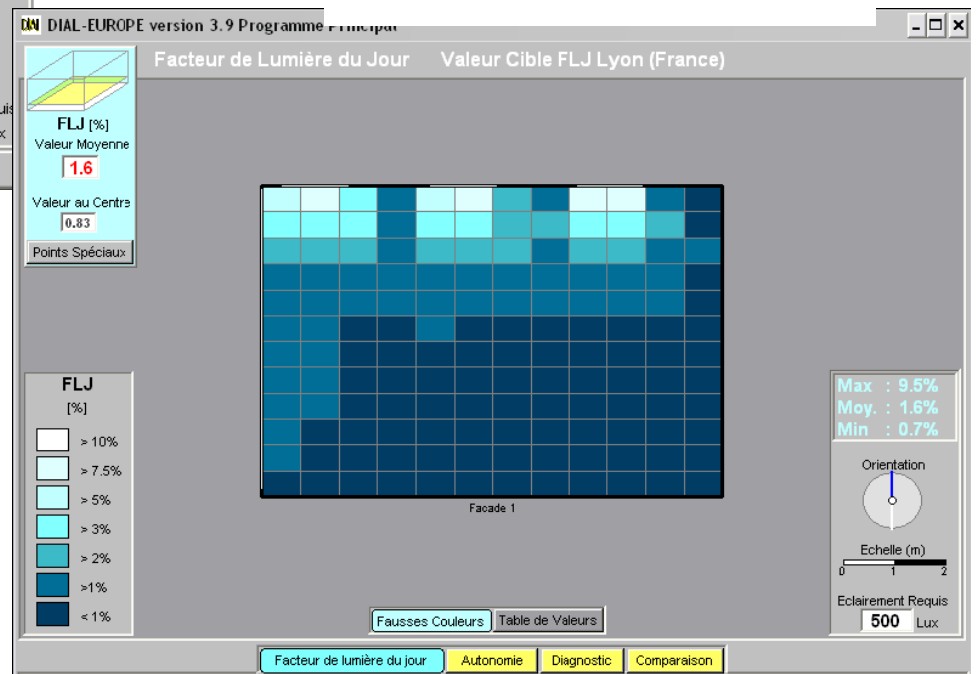


Etude Facteur de lumière du Jour Plateforme Informatique Industrielle

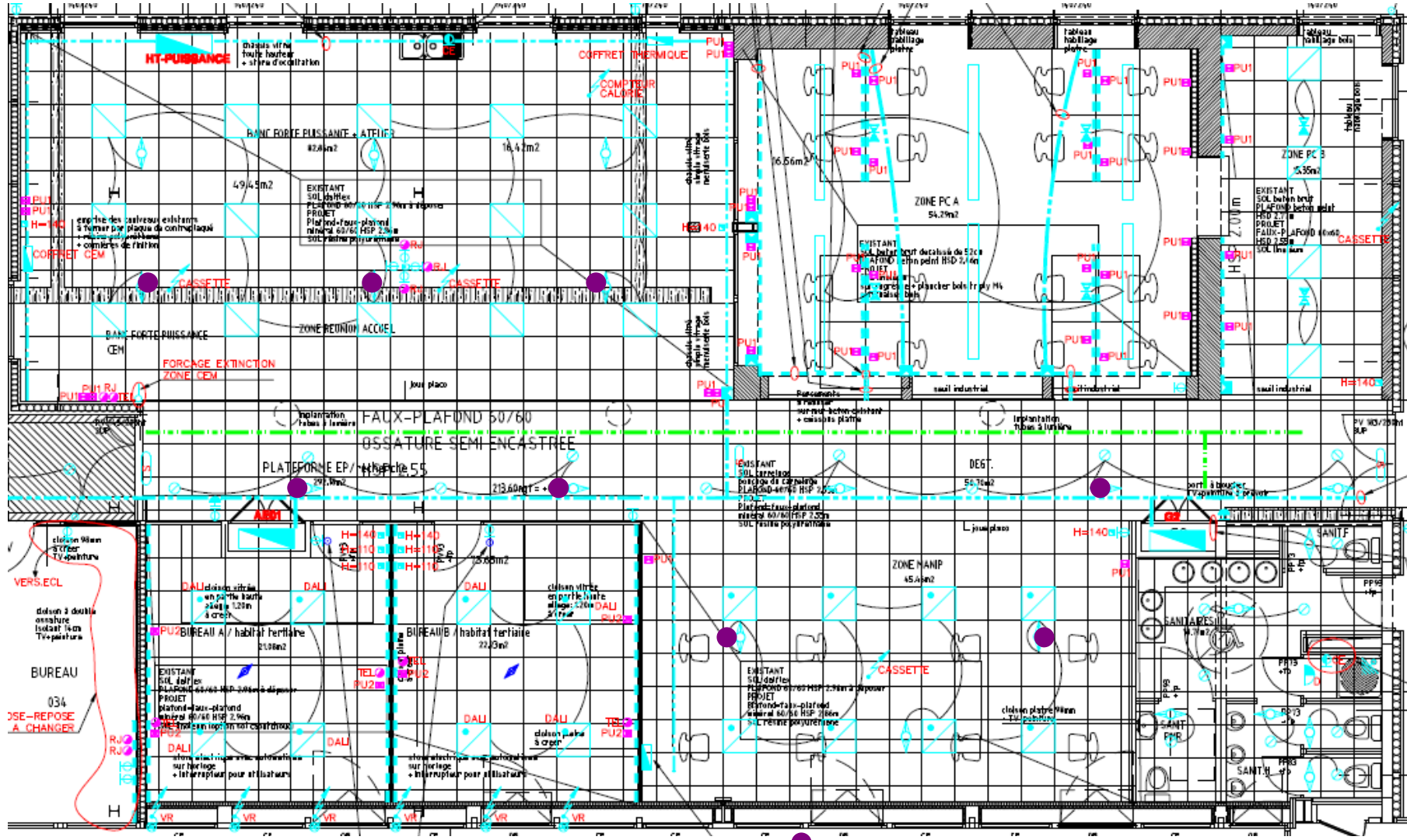






Salle Informatique Ecole

Espace Bureau /Projet collectif

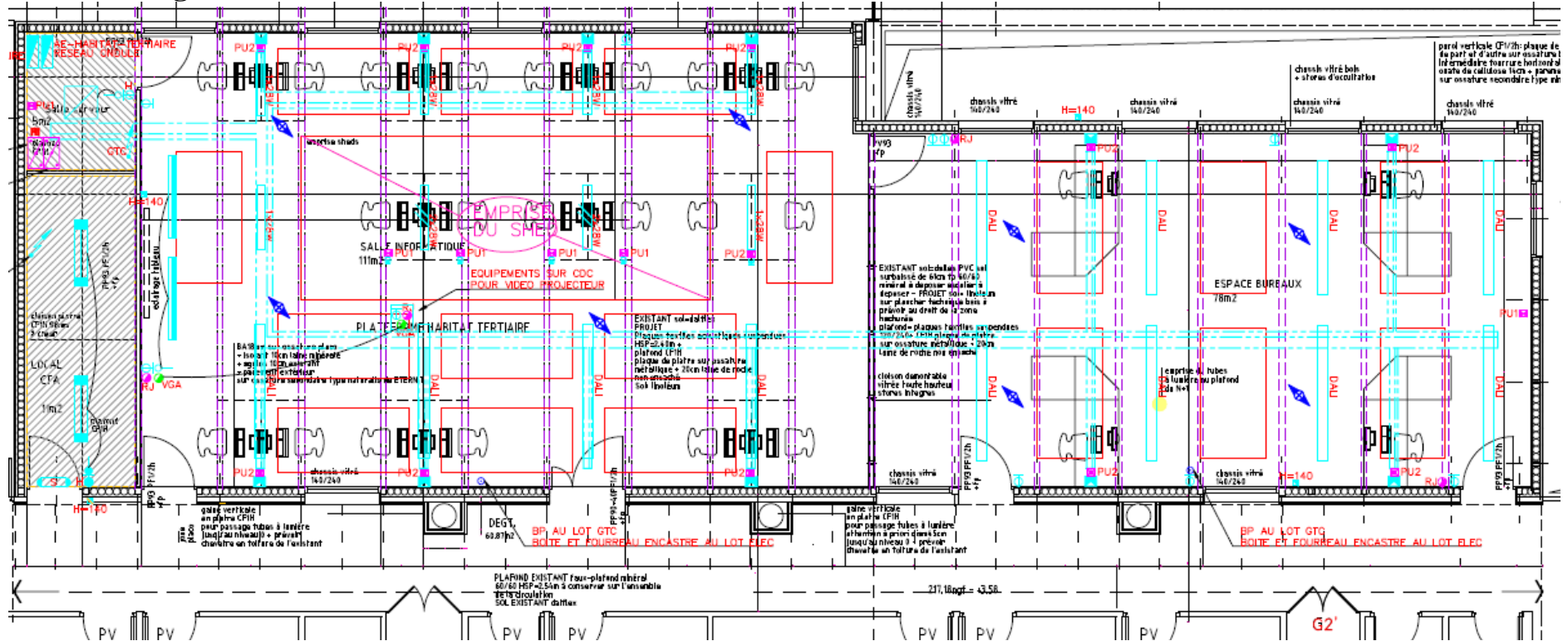





Annexe 9 : Plan éclairage Rez-de-chaussée



-  Détecteur Multicapteur (présence et luminosité)
-  Détecteur de mouvement
-  Luminaire encastré fluorescent 3*14W
-  Plafonnier Fluorescent 1*28W

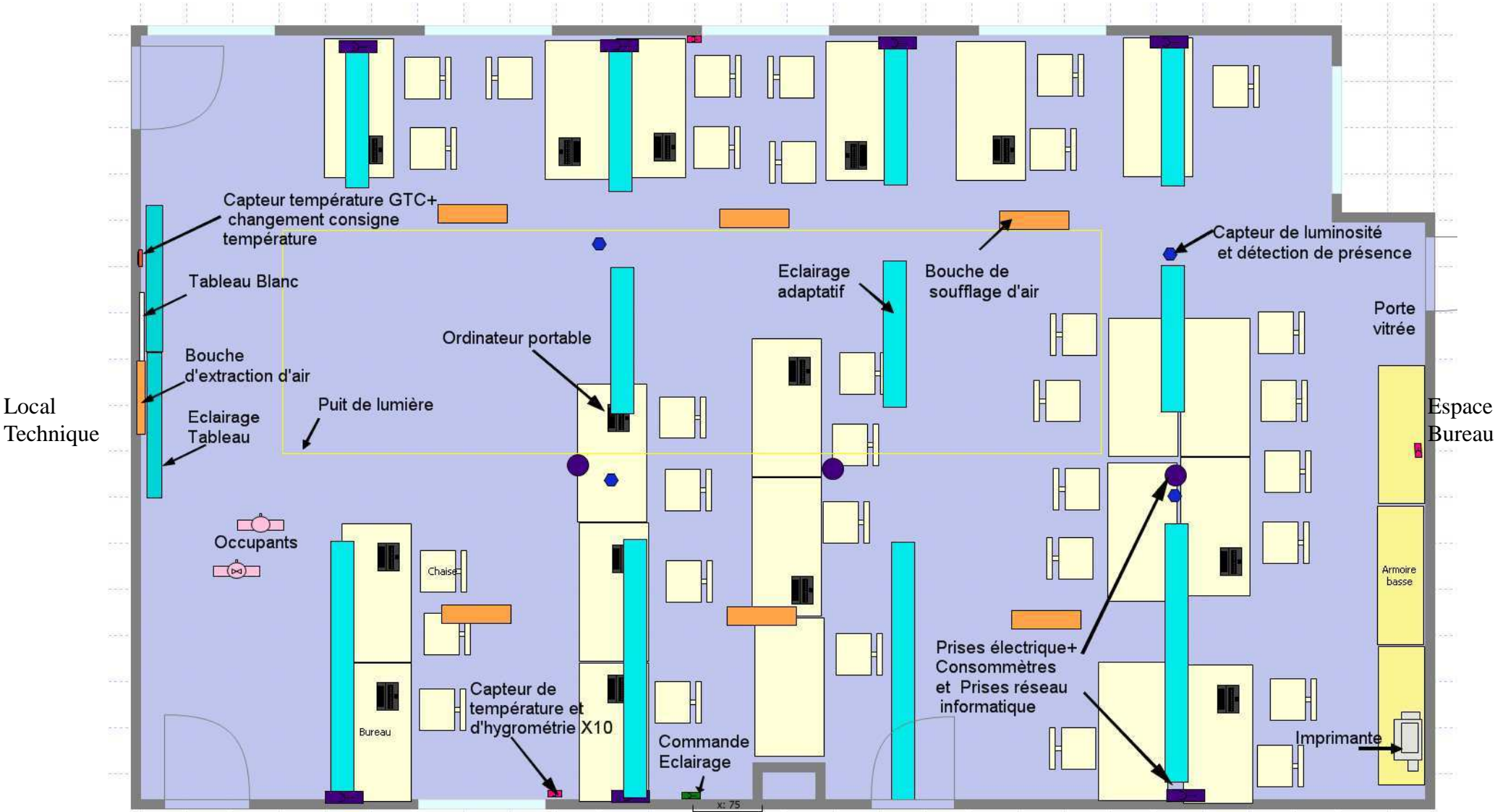
Plan Eclairage 1er



-  Détecteur Multicapteur (présence et luminosité)
-  Luminaire encastré fluorescent 3*14W
-  Plafonnier Fluorescent 1*28W

Annexe 10 : Plan d'aménagement et de placement des capteurs Salle Informatique

Vide



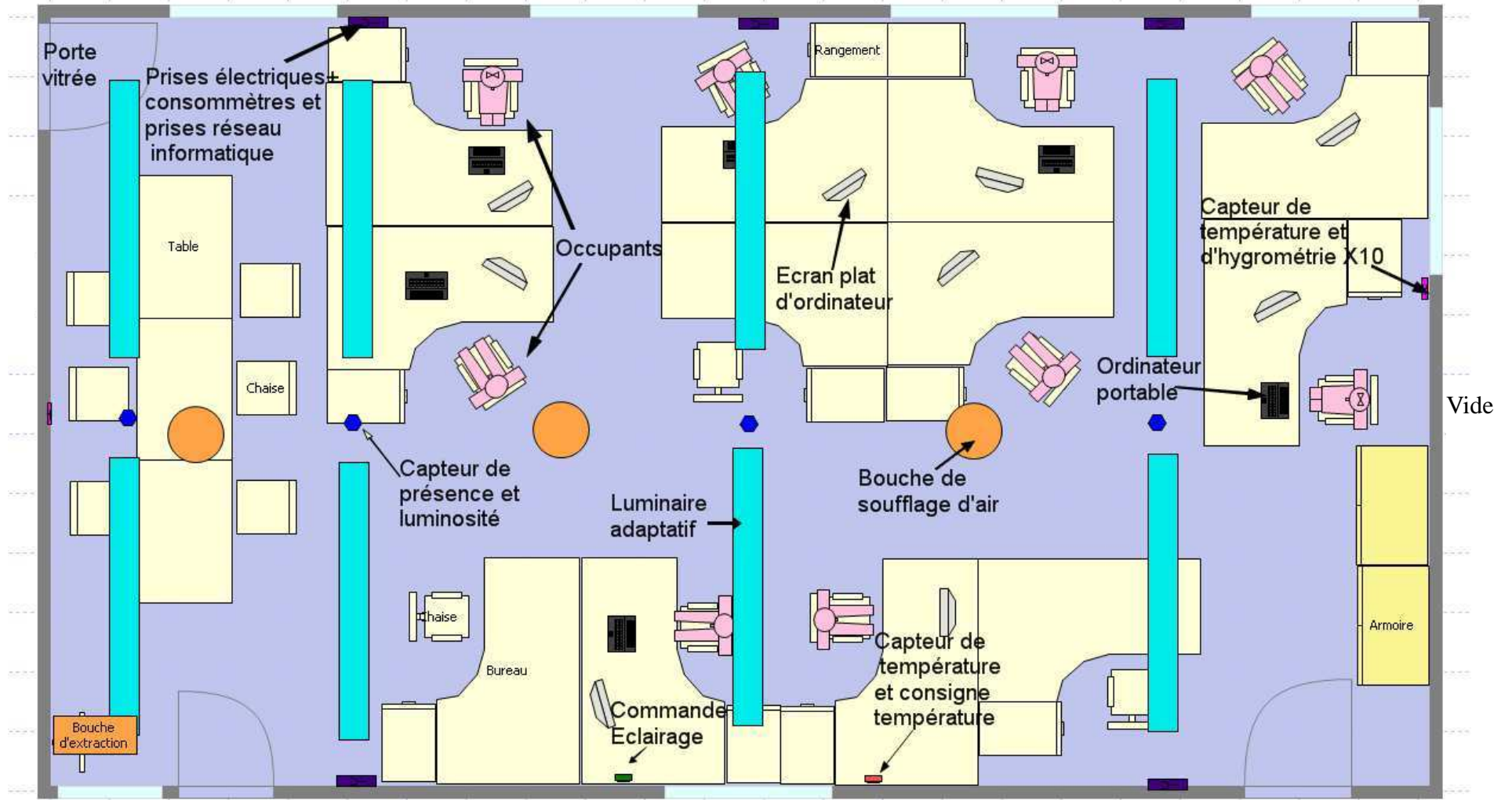
Projet: Salle Informatique2.rap (1391x828 cm), créé: 17.1.2011

Couloir

Plan d'aménagement et capteurs Espace Bureau

Vide

Salle Informatique

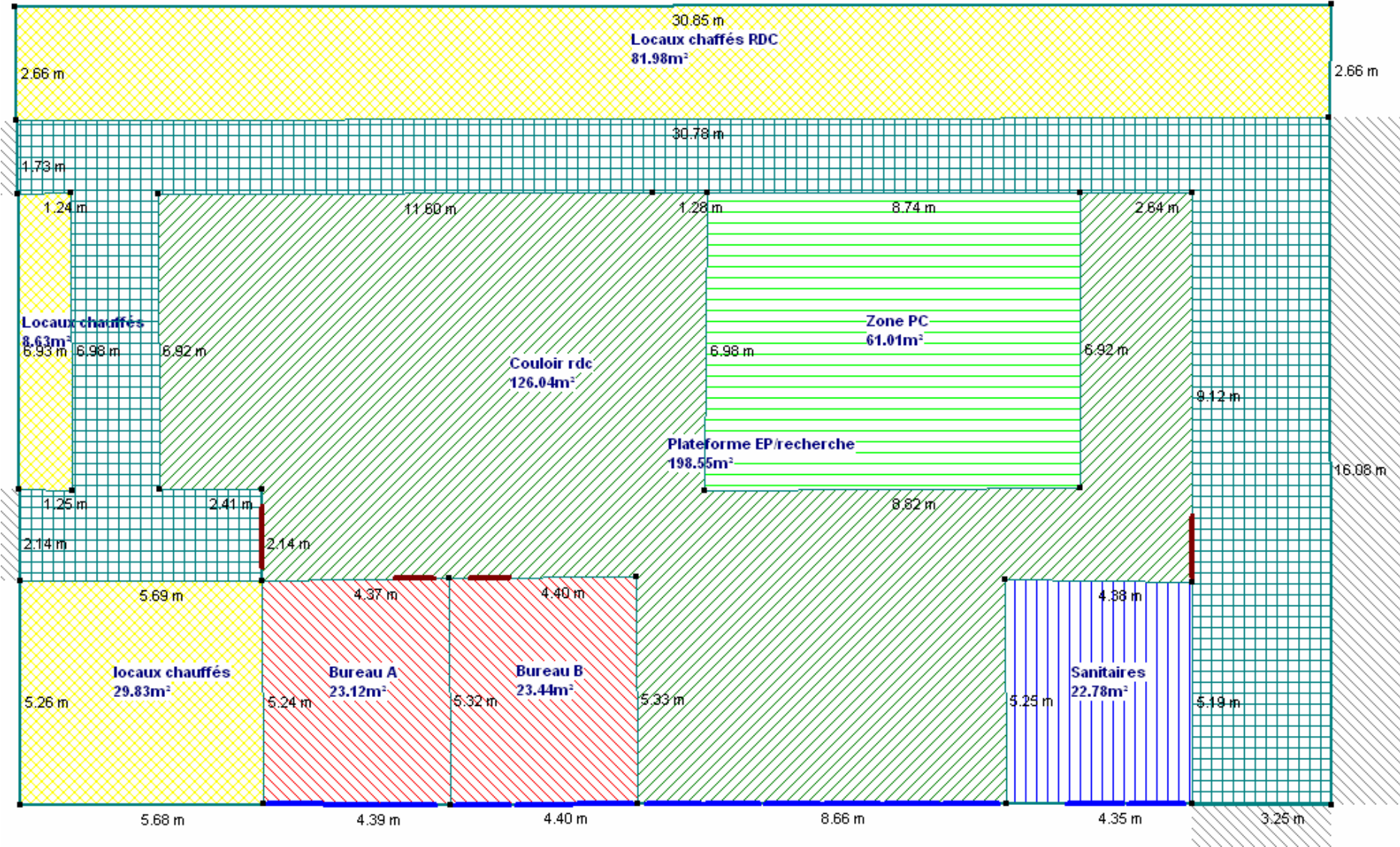


Vide

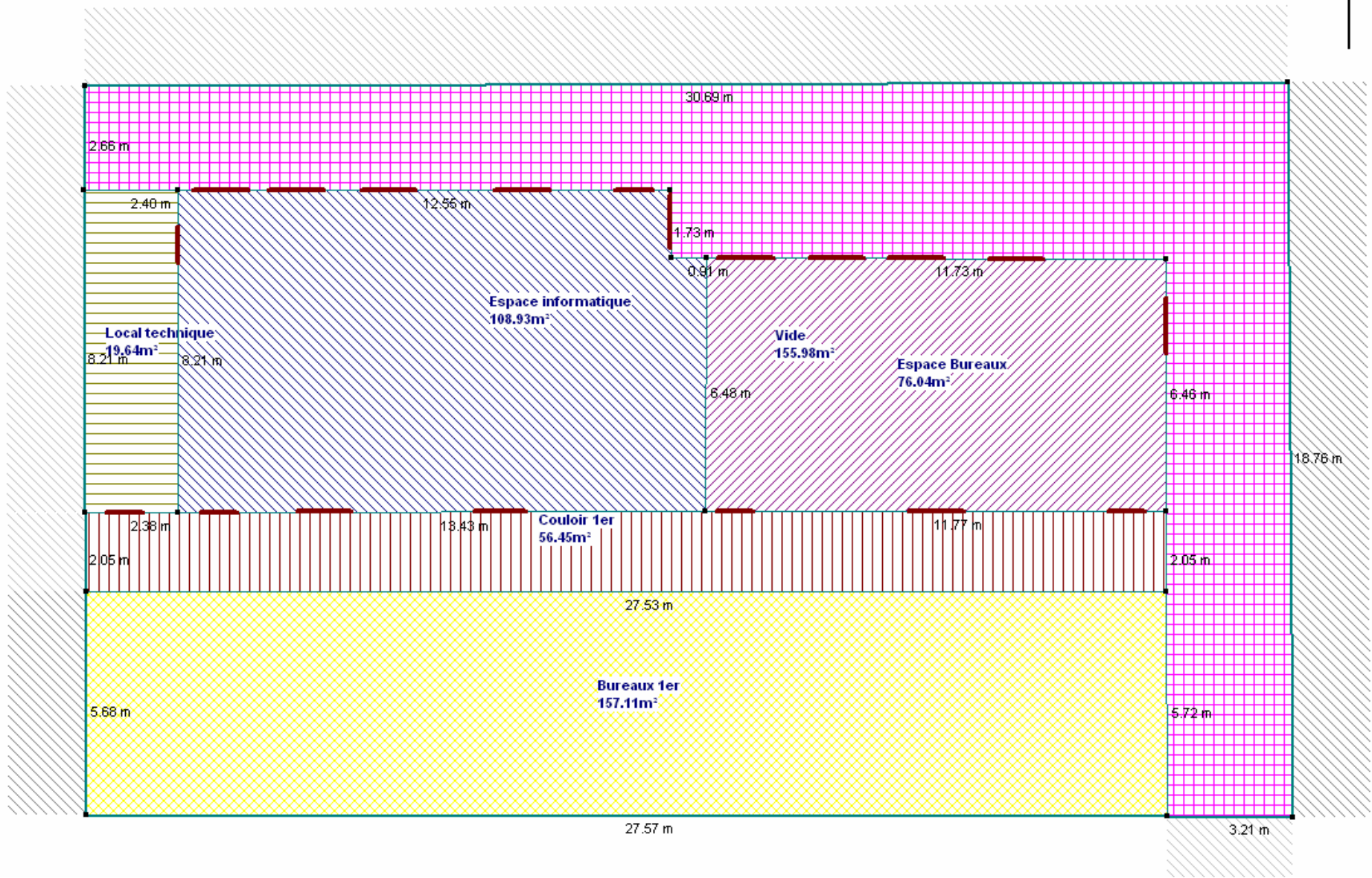
Projet: Espace Bureau.rap (1160x646 cm), créé: 17.1.2011

Couloir

Annexe 11 : Modèle Thermique Etude PREDIS MHI : Rez-de-chaussée



Modèle Thermique Etude PREDIS MHI : 1^{er} étage



Annexe 12 Processus de conception et description de la Plateforme MHI

12.1 Démarche HQE de la Conception du bâtiment

La conception de la Plateforme PREDIS MHI a fait l'objet d'un processus particulier compte tenu des vocations auxquelles elle a à répondre. Ainsi, une volonté forte de concevoir un bâtiment ayant un rapport optimal avec l'environnement (naturel et humain) s'est traduite par le recours à une démarche Haute Qualité Environnementale [HQE, 2010] le long du projet de conception qui permet de mettre en oeuvre les différents acteurs de la conception d'un bâtiment autour d'une problématique environnementale (figure 69).

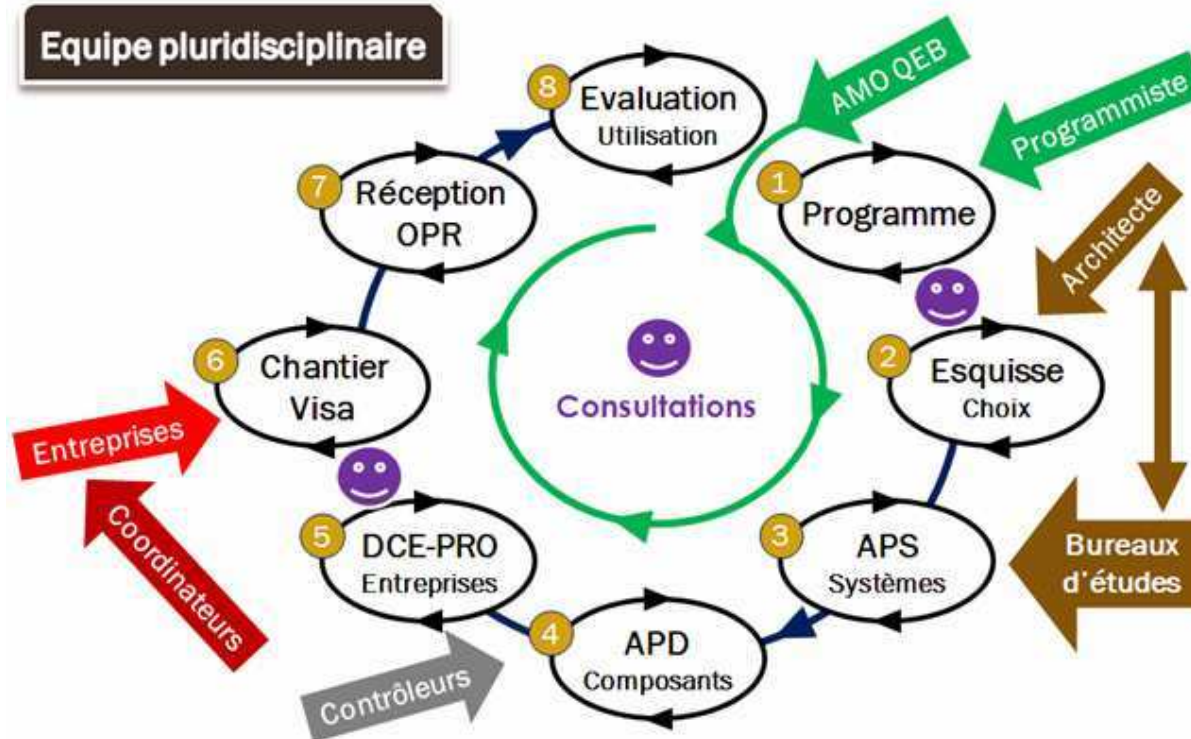


Figure 69 : Processus de conception intégrant une méthode de Qualité environnementale des bâtiments (QEB) [BOUR, 2010]

Ce processus de conception permet de réunir ainsi les différents acteurs de la maîtrise d'œuvre autour d'un cahier des charges dictant un certain nombre de préconisations. Les préconisations HQE qui sont de l'ordre de l'informel plutôt que du chiffrage/du dimensionnement, s'affèrent à donner des pistes de travail pour les différents domaines étudiés (annexe 1).

12.2 Description du Système Bâtiment « Plateforme PREDIS MHI »

Le bâtiment qui a été livré suite à la phase de conception est un espace conçu pour être énergétiquement efficace. On regroupera ici les composantes du système bâtiment, en fonction de leurs contrôlabilités et relativement aux métiers concernés lors de la conception, en trois grandes familles : l'enveloppe (architecture), les système énergétiques actifs et les occupants.

12.2.1 Architecture et descriptions des pièces

La partie du bâtiment qui a été restructurée (rénovation), renommé pour le projet d'étude Plateforme Habitat Tertiaire, a dû s'ajuster avec les caractéristiques présentes du bâtiment rénové. Le concept de « bâtiment dans le bâtiment » a été choisi afin de s'isoler des conditions extérieures aux parois et d'éviter des travaux lourds de rénovation.

Définition des pièces :

L'ensemble rénové Habitat Tertiaire est composé de deux étages

Au rez-de-chaussée (Plateforme « EP Recherche ») se situent des bureaux de recherche ainsi qu'un espace d'expérimentation en génie électrique (Electronique de Puissance):

Au premier étage (Plateforme MHI« Monitoring et Habitat Intelligent », on retrouve la Salle Informatique qui est une salle de cours et espace informatique pour l'école d'ingénieur voisin ; l'Espace Bureau en libre service qui est un open space de 12 bureaux et le local technique des systèmes énergétiques.

Dans nos travaux, nous nous sommes attaché plus spécifiquement à l'étude de l'usage dans les salles « Salle Informatique » et « Espace Bureau ». Ce choix s'explique par le fait qu'elles représentent de façon représentative, les usages dans des bâtiments de type bureau (pour l'Espace Bureau) et de type enseignement (pour la Salle Informatique).

On peut retrouver les plans architecturaux de ce projet en Annexe 4.

12.2.2 Gestion Technique Centralisée et Systèmes énergétiques

Le système bâtiment de la plateforme Habitat Tertiaire, et plus particulièrement MHI, est composé de différents sous systèmes énergétiques pilotés pour la plupart par un système de gestion technique centralisé (GTC)

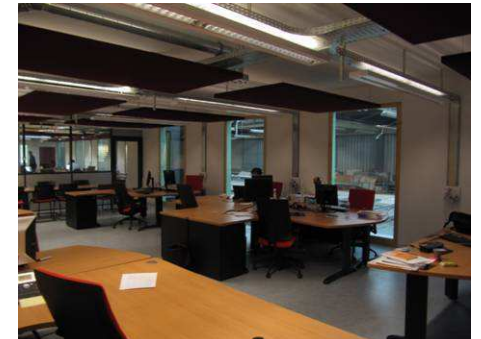


Photo 1 : Espace Bureau
Plateforme PREDIS MHI

12.2.2.1 Gestion Technique Centralisée et Instrumentation Sans Fil

La GTC qui est installée a davantage un rôle de supervision dans le sens où elle remonte les informations fournies par les différents capteurs (capteurs de débits d'air, de température, de consommation d'énergie (1 impulsion par kWh) des différents départs électriques : prises électriques et éclairage commun), capteurs de contacts de portes/fenêtres et position de stores) et gère également en fonction de cela le contrôle/commande des systèmes de ventilation et de chauffage car ces deux fonctions sont réalisées conjointement par une VMC (Ventilation Mécanique Contrôlée) Double Flux ; ainsi que la gestion des stores et de l'éclairage artificiel.

Toute cette supervision est gérée par un logiciel de supervision (InTouch) qui dialogue avec les différents actionneurs et capteurs au travers de protocoles de communication comme Modbus ou LonWorks. Cette supervision est installée sur un ordinateur ordinaire permettant le stockage des données.

12.2.2.2 Chauffage et refroidissement

12.2.2.2.a Chauffage

Le système de chauffage est réalisé de deux manières : soit au travers d'une Ventilation Mécanique Contrôlée (VMC) Double Flux (Plateforme MHI) soit par des radiateurs d'appoints (Rez-de-chaussée). La VMC Double flux (figure 70) est une technologie de ventilation où on récupère les calories de l'air intérieur renouvelé pour réchauffer l'air neuf soufflé dans la pièce au travers d'un échangeur rotatif réduisant ainsi la demande énergétique de chauffage (figure 70). En période d'hiver, cet air neuf préchauffé par l'échangeur rotatif de la VMC passe au travers d'une batterie chaude (convertisseur de chaleur eau-air avec de l'eau provenant du circuit d'eau chaude industrielle du bâtiment, dont la production est réalisée au moyen d'une chaudière fioul que l'on ne considérera pas dans notre étude) afin de pouvoir atteindre au final la température souhaitée.

La régulation de la VMC est effectuée par la GTC et la seule action possible pour les occupants est le changement de consigne de +/- 3°C au travers d'un gradateur afin d'atteindre le confort thermique souhaité.

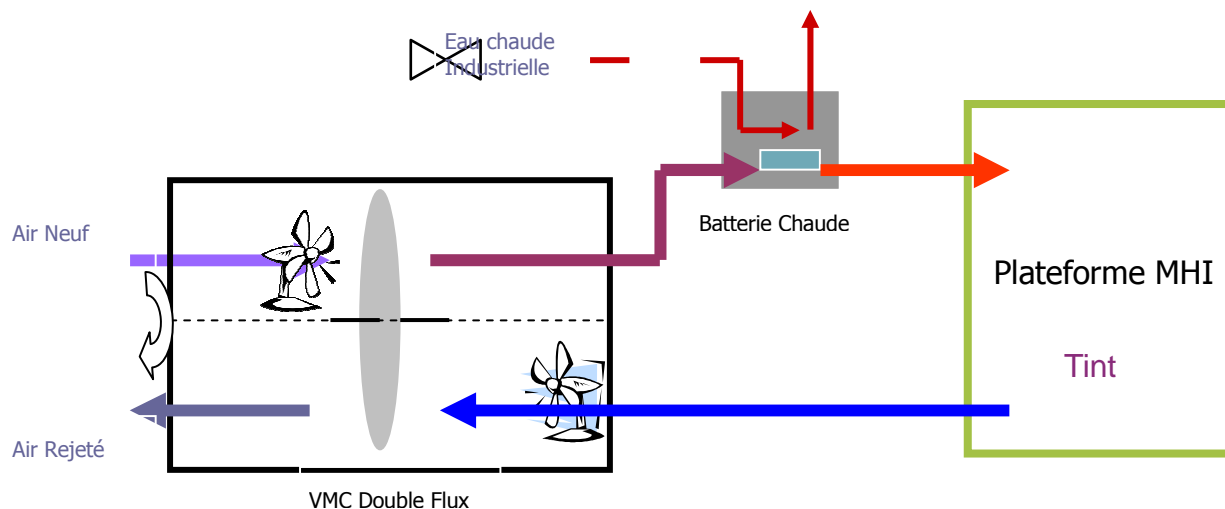


Figure 70 : Fonctionnement de la VMC en Mode chauffage ou Normal (sans batterie chaude)

12.2.2.2b Refroidissement

Ce bâtiment dispose d'un système de climatisation (Rez-de-chaussée) ainsi que d'un système de rafraîchissement de type freecooling effectué par la VMC Double Flux (1^{er} étage). Ce mode de fonctionnement de la VMC double flux (figure 71) permet de surventiler les pièces durant la nuit (en augmentant de 1,5 fois le débit nominal), profitant de l'air plus frais de la nuit, pour rafraîchir le bâtiment. Durant la journée, la ventilation en interne et l'inertie du bâtiment doivent normalement permettre de conserver une température de confort acceptable. Dans ce cas-là, il n'y a donc plus d'échange thermique au niveau de l'échangeur rotatif.

La régulation de débit d'air pour le freecooling est réalisée par la GTC et les occupants n'ont pas de possibilité d'action sur le système de ventilation dans ce mode-là.

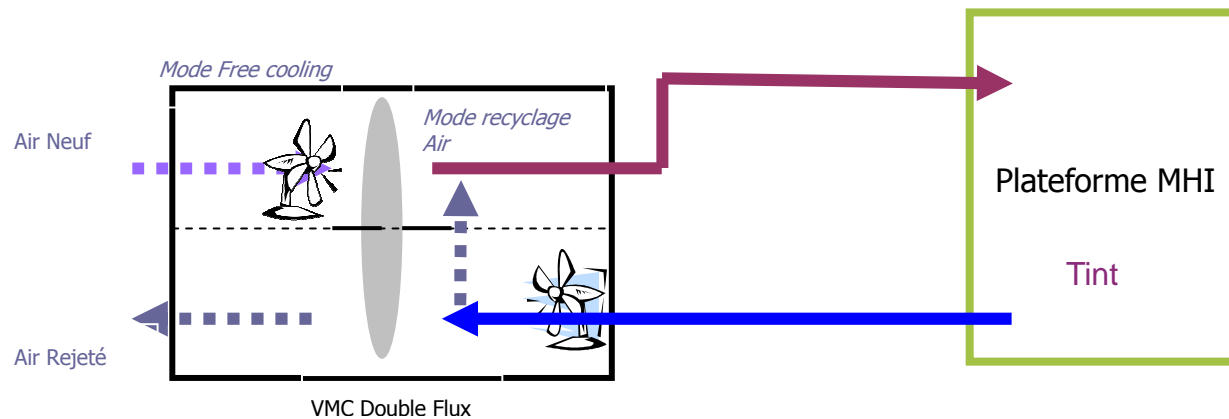


Figure 71 : Fonctionnement de la VMC en Mode Freecooling

12.2.2.3 Ventilation

La ventilation est assurée par la VMC double flux au travers de circuits de soufflage présentés en annexe 6. Les occupants n'ont pas de contrôle direct sur le système de ventilation.

La seule régulation qui est effectuée sur le débit d'air concerne la régulation de température par rapport à la consigne programmée. D'autre part, il existe seulement deux plages de fonctionnement : période d'occupation de l'immeuble de 7h à 12h et de 13h à 19h durant lesquels la ventilation fonctionne et est éteinte en dehors de ces plages de fonctionnement. Un tel réglage a été préprogrammé au niveau de la GTC et seuls les gestionnaires du bâtiment peuvent le modifier le cas échéant.

12.2.2.4 Eclairage

Le choix des luminaires s'est porté sur des tubes fluorescents, étant, à l'époque de l'installation, le type d'éclairage artificiel collectif des plus performants. Des tubes de lumières ont également été installés au niveau de la zone de passage afin de pouvoir ramener la luminosité naturelle du toit vers le rez-de-chaussée.

Dans les bureaux A et B du rez-de-chaussée, des stores automatisés ont été installés. Ils sont automatisés par le niveau d'éclairage extérieur permettant de se baisser plus ou moins en fonction du niveau de luminosité mais également en fonction de l'occupation.

L'installation de l'éclairage artificiel bénéficie d'une configuration permettant d'avoir deux zones de réglage différentes: zone 1er jour et zone 2eme jour (figure 72). Ces zones sont définies en fonction de leur localisation par rapport à l'apport naturel d'éclairage via les fenêtres.

Enfin, le système d'éclairage artificiel est relié à un capteur de présence permettant l'allumage automatique et l'extinction automatique au bout de 15 minutes en cas de non-détection de présence.

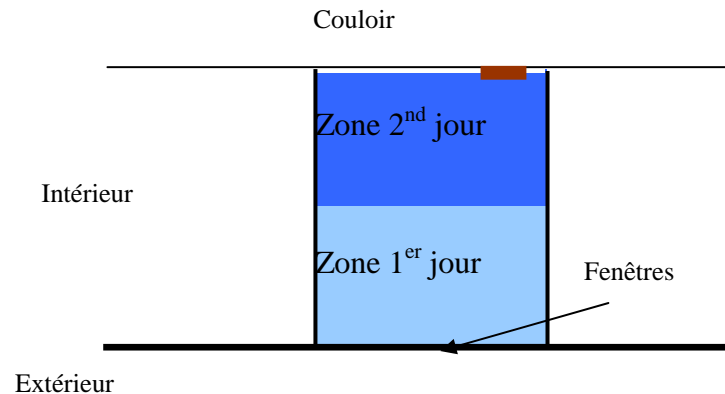


Figure 72 : Répartition des zones de réglage des luminaires (Vue de haut)

12.2.2.5 Equipements électriques blanc /bruns

Les équipements brun et blanc installés étant indépendants du projet de conception et appartenant déjà au laboratoire, ils ont été installés dans les pièces assignées à leurs fonctions. On retrouve ainsi:

- Charges électriques d'expérimentation pour des travaux de recherche en électronique de puissance: banc de puissance, instrumentation, etc....
- Ordinateurs fixes et portables pour les bureaux et la plateforme PREDIS MHI : 4 Ordinateurs portables+ écran plat et 4 ordinateurs fixes situés dans l'espace bureau de la plateforme MHI et 15 ordinateurs portable dans la salle informatique de la plateforme PREDIS MHI

12.2.3 Occupants

En fonction des zones de travail, on retrouvera trois types de profils d'occupants :

- Doctorants : majoritaires et étant le plus présents en terme de fréquence occupation des zones de vie. Ils occupent principalement le Rez-de-chaussée et l'Espace Bureau de la Plateforme MHI
- Chercheurs permanents et techniciens : disposant de leur bureau dans le bâtiment (Rez-de-chaussée) mais dont le taux d'occupation est plus aléatoire et temporaire
- Elèves ingénieurs : Occupants de la Salle Informatique de la plateforme MHI, dont l'occupation provient principalement d'un emploi du temps de cours. Néanmoins, étant également une salle Informatique libre service, lors de projets d'étude, des étudiants peuvent profiter de cette salle pour y mener leurs travaux.

On peut noter enfin que les populations présentes dans ces locaux sont de différentes cultures, ce qui influe sur les modes de vie et comportements énergétiques (européennes, maghrébines, asiatiques, etc...)

Annexe 13 : Questionnaire de satisfaction usagers Espace Bureau


Questionnaire de Satisfaction Plateforme PREDIS MHI

Ceci est une enquête de satisfaction et de retour d'expérience de l'espace de travail au sein de la Plateforme PREDIS depuis votre aménagement. Merci de consacrer un instant de votre temps afin d'y répondre le plus fidèlement possible

Continuer »

Fourni par [Google Documents](#)

[Signaler un cas d'utilisation abusive](#) - [Conditions d'utilisation](#) - [Clauses additionnelles](#)



Questionnaire de Satisfaction Plateforme PREDIS MHI

*Obligatoire

Confort Thermique, Systèmes de chauffage et de refroidissement
On s'intéressera ici qu'à la notion de confort thermique, ce qui est entre autre lié à la température, ainsi qu'aux réglages et contrôles vis à vis du chauffage et au rafraichissement des locaux

Confort Thermique,
On s'intéressera ici qu'à la notion de confort thermique, ce qui est en particulier lié à la température

Comment jugez vous le confort Thermique *
Ceci de manière globale sur la période sur laquelle vous avez emmenagé

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

En période d'hiver, quelles ont été vos sensations de confort ? *

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

Très Froid Très chaud

Si vous avez eu trop chaud ou trop froid parfois, pourriez vous indiquer la fréquence de ces périodes ?

En période d'hiver (Janvier-> Avril et Octobre-> Décembre)

	Très rarement (moins d'une fois par mois)	Rarement (entre 1 et 2 fois par mois)	Assez souvent (entre 2 et 4 fois par mois)	Souvent (au moins 1 fois par semaine)	Très souvent (plus de 3 fois par semaine)
Trop Froid	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Trop Chaud	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

En période d'été, quelles ont été vos sensations de confort ? *

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

Très Froid Très chaud

Si vous avez eu trop chaud ou trop froid parfois, pourriez vous indiquer la fréquence de ces périodes ?

En période d'été (Mai/juin-> Septembre)

	Très rarement (moins d'une fois par mois)	Rarement (entre 1 et 2 fois par mois)	Assez souvent (entre 2 et 4 fois par mois)	Souvent (au moins 1 fois par semaine)	Très souvent (plus de 3 fois par semaine)
Trop Froid	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Trop Chaud	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Réglage et contrôle du chauffage/rafraîchissement

On s'intéressera ici aux réglages automatiques, à la régulation de température ainsi qu'aux moyens de contrôle et de dérogation des consignes

Comment jugez vous le réglage automatique du système de chauffage/rachissement *

En fonction des conditions extérieures, comment situez vous la régulation de température par rapport à votre confort

	Exécutable	A améliorer	Convenable	Performant	Très performant
Système de chauffage (VMC en Hiver et intersaisons)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Système de rafraîchissement (VMC en été)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Avez vous un moyen de contrôle sur le niveau de réglage de température

- Oui
- Je ne sais pas
- Non

Utilisez vous ce contrôle de température? *

- Oui et réglage efficace/facile à utiliser
- Oui mais pas efficace/difficile à utiliser
- Non car trop compliqué
- Non, pas besoin
- Non, car Commande mal positionnée
- Autre :

Quelles sont vos actions en cas d'inconfort thermique *
Trop chaud ou trop froid

- Quitter la pièce
- Ouvrir la porte
- Mettre un vêtement en plus (ou en enlever un)
- Agir sur la consigne de réglage du chauffage/climatisation
- Installer un système supplémentaire individuel de chauffage/climatisation
- Autre :

Remarques sur cette partie du confort thermique
points d'amélioration/critiques, etc..

« Retour Continuer »

Confort qualité d'air et Ventilation
On s'intéressera ici au confort de la qualité de l'air (taux de CO2, odeurs, etc..) aux sensations de courants d'air et aux réglages et contrôles de la ventilation

Comment jugez vous le confort aéraulique, relatif à la qualité d'air *
Ceci de manière globale sur la période sur laquelle vous avez emmenagé

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

Excécrable ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● Très Bonne

Avez vous souvent des symptômes liés au syndrome de bâtiment malsain ou des remarques sur la qualité d'air? *
Maux de têtes, gorges sèches, irritation des yeux dûs à la qualité de l'air

	Jamais	Rarement	Assez Souvent	Souvent	Très Souvent
Maux de tête	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Gorge Sèche	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Irritation des yeux	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Mauvaises odeurs	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Autres	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Comment jugez vous le confort de sensation de courant d'air/soufflage d'air de la ventilation ? *
Sentez vous l'air insufflé par les bouches d'air?et par les portes?

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

Excécrable ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● Très Bonne

Si vous avez eu un inconfort aéraulique, pourriez vous indiquer la fréquence de ces périodes ? *

Aussi bien qualité d'air que sensation d'air

	Très rarement (moins d'une fois par mois)	Rarement (entre 1 et 2 fois par mois)	Assez souvent (entre 2 et 4 fois par mois)	Souvent (au moins 1 fois par semaine)	Très souvent (plus de 3 fois par semaine)
Trop Froid	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Trop Chaud	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Quelles sont vos actions en cas d'inconfort aéraulique ? *

Sensation d'air Trop chaud ou trop froid

- Quitter la pièce
- Ouvrir la porte
- Mettre un vêtement en plus (ou en enlever un)
- Agir sur la consigne de réglage du chauffage/climatisation
- Installer un système supplémentaire individuel de chauffage/climatisation
- Autre :

Avez vous un moyen de contrôle sur le débit d'air?

Si oui, préciser

- Oui
- Je ne sais pas
- Non
- Autre :

Comment jugez vous le placement et débits de soufflage d'air? *

Les bouches d'air de soufflage de la VMC

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

Excécrable Très Bonne

Remarques sur cette partie du confort aéraulique

points d'amélioration/critiques, etc...

Confort visuel et Eclairage

On s'intéressera ici au confort visuel (niveau de luminosité) par rapport à l'éclairage naturel et artificiel ainsi qu'aux réglages et contrôles de l'éclairage artificiel

Confort Visuel

On va s'intéresser ici seulement au confort visuel c'est à dire le niveau de luminosité adéquat pour votre confort lorsque l'éclairage fonctionne normalement

Comment jugez vous le confort visuel ? *

C'est à dire le niveau de luminosité pour voir. Ceci de manière globale depuis général depuis votre emménagement

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

Excécrable Très bon

Comment jugez vous l'apport de l'éclairage naturel (  votre poste)?

C'est à dire, en journée, lorsqu'il n'y a pas d'éclairage artificielle

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

Excécrable Très bon

Comment jugez vous l'apport de l'éclairage artificiel , en mode de réglage automatique (  votre poste)? *

C'est à dire, dès détection d'une personne, niveau de luminosité réglée en fonction de l'éclairage naturelle

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

Excécrable Très bon

Avez vous un moyen de contrôle sur le niveau de lumière artificielle ? *

- Oui
- Je ne sais pas
- Non

Quelles sont vos actions en cas d'inconfort Visuel ? *

Poste de travail pas assez ou trop éclairé (indépendamment de la détection de présence)

- Quitter la pièce
- Mettre l'éclairage au maximum//Eteindre
- Augmenter/diminuer le niveau de réglage luminosité
- Agir sur la consigne de réglage du chauffage/climatisation
- Installer un système individuel d'éclairage
- Autre :

Contrôle de l'éclairage artificielle

Retour d'expérience sur le dispositif automatique d'éclairage

Comment est allumé l'éclairage artificiel? *

- Automatiquement, par capteur de présence qui me détecte à mon poste
- Automatiquement mais je ne suis pas détecté à mon poste (je dois me mettre dans le champ de détection)
- Manuellement
- Autre :

Coimment jugez vous le dispositif automatique? *

Pour tout commentaire supplémentaires, utilisez "Autre"

- A supprimer
- Mauvais
- Moyen
- Bon
- Très Agréable
- Autre :

Coimment modifiez vous le cas échéant le dispositif automatique? *

Pour tout commentaire supplémentaires, utilisez "Autre"

- A supprimer et rendre totalement manuel
- Améliorer la sensibilité de détection)
- Améliorer le temps d'extinction automatique)
- Fonctionne correctement
- Autre :

Coimment jugez vous le contrôle manuel de l'éclairage artificiel? *

Pour tout commentaire supplémentaires, utilisez "Autre"

- A supprimer
- Mal conçu (complexe)
- Mal placé
- Bon (Fonctionne correctement)
- Autre :

Quelle est la fréquence de vos interactions avec le contrôle d'éclairage? *

Combien de fois vous levez vous pour agir directement sur l'interrupteur de l'éclairage

- Jamais (pas Besoin)
- Jamais (Les autres le font pour moi)
- Très Rarement (moins d'une fois par mois)
- Rarement (1 à 3 fois par mois)
- Occasionnellement(1 fois par semaine)
- Assez souvent (2 à 4 fois par semaine)
- Souvent (1 fois par jour)
- Très Souvent (Plusieurs fois par jour)
- Autre :

Remarques sur cette partie du confort visuel

points d'amélioration/critiques, etc..

« Retour

Continuer »

Confort Acoustique et Divers

On va s'intéresser ici au confort par rapport au bruit et également au bien être point de vue aménagement, services présents etc..

Confort acoustique

Comment jugez vous le confort acoustique depuis votre emménagement ? *

Bruit intérieur et extérieur au bureau

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

Exécration Très Bon

Quelle est la nature de cet inconfort? et quelle importance? *

	Non présent	Bruit de fond	Peu nuisible/	Dérangeant	Très Dérangeant
Cours en Salle Informatique	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Discussions dans l'espace Bureau	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ventilation	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Bruits du couloir et alentours	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Autre	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Quelle est la fréquence de cet inconfort acoustique ?

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

Jamais Très souvent (tous les jours)

Quelles sont vos actions en cas d'inconfort acoustique ? *

Trop de bruit

- Quitter la pièce
- Fermer la porte (si elle ferme (porte coulir))
- Mettre une chaise pour fermer la porte (porte Salle Informatique)
- Mettre des écouteurs
- Autre :

Confort de bien être

Comment jugez vous le confort de "bien être" depuis votre emménagement ? *

Ambiance au bureau, décoration, etc...

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

Exécration Très Bon

Comment jugez vous ces points là?

Aménagement= emplacement bureau, choix du mobilier, etc

	Mauvais	Passable	Moyen	Bon	Très Bon
Ambiance	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>
Décoration	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Aménagement	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>
Sécurité	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>
Autre (à préciser dans les remarques)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Remarques sur cette partie du confort acoustique et bien être

points d'amélioration/critiques, etc..

Remerciements et Remarques générales

Merci d'avoir répondu à ce questionnaire et si vous avez des remarques et suggestions de tout ordre sur le confort et l'usage dans l'espace Bureau Predis, merci de laisser un message

Remarques générales

Enfin, pourriez vous indiquer de n° de votre poste pour une localisation spatiale *

Numéro inscrit sur l'ordinateur par exemple

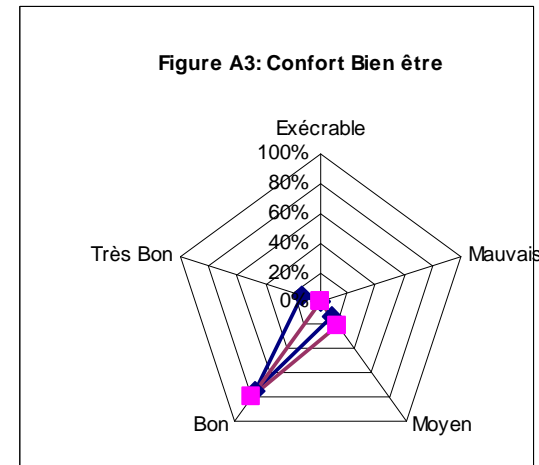
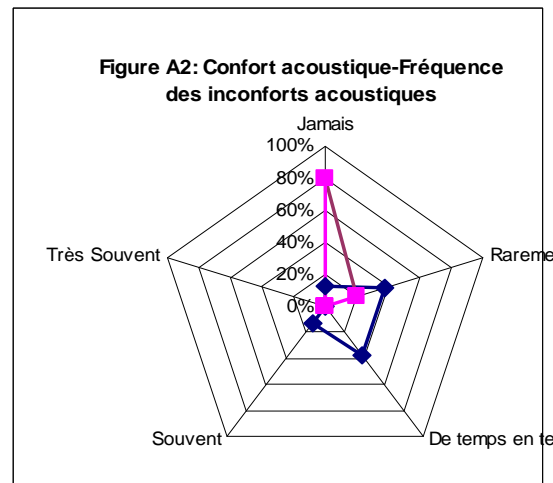
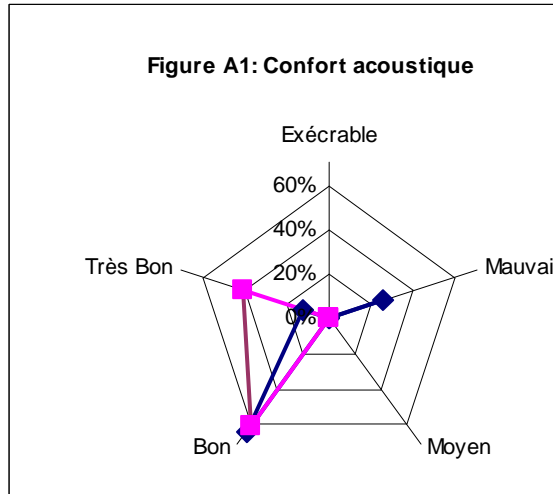
Annexe 14 : Résultats du questionnaire de satisfaction de la Plateforme PREDIS MHI

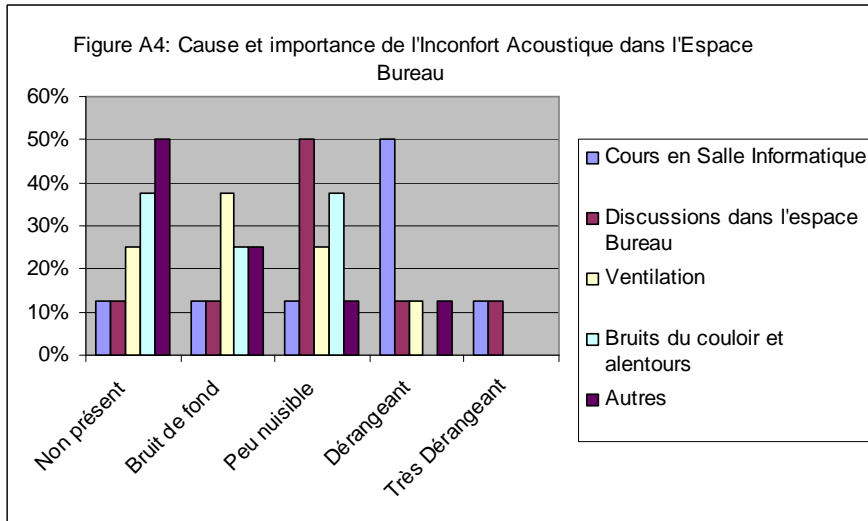
Légende

Espace Bureau
Salle Informatique

8 doctorants
5 élèves ingénieur

Confort acoustique





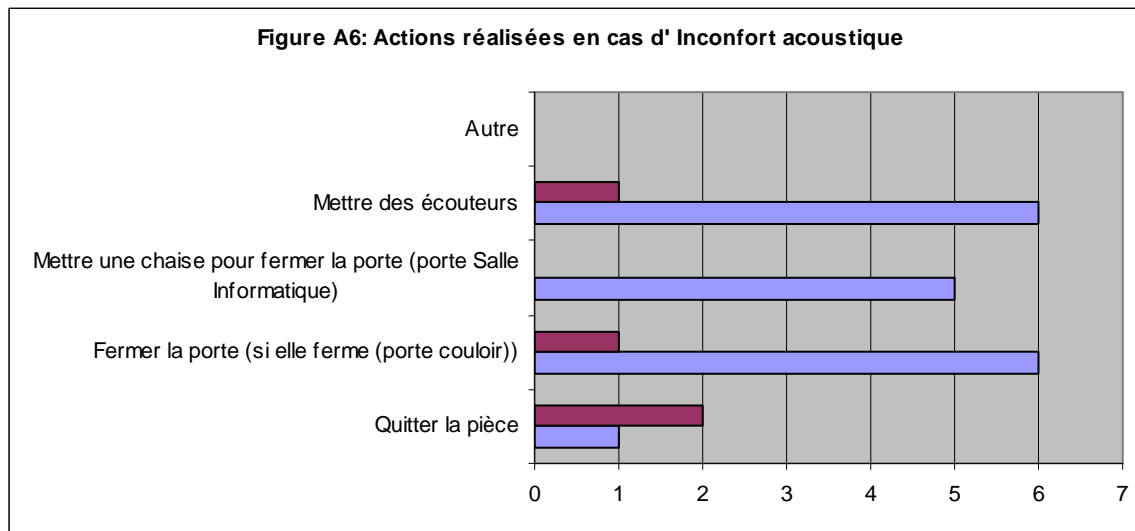
Remarques émises sur la partie acoustique et bien être

Dans l'ensemble, l'accès aux prises électriques n'est pas évident (les capteurs de mesure de puissance occupent quasiment tout l'espace) et

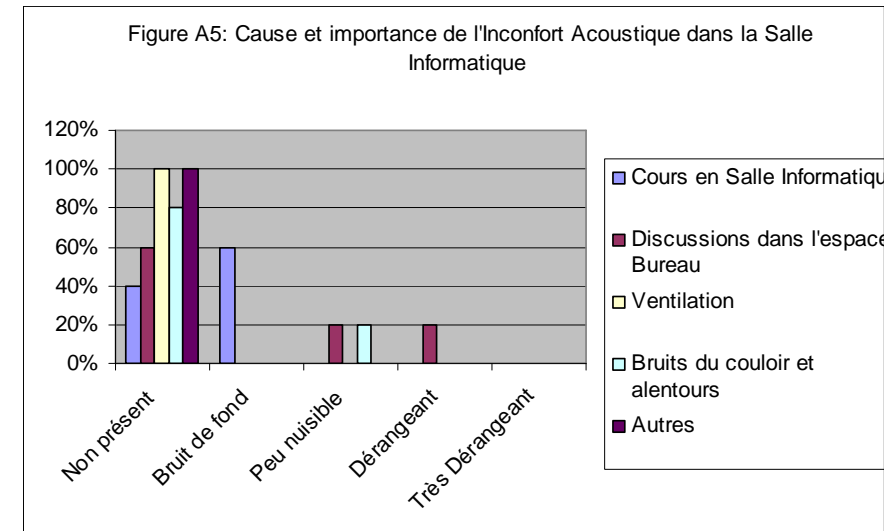
les multiprises des bureaux sont difficilement accessibles (notamment si on veut couper le soir en partant)

La place des ordinateurs n'est juste pas très judicieuse pour travailler en groupe mais sinon le confort acoustique et le bien être sont assez bons.

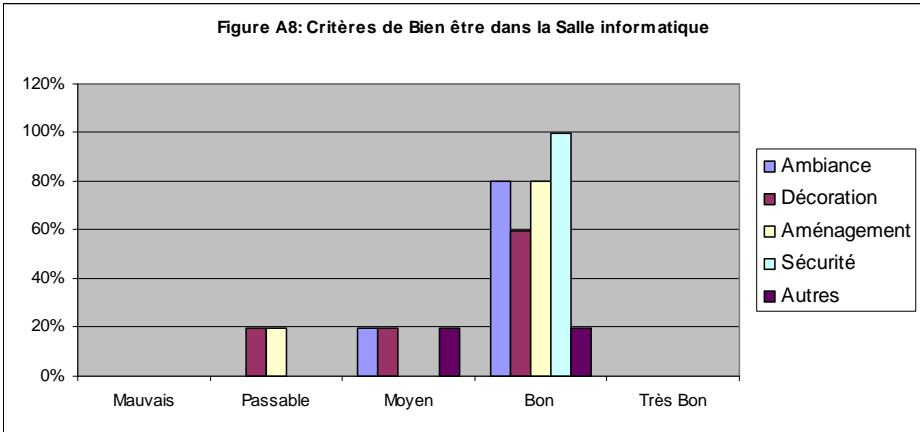
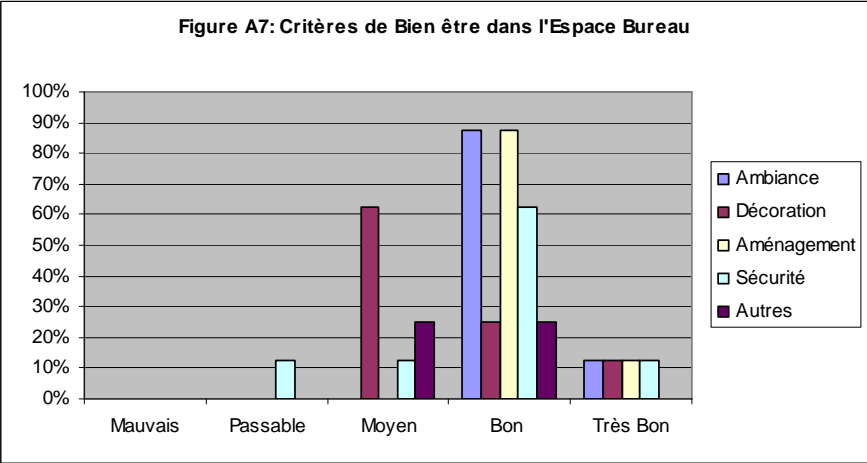
Il y a quand même un réel problème avec les fixations des ordinateurs portables. Ne pas pouvoir les bouger rend le travail en binôme voire trinôme vraiment compliqué et désagréable.



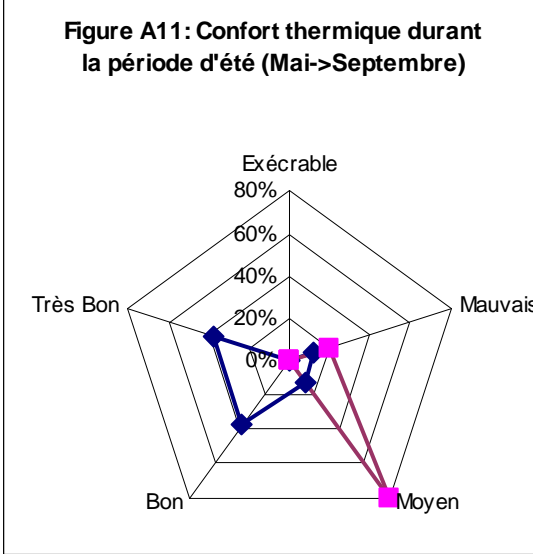
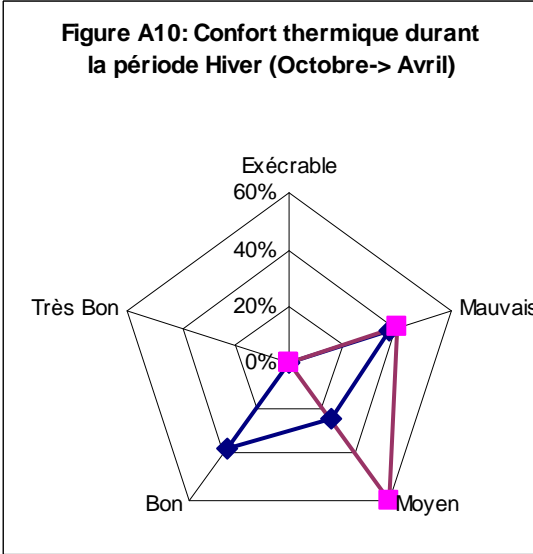
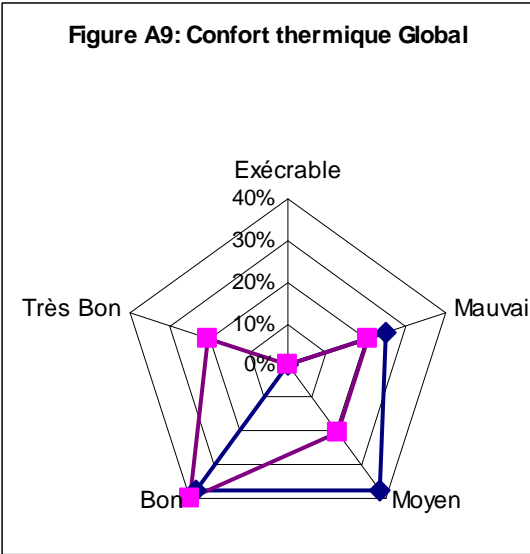
Aménagement pas optimal surtout en salle Info



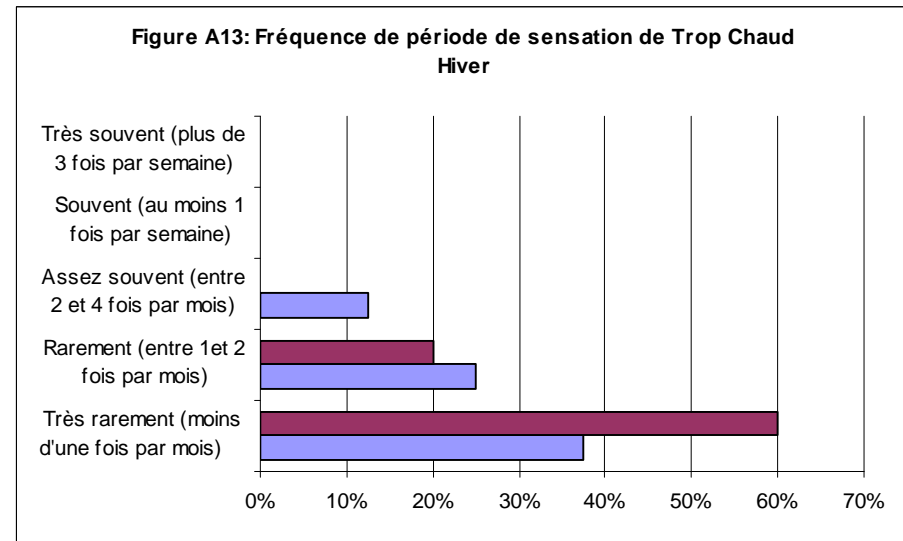
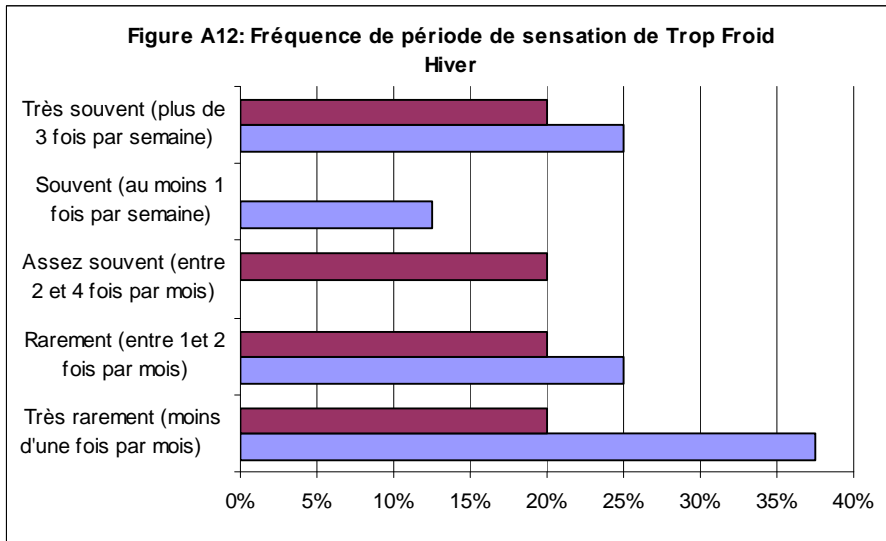
Bien être



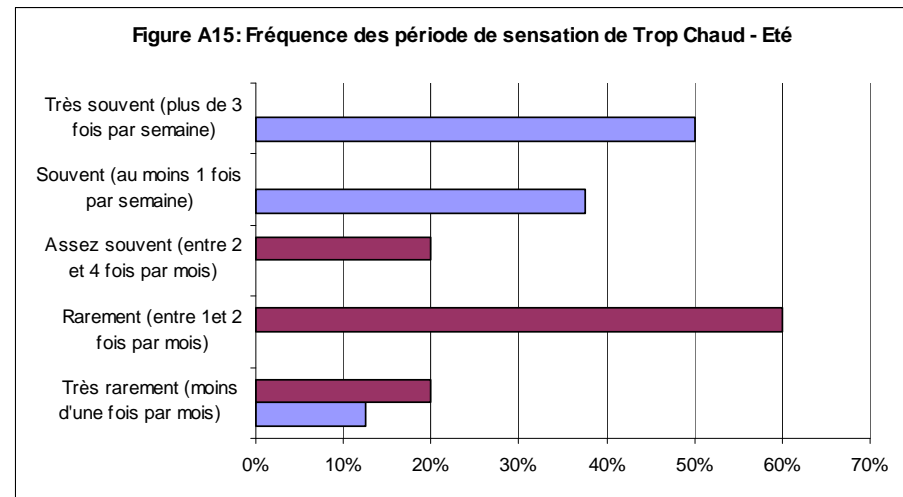
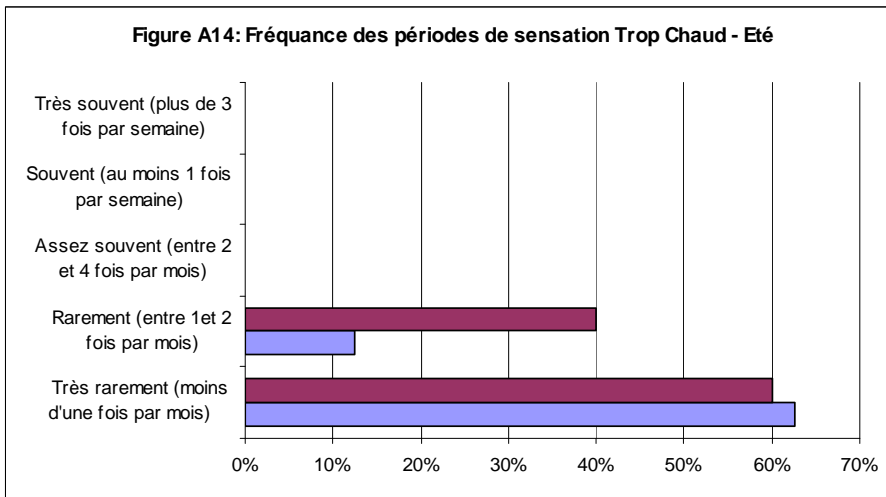
Confort Thermique



Durant la période hiver (Octobre->Avril) :



Durant la période d'été (Mai-> Septembre) :



**Réglage et contrôle du système de chauffage/rafraîchissement
(VMC Double flux selon ses modes de fonctionnement)**

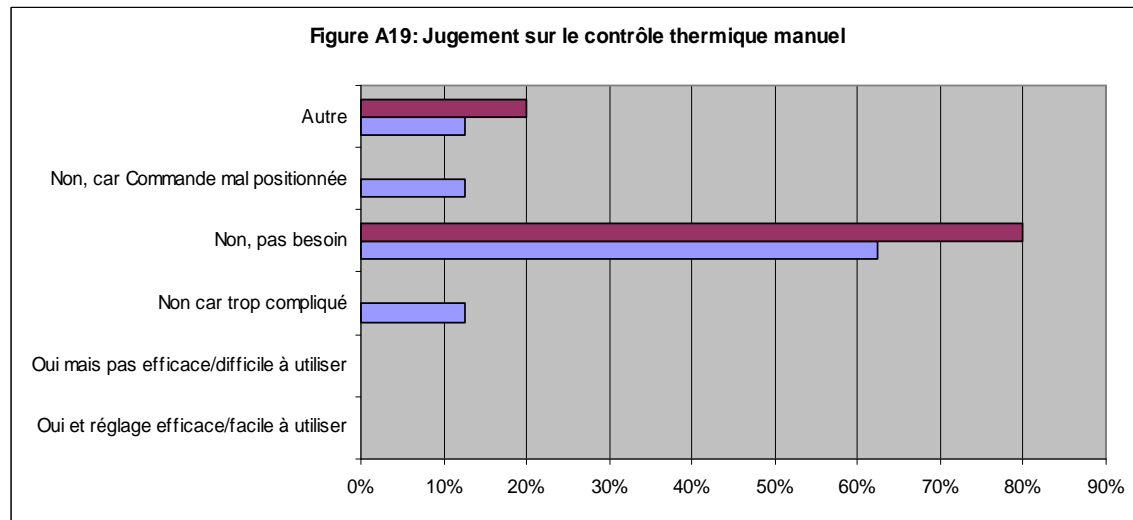
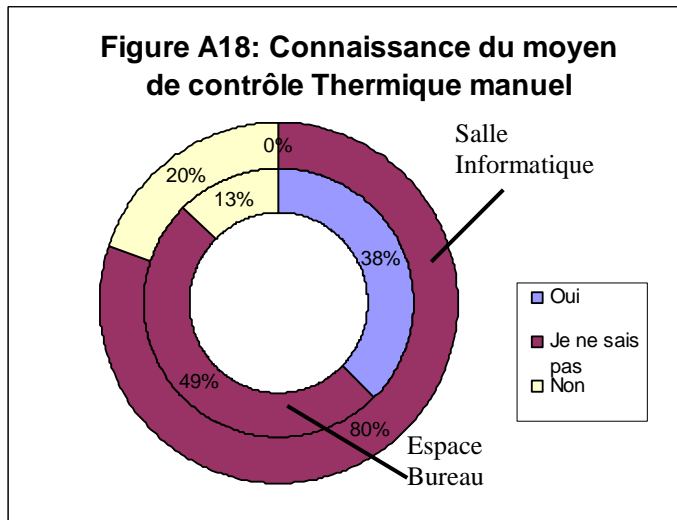
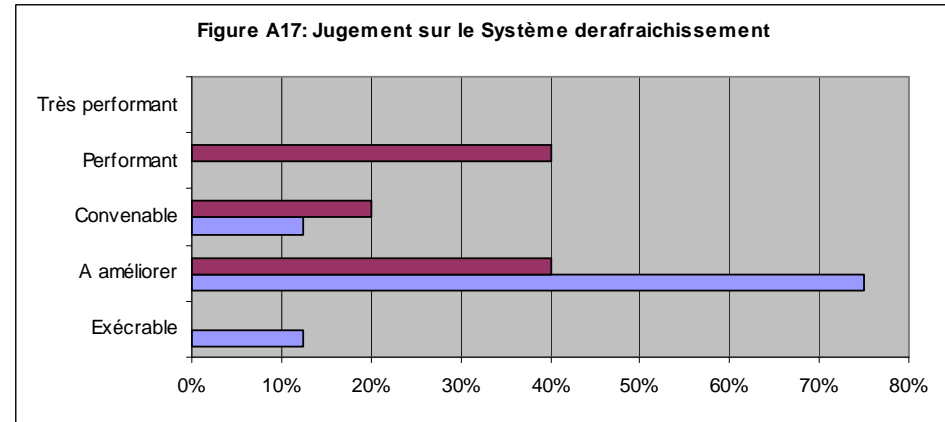
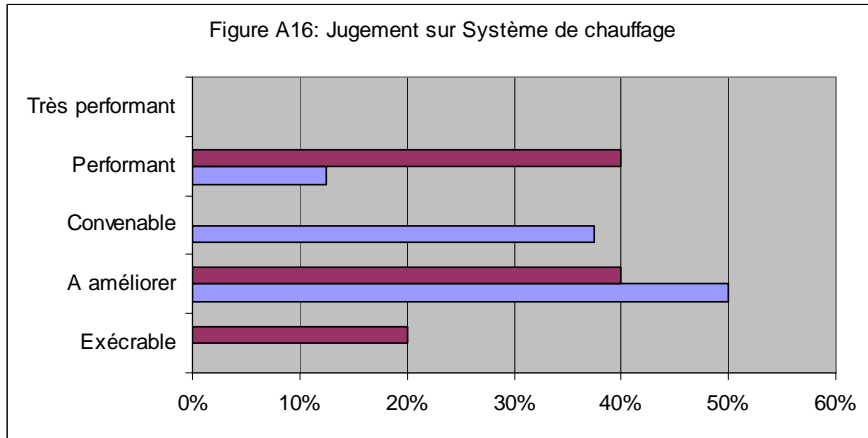
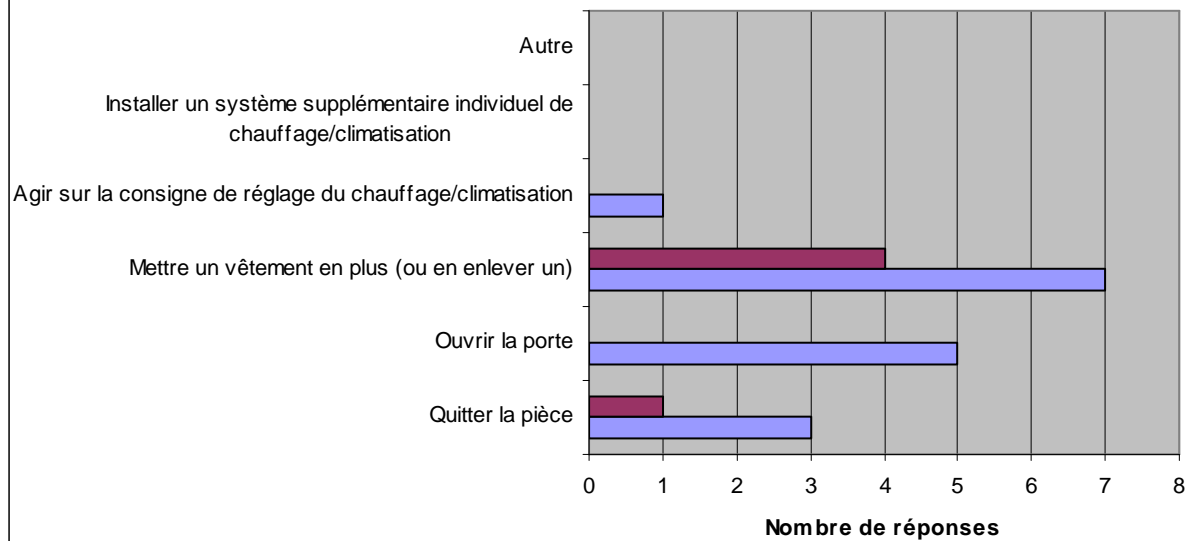


Figure A20: Actions réalisées en cas d'Inconfort thermique



Remarques émises sur la partie thermique

Avoir une visualisation de la température directement sur le bouton de contrôle de la température

Ajouter une climatisation l'été La sensation de froid en hiver et de chaut en été est très grande.

Je pense qu'il faut augmenter la température de consigne en hiver et en contre partie la diminuer en été.

Ca sera bien si on arrive (les gens qui se trouvent à la salle) à contrôler nous même la température.

1) Le système de chauffage à réajuster. 2) Guide d'utilisateurs à prévoir : si cela existe déjà, penser à l'afficher de manière plus visible

Confort qualité d'air et Ventilation

Figure A21: Confort Aéraulique

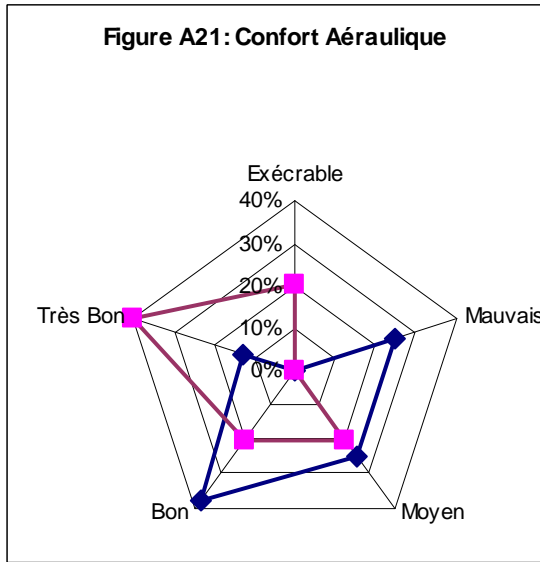


Figure A22: Confort Sensation courant d'air

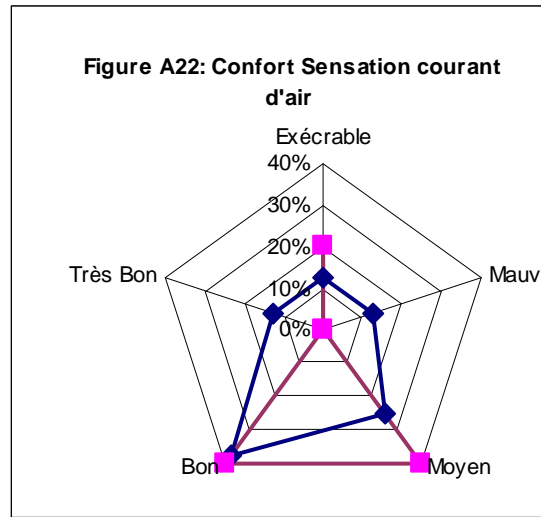


Figure A23: Confort Placement bouche d'air

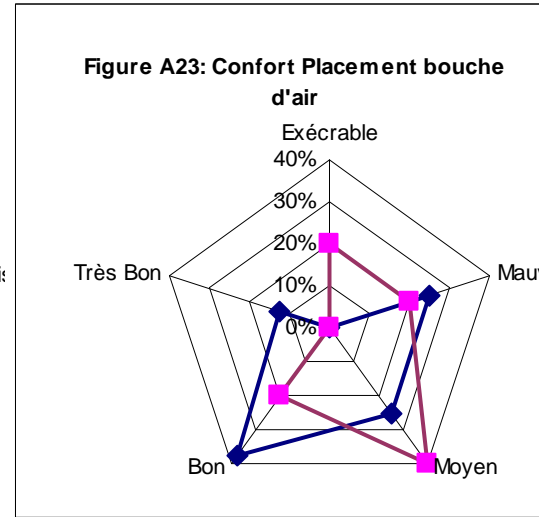


Figure A24: Sensation d'air Trop froid

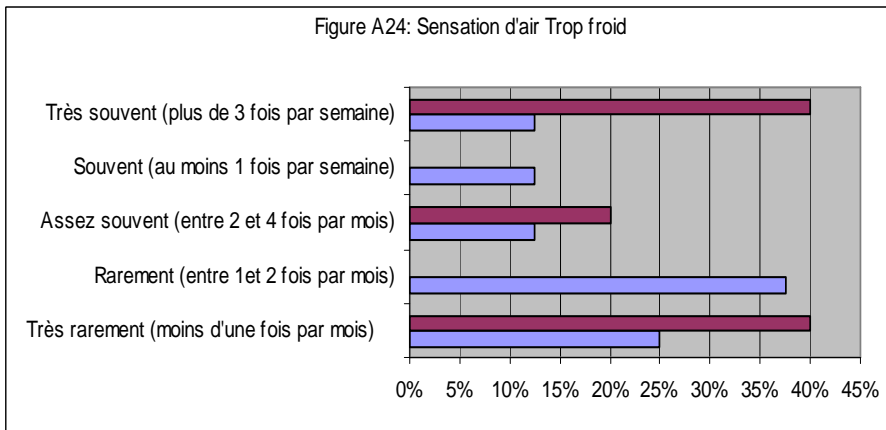


Figure A25: Sensation d'air Trop chaud

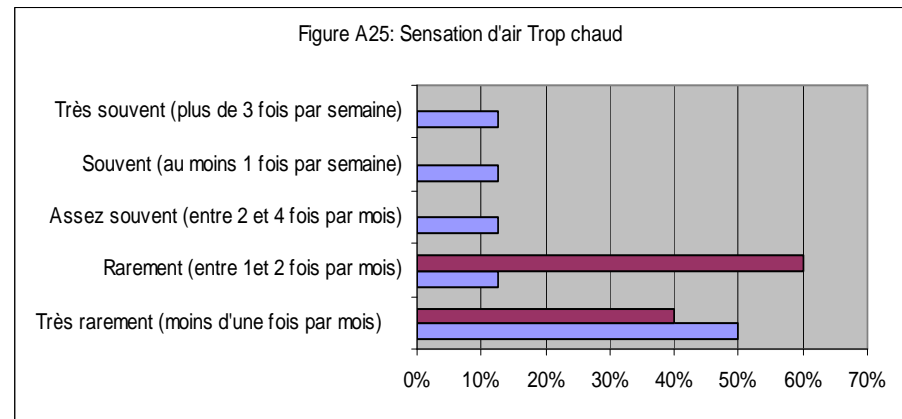


Figure A26: Sensation Trop d'Air

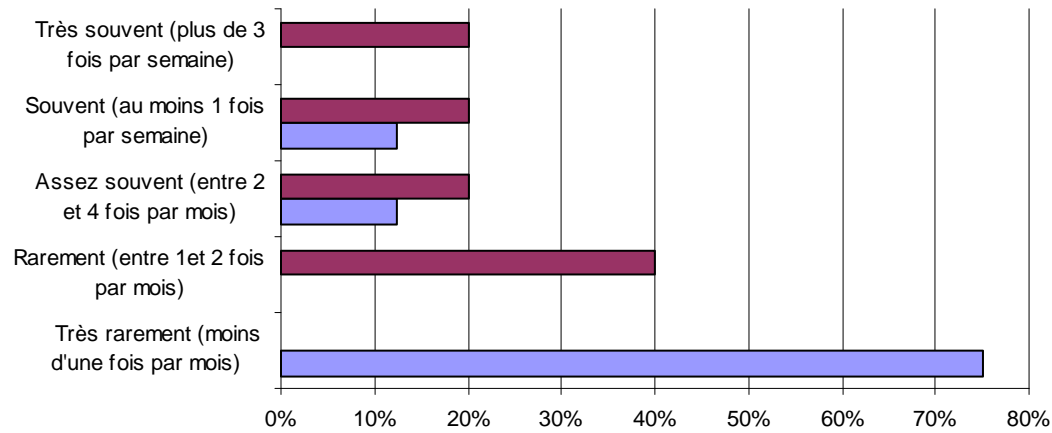


Figure A27: Connaissance moyen de contrôle Air

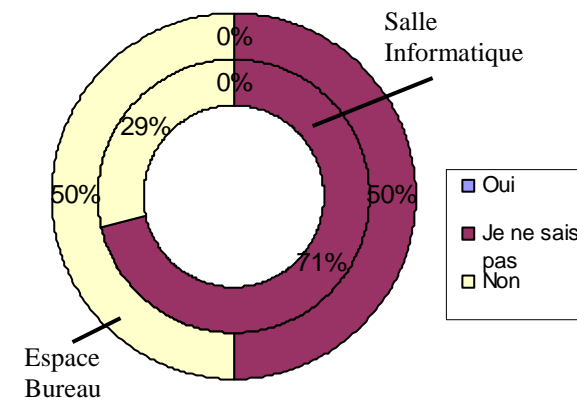


Figure A28: Syndrome bâtiment malsain Espace Bureau

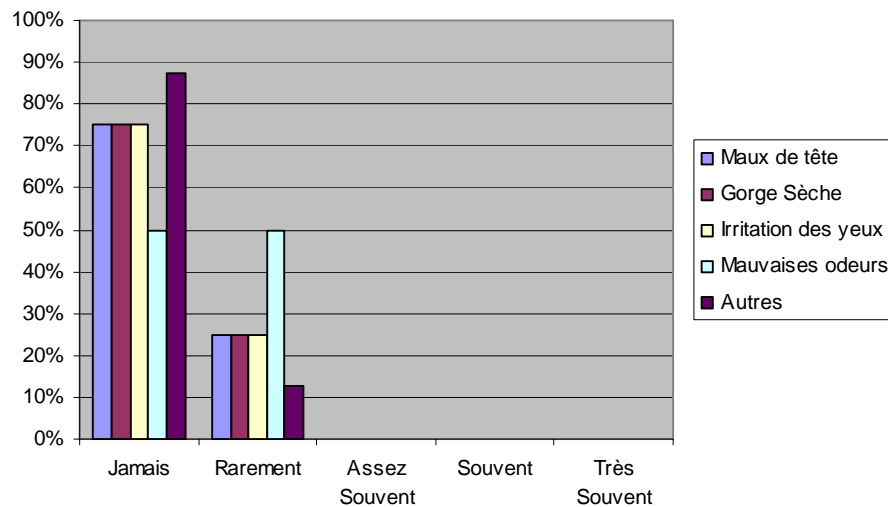
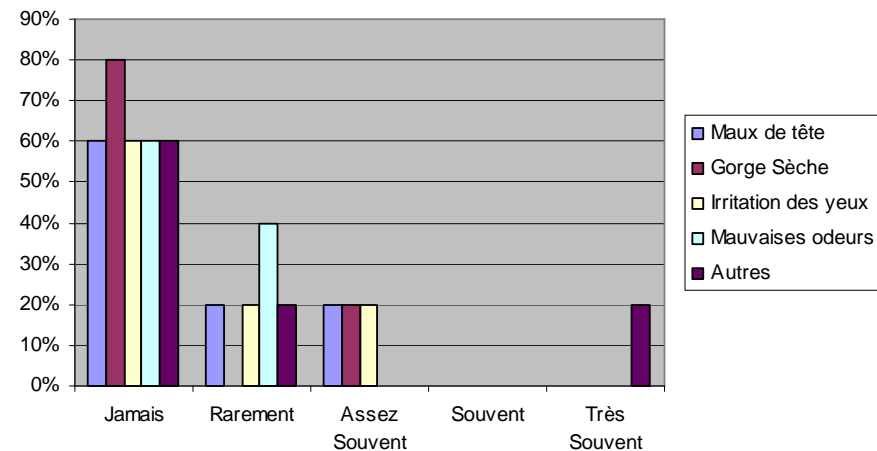
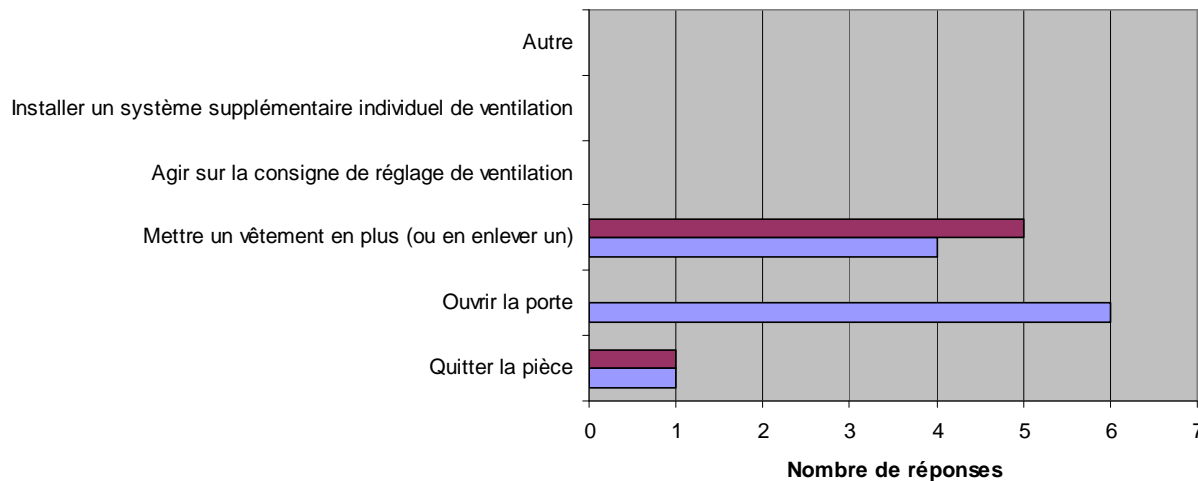


Figure A29: Syndrome bâtiment malsain Salle Informatique



A30: Actions réalisées en cas d'Inconfort Aéraulique



Remarques émises sur la partie aéraulique

Réglage du débit surtout l'été afin de pouvoir avoir plus d'air si ça devient pesant ou au contraire réduire le débit s'il fait trop chaud

Certaines bouches de soufflage sont situées presque au dessus de bureaux. On ressent l'air insufflé. Cela peut être agréable en été mais un peu dérangent en hiver,

on a une sensation de courant d'air.

Il aurait peut être mieux valu mettre ces bouches au dessus des zones de passage. Sinon la ventilation est agréable. On a la sensation de respirer de l'air frais et pur.

le confort aéraulique est mieux que le confort thermique.

Confort Visuel

Figure A31: Confort Visuel Global

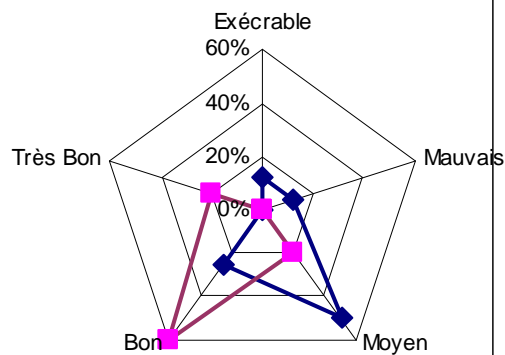


Figure A32: Jugement sur l'Apport Eclairage Naturel

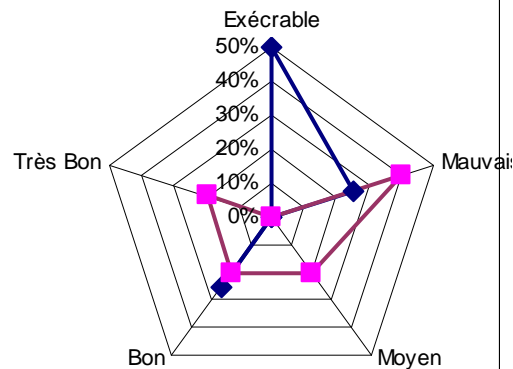


Figure A33: Jugement de l'Apport Eclairage Artificiel

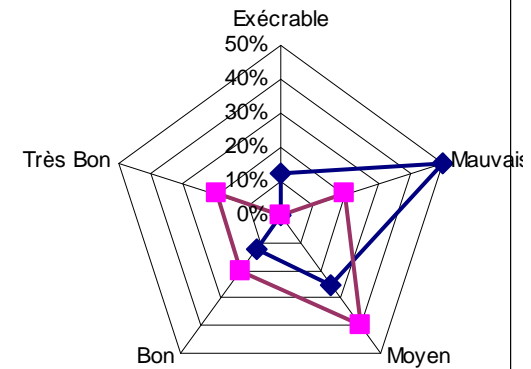


Figure A34: Actions réalisées en cas d'Inconfort Visuel

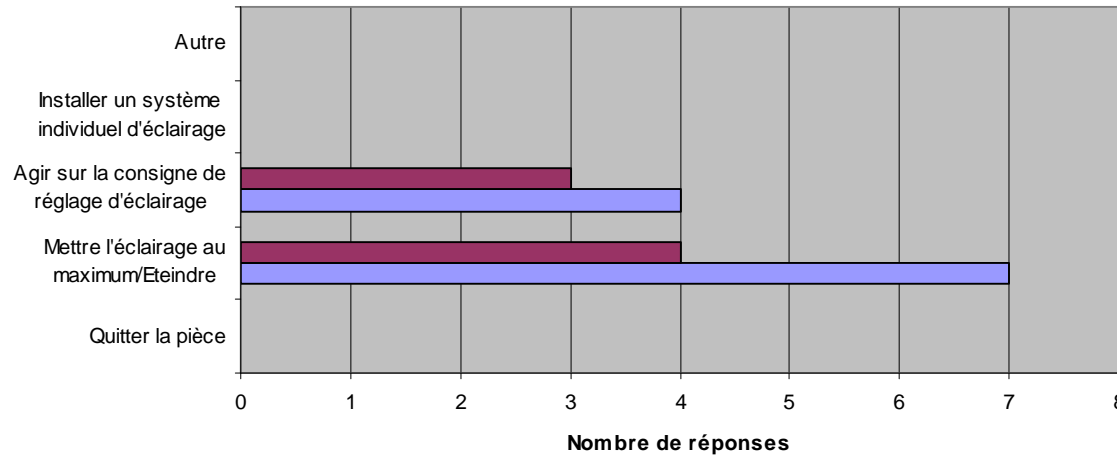


Figure A35: Connaissance moyen de contrôle Eclairage

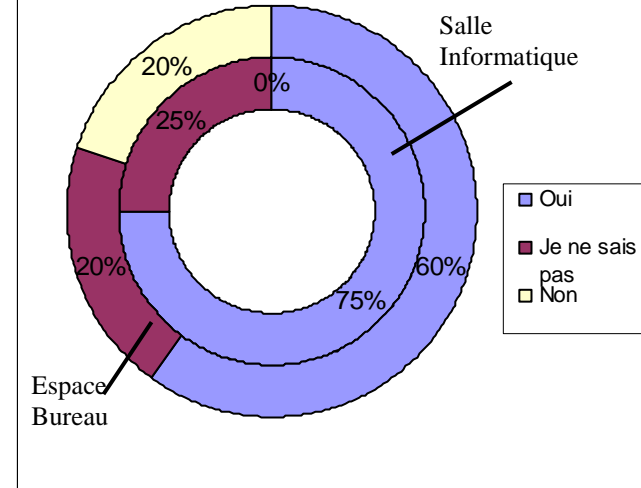


Figure A36: Moyen d'allumage éclairage artificiel

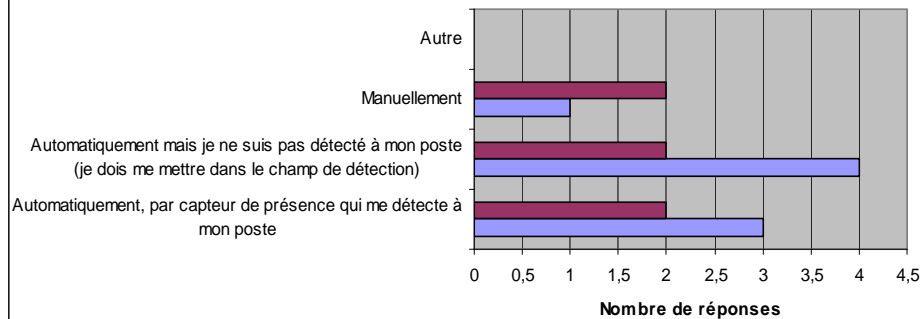
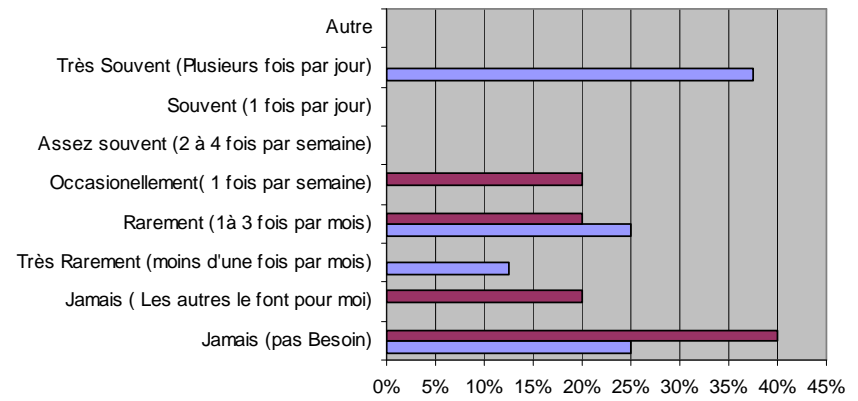
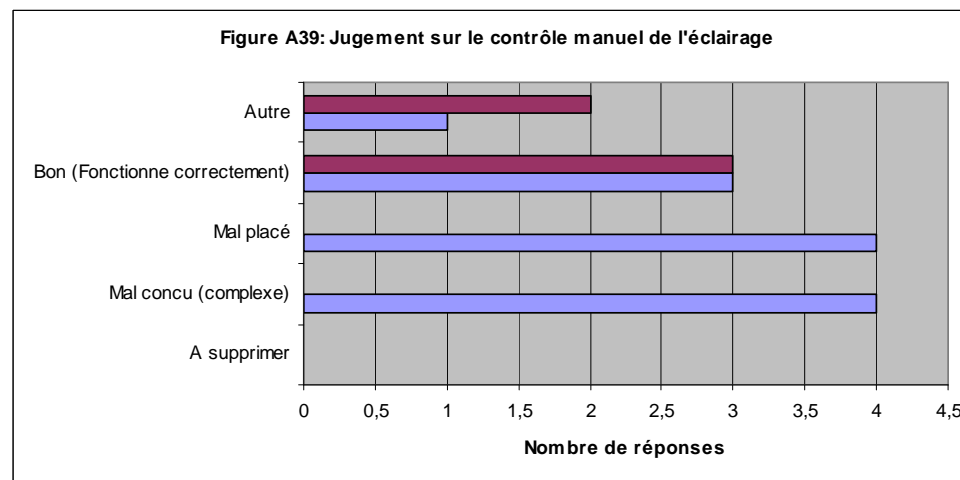
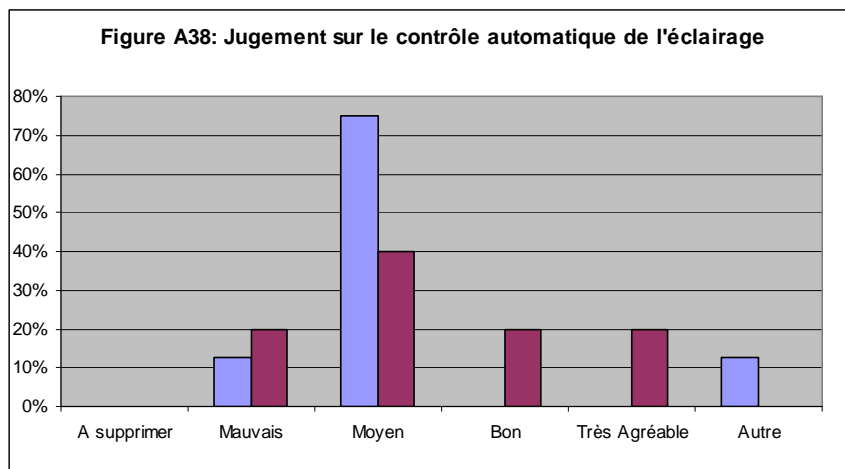


Figure A37: Fréquence d'interaction avec contrôle Eclairage





Remarques émises sur la partie éclairage

La Conception du système ne prend pas en compte l'aménagement final

La luminosité naturelle est très agréable et procure une sensation de bien être. De plus je trouve que l'éclairage artificiel est moins fort que dans une salle classique et cela fatigue moins les yeux.

le plus urgent c'est d'améliorer la détection automatique de la personne depuis sa place (son chaise)!

Commande manuel est inutile car éclairage automatique suffisant (Salle Informatique)

Annexe 15 : Simulation de la surchauffe liée à l'usage

Afin de nous rendre compte de l'importance des apports internes et étudier l'impact énergétique de l'usage du point de vue thermique du bâtiment, nous avons mené une étude de simulation thermique sous COMFIE Pleiades, en utilisant un modèle à partir des documents de rénovation (la définition des zones est donnée en annexe 11) Les scénarios d'usage utilisés sont ceux du tableau 6 en prenant comme hypothèse que chaque appareil électrique dissipe 1 W de chaleur thermique pour 1 W électrique consommé.

Etage	Zones thermiques	Périodes d'activité des scénarios	Chauffage /Climatisation	Ventilation	Occupants	Puissance dissipée
RD C	Bureau A et B	8h à 19h Pause entre 12h et 13h	Inoccupation : 17°C Occupation : 20°C	0.43 Vol/h	2 par bureau	2 PC fixe :-activité : 100W -veille : 5W Eclairage: 42 W
RD C	Zone PC	8h à 19h Pause entre 12h et 13h	Inoccupation : 17°C Occupation : 20°C Climatisation : 26°C	0.6 Vol/h	6	8 PC fixe :-activité : 100W -veille : 5W Eclairage: 168 W
RD C	Zone Manip	8h à 19h Pause entre 12h et 13h	Inoccupation : 17°C Occupation : 20°C Climatisation : 26°C	0.55 Vol/h	6	Machine EP : 4 kW (fonctionnement court non prévisible) Eclairage : 900W
R+1	Espace Bureau	8h à 19h Pause entre 12h et 13h	Double flux coefficient d'échange 0,8	0.65 Vol/h	7	7 PC fixe :-activité : 100W -veille : 5W Eclairage (graduable en fonction luminosité naturelle) : 192 W
R+1	Salle Informatique	8h à 19h Pause entre 12h et 13h	Double flux coefficient d'échange 0,8	1.2 Vol/h	26	15 PC portable :-activité : 30W/poste 1PC + imprimante : 250W Eclairage (graduable) 290 W

Tableau 6 : Présentation des scénarios de simulation Plateforme Predis MHI

Une simulation thermique dynamique sur une année type, avec des données météo d'un site voisin, on trouve des besoins énergétiques de chauffage très bons également au cours d'une année (moins de 2kWh/m².an sur la plateforme PREDIS MHI) Une telle performance est due à l'importance des apports internes (puissance thermique dissipée par les occupants et les équipements électriques)).

La part thermique lié à l’usage est ici très important. Afin de pouvoir étudier quelle est la part de contribution énergétique des apports internes (occupants, puissance dissipée par les équipements électriques et solaire), il est nécessaire de faire pour cela 5 simulations distinctes [IZAR, 2006]. Ces 5 simulations correspondent à un plan d’expérience où l’on appliquera le théorème de superposition. La méthode consiste à faire une simulation indépendante de chaque apport interne et d’étudier leur contribution par rapport au cas où ils sont ensemble (c'est-à-dire la simulation complète). Un tel découplage des apports ne peut être fait que par simulation car dans la réalité, on ne peut pas se soustraire à l’apport solaire.

Les différentes simulations s’effectuent avec certains scénarios d’usage actifs comme précisé dans le Tableau 7

Simulation/ Scénarios d’usage pour la simulation	Consigne de chauffage	de Apports Solaires	Apports Occupants	Apports Equipements électriques
Simulation Sans apports (SSA)	X			
Simulation Apports solaires (SAS)	X	X		
Simulation Apports Occupants (SAO)	X		X	
Simulation Apport Electrique (SAE)	X			X
Simulation Tout Apports (STA)	X	X	X	X

Tableau 7 : Procédure de simulation en fonction des scénarios de fonctionnement COMFIE

Soit $BSSA_i$, $BSTA_i$, $BSAS_i$, $BSAO_i$ et $BSAE_i$ les besoins de chauffages de la zone thermique i associés respectivement à chacun des essais précédents. La part maximale de chaque apport interne se calcule à partir de la contribution de chaque apport. L’équation s’écrit donc (Equation 21) :

$$\begin{aligned}
 \text{Apport SolaireMax}_i &= (BSSA_i - BSAS_i) / ((BSSA_i - BSAS_i) + (BSSA_i - BSAE_i) + (BSSA_i - BSAO_i)) * (BSSA_i - BSTA_i) \\
 \text{Apport ElectriqueMax}_i &= (BSSA_i - BSAE_i) / ((BSSA_i - BSAS_i) + (BSSA_i - BSAE_i) + (BSSA_i - BSAO_i)) * (BSSA_i - BSTA_i) \\
 \text{Apport OccupantMax}_i &= (BSSA_i - BSAO_i) / ((BSSA_i - BSAS_i) + (BSSA_i - BSAE_i) + (BSSA_i - BSAO_i)) * (BSSA_i - BSTA_i)
 \end{aligned}
 \tag{Equation 21}$$

Ce calcul est valable pour les périodes de chauffe mais pour les périodes de climatisation, il suffit d’inverser les tests STA et SSA dans la formule ci-dessus en simulant avec une consigne de température de climatisation.

Ainsi, pour la plateforme PREDIS MHI on obtient la répartition des contributions énergétique de chaque apports thermiques interne permettant d’obtenir la température de confort de 20°C durant les périodes d’occupation (figures 73 et 74)

Figure 73 : Répartition des apports thermiques Espace Bureau

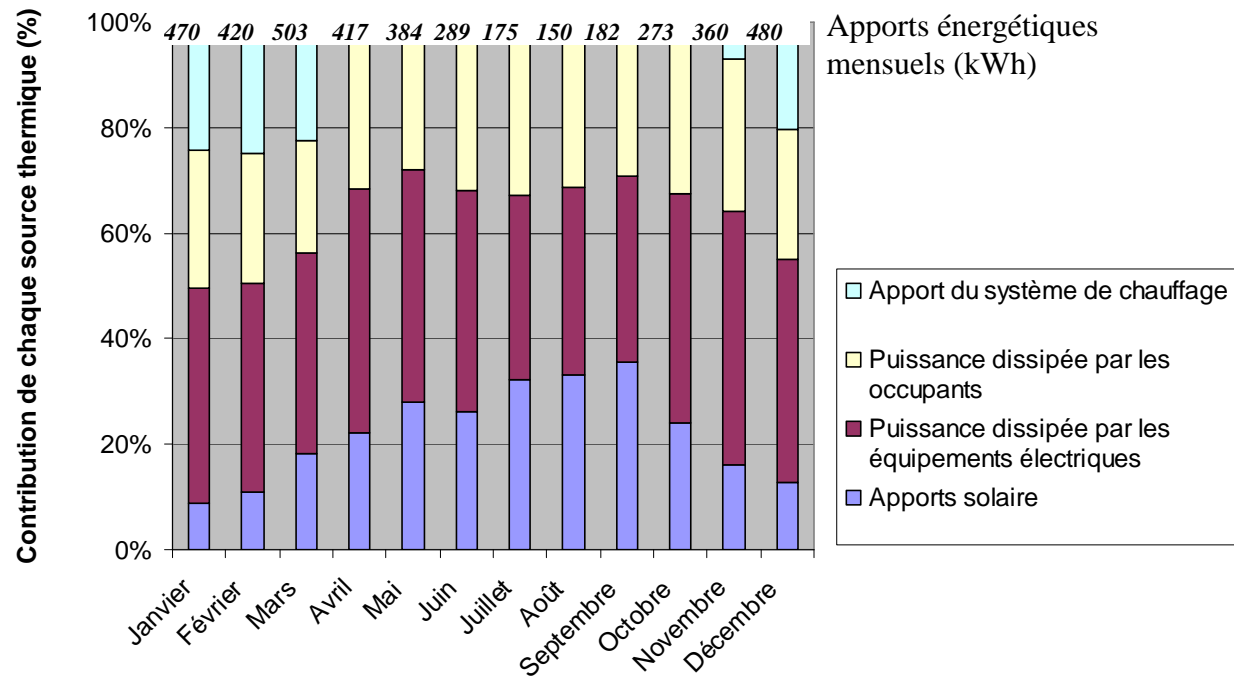
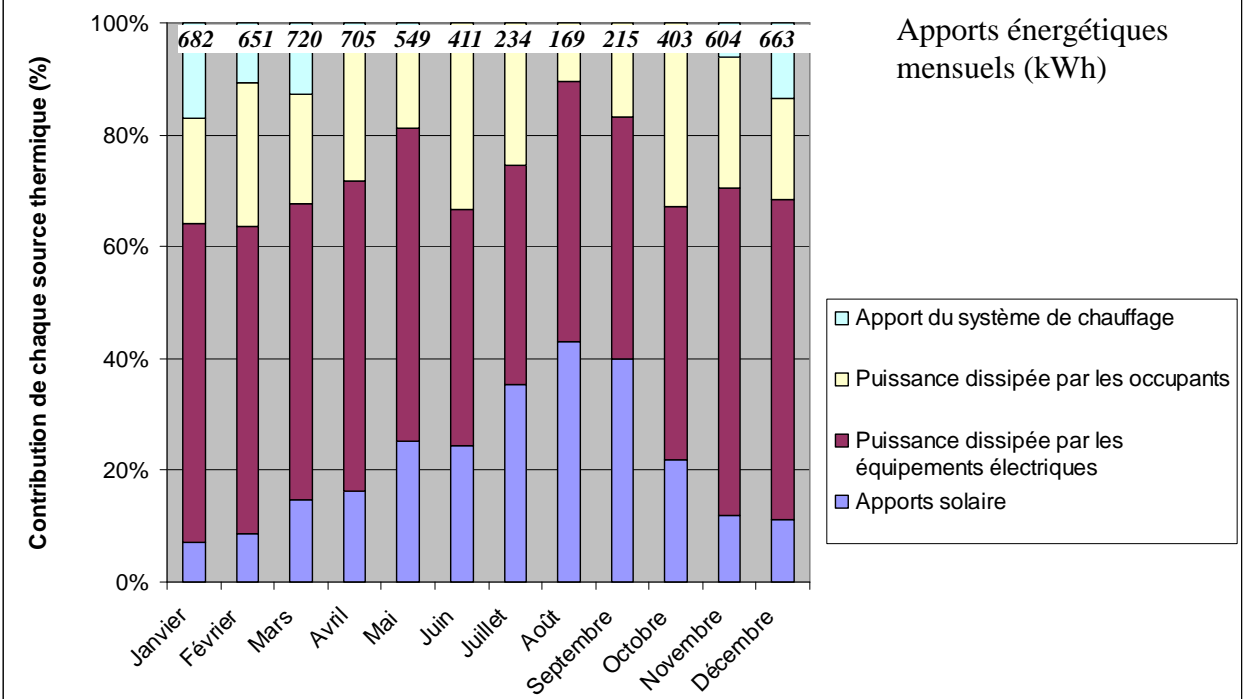


Figure 74: Répartition des apports thermiques Espace Informatique



On se rend compte dans ces simulations de la contribution des apports thermiques que dans notre bâtiment, qui est conçu pour être énergétiquement performant, les apports internes liés à l'usage : occupant et équipements électriques, sont prépondérants sur le bilan énergétique global (+ 80 % des apports énergétiques dans chaque salle). Aussi, ces apports internes permettront en période de chauffe, de réduire la consommation énergétique chauffage, mais en été, cela contribuera aux périodes de surchauffe

Annexe 16 : Terminologies de l'épistémologie constructiviste

L'hypothèse phénoménologique : L'hypothèse phénoménologique suppose que les connaissances ne sont pas définies intrinsèquement par la nature des dispositifs. Ce que nous connaissons, théorisons et modélisons est la perception que nous en avons, dans un contexte donné. Il en résulte que les théories, les modèles, ... n'ont pas valeur de vérité intemporelle, indépendante des observateurs, mais sont des connaissances dynamiques continuellement remaniables pour s'adapter à de nouveaux contextes, ... Cette hypothèse propose une alternative à l'hypothèse ontologique du cadre classique (signifiant l'accès à l'essence et à la nature des objets indépendamment de la perception des concepteurs – modélisateurs)

L'hypothèse téléologique : L'hypothèse téléologique suppose que les théories et modèles sont dépendants des objectifs à atteindre par le concepteur/modélisateur dans le contexte. Ceci vient en opposition à l'hypothèse déterministe : la nature des savoirs, des connaissances devient à présent aussi liée aux fins, alors qu'elle était plutôt exclusivement déterminée par la nature et l'essence des objets dans l'approche classique, qui étaient vues comme la cause déterminante de leur nature. Pour le dire encore autrement : c'était uniquement la nature des choses qui déterminait la nature de la connaissance, alors que l'hypothèse téléologique, suppose que c'est aussi le but du projet qui va fixer la nature du savoir. Cela introduit à nouveau le concepteur - modélisateur qui définit et construit ces buts et ce projet.

Le principe de la modélisation systémique : les connaissances sont le résultat d'un processus de construction global, dépendant bien sûr de l'objet, mais aussi du contexte, des objectifs, de l'observateur ... Ce principe relativise le principe de l'analyse réductionniste au sens où il prend acte du fait que pour faire l'étude d'un système, on ne peut pas systématiquement le réduire à l'étude de ses parties prises isolément. Autrement dit émergent au niveau du système des propriétés que l'on ne peut déduire de l'étude des composants pris isolément. Il faut donc considérer les connaissances, les théories et les modèles dans leur globalité, intégrés dans leur contexte et leurs objectifs. L'observateur fait aussi pleinement partie du système, notamment dans l'élaboration des modèles, dans le sens où ce qu'il modélisera est la perception qu'il a de ces phénomènes. Ce principe vient en complément ou en opposition de l'analyse réductionniste de l'épistémologie classique naïve.

Le principe d'action intelligente : les connaissances sont argumentées (et non démontrées), et sont tenues pour possibles (et non vraies). Ce principe vient en complément ou en en opposition du principe de raison suffisante de l'épistémologie classique naïve.

En s'inspirant de [LEMO, 1999], on peut proposer comme critère principal d'évaluation des connaissances, pour surmonter les limites du seul principe de validation expérimental, l'**effectivité** ce qui signifie que les connaissances pour être valables doivent avoir :

- la capacité d'être valides dans certains contextes, pour agir (comprendre, prendre, des décisions, ...) avec un résultat efficace permettant notamment de mener à bien les projets des concepteurs/modélisateurs

- tout en sachant qu'elles peuvent être simultanément non valides dans d'autres contextes.

Pour être ainsi effectives, ces connaissances pourront avoir comme propriétés :


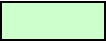


- L'**intelligibilité**, soit la capacité d'aider à la compréhension, à l'aide à la décision pour les acteurs humains, ...

- La capacité à être délibérable, donc confrontable à l'expérimentation, mais pas seulement, aussi à l'argumentation, à la critique, au débat, ...

Annexe 17 : Analyse de l'usage d'un bâtiment

	Géolocalisation (Où ?)	Période et durée (Quand ?)	Caractérisation de la population d'utilisateurs* (Qui ?)	Constitution/ Objectif (Quoi ?)	Manière (Comment ?)	Raison (Pourquoi ?)
Chauffage	<p>Domaine Rationnel : Présence effective d'une pièce Localisation de la pièce dans le bâtiment (Nord/Sud)</p> <p>Domaine Sensible : A l'endroit où l'utilisateur juge sa satisfaction</p>	<p>Domaine Rationnel : Lors de l'occupation effective d'une pièce</p> <p>Domaine Sensible : A l'instant où l'utilisateur juge sa satisfaction</p>	<p>Domaine Rationnel : Emission de chaleur : apports interne humain</p>	<p>Domaine Sensible : Niveau de température (20°C) Niveau d'humidité (50% < HR < 80%)</p>	<p>Domaine Rationnel : Ouverture de la fenêtre/porte pour rafraîchir/chauffer ou autres Mise de la consigne au maximum</p>	<p>Domaine Rationnel : Confort thermique Raison sociale, bien être</p>
Climatisation	<p>Domaine Rationnel : Présence effective d'une pièce Localisation de la pièce dans le bâtiment (Nord/Sud)</p> <p>Domaine Sensible : A l'endroit où l'utilisateur juge sa satisfaction</p>	<p>Domaine Rationnel : Lors de l'occupation effective d'une pièce</p> <p>Domaine Sensible : A l'instant où l'utilisateur juge sa satisfaction</p>	<p>Domaine Rationnel : Emission de chaleur : apports interne humain</p>	<p>Domaine Sensible : Niveau de température (20°C) Niveau d'humidité (50% < HR < 80%)</p>	<p>Domaine Rationnel : Ouverture de la fenêtre/porte pour rafraîchir/chauffer Mise de la consigne au maximum</p>	<p>Domaine Rationnel : Confort thermique Raison sociale, bien être</p>
Ventilation	<p>Domaine Rationnel : Présence effective d'une pièce</p> <p>Domaine Sensible : A l'endroit où l'utilisateur juge sa satisfaction</p>	<p>Domaine Rationnel : Lors de l'occupation effective d'une pièce</p> <p>Domaine Sensible : A l'instant où l'utilisateur juge sa satisfaction</p>	<p>Domaine Rationnel : Nombre d'occupants émettant du CO2</p>	<p>Domaine Sensible : Taux de CO2 Taux de COV Odeurs Sensation aux courants d'air</p>	<p>Domaine Rationnel : Ouverture de la fenêtre/porte pour ventiler Forçage manuel à une consigne maximale :</p>	
Eclairage	<p>Domaine Rationnel : Présence effective d'une pièce Localisation exacte si pièce commune (zonage)</p> <p>Domaine Sensible : A l'instant où l'utilisateur juge sa satisfaction</p>	<p>Domaine Rationnel : Lors de la présence effective</p> <p>Domaine Sensible : A l'instant où l'utilisateur juge sa satisfaction</p>	<p>Domaine Rationnel : En fonction du nombre exact de personnes et leur localisation dans la pièce si salle commune</p>	<p>Domaine Sensible : Niveau de lumière Rendu des couleurs Eblouissement</p>	<p>Domaine Rationnel : Changement de consigne de luminosité Extinction, allumage)</p>	<p>Domaine Sensible : Confort visuel</p> <p>Domaine Rationnel : Esthétique (Ambiance visuelle) Sécurité</p>

Ordinateur Informatique			Domaine Rationnel : Selon le profil socio professionnel et les activités de travail/loisir	Domaine Sensible : Informations de type média (son, image, vidéo) ou de type textuelle	Domaine Rationnel : Mise en veille ou non lors d'absences prolongées	Domaine Rationnel : Travail Loisir Education
Réfrigérateur/ Congélateur	Placement dans un endroit au sec, à l'abri de la lumière et en dehors de source chaudes (micro ondes dessus, à côté du four,...) Encastré ou non			Domaine Sensible : Température des aliments Niveau d'hygiène	Domaine Rationnel : Ouverture intempesive/longue de la porte du frigo Quantité variable du chargement du frigo	Domaine Sensible : Hygiène Domaine Rationnel : Plaisir (produit frais l'été)
Machine à Laver		Domaine Rationnel : En dehors des périodes de pics de consommation (Perspective smart grid)		Domaine Rationnel : Quantité de linge Choix du textile/ du programme Domaine Sensible : Niveau d'hygiène	Domaine Rationnel : Mise en veille ou non lors d'absence prolongés	
Lave Vaisselle		Domaine Rationnel : En dehors des périodes de pics de consommation (Perspective smart grid)		Domaine Rationnel : Quantité de vaisselle Choix du programme Domaine Sensible : Niveau d'hygiène	Domaine Rationnel : Mise en veille ou non lors d'absence prolongés	
Appareils de cuisson (Four, Plaques, micro ondes)				Nature de l'aliment Mode de cuisson (feu doux, etc...)	Domaine Rationnel : Mettre au maximum la consigne et ensuite baisser (faire bouillir l'eau) : différents modes de cuissons	Domaine Sensible : Satiété Domaine Rationnel : Plaisir (produits chaud l'hiver)
Multimédia et autres	Domaine Rationnel : Musique : en fonction de l'occupation de la pièce Télévision : occupation de la pièce	Domaine Rationnel : Lors de l'occupation effective de la pièce/ présence de quelqu'un devant l'équipement		Domaine Sensible : Niveau sonore (Décibel) Qualité des fréquences sonores (Hz) ou de l'image	Domaine Rationnel : Mise en veille ou non lors d'absence prolongés	Domaine Rationnel : Education Loisir Plaisir (ambiance sonore) Fond sonore Fond visuel durant les repas 236 Babysitting

-  Equipement agissant sur un flux physique facilement quantifiable. En terme de commandabilité, on peut contrôler à distance (au travers d'un gestionnaire d'énergie) la consigne de réglage de tels équipements
-  Equipement intrinsèquement lié à l'usage. Non commandable car allumage, usage et extinction sont liés à l'action de l'utilisateur
-  Equipement lié à l'utilisateur par usage discontinu sinon fonctionne de manière autonome afin de compenser les actions de l'utilisateur
-  Equipement lié à l'usage par allumage de l'équipement. Ce sont des charges délestables, reportables

*: La caractérisation de la population peut intégrer des paramètres plus ou moins pertinents pour la conception de système de gestion énergétique comme :

Le nombre d'habitants

La qualité socioprofessionnelle (permet de construire des patterns d'occupation davantage ciblés pour l'anticipation des usages (occupation des pièces)) car l'utilisation de certains équipements varie selon la catégorie professionnelle.

Annexe 18 Aide à la conception du système de Ventilation

Parmi les autres systèmes énergétiques du bâtiment, on peut retenir le système de ventilation qui d'ailleurs en terme d'élément physique, agit sur le même élément que le confort thermique: l'air.

Nous nous attacherons ici à étudier le système de ventilation de la salle Informatique de la plateforme PREDIS MHI durant la même semaine d'étude que précédemment (du 29 novembre au 3 Décembre 2010). Nous reprendrons la même philosophie et cheminement que l'étude du chauffage mais cette fois ci du point de vue aéraulique (principalement la qualité de l'air).

18.1 Analyse de l'usage aéraulique et étude de la mesurabilité des paramètres d'usage

Le confort aéraulique est une autre composante du confort d'ambiance et peut être analysé selon l'approche *QQOQCP* annexe 16). On y retrouvera parmi les paramètres d'usage identifiés, ceux relatifs au domaine sensible et ceux relatifs au domaine rationnel.

Domaine sensible

Par rapport au domaine sensible lié à l'air du point de vue ventilation, on retrouvera un certain nombre de paramètres physiques :

- la *qualité de l'air* (répondant à la question Quoi ?) qui pourra être évaluée par le taux de CO₂ (en ppm (partie par millions)) présent dans l'air ambiant ainsi que par le taux de concentration COV (composé organique volatil), les odeurs, etc. (dont nous ne tiendrons pas compte par la suite de ces derniers). On considérera que toutes les personnes ont le même niveau d'exigence (ou niveau de satisfaction) par rapport au niveau de CO₂ et cela constamment au cours du temps. **Mesurabilité** : Le taux de CO₂ est une grandeur physique facile à mesurer grâce à des capteurs de CO₂ existant sur le marché (mesure indiquée généralement en ppm (partie par millions)).
- La *sensation aux courants d'air* liée en partie au positionnement des bouches d'aération ainsi que le débit d'air interne d'une pièce qui peut amener les personnes à être plus ou moins satisfaisantes. **Mesurabilité** : difficile car liée au jugement des personnes à un instant donné.

Domaine rationnel

Parallèlement, le domaine rationnel regroupe l'ensemble des paramètres composant l'usage ayant un rapport direct avec l'action :

- La *localisation spatiale et temporelle*. Où, quand et combien de temps les pièces sont occupées par un ou des usagers ? (Réponse à la question Où ? et Quand ? de l'approche *QQOQCP*) Comme dans l'exemple thermique, en fonction de l'identité des usagers qui peuvent avoir un emploi du temps d'occupation variable, l'usage du système de ventilation sera conséquent **Mesurabilité** : Comme précédemment, le lieu et le moment peuvent être combinés en terme d'instrumentation par un capteur de présence.
- le *nombre d'occupants*. En effet, sachant que le principal émetteur de CO₂ est l'utilisateur lui-même, en tant qu'espèce vivante, le nombre d'usagers influencera le niveau de CO₂ et par conséquent la qualité d'air. (Réponse à la question Qui ? de l'approche *QQOQCP*) Comme évoqué précédemment, le nombre de personnes est totalement couplé au système physique car influe directement le paramètre physique sensible de taux de CO₂.

- Les *réactions à l'inconfort* (Réponse à la question *Comment ?* de l'approche *check-list*) Comme observé dans le retour d'expérience de la Plateforme PREDIS MHI, l'usager peut agir indirectement (ouverture porte, installation ventilateur personnel) sur le système de ventilation ce qui aura des conséquences au niveau énergétique et confort. **Mesurabilité** : Assez difficile d'instrumentation.

Que la force soit avec toi.

18.2 Construction de la fonction de satisfaction globale à partir des fonctions de satisfaction de chaque paramètre d'usage

18.2.1 Fonction de satisfaction sensible de la qualité de l'air

Nous avons choisi pour la construction de la fonction de satisfaction sensible de ne prendre que le taux de CO2 comme paramètre d'usage identifié après l'approche QQQQCP (partie 18.1). On pourra, dans des études plus approfondies, prendre en compte les autres paramètres d'usage sensible.

Le taux de CO2 dans l'air est une donnée liée au syndrome de bâtiment malsain qui donne la liste des paramètres physiques qui peuvent engendrer l'inconfort et agir sur la santé des habitants. En cela, le taux de CO2 se positionne ainsi comme une grandeur physique réglementée (Norme NBN EN 13779 par exemple) dont il existe une classification de niveaux acceptables (Tableau 8)

Qualité de l'air	Niveau de CO2 dans les locaux (ppm)	
	Plage type	Valeur par défaut
Excellente	< 400	350
Bonne	400-600	500
Moyenne	600-1000	800
Médiocre	>1000	1200

Tableau 8 : Modèle d'usage du service de qualité d'air/confort aéraulique

Contrairement à la température qui est une donnée physique, le taux de CO2 est davantage liée au processus de sécurité dans le sens où il existe un seuil au-delà duquel cela est dangereux pour la santé. Ainsi, la fonction de satisfaction sensible pourra disposer de différents seuils.

On propose que la satisfaction serait maximale tant qu'on est en deçà du seuil limite (CO2 limite= 1000ppm) mais se dégraderait ensuite au fur et à mesure que le taux de CO2 augmente jusqu'à un maximum (CO2 max=1600ppm dans notre exemple) au-delà duquel la satisfaction sera nulle (figure 75). La loi d'évolution de la courbe de satisfaction entre CO2 limite et CO2 max peut être de différentes allures : exponentielle (comme dans notre cas où l'on a estimé empiriquement ses paramètres (Equation 22)), linéaire (dans le cas d'implémentation dans un système de gestion d'énergie du bâtiment (figure 77), etc...

$$S_{CO_2} = \left(1 - e^{\frac{(C(t)-16)}{100} / 2}\right)$$

$C(t)$ = Taux de CO2 (ppm)

Equation 22

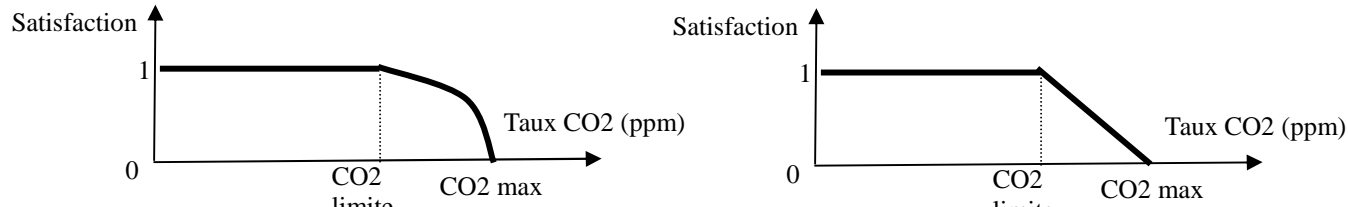


Figure 75 : Fonction de satisfaction CO2 (exponentielle et linearisée)

Une telle fonction de satisfaction est opérationnelle lors de la présence effective des habitants car ce sont eux qui ressentent ces phénomènes

18.2.3 Fonction de satisfaction Rationnelle aéraulique.

Comme dans l'exemple du système de chauffage (partie 2 chapitre 4), il est intéressant de pouvoir construire une fonction de satisfaction correspondant à la consommation énergétique permettant de pouvoir faire émerger les gaspillages d'énergie. Nous ne prendrons en compte que les paramètres d'usage rationnels de présence *de l'occupant, l'ouverture du bâtiment ainsi que la consommation énergétique* (au travers de la puissance électrique consommée par la ventilation)

Ainsi, on construit une fonction de satisfaction ($S_{\text{énergie}}$) privilégiant la consommation d'énergie lorsque la salle est effectivement occupée et pénalisant les périodes de ventilation alors que la salle est inoccupée (Equation 23)

$$\begin{cases} \text{SI (Presence Usager=1 \& Ouverture Batiment=1) ET Puissance Ventilation>0: } S_{\text{énergie}}=1 \\ \text{SI ((Presence Usager=0 \& Ouverture Batiment=1) OU Ouverture Batiment=0) ET Puissance Ventilation=0: } S_{\text{énergie}}=1 \\ \text{SI ((Presence Usager=0 \& Ouverture Batiment=1) OU Ouverture Batiment=0) ET Puissance Ventilation>0: } S_{\text{énergie}}=0 \end{cases} \quad \text{Equation 23}$$

18.2.4 Fonction de satisfaction globale du confort aéraulique

Comme nous l'avons présenté dans le cas thermique, on peut construire une fonction de satisfaction globale par combinaison des fonctions de satisfaction précédentes en fonction des objectifs et priorités d'intégration de l'usage que l'on se donne.

Nous choisirons ici de construire la fonction de satisfaction globale à partir de l'approche PLN car nous souhaitons, par exemple, valoriser la solution la plus économique ($a=1, b=2$). (Equation 24)

$$FS_{i,a\acute{e}raulique} = \frac{a.FSS_{i,CO_2} + b.FSr_{i,Energie}}{a + b} \quad \text{Equation 24}$$

18.3 Application au Système de ventilation

L'objet de l'étude de l'aide à la décision est de pouvoir comparer ici différentes configurations d'un même système de ventilation. Ces configurations différencient selon la stratégie de contrôle-commande appliqué afin de pouvoir fournir le niveau de CO2 souhaité.

18.3.1 Stratégies de contrôles commande étudiées

Les quatre types de contrôle-commande que l'on comparera au travers du diagramme de compromis différent en termes de lois de commande du débit d'air :

- Système Sans Ventilation : (Scénario d'étude n°1 Annexe 19) On suppose une première étude sans ventilation artificielle et où le renouvellement d'air est seulement réalisé au travers des infiltrations d'air (portes, fenêtres, etc...). Cela pourrait correspondre également à la situation où le système de ventilation est en panne.
- Système de Ventilation Basique Sans régulation (Scénario d'étude n°2 annexe 19) : Dans ce cas, on suppose un débit de ventilation constant (430m³/h) durant les heures d'ouverture de la salle : de 8h à 18h du lundi au vendredi. Ce débit correspond environ à la valeur nominale préconisée par la réglementation sur la ventilation dans les bâtiments si l'on prend 18m³/h/personnes avec notre scénario de 25 personnes présentes. On pourra remarquer au passage que c'est cette solution qui est employée réellement sur la plateforme PREDIS MHI.
- Système de chauffage avec Détection de présence Sans régulation (Scénario d'étude n°3 annexe 19) : Dans ce cas, la ventilation est enclenchée lors des horaires d'occupation de la salle Informatique (les lundi, mardi, mercredi et vendredi aux horaires effectives) à un débit égal à 430m³/h. Technologiquement, ce scénario pourrait correspondre à l'installation d'un détecteur de présence commandant le système de ventilation.
- Système de chauffage anticipatif avec régulation (Scénario d'étude n°4 annexe 19) Dans ce cas, le système de ventilation dispose d'une régulation de débit par rapport au taux de CO2. Cette régulation est construite de façon à ne pas ventiler lorsque le taux de CO2 est inférieur à 1000ppm (seuil de CO2 au-delà duquel les effets du CO2 peuvent être nocif pour la santé. Taux limites donné pour des immeubles de bureau (AQME, 1995)) et au-delà, on ventile de façon à maintenir le taux de concentration à 1000ppm.

18.3.2 Détermination du coût énergétique

Afin de pouvoir déterminer le coût énergétique de chaque solution, on calculera la consommation électrique du système de ventilation.

La consommation électrique d'un ventilateur peut être liée au débit d'air qu'il fournit par l'équation 25 [AICVF, 1992]. On supposera dans notre calcul la perte de charge constante. La valeur de la perte de charge retenue est celle trouvée expérimentalement à un point de fonctionnement donné (1030Pa)

$$C_{elec}(t) = \frac{Q(t) \cdot \Delta p}{\eta_{vent}} \quad \text{Equation 25}$$

avec

C_{elec} = Consommation électrique du transport de l'air (W)

Q = Débit d'air neuf (m^3 / s)

Δp = Pertes de charge (pulsion+extraction) (Pa)=1030 Pa

η_{vent} = Rendement global du système de ventilation (moyenne entre pulsion et extraction)=0.65

Cette consommation électrique nous permet donc de pouvoir construire le coût énergétique de chaque solution.

18.3.3 Evolution du taux de CO2

Le taux de CO2 d'une pièce peut être modélisé en fonction des paramètres physiques (Volume de la pièce), du système de ventilation (débit d'air) et des occupants qui sont les principaux émetteurs de CO2 (Equation 26) [JEON, 2010]:

$$V \frac{dC(t)}{dt} = -Q \cdot (C(t) - C_0) + G \cdot P \quad \text{Equation 26}$$

Avec

$C(t)$ = Taux de CO2 dans la pièce (ppm ou g)

C_0 = Taux de CO2 de l'air insufflé=Taux de CO2 atmosphérique =380ppm

Q = Débit d'air de soufflage (m^3 / min)

V = Volume de la pièce (m^3)

G = Quantité de CO2 émis par personne (0,44g/min au repos)

P = Nombre de personnes

La conversion entre la quantité de CO2 exprimée en grammes et en ppm est obtenue par (Equation 27) :

$$C_{(g)}(t) = \frac{C_{(ppm)}(t) * V * m_{air}}{1000}$$

Equation 27

m_{air} = masse volumique de l'air: 1.2kg/m³

Grâce à la détermination de l'évolution de la concentration de CO2 on peut évaluer la fonction de satisfaction sensible aéraulique dans notre étude de cas. Ensuite, avec la fonction de satisfaction rationnelle, on construit la fonction de satisfaction globale et l'applique aux différentes stratégies de contrôle-commande de ventilation afin de les comparer sur le diagramme de compromis Coût/Satisfaction.

18.4 Analyse des résultats et prise de décisions

Nous avons pu voir par l'exemple thermique que pour prendre une décision sur le choix de systèmes de commandes, le concepteur peut étudier la satisfaction de différents points de vue (diagramme satisfaction globale/ coût, diagramme satisfaction sensible/ coût, diagramme satisfaction rationnelle coût). Ici, on se propose d'étudier directement la satisfaction globale du système (construite à partir de l'équation 22) en fonction du coût énergétique de chaque configuration du système de ventilation (figure 76)

18.4.1 Diagramme de compromis sur la satisfaction globale

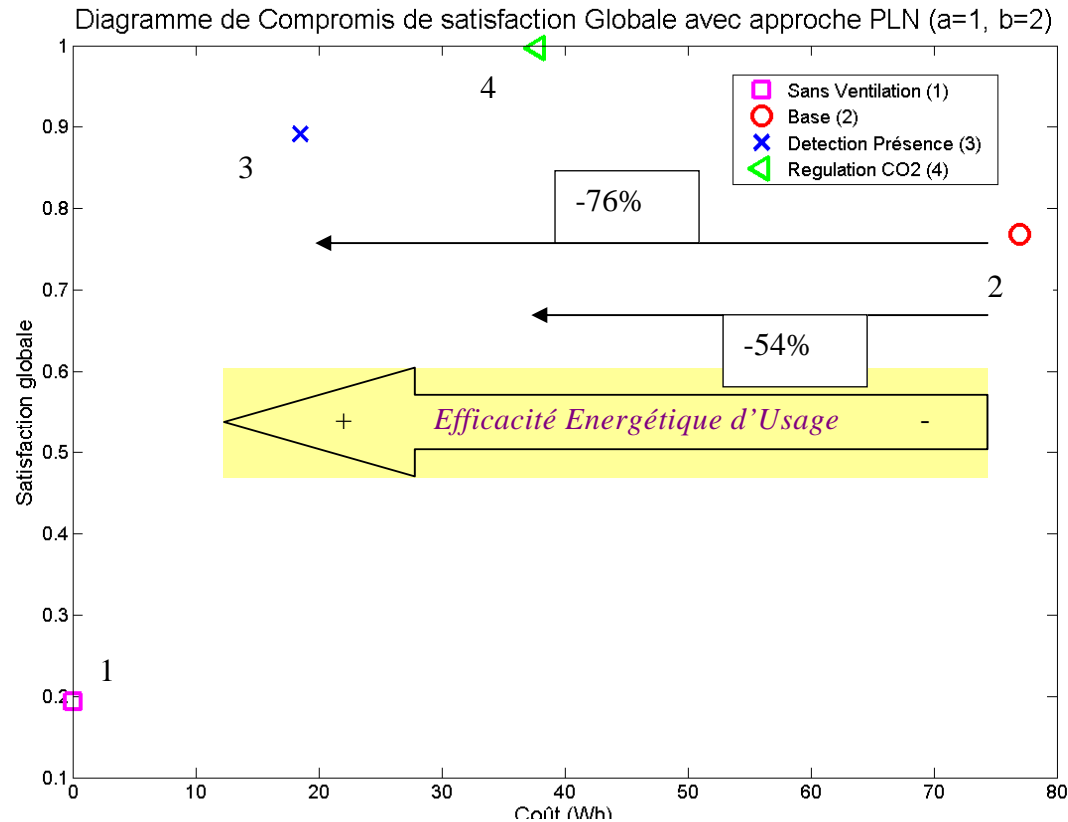


Figure 76 : Diagramme de Compromis système ventilation avec fonction de satisfaction globale

De façon triviale, on retrouve que l'absence de ventilation (scénario 1 figure 76) génère une satisfaction très basse car le taux de concentration de CO2 atteint plus de 7000 ppm.

On peut remarquer d'autre part que le système avec ventilation basique (2) (Scénario d'étude 2 de l'annexe 19), qui correspond au système de régulation réellement installé sur PREDIS, n'est pas la solution optimale du point de vue efficacité d'usage énergétique car consommant beaucoup d'énergie pour un résultat de taux de CO2 peu efficace (taux supérieur à 1500ppm)) (annexe 20). En effet, cette solution de ventilation tourne tout le temps et est donc discriminée grâce à la fonction de satisfaction rationnelle.

On peut ensuite constater qu'avec la simple installation d'un capteur de présence couplé à la commande du système de commande, on peut réduire sensiblement la consommation énergétique (de 77 Wh à 18 Wh soit 76% de réduction) tout en augmentant la satisfaction globale (qualité

d'air + économie d'énergie) (en allant du point 2 au point 3 du graphe 76) Une telle solution simple à mettre en œuvre apparaît comme intéressante dans ce cas où l'on favorise la réduction d'énergie mais c'est au détriment du taux de CO2 dans ce cas (taux de CO2 > 2000ppm)

La solution (4) consistant à mettre en place un système de régulation apparaît comme une solution offrant la meilleure efficacité d'usage énergétique car elle permet d'offrir une qualité d'air optimale (<1000 ppm) tout en économisant de l'énergie par rapport à la solution de ventilation basique (réduction de 56%). Néanmoins, on peut remarquer que cette dernière solution n'est pas la plus économe car dans la construction de l'optimisation du débit de ventilation du système en fonction du CO2, nous n'avons pas contraint un débit maximum (et donc une puissance de ventilation maximale correspondant à la limite physique du système de ventilation) ce qu'y engendre des débits importants. On s'aperçoit ici que l'on pourrait mettre en œuvre une optimisation de la loi de commande du système de ventilation avec comme contrainte le taux de concentration de CO2 d'une part et les économies d'énergies d'autre part.

18.4.2 Autre présentation de la satisfaction globale.

Comme nous avons pu le présenter dans l'exemple thermique, les diagrammes de compromis ont toujours les mêmes abscisses et seules les ordonnées des diagrammes changent. Aussi, il est possible de tracer une version complémentaire de la satisfaction globale de notre système en mettant en abscisse les valeurs de satisfaction rationnelle calculés et en ordonnée la satisfaction sensible (figure 77)

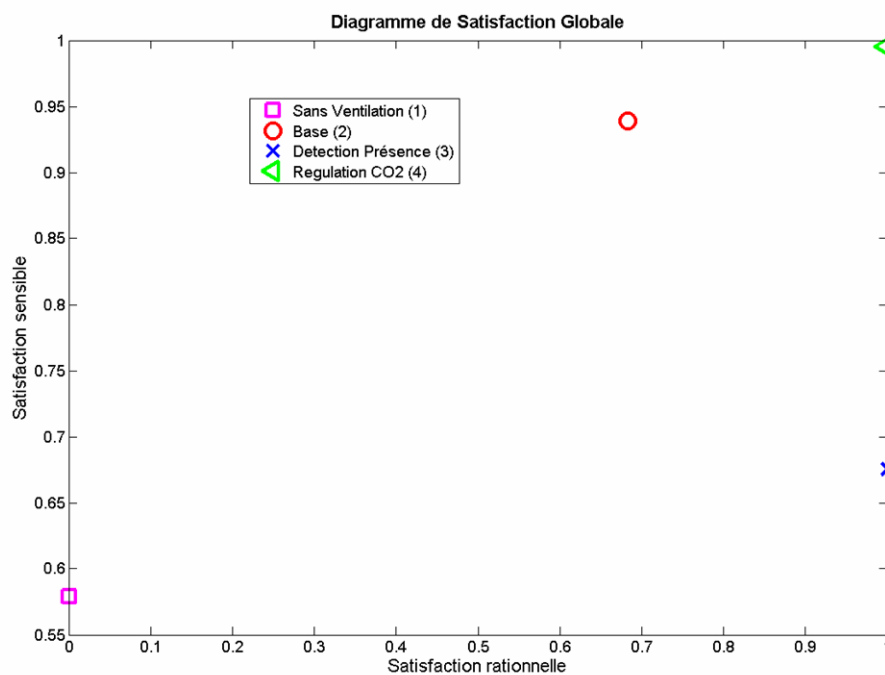


Figure 77 : Diagramme de Satisfaction rationnelle/Satisfaction sensible système ventilation

Un tel graphe nous permet ici de mieux se rendre compte de l'intérêt de chaque système de contrôle-commande sur chacun des domaines sensible et rationnelle. On y voit apparaître que le système 4, celui disposant d'un système de régulation, est celui le plus satisfaisant aussi bien au niveau sensible qu'au niveau économie d'énergie (valeur de 1 dans les deux fonctions de satisfaction). Une telle performance est due au fait que cette solution intègre mieux les dimensions de l'usage :

- meilleure intégration du moment et du lieu de l'usage par l'installation de capteur de présence
- meilleure intégration du nombre d'occupant par la régulation du débit en fonction du nombre d'occupant

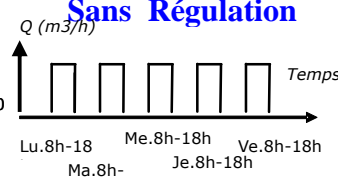
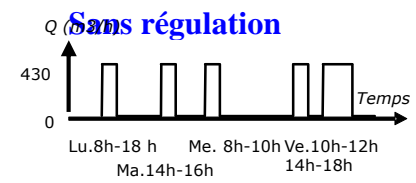
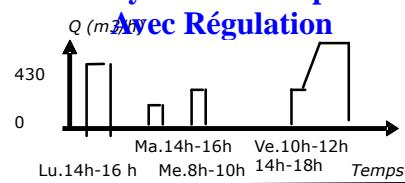
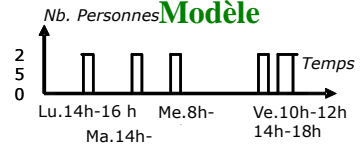
18.4.3 Bilan des diagramme et prise de décision

Nous avons pu voir de nouveau que les diagrammes construits ont chacun une effectivité particulière dans le sens où ils permettent au concepteur d'en retirer des informations utiles pour ses choix de matériel (d'où une nécessité également de l'intelligibilité des graphes) :

- Le graphe faisant apparaître la satisfaction globale comme une combinaison linéaire de ses composantes de satisfaction (figure 76) permet au concepteur d'écarter certaines solutions inacceptables : pas de ventilation (trop d'inconfort) ou ventilation basique (consomme trop)
- Le graphe faisant apparaître les composantes de la satisfaction globale (figure 77), permet de mieux comprendre les avantages et inconvénients de chaque stratégies de contrôle-commande vis-à-vis des fonctions de satisfaction sensible et rationnelle et de départager au final les dernières solutions : le système réactif (4) a la meilleure efficacité d'usage énergétique donc il choisira celui-ci.
- On peut enfin constater que l'on peut mettre en place facilement en œuvre des solutions technologiques intégrant l'usage qui permettent d'économiser de l'énergie jusqu'à 76% (figure 76)

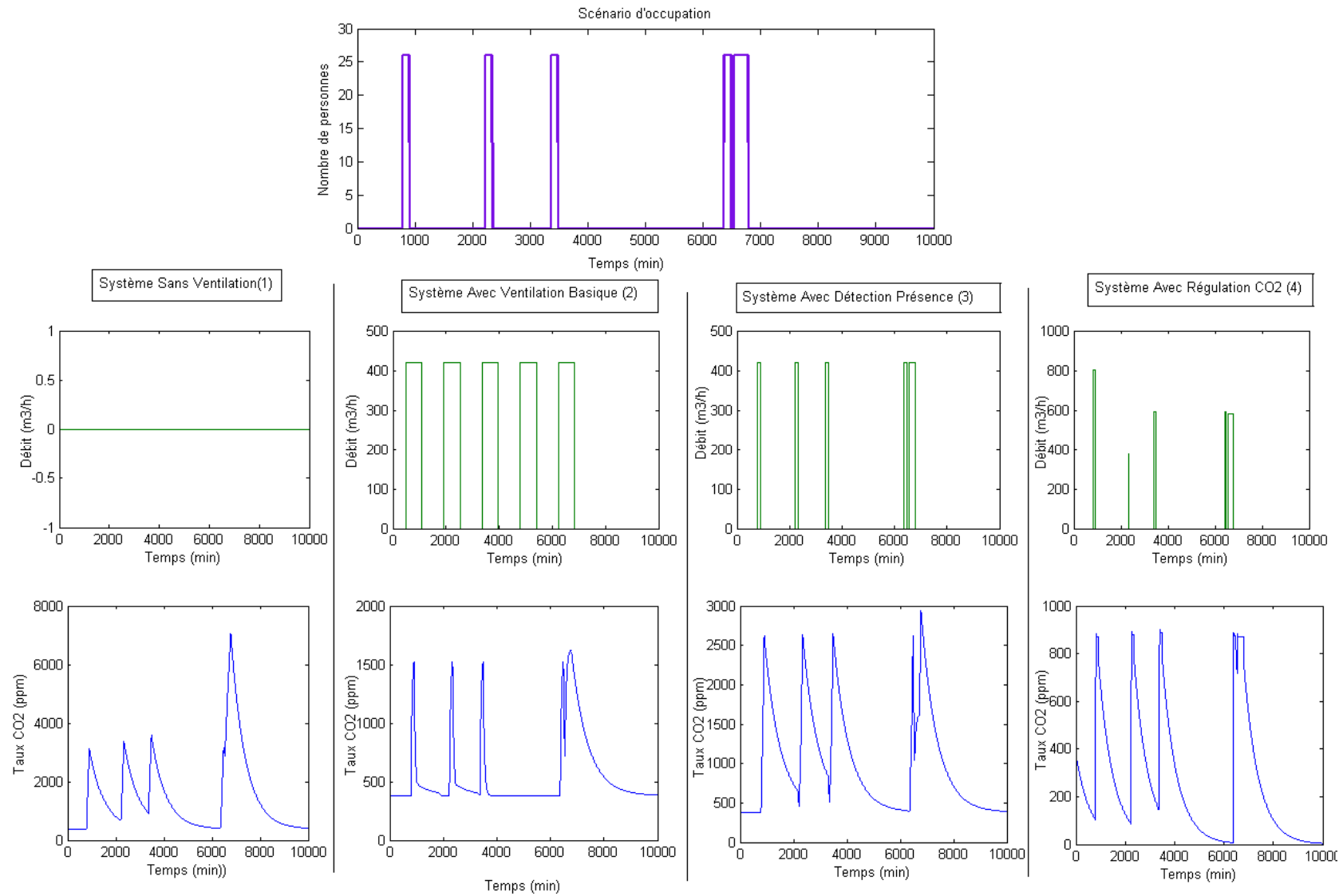
Les diagramme de compromis montrent donc que lorsque l'on intègre davantage l'usage, sous forme de composante spatiale et temporelle ainsi que par sa composante nombre d'occupants (par exemple le fait d'intégrer un système capable de connaître l'occupation, aussi bien en nombre de personnes qu'en terme de période d'occupation, au contrôle-commande de la ventilation) permet de gagner en EUE. En effet, on gagne en satisfaction rationnelle (car le taux de CO2 est considérablement augmenté) mais également, on gagne en satisfaction rationnelle : on consomme justement l'énergie au moment effectif de l'usage.

Annexe 19 : Scénarios d'étude pour le système de ventilation

<p>Consigne de Débit</p> <p>Scénarios d'usage</p>	<p>Sans Ventilation</p>	<p>Basique Sans Régulation</p> 	<p>Avec Détection Présence Sans régulation</p> 	<p>Système Anticipatif Avec Régulation</p> 
<p>Scénario Usage Modèle</p> 	<p>1</p>	<p>2</p>	<p>3</p>	<p>4</p>

Annexe 20 : Graphes d'évolution du taux de CO2

Scénario d'usage : Occupation Modèle : 25 personnes constant durant les périodes d'occupation de la salle Informatique



Annexe 21 : Aide à la conception système d'éclairage artificiel

Nous allons nous intéresser à présent au 3^{ème} type de confort composant le confort ambiant : le confort visuel au travers de l'étude de l'éclairage artificiel. Nous nous intéresserons uniquement à l'éclairage artificiel qui vient en complément de l'éclairage naturel ce dernier faisant l'objet d'optimisation lors de la conception architecturale. Comme pour le système de chauffage et de ventilation, nous reprendrons la même trame d'analyse et d'application.

Néanmoins, nous étudierons ici l'Espace Bureau de la plateforme PREDIS MHI car cette pièce dispose de huit postes de travail et est utilisée de façon plus importante que la salle Informatique. Une telle configuration permet de définir de manière plus individualisée la notion de confort visuel. D'autre part, le retour d'expérience en matière d'insatisfaction sur l'éclairage s'est fait en particulier sentir dans cet endroit.

On découpera ainsi huit zones d'éclairage dans cette pièce où l'on y mettra pour chaque zone un luminaire (annexe 22). La science de l'éclairage et de la lumière étant un domaine scientifique en soit, nous aborderons ce domaine de façon simpliste par rapport à la réalité afin de pouvoir valider sur un cas simple notre outil d'aide à la décision.

On posera l'hypothèse simplificatrice que le niveau d'éclairement lumineux dans une zone est seulement due à l'éclairage naturel ainsi que l'éclairage artificiel de cette zone et n'est pas influencé pas le système d'éclairage artificiel d'une zone voisine.

21.1 Analyse de l'usage et étude de la mesurabilité des paramètres d'usage du confort visuel

Le confort visuel est une autre composante du confort d'ambiance dont l'interaction entre l'utilisateur et l'artefact est beaucoup plus présent et direct que dans le cas de la ventilation ou du chauffage. Cela est lié également au fait que l'inertie du phénomène lumineux est quasi nulle comparé à l'inertie thermique ou aéraulique qui font qu'il y a un certain temps de réactivité au niveau des équipements mais également des usagers (l'insatisfaction de la lumière va être immédiate)

Domaine sensible :

Si l'on applique la méthode QQQCP au domaine sensible de l'éclairage, on pourra retrouver plusieurs paramètres d'usage sensibles intervenant dans le confort visuel :

- La **quantité de lumière** reçue par une surface (répondant à la question Quoi ?) qui pourra être évaluée par l'éclairement lumineux (en lux) à un point donné de la pièce. On prendra cette grandeur physique comme principal élément d'évaluation du confort visuel car correspondant à l'objectif du service d'éclairage. On considérera que toutes les personnes ont le même niveau d'exigence (ou rapport de satisfaction) par rapport au niveau d'éclairement lumineux (niveau de luminosité défini par rapport à une surface située à 1m, correspondant au plan de travail pour un travail de bureautique) et cela constamment au cours du temps. **Mesurabilité** : Assez facile grâce à l'emploi d'un luxmètre situé sur la zone de travail
- La **sensation à la couleur** : Le rendu des couleurs est un éléments sur lequel on peut juger un éclairage artificiel selon la température des couleurs émis
- La **sensibilité aux éblouissements** définit également le confort visuel afin de ne pas trop fatiguer l'œil

Domaine rationnel :

Parmi les paramètres prenant part à la satisfaction rationnelle c'est-à-dire liée à l'action, on peut y trouver :

- la **localisation de l'usage** : où est situé l'usage (l'utilisateur), dans quel endroit de la pièce le confort visuel doit être évalué ? (Réponse à la question *Où ?* de l'approche *check-list*) Il s'agit ici de prendre en compte en plus de cela le positionnement de l'utilisateur vis-à-vis des sources lumineuses naturelles (fenêtres) et artificielles (lampes, etc...) et déterminer quelles sont les zones où l'occupation est effective. Pour notre étude, on réalisera le découpage de l'espace Bureau en huit zones correspondant aux huit postes de travail où se situe l'usage.
- le **moment de l'usage** : quand et combien de temps les postes de travail sont occupés par un ou des utilisateurs ? (Réponse à la question *Quand ?* de l'approche *check-list*). **Mesurabilité** : Comme précédemment un capteur de présence permet de localiser précisément l'usage ainsi que son instant d'occurrence.
- le **nombre d'occupant**. Cela sera couplé à la problématique de la localisation de l'usage car l'intérêt est de savoir quel utilisateur est positionné à quel poste de travail afin d'individualiser la notion de confort visuel. (Réponse à la question *Qui ?* de l'approche *check-list*). **Mesurabilité** : La mesure d'une telle donnée pourra s'effectuer soit indirectement au travers de capteur de CO2 soit directement avec des compteurs de présence et/ou détecteur de présence par zones.
- Les **réactions à l'inconfort** (Réponse à la question *Comment ?* de l'approche *check-list*) Comme observé dans le retour d'expérience de la Plateforme PREDIS MHI, l'utilisateur peut agir indirectement (agissant sur l'occultation des fenêtres) ou directement (en forçant la consigne d'éclairage) sur le système de ventilation ce qui aura des conséquences au niveau énergétique et confort.
- La **raison** d'avoir le confort visuel peut être ici également multiple (Réponse à la question *Pourquoi ?* de l'approche *check-list*). En effet, la raison d'utiliser un système d'éclairage artificiel peut être pour des raisons de visualisation des objets mais il peut être, notamment dans le cas d'application résidentiel, utilisé pour des raisons de sécurité (lumière laissée allumée la nuit pour rassurer les enfants, pour montrer une présence dans la pièce), d'esthétique (utilisation de lampes colorées pour créer des ambiances lumineuses particulières,..) etc....

21.2 Construction de la fonction de satisfaction globale à partir des fonctions de satisfaction de chaque paramètre d'usage

21.2.1 Satisfaction sensible de l'éclairage lumineux

Comme nous avons pu le voir précédemment, le confort visuel est un domaine complexe et il est difficile de pouvoir construire une fonction de satisfaction universelle pour l'éclairage (annexe 24). Néanmoins, nous baserons la construction de notre fonction sur seulement le niveau d'éclairage qui est facilement mesurable.

Afin de construire le profil de la fonction de satisfaction de confort visuel, on s'est basé ici sur les réponses d'un questionnaire mené au sein de la plateforme PREDIS MHI portant sur le confort visuel (annexe 25). On emploie, pour la construction de la fonction de satisfaction, une méthode empirique par l'expert et validé par une enquête exploratoire in situ (par questionnaire) (Partie 1 chapitre 4) Dans ce questionnaire, il est question de définir les niveaux d'éclairage acceptables ainsi que le comportement de la satisfaction supposée en fonction de l'éclairage lumineux afin de déterminer, avec les usagers, la forme et l'amplitude de la fonction de satisfaction sensible de l'éclairage lumineux. C'est ainsi une fonction de satisfaction construite par les usagers et adaptée à eux-mêmes.

Il est ressorti de cet entretien sociologique (que le concepteur peut donc mener) un certain profil de satisfaction : le ressenti des personnes par rapport au confort visuel se caractérise par une plage de tolérance à l'éclairage lumineux (75% des personnes interrogées ont choisi le profil présenté figure 78).

Ainsi, la fonction de satisfaction sensible (S_{Lux}) pourra être définie par une plage optimale d'éclairage total où la satisfaction est maximale, limitée de part et d'autre par un seuil minimum (Ecl Opt Min) et maximal (Ecl Opt Max) au delà desquels la satisfaction se dégrade jusqu'à des points limites (Ecl limite min et Ecl limite max) où la satisfaction s'annule (figure 78).

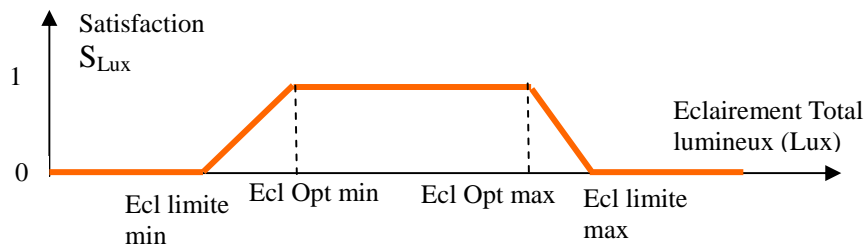


Figure 78 : Fonction de satisfaction Eclairage Lumineux

On pourra retrouver dans la thèse de Carre [CARR, 2008] que le confort visuel pourrait prendre en compte différents éléments et serait défini selon certaines normes nationales et internationales. On remarquera que cette fonction de satisfaction découle en fait d'une linéarisation d'une loi de distribution gaussienne qui pourrait être également utilisée à condition de la paramétrer en fonction des exigences des personnes.

21.2.3 Fonction de satisfaction rationnelle.

Comme précédemment, il est intéressant de pouvoir construire une fonction de satisfaction correspondant à la consommation énergétique permettant de pouvoir faire émerger les gaspillages d'énergie. On prendra pour construire une telle fonction de satisfaction, les paramètres d'usage rationnel de présence d'occupant dans une zone donnée, les horaires d'ouverture du bâtiment ainsi que la puissance électrique consommée par l'éclairage artificiel.

Ainsi, on construit avec les usagers, suite à une réflexion liée au jugement de ce qui est juste ou pas de consommer selon leurs points du vue, une fonction de satisfaction ($S_{\text{énergie}}$) privilégiant la consommation d'énergie lorsque une zone i est éclairée lorsqu'elle est effectivement occupée et pénalisant les périodes d'éclairage alors que la zone i est inoccupée (Equation 28):

$$\begin{cases} \text{SI (Presence Usager}_i=1 \text{ \& Ouvverture Batiment}=1) \text{ ET Puissance Eclairage}_i>0: S_{\text{énergie},i}=1 \\ \text{SI ((Presence Usager}_i=0 \text{ \& Ouvverture Batiment}=1) \text{ OU Ouvverture Batiment}=0) \text{ ET Puissance Eclairage}_i=0: S_{\text{énergie},i}=1 \\ \text{SI ((Presence Usager}_i=0 \text{ \& Ouvverture Batiment}=1) \text{ OU Ouvverture Batiment}=0) \text{ ET Puissance Eclairage}_i>0: S_{\text{énergie},i}=0 \end{cases} \quad \text{Equation 28}$$

21.2.4 Fonction de satisfaction globale du confort visuel

On peut désormais construire la fonction de satisfaction globale par combinaison des fonctions de satisfaction précédentes en fonction des objectifs et priorités d'intégration de l'usage que l'on se donne. Etant donné que l'on définit les fonctions de satisfaction pour chaque zone, il sera possible d'étudier la fonction de satisfaction globale pour chaque zone et ainsi il sera possible d'individualiser la notion de confort visuel.

Nous choisirons ici de construire la fonction de satisfaction globale du confort visuel comme une combinaison disjonctive des différentes fonctions de satisfaction de paramètres d'usage. Nous y appliquerons également une pondération (choix des coefficients a , b) à ces fonctions de satisfaction tels afin de valoriser, par exemple, la solution la plus économe (c'est-à-dire en privilégiant la fonction de satisfaction rationnelle) ($a=1$, $b=2$). (Equation 29)

$$FS_{i,\text{visuel}} = \frac{a.FSS_{i,\text{Lux}} + b.FSr_{i,\text{Energie}}}{a + b} \quad \text{Equation 29}$$

On va à présent appliquer cette fonction de satisfaction globale du confort visuel au système d'éclairage artificiel que l'on va présenter à présent

21.3 Application au système d'éclairage artificiel de l'Espace Bureau

L'objet de l'étude de l'aide à la décision est de pouvoir comparer ici différentes configurations d'un même système d'éclairage artificiel. Comme évoqué précédemment, la modélisation d'une pièce et d'un système d'éclairage est particulièrement difficile à modéliser dans sa totalité, d'autant plus de façon simple. Le domaine de l'éclairage utilise souvent des logiciels de simulations (Dialux, etc..) permettant de simuler et dimensionner les systèmes d'éclairage artificiel.

21.3.1 Systèmes de contrôle-commande

Les configurations d'éclairage artificiel étudiés différencient selon la stratégie de contrôle-commande appliquée afin de pouvoir fournir le niveau d'éclairement lumineux souhaité en prenant en compte ou non l'éclairage naturel.

Les 6 types de contrôle-commande que l'on comparera au travers du diagramme de compromis différent en terme de loi de commande de l'éclairement lumineux qui est le paramètre physique principal effectué par un système d'éclairage artificiel:

- Système Eclairage de Base : Par interrupteur (Scénario d'étude n°1 Annexe 23) On suppose une première étude dans laquelle une première personne arrive le matin allume l'éclairage général (donc fournissant un éclairage à tous les postes de travail) de la salle à un niveau de maximal correspondant au flux lumineux maximal disponible au niveau des luminaires (400 Lux) et une dernière personne l'éteint. Il y aura ainsi 400lux d'éclairement lumineux provenant de l'éclairage artificiel dans chaque zone durant toute la période d'occupation du bâtiment. Un tel scénario pourrait correspondre également à un enclenchement automatique programmé par la GTC en fonction de l'horaire d'ouverture du bâtiment.
- Système Eclairage avec Détecteur de présence (Scénario d'étude n°2 annexe 23) : Dans ce cas, on suppose que l'éclairage artificiel général (allumage simultanée des huit zones) à 400lux s'effectue à la détection de présence d'au moins une personne présente dans l'espace bureau lors des heures d'ouverture de la salle.
- Système de zonage de l'éclairage (Scénario d'étude n°3 annexe 23) : Dans ce cas, on met en application les zones d'éclairage défini en annexe 18 et on suppose que chaque zone est éclairé par le luminaire correspondant à un éclairement lumineux nominal de 400 lux. Ce déclenchement s'effectue par détection de présence d'une personne dans la zone concernée. Technologiquement, ce scénario pourrait correspondre à l'installation d'un détecteur de présence dans chaque zone ainsi qu'une commande d'éclairage indépendante, par zones. Un tel système de localisation de l'usage permet d'intégrer la dimension « lieu » de l'approche *QOOQCP* intégrant ainsi l'usage.
- Système Eclairage de Base : Par interrupteur avec régulation éclairage naturel (dimming) (Scénario d'étude n°4 annexe 23) : On reprend ici le système d'allumage classique de l'éclairage général (allumage par le premier usager entrant et extinction par le dernier usager sortant) avec cette fois ci un niveau d'éclairement lumineux régulé en fonction de l'éclairage naturel rentrant dans la pièce. Le but est de maintenir 400lux dans chaque zone donc le flux lumineux artificiel compensera le manque d'éclairage. Cette technologie s'appelle le dimming [KIM, 2007].
- Système Eclairage avec Détecteur de présence et Dimming (Scénario d'étude n°5 annexe 23) : Dans ce cas, on suppose que l'éclairage artificiel général (allumage simultanée des 8 zones) s'effectue à la détection de présence d'au moins une personne présente dans l'espace bureau lors heures d'ouverture de la salle mais à un niveau de d'éclairement régulé en fonction de l'éclairage naturel (dimming).
- Système de zonage de l'éclairage avec Dimming (Scénario d'étude n°6 annexe 23) : Dans ce cas, on met en application les zones d'éclairage défini en annexe 21 et on suppose que chaque zone est éclairée par le luminaire correspondant équipé d'autre part d'un

système de dimming. Un tel système de localisation de l'usage et de régulation de la lumière permet d'intégrer les dimensions « lieu » et « objectif » de l'approche *QOQCP* intégrant ainsi davantage l'usage.

21.3.2 Consommation énergétique des luminaires

Les luminaires qui fournissent le service d'éclairage effectuent cela de manière instantanée du moment où l'on est allumé. L'éclairage est ainsi un service ambiant n'ayant aucune inertie car la lumière artificielle fournit un éclairage lumineux, à sa valeur nominale, du moment où on utilise le système.

Ces luminaires sont composés de différents éléments qui impacteront le niveau d'éclairement dont

- un réflecteur qui réfléchit la lumière émise par la lampe et la dirige selon des directions préférentielles
- des venelles qui protègent l'œil des éblouissements en empêchant la vue directe de la lampe

En cela aucun luminaire ne restitue 100% de la lumière émise par les lampes et possède alors d'un rendement lumineux correspondant au rapport du flux lumineux émis par le luminaire (ensemble lampes+ réflecteur) et le flux lumineux des lampes. Ces mêmes lampes auront un rendement électrique (ou efficacité lumineuse) correspondant au rapport entre l'énergie électrique consommée et la production de flux lumineux soit au travers de la technologie incandescente (efficacité lumineuse comprise entre 9 et 16 lm/W) soit par fluorescence (efficacité lumineuse comprise entre 60 et 90 lm/W)

Ainsi, la relation entre la puissance électrique consommée et l'éclairement lumineux fourni par les luminaires dans une zone donnée pour une surface de 1m², situé à 1m du sol est donné par l'équation suivante : (Equation 30) (exemple pour la zone 1 pour une journée avec les différentes configurations de système d'éclairage (figure 79)):

$$E_{art,i} = \frac{P_{elec}}{\eta_{luminaire} * \delta} \quad \text{Equation 30}$$

$E_{art,i}$ = Eclairement artificiel dans la zone i sur une surface de 1m² (lux)

P_{elec} = Puissance électrique consommée (W)

$\eta_{luminaire}$ = Rendement du luminaire (%)

δ = Efficacité lumineuse de la lampe

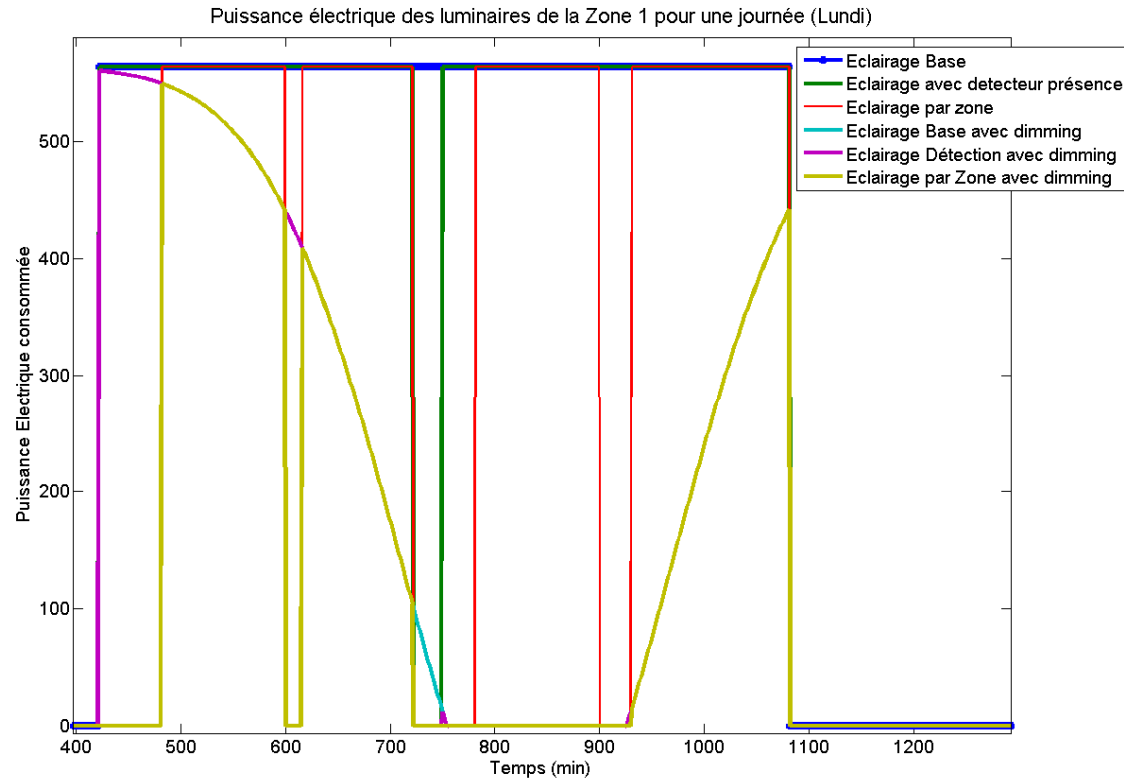
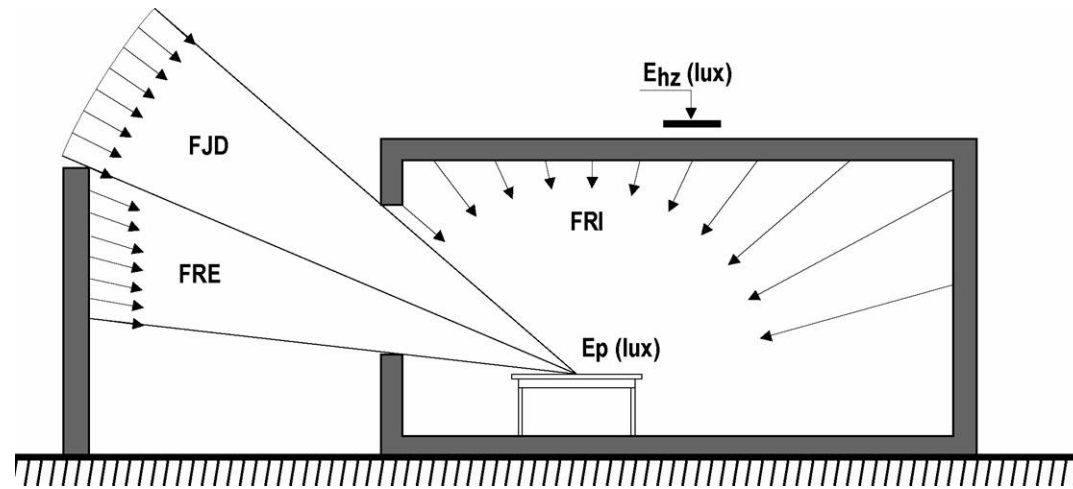


Figure 79 : Puissance électrique des luminaires pour une zone durant une journée en fonction des différentes configurations du système d'éclairage artificiel

Cette consommation électrique nous permettra de déterminer le coût énergétique des différentes configurations du système d'éclairage étudié

21.3.3 Modélisation Eclairage naturel

La lumière naturelle à l'intérieur d'une pièce dispose de trois composantes : directe, réflexion extérieure et réflexion intérieure. Le Facteur de Lumière du Jour (FLJ), qui est une donnée calculée en phase de conception par les bureaux d'étude éclairagiste, représente ainsi le rapport de l'éclairement naturel intérieur reçu en un point à l'éclairement extérieur simultané sur une surface horizontale, en site parfaitement dégagé (Ehz), par ciel couvert. (Equation 31)(Figure 80)



Equation 31
$$FJ = E_p / E_{hz} (\%) = FJD + FRE + FRI$$

FJD Composante Directe

FRE Composante Réfléchie Externe

FRI Composante Réfléchie Interne

E_{hz} Eclairage Extérieur sans soleil

Figure 80 : Composante de la lumière et calcul du Facteur de lumière de Jour

Compte tenu de la complexité du cas d'étude de la salle Espace Bureau PREDIS, qui fait partie d'un bâtiment dans un bâtiment (donc n'est pas soumise à la lumière directe de l'extérieur), nous ne modéliserons pas la partie d'éclairage naturel résultante de l'apport solaire extérieur mais simplement nous modéliserons un certain flux lumineux entrant dans l'espace bureau. Nous considérerons donc que la luminosité dans le shed est, du point de vue de l'espace bureau, l'éclairage naturel extérieur.

Ainsi, nous considérons que l'éclairage lumineux naturel en un point regroupera à la fois la composante réfléchie extérieure et réfléchie intérieure. Le calcul classique de ces composantes s'effectue au travers de la modélisation des ciels (ciel clair et ciel couvert), de l'étude de la luminance avec les paramètres de réflexion des différentes parois et les paramètres de transmission des fenêtres. Dans notre cas, ne disposant pas de l'ensemble de ces informations, nous établirons un modèle simplifié de l'éclairage lumineux pour une zone donnée au cours d'une journée s'inspirant de l'évolution du rayonnement solaire sur une journée. Ce modèle d'éclairage global (modèle gaussien de Jain [BAIG, 1997]) est calculé en fonction de la connaissance du rayonnement global I au zénith (T_{zenith}) (Equation 32)

$$I(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(t-T_{zenith})^2}{2\sigma^2}\right) \quad \text{Equation 32}$$

avec σ = deviation standard, déterminé pour $I(T_{zenith})$ connu

Aussi, on estimera cette course du soleil par la même équation de Gauss, ayant pour paramètres l'éclairement maximal (EMax) ; l'heure du lever et du coucher du soleil (Tlever, TCoucher) en considérant l'heure du zénith au temps médian (Tzenith) et un facteur correctif λ (Equation 33). Nous considérerons deux modèles d'éclairement lumineux correspondant à un jour clair et à un jour nuageux (figure 81) dont nous avons estimé le calcul des paramètres λ et σ s'effectuant au Zénith où $E = E_{max}$ et au lever $E = E_{min}$.

$$E_{nat,i}(t) = \frac{\lambda}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(t-T_{zenith})^2}{2\sigma^2}\right)$$

avec

$E_{nat,i}$ = Eclairement naturel dans la zone i

Equation 33

$$E_{nat,i} = \begin{cases} E_{max,beautemps} = 500, E_{min,beautemps} = 10 \\ E_{max,nuageux} = 300, E_{min,nuageux} = 10 \end{cases}$$

$$\sigma = \text{dispersion} = \begin{cases} \sigma_{beautemps} = 128 \\ \sigma_{nuageux} = 138 \end{cases}$$

$$\lambda = \text{facteur correctif} = \begin{cases} \lambda_{beautemps} = 161000 \\ \lambda_{nuageux} = 103800 \end{cases}$$

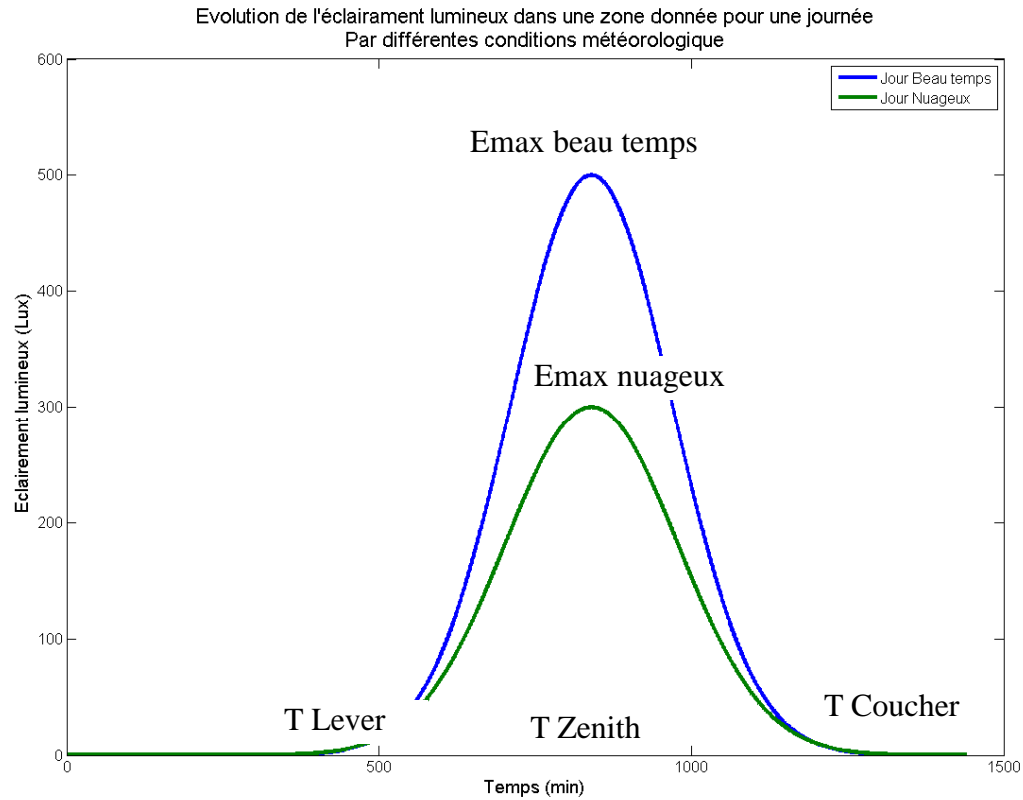


Figure 81 : Evolution Eclairage lumineux naturel sur une journée

Nous pouvons ensuite construire une semaine typique où on simulera certains passages nuageux provoquant une diminution de l'éclairage naturel (figure 82)

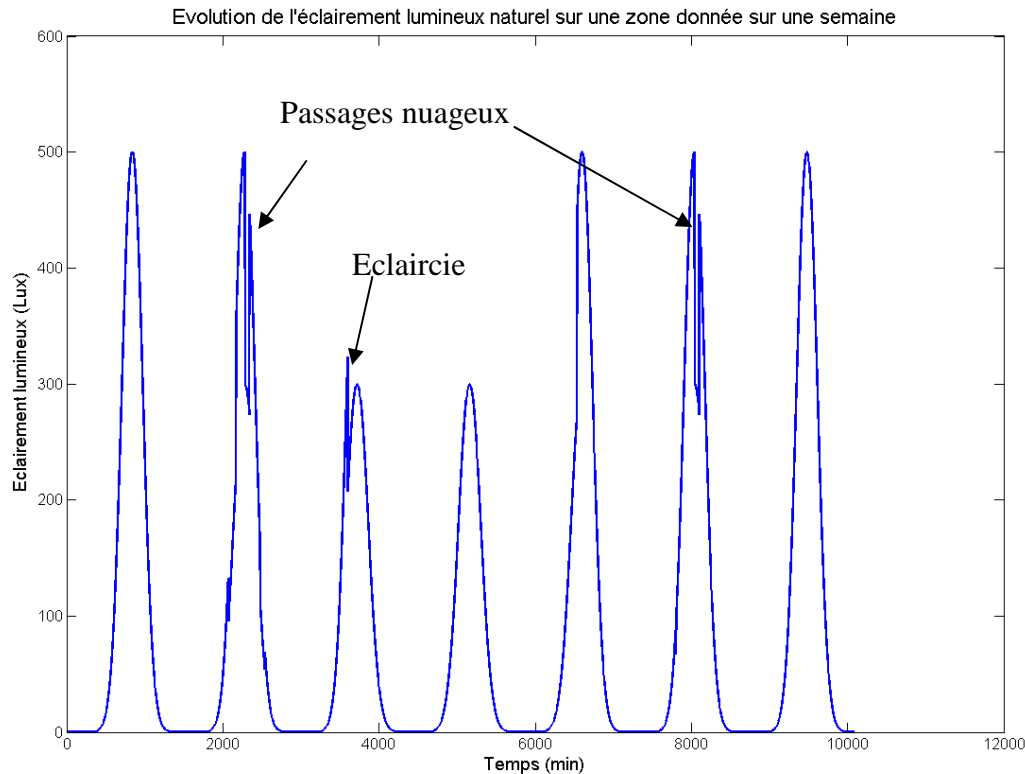


Figure 82 : Evolution Eclairage lumineux naturel sur une semaine

A partir de cela, nous ferons un certain nombre d'hypothèses concernant la modélisation de l'éclairage artificiel :

- Nous considérerons par la suite que chaque zone reçoit indépendamment ce profil d'éclairage naturel et que l'éclairage d'une zone n'est pas influencé par l'éclairage naturel et artificiel de la zone voisine.
- Nous supposerons que les zones 1, 2, 3 et 4 reçoivent l'intégralité de cet éclairage naturel car ces zones sont situées à côté des fenêtres alors que les zones 5, 6, 7 et 8 recevront que la moitié de cet éclairage naturel (annexe 22)
- Enfin, nous ferons l'hypothèse que l'éclairage lumineux résultant de deux sources lumineuses (ici l'éclairage naturel d'une part et l'éclairage artificiel d'autre part) pour la zone, est la somme des éclairages lumineux (Equation 34)

$$E_{T,i}(t) = E_{nat,i}(t) + E_{art,i}(t)$$

$E_{T,i}$ = Eclairage total d'une zone i

$E_{nat,i}$ = Eclairage naturel d'une zone i

$E_{art,i}$ = Eclairage artificiel d'une zone i

Equation 34

Par exemple, l'éclairage résultant dans la zone 1 durant une journée, en fonction des différentes configurations de systèmes d'éclairage (annexe 22) permet de voir la différence d'éclairage (figure 83).

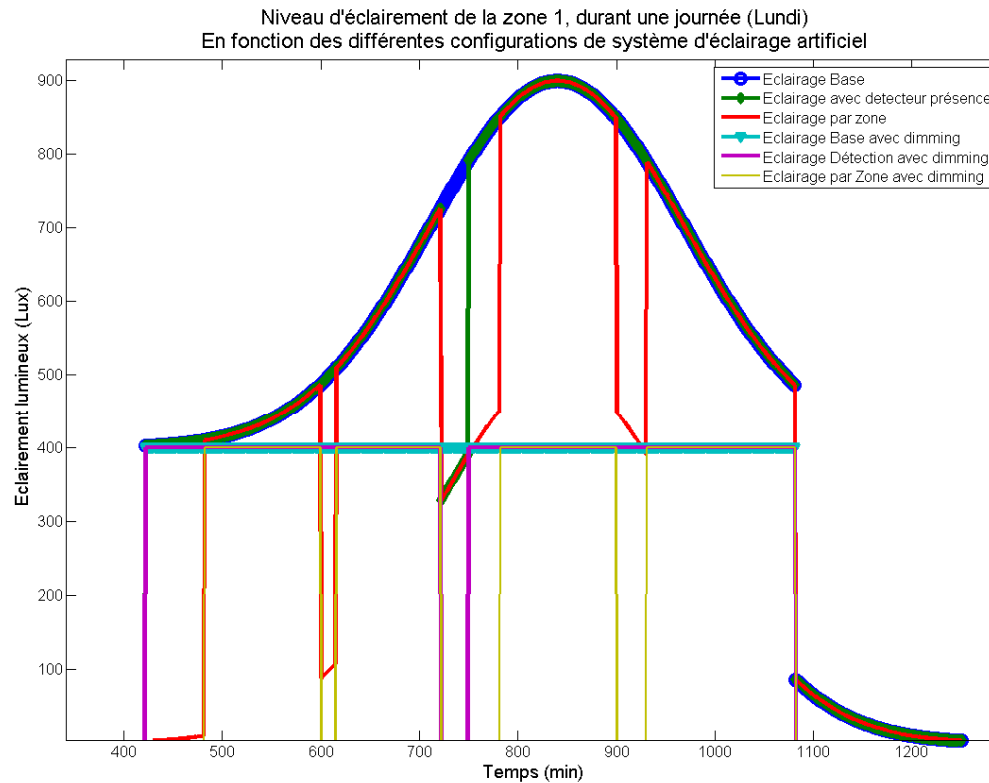


Figure 83 : Niveau Eclairage Lumineux dans une zone durant une journée en fonction des différentes configurations du système d'éclairage artificiel

21.4 Analyse des résultats et prise de décisions

Comme dans les exemples thermiques et aérauliques préalablement présentés, le concepteur du système d'éclairage artificiel dispose d'une palette d'outil, notamment en ce qui concerne les diagrammes de compromis, afin de pouvoir faire des choix en fonction de ses objectifs.

21.4.1 Diagramme de compromis des satisfactions sensible et rationnelle

Les diagramme de compromis mettant en œuvre les fonctions de satisfaction sensible et rationnelle par rapport au coût permet de visualiser l'évaluation de chaque système selon le point de vue du confort ressenti par les usagers (domaine sensible : figure 84) ou selon le point de vue de la « justesse énergétique » des actions (domaine rationnel : figure 85)

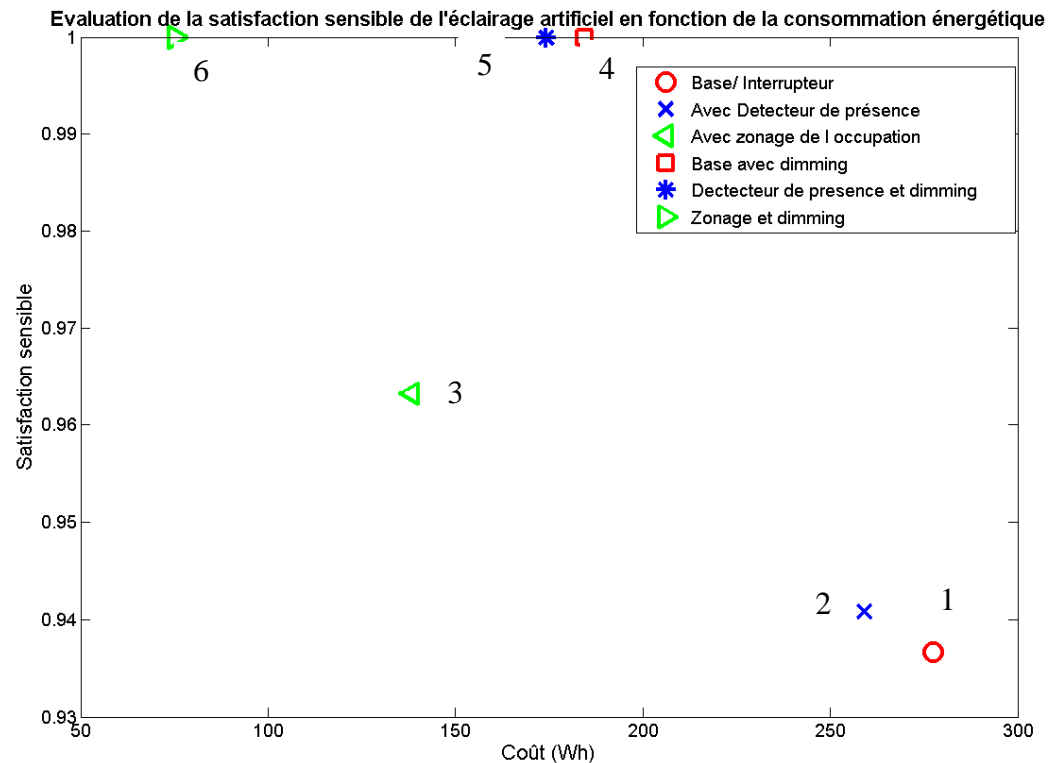


Figure 84 : Diagramme de Compromis de satisfaction sensible

Le diagramme de compromis de satisfaction sensible permet déjà d'évaluer le confort visuel qu'offre chaque solution de contrôle-commande d'éclairage artificiel. On peut déjà remarquer, compte tenu de la proximité des valeurs de satisfactions (entre 0,94 et 1) que toutes les solutions offrent un service d'éclairage satisfaisant. Néanmoins, on peut voir émerger de manière triviale que les solutions avec dimming, qui permettent justement de réguler la luminosité artificielle en fonction de la luminosité naturelle (évitant alors un sur éclairage lumineux), offrent une satisfaction sensible maximale de 1. On peut désormais remarquer, ce qui apparaîtra de manière plus évidente avec la satisfaction rationnelle, que les solutions avec dimming, en plus d'offrir un meilleur confort visuel, consomment moins d'énergie ce qui va doubler dans le sens de l'efficacité d'usage montrant bien qu'en intégrant l'usage, on réduit la consommation énergétique.

En effet, au regard du diagramme de compromis de satisfaction rationnelle (figure 85), on se rend compte que les solutions avec dimming (4, 5, 6) consomment moins que les solutions sans dimming (1, 2, 3) permettant une réduction moyenne de la consommation énergétique de 33%. Néanmoins, l'implantation de ces systèmes ne consomment respectivement pas mieux cette énergie car la satisfaction rationnelle ne change pas entre la solution avec et sans dimming (même satisfaction rationnelle de 0,51 entre les solutions 1 et 4, de 0,55 entre solutions 2 et 5, et de 0,75 entre les solutions 3 et 6 de la figure 85)

Ainsi, à travers ces deux précédents diagrammes, on peut en tirer un certain nombre d'information :

- la solution de contrôle par Interrupteur est celui qui est le plus facile à mettre en place mais celui consommant le plus. Ce système peut être amélioré avec un système de détection de présence permettant d'économiser globalement 8% d'énergie (figure 87)

- le fait de tenir encore davantage de l'usage par la mise en place du zonage (lieu de l'usage) est aussi une solution efficace d'usage car consomme encore moins que les deux solutions précédentes (plus de **50% de réduction d'énergie**) et améliore un peu le confort visuel (point 3 figure 85).

- la technologie de dimming permet d'améliorer sensiblement le confort visuel tout en offrant une réduction de la consommation énergétique (**de plus de 30%**). Cela est dû au fait que l'on tient mieux en compte de l'usage au travers du niveau de luminosité perçu (composante « Qui » de l'approche check-list).

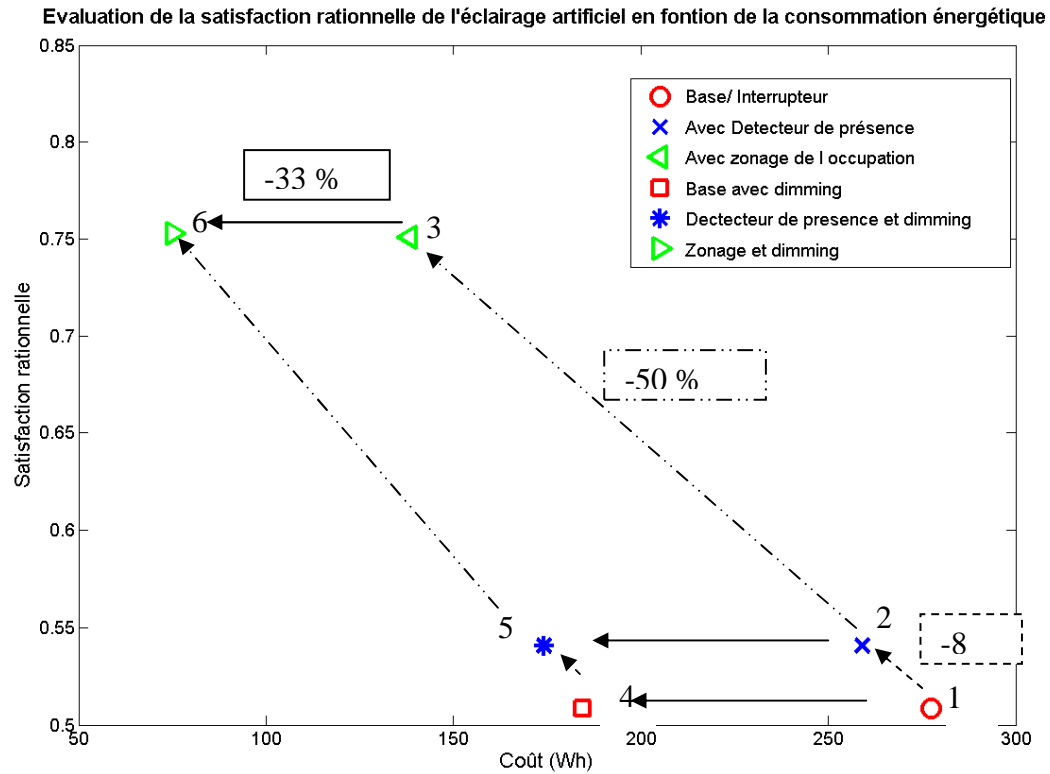


Figure 85 : Diagramme de compromis Coût/ satisfaction rationnelle de l'éclairage artificiel

On pourra retrouver l'ensemble de ces renseignements afin de pouvoir distinguer les configurations les plus efficaces d'usage au travers du diagramme mettant en rapport la satisfaction sensible et la satisfaction rationnelle (figure 86)

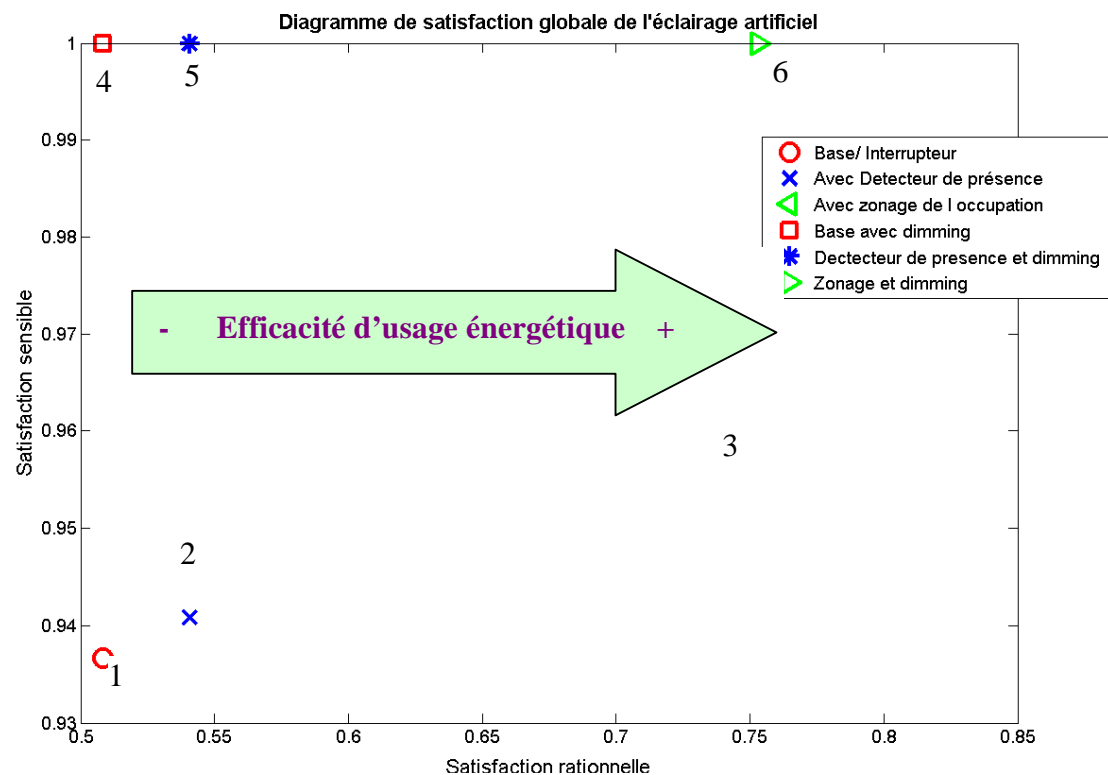
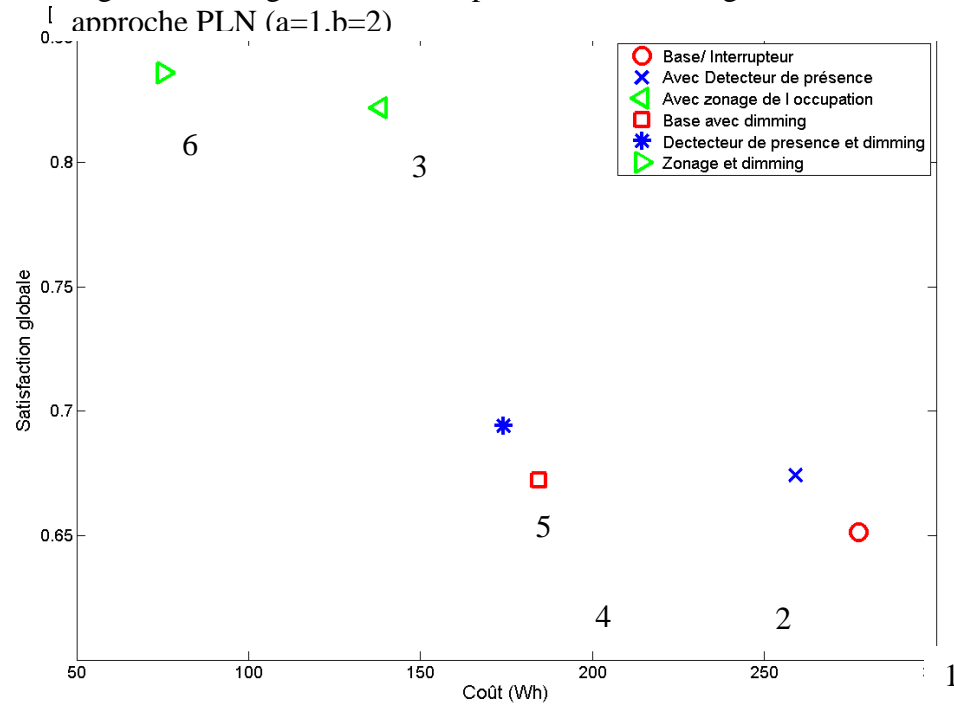


Figure 86 : Diagramme de compromis Confort visuel/Satisfaction d'utilisation de l'énergie

En effet, sur ce dernier diagramme, on peut bien se rendre compte de l'évolution de l'efficacité d'usage entre chaque configuration qui intègre plus ou moins l'usage. Ainsi au final, le concepteur va pouvoir choisir de manière quasi immédiate la solution de zonage avec dimming (qui prend en compte l'aspect géolocalisation/identification de l'utilisateur, moment de l'usage et éclairage naturel) car c'est la solution qui offre une meilleure satisfaction globale et une consommation énergétique optimale :

- réalisation d'une économie d'énergie de plus de **75 %** par rapport à la solution basique (1) (passant de 280Wh à 75 Wh pour une semaine)
- augmentation de la satisfaction globale à 0,82 par rapport à la solution basique 1 offrant une satisfaction globale de 0,65 (en particulier due à un meilleur mode de consommation, gratifiée par une meilleure satisfaction rationnelle)

Figure 87 : Diagramme de compromis satisfaction globale avec approche PLN (a=1.b=2)

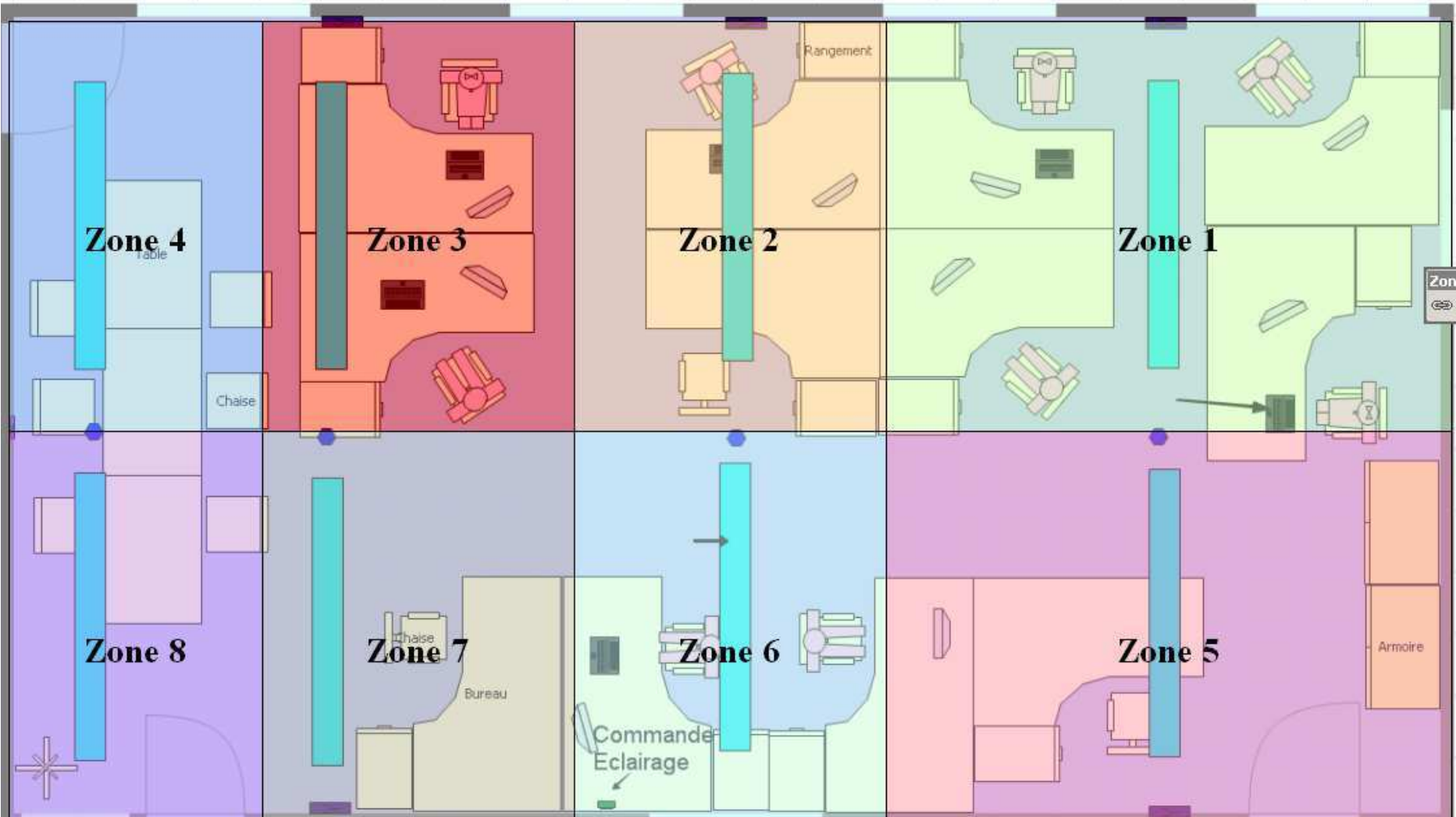


Enfin, dans le diagramme de compromis situant la satisfaction globale (avec approche PLN) par rapport au coût, on retrouve un positionnement des différentes solutions nous permettant un choix encore plus évident de par le fait que l'on a valorisé (par la pondération) les solutions économes en énergie, ce qui démarque encore plus la solution avec dimming et zonage. Cela prouve une fois de plus que plus on intègre l'usage (passant du scénario 1 au 6) dans les solutions de contrôle-commande, meilleure sera le compromis coût et satisfaction (et donc l'EUE ce qui permet ainsi de conforter le concepteur dans ses choix. En effet, avec le système de dimming, on prend en compte la dimension « Quoi ? » et avec le système de zonage, on prend en compte les dimensions « Où , Quand et Qui ? » de l'approche QQOCP appliqué à l'usage de l'éclairage.

21.4.2 Bilan des diagrammes de compromis

Comme dans les exemples du chauffage et de ventilation, on a pu voir que l'efficacité d'usage s'appliquait de manière effective sur le cas de l'éclairage artificiel et qu'on était en mesure de trouver des solutions technologiques permettant de mieux intégrer ce qui avait alors pour double avantage d'obtenir une satisfaction maximale tout en économisant de l'énergie (jusqu'à 75% par rapport à la solution basique à base d'allumage par interrupteur). Il faudrait ensuite faire une étude économique afin d'étudier le retour sur investissement des solutions alors choisies

Annexe 22 : Découpage de l'espace Bureau en Zones d'éclairage



Annexe 23 : Scénarios d'étude pour le système d'éclairage artificiel

<p>Consigne d'éclairage lumineux</p> <p>Scénario d'usage</p>	<p>Basique : Par interrupteur</p> 	<p>Avec Détecteur Présence</p> 	<p>Avec Zonage</p> 	<p>Basique avec Dimming</p> 	<p>Détection Présence et Dimming</p> 	<p>Avec Zonage Avec Dimming</p> 
<p>Profil d'occupation d'une semaine type de l'espace Bureau</p>  <p>Nombre d'occupants</p> <p>Temps</p>	<p>1</p>	<p>2</p>	<p>3</p>	<p>4</p>	<p>5</p>	<p>6</p>

Annexe 24 : Le confort Visuel dans l'architecture bioclimatique

Le confort visuel est une impression subjective liée à la quantité, à la distribution et à la qualité de la lumière. L'environnement visuel nous procure une sensation de confort quand nous pouvons voir les objets nettement et sans fatigue dans une ambiance colorée agréable. L'obtention d'un environnement visuel confortable dans un local favorise le bien-être des occupants. Par contre, un éclairage trop faible ou trop fort, mal réparti dans l'espace ou dont le spectre lumineux est mal adapté à la sensibilité de l'œil ou à la vision des couleurs, provoque à plus ou moins longue échéance une fatigue, voire même des troubles visuels, accompagnés d'une sensation d'inconfort et d'une performance visuelle réduite. Le confort visuel dépend d'une combinaison de paramètres physiques : l'éclairage, la luminance, le contraste, l'éblouissement et le spectre lumineux, auxquels s'ajoutent des caractéristiques propres à l'environnement et à la tâche visuelle à accomplir, comme la taille des éléments à observer et le temps disponible pour la vision. Le confort visuel relève, en outre, de facteurs physiologiques et psychologiques liés à l'individu tels que son âge, son acuité visuelle ou la possibilité de regarder à l'extérieur. Les paramètres du confort visuel pour lesquels l'architecte joue un rôle prépondérant sont :

- le niveau d'éclairage de la tâche visuelle ;
- un rendu des couleurs correct ;
- une répartition harmonieuse de la lumière dans l'espace ;
- les rapports de luminance présents dans le local ;
- l'absence d'ombres gênantes ;
- la mise en valeur du relief et du modelé des objets ;
- une vue vers l'extérieur ;
- une teinte de lumière agréable ;
- l'absence d'éblouissement.

Il est cependant très difficile de quantifier les valeurs idéales que ces paramètres devraient atteindre : il n'existe en effet pas de solution universelle au problème du confort visuel car celui-ci sera influencé par le type de tâche, la configuration du lieu, et les différences individuelles. De plus, le jugement de la qualité de la lumière sera influencé par des aspects personnels, culturels et historiques.



Annexe 25 : Questionnaire sur le confort lumineux et l'éclairage lumineux artificiel

On s'intéresse ici à évaluer le niveau d'éclairage proposé par l'éclairage artificiel, et ce au cours de l'année.

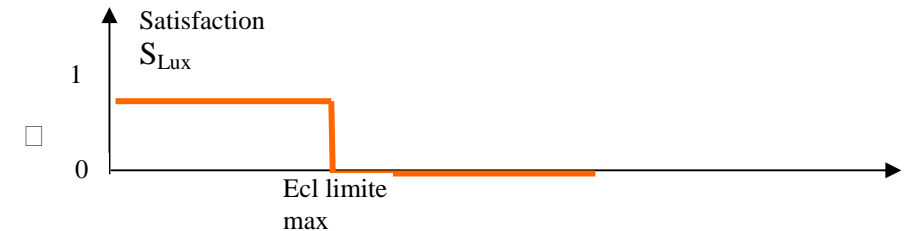
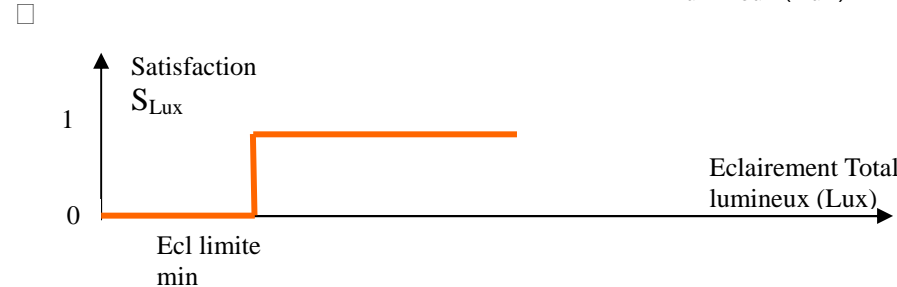
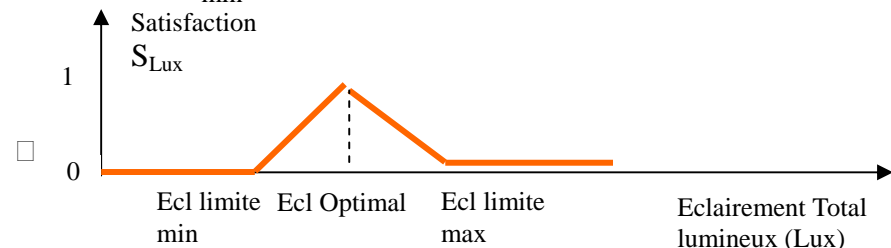
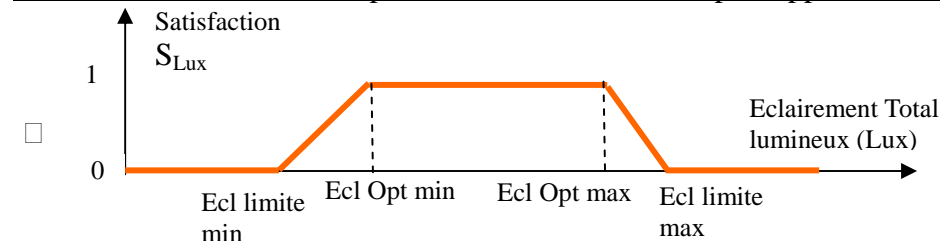
Quels sont les paramètres rentrant en compte dans le jugement de l'éclairage apporté par l'éclairage artificiel?

- Apport Eclairage Naturel
- Période de la journée
- Météo extérieure
- Nature de travail à effectuer sur le poste de travail
- Autres (préciser)

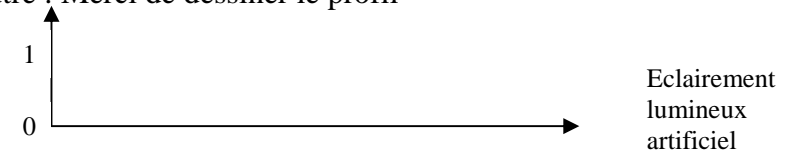
Pouvez vous caractériser votre sensibilité à l'éclairage lumineux artificiel

- Indifférent jusqu'à un niveau d'éclairage maximum (trop d'éclairage-> Eblouissement)
- Indifférent à partir d'un niveau d'éclairage minimum (Pas assez d'éclairage-> Illisibilité)
- Un point optimal d'éclairage lumineux optimal
- Plage d'éclairage lumineux acceptable en dehors de laquelle c'est inacceptable

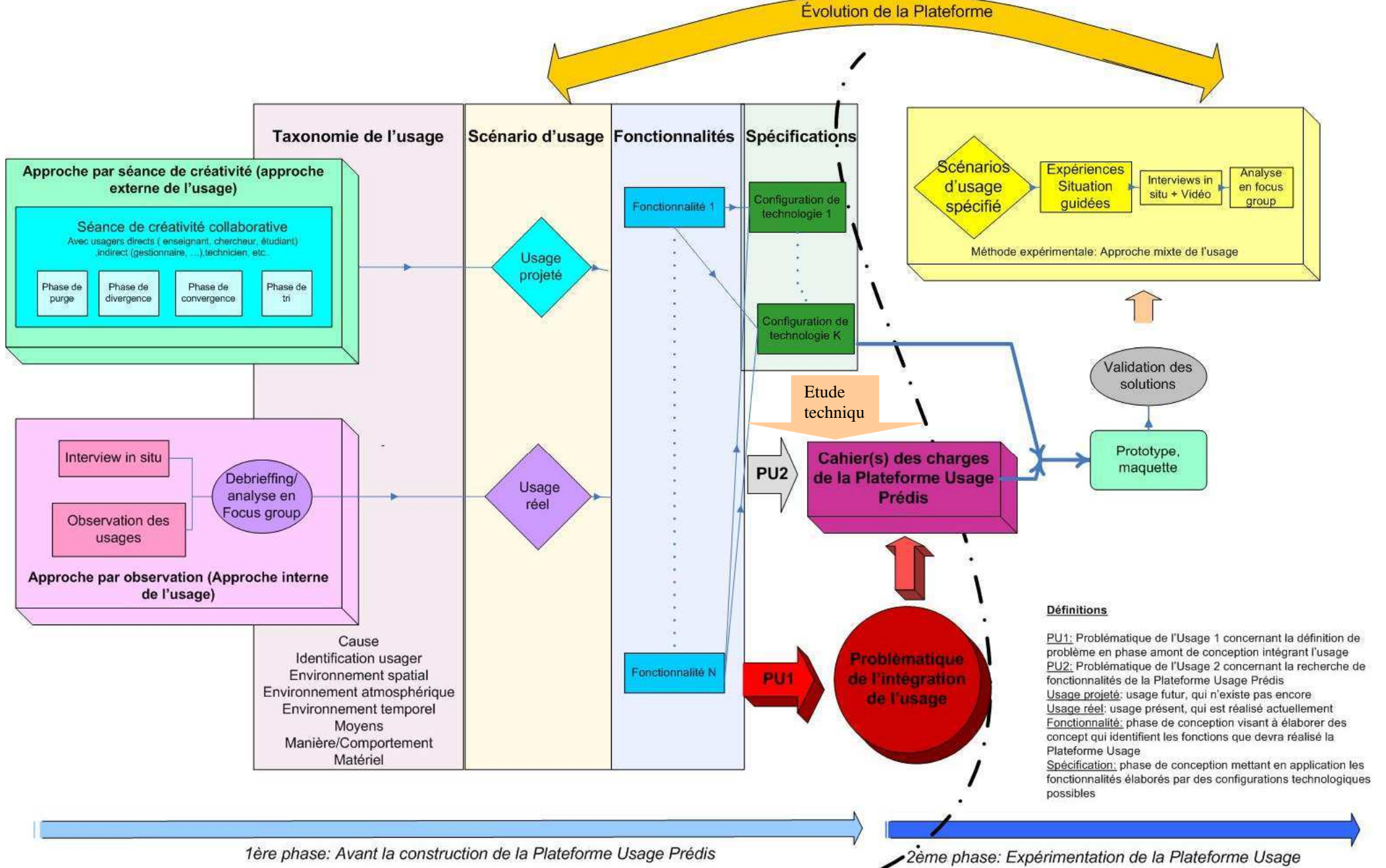
Si l'on devait construire un profil de votre satisfaction par rapport au niveau d'éclairage lumineux, lequel serait-t-il ?



Autre : Merci de dessiner le profil



Annexe 26 : Méthodologie proposée pour la conception par l'usage de la Plateforme PREDIS



Méthodologie de la conception par l'usage de la Plateforme Usage Prédís

Annexe 27 Etude du diagnostic d'usage sur le cas du lave-linge

27.1 Analyse de l'usage et étude de la mesurabilité des paramètres d'usage du lave-linge

Le but d'un lave-linge, est d'apporter une certaine qualité d'hygiène au vêtement sale introduit dans la machine. On retrouve d'ailleurs, dans l'autre type d'OUE thermique à puissance imposée qu'est le lave-vaisselle, le même paramètre d'usage sensible : l'hygiène du produit concerné.

Mesurabilité : Très difficile car il faudrait réaliser une analyse microscopique des vêtements avant et après le lavage.

Parmi les paramètres qui influenceront sur l'usage (et caractériseront ainsi la satisfaction rationnelle), on peut retrouver

- Le choix du programme correspondant au type de linge /de fibre que l'on souhaite laver (réponse à la question Quoi ? de l'approche *QQQQCP*). En fonction du programme choisi, la durée des cycles de lavage sera variable ainsi que la température de l'eau. Une telle donnée est partie intégrante du fonctionnement de la machine à laver et est disponible facilement.
- La quantité de linge. (réponse à la question quoi ?) qui est introduite dans le tambour. La quantité de linge aura une conséquence du point de vue énergétique car le moteur voyant sa charge augmentée, consommera plus, tout comme la quantité d'eau à chauffer. **Mesurabilité** : On pourra obtenir cette quantité par la mesure du poids du tambour une fois plein. Le moment de démarrage et de fin de cycle qui peut constituer, dans le cadre de l'étude de gestion d'énergie du bâtiment, des données d'usage à prendre en compte. En effet, ce type de charge électrique (les OUE à puissance thermique imposée) est délestable dans le temps ce qui permet d'éviter les pics de consommations durant la journée.

Pour des raisons essentiellement liées à la complexité de mesurabilité, nous n'étudierons ici que la fonction de satisfaction rattachée à la quantité de linge. En effet, ce paramètre d'usage est le plus simple à mettre en œuvre (en utilisant une balance par exemple) et permet déjà, comme nous allons le voir, de construire une fonction de satisfaction rationnelle effective et intéressante pour diagnostiquer l'usage.

27.2 Fonctions de satisfaction rationnelle pour le lave-linge

En s'intéressant au fonctionnement du lave-linge, on peut se rendre compte que de tels équipements électriques à puissance thermique imposée, au même titre que le lave-vaisselle, sont conçus et calibrés pour une certaine quantité de produit. On peut se reporter pour cela à la signification des étiquettes énergies pour ces équipements tel que l'on a pu déjà le décrire dans l'analyse de l'efficacité énergétique: il y est donné la consommation énergétique pour X kg de linge ou (Y couverts dans le cas d'un lave-vaisselle) pour un programme (mode de fonctionnement) précis. Dans notre cas, notre équipement est dimensionné pour $P_{opt}=5\text{kg}$ de linge que l'on supposera la quantité de linge optimale.

Aussi, on pourra construire une fonction de satisfaction d'utilisation du lave-linge basée sur la quantité de linge effectivement introduite dans le tambour de la machine à laver (figure 88). On supposera alors qu'à consommation égale de la machine, plus de linge sera lavé, meilleure sera la satisfaction car on a utilisé à son maximum la machine, avec une satisfaction maximale pour la quantité de linge prévue (P_{Opt}). Néanmoins si l'on surcharge la machine à laver, cela peut fatiguer à terme la machine et même casser celle-ci (au-delà d'un poids maximum P_{Max}) ce qui fait décroître la satisfaction de l'usager.

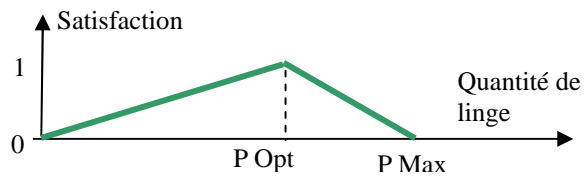


Figure 88 : Fonction de satisfaction de l'utilisation du lave-linge

Nous avons réalisé l'expérimentation sur trois lavages, à programme de lavage égaux en faisant simplement varier la quantité de linge : 2.9, 3.9 et 4.7 kg (figure 89). On supposera que la température d'eau n'a pas beaucoup changé entre ces trois essais.

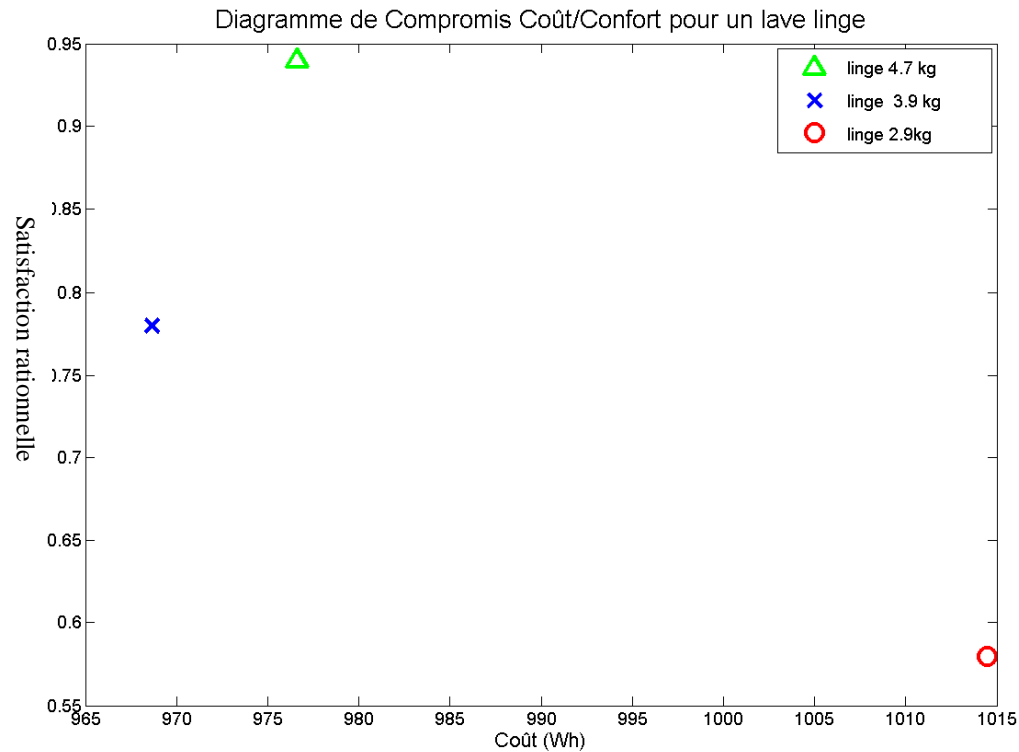


Figure 89 : Diagramme de compromis de l'utilisation d'un lave-linge

On s'aperçoit que l'efficacité d'usage est meilleure lors de l'emploi du lave-linge à un poids de linge optimum de 4.7 kg de linge plutôt que 2.9kg. En effet, lors de l'emploi de 2,9 kg, la satisfaction rationnelle n'est que de 0,6 alors que la meilleure pratique est celle de 4,7 kg car on lave plus de linge pour une même consommation énergétique. A l'utilisateur ensuite de juger s'il aurait pût mettre plus de linge lors de ses utilisations afin d'optimiser son efficacité d'usage ou s'il a choisi volontairement de ne pas mettre plus de linge (par exemple en voulant trier les couleurs des vêtements).

On remarquera que la consommation énergétique a légèrement varié entre chaque scénario d'usage ce qui peut être dû à la température d'eau courante qui n'était pas la même. Afin de pouvoir n'avoir que l'impact de l'usage, il est ainsi nécessaire, comme nous l'avons présenté précédemment, d'enlever la composante de l'efficacité énergétique liée à la partie physique.

Annexe 28 : Etude de l'efficacité d'usage en exploitation pour l'ordinateur

28.1 Analyse de l'usage et étude de la mesurabilité des paramètres d'usage de l'ordinateur

Dans le troisième type d'équipement fonctionnel, les appareils électriques à moindre influence thermique, le rapport à l'usage se caractérise par un service qui est effectué à l'instant où est commandé ce service, notamment en ce qui concerne le multimédia où l'information (visuelle ou sonore) est produite instantanément. Pour un ordinateur, les services effectués, correspondant à l'évaluation des paramètres d'usage sensibles, sont multiples et liés à des services de types *médias* (vidéos, sonore, image, logiciel, texte etc.)

Domaine sensible

Les paramètres d'usage sensible peuvent donc être

- La qualité d'une image. Cette notion aura également une composante liée à l'esthétique du paramètre rendu. **Mesurabilité** La mesure de sa définition (en pixel) pourrait être une évaluation de la qualité du service rendu

- La qualité d'un son. Comme pour le son, il y aura une composante liée à l'esthétique qui est difficilement formalisable.

Mesurabilité : la mesure de la fréquence (en Hz) pourrait être une évaluation de la qualité du service effectué

- La qualité d'une vidéo. Comme pour l'image et le son, la qualité esthétique devra être pris en compte mais on pourra évaluer également la définition de l'image (en pixel) et du son (en Hz) pour attester de la qualité du service effectué

- Le rendu d'une information textuelle

- ...

Domaine rationnel :

Les paramètres d'usage caractérisant le domaine rationnel c'est-à-dire étant en rapport avec l'action initié par une réflexion, seront (de manière non exhaustive) :

- le *mode de fonctionnement* de l'ordinateur qui peut être en veille standard (écran en veille mais unité centrale en fonctionnement), veille prolongée (écran et unité centrale en veille), en état totalement allumé ou en état éteint. (Réponse à la question *Comment ?*) Ces différents modes de fonctionnement qui peuvent être enclenchés automatiquement ou manuellement par l'utilisateur, impactera la consommation énergétique

- le *moment de démarrage et la fréquence* d'utilisation dans la journée peuvent permettre de déterminer le type d'usage dont l'ordinateur est effectué (réponse à la question *Quand ?*)

- la *réactivité* de l'ordinateur aux commandes effectuées par l'utilisateur. Un exemple d'usage consommant beaucoup d'énergie est par exemple que certaines personnes, lors d'une absence prolongée préfère laisser allumé (ou à la limite mettre en veille) l'ordinateur plutôt que de l'éteindre car sinon le redémarrage leur paraît trop lent, trop contraignant ce qui évidemment génère de la consommation « inutile ».

- le besoin d'utilisation (réponse à la question *Pourquoi ?*) qui peut définir les différents intérêts et les fonctionnalités selon lesquelles est utilisé un ordinateur. En effet, on peut y retrouver des intérêts directement liés aux fonctionnalités de logiciels comme l'intérêt d'outil de travail.

Compte tenu de la complexité de mesurabilité de nombreux paramètres d'usage de l'ordinateur, nous nous attacherons par la suite uniquement à l'étude de la satisfaction rationnelle par rapport à la bonne utilisation des modes de veilles. Cependant, on pourrait imaginer d'autres fonctions de satisfaction prenant en comptes plus ou moins de paramètres d'usage identifiés :

-Fonction de satisfaction de *qualité de l'information média donné* (FSs): si l'on suppose que l'utilisateur souhaite avoir un son dans une certaine plage de fréquence auditive (entre et obtenir une définition de l'image minimum (par exemple 3 millions de pixels), on pourra créer une fonction de satisfaction sensible prenant en compte ces deux paramètres pour évaluer la satisfaction par rapport au visionnage d'une vidéo.

- Fonction de satisfaction de besoin de service (FSr) : On pourrait, par un questionnaire, interviewer les usagers pour connaître la raison d'utilisation de l'ordinateur ou de certains programme ou logiciel. Il serait alors possible d'établir une classification entre ces besoins et les logiciels utilisés et voir s'ils sont correctement appropriés. Ainsi, la fonction de satisfaction discriminerait l'utilisation de logiciel gourmand en ressources et inapproprié pour le service effectué (par exemple le lancement d'un logiciel de calcul numérique tel que Matlab pour réaliser des calcul basique ce qui demande des ressources, et donc de la consommation énergétique, supplémentaire pour rien)

28.2 Fonctions de satisfaction rationnelle pour l'ordinateur

On s'intéressera dans ce cas d'étude (et ce type d'équipement d'OUE à moindre influence thermique) à la consommation énergétique et au gaspillage d'énergie dû à une non ou mauvaise utilisation des veilles lors de l'inutilisation du service. Le paramètre d'usage rationnel de la mise en veille de l'équipement est un des rares paramètres sur lequel on peut agir sans affecter le service. En effet, éteindre ou non durant la non utilisation n'affectera pas l'évaluation de la satisfaction sensible lors de l'utilisation de l'ordinateur.

On définira dès lors la fonction de satisfaction par rapport à la présence effective d'une personne. On peut reconstruire celle-ci à partir de la consommation électrique et plus particulièrement de la dynamique de la consommation électrique. En effet, à chaque mode de fonctionnement de l'ordinateur (allumé, veilles, éteint) il existe des plages de puissances électriques et on peut alors détecter le changement de consommation d'une plage à l'autre par la détection de dérivée infinie de la puissance électrique. Pour cela, on effectuera d'abord un lissage par palier des données afin de n'obtenir qu'un niveau de consommation par palier moyen. Le changement de chaque palier permet de modéliser la présence car à chaque impulsion la présence change (0 et 1 ou 1 en 0) (processus illustré en annexe 28)

Cette méthode permet également de diagnostiquer l'usage et de faire visualiser à l'utilisateur sa dynamique de consommation (par exemple voir à quelles heures ont été réalisées les allumages et extinctions de l'ordinateur, quand sont utilisés les veilles et quelles veilles sont utilisées (veille prolongée, veille simple, etc...))

A partir du profil de présence supposé ainsi créé (paramètre d'usage rationnel de la présence), on peut construire avec le paramètre d'usage rationnel de la puissance électrique, la fonction de satisfaction rationnelle qui permet de mettre en valeur les cas de figure où la veille est toujours employée lors d'une absence prolongée de l'utilisateur (Equation 35):

$$\begin{aligned}
 & \text{Si } Presence = 1 \text{ ET } Puissance > 0 : S_{\text{energie}} = 1 \\
 & \text{Si } Presence = 0 \text{ ET } Puissance > P_{\text{veille}} : S_{\text{energie}} = 0 \\
 & \text{Si } Presence = 0 \text{ ET } Puissance \leq P_{\text{veille}} : S_{\text{energie}} = 1
 \end{aligned}
 \tag{Equation 35}$$

Nous avons donc construit une fonction de satisfaction effective car elle permet de mettre en évidence les périodes de consommations où l'utilisateur a bien agi (mettre en veille durant son absence) et pénalisant les moments de gaspillages d'énergie.

Par extension à cette fonction de satisfaction, nous avons créé deux profils fictifs d'utilisateur qui permettront, comme nous allons le voir ensuite, de situer l'utilisateur par rapport à ces deux profils virtuels de consommation.

- un profil d'utilisateur économe qui, à chacune de ses absences du poste de travail, éteint son ordinateur
- un profil d'utilisateur non économe qui allume l'ordinateur le matin en arrivant et l'éteint le soir en partant

28.3 Diagramme de Compromis Coût/Satisfaction rationnelle

On va comparer désormais les trois scénarios d'utilisation à partir du relevé réel et comparer jour à jour la consommation énergétique de l'ordinateur et la fonction de satisfaction associée:

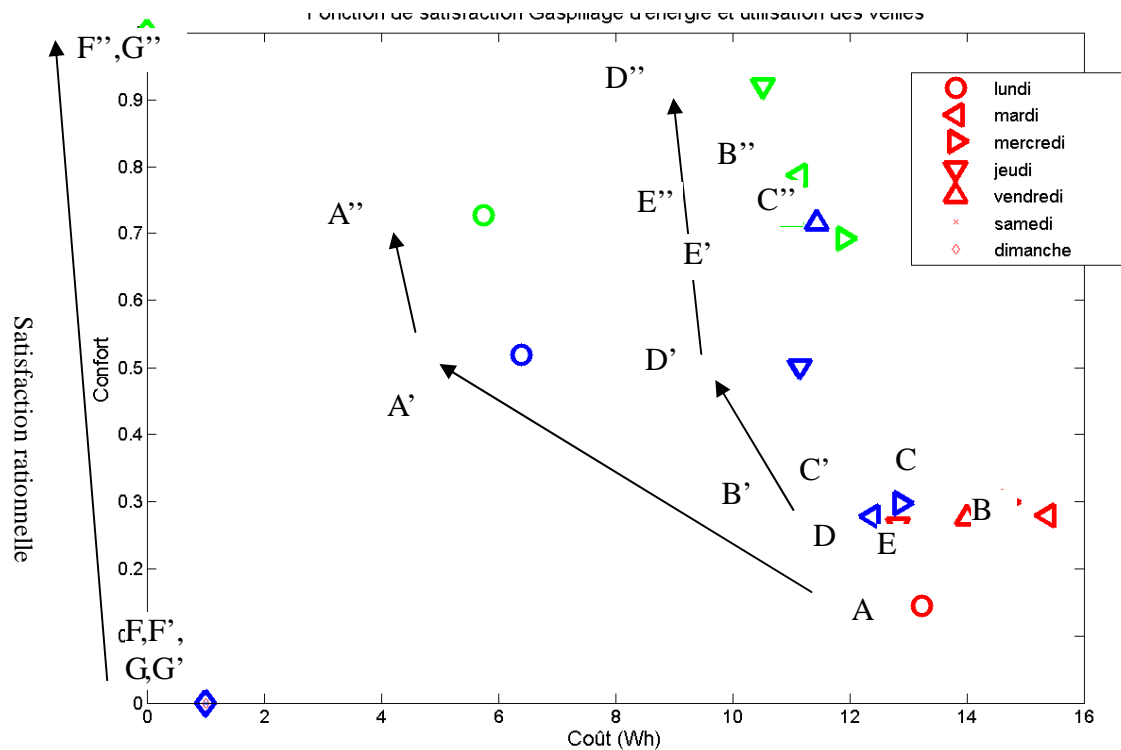
- L'utilisation basique de l'ordinateur par le profil d'utilisateur non économe (points A à G sur la figure 90).
- Le deuxième scénario correspond au profil réel de l'utilisateur (ici, éteignant de temps en temps l'ordinateur (points A' à G' sur la figure 90)).
- Enfin, le troisième profil correspondant à un consommateur économe (points A'' à G'' sur la figure 90).

Le diagramme de compromis nous offre un certain nombre d'informations parmi lesquelles :

- La consommation électrique varie sensiblement d'une journée à l'autre ce qui peut être lié soit à l'activité de l'utilisateur, soit à l'utilisation raisonnable des veilles (par exemple le lundi (points A' et A'' où les utilisations de la veille ont été bonnes)
 - En comparant le jeudi (points D' et D'') et le vendredi (points E' et E''), on peut se rendre compte qu'a priori, l'utilisateur a été plus vertueux le vendredi que le jeudi, car avec le scénario 3 de gestion d'énergie optimisé, l'utilisateur réel se rapproche plus du profil virtuel économe le vendredi (figure 90).
 - Enfin, on remarquera, que le week-end, jour où l'espace de travail est fermé, il y a eu des consommations résiduelles d'énergie que l'on aurait pu éviter (passant ainsi de F', G' à F'' et G'' où l'on améliore alors l'efficacité d'usage)

(Vous êtes arrivé à lire jusqu'ici ? Pour cela, vous avez gagné... toute ma reconnaissance)

Figure 90 : Diagramme de compromis de l'utilisation d'un ordinateur portable

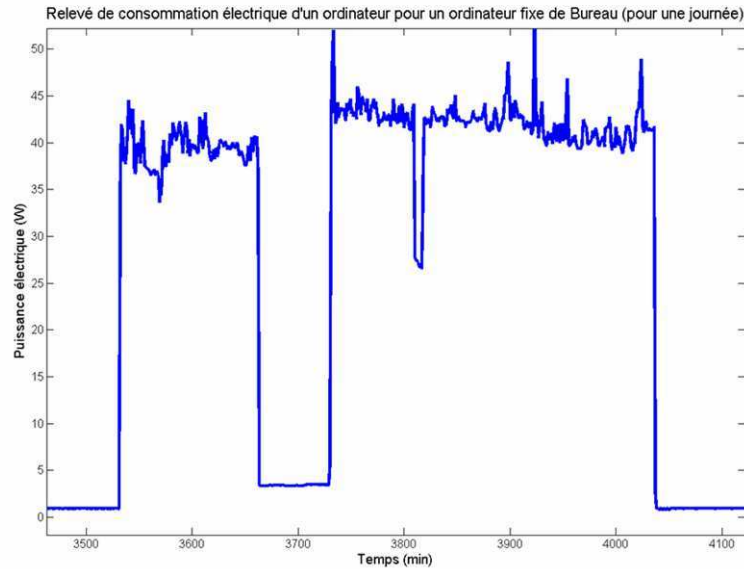


Une telle analyse de l'usage permet ainsi à l'utilisateur de situer son usage, au jour le jour, entre un profil de consommateur peu attentionné aux économies d'énergie (point A à G) et un profil de consommateur vertueux (point A'' à G''). Cela permet ainsi d'évaluer son efficacité énergétique d'usage dans le plan de compromis coût /confort et analyser s'il veut/s'il est prêt à améliorer sa sobriété énergétique.

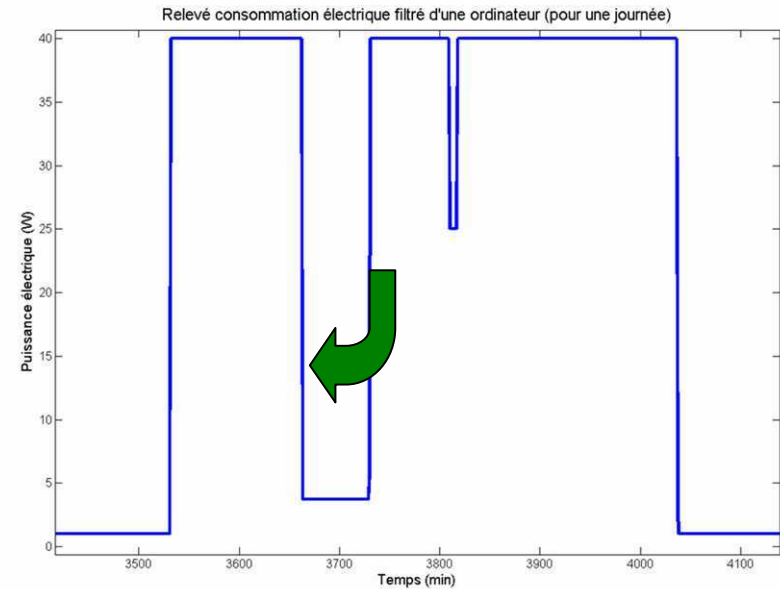
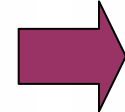
Le diagramme de Compromis est donc effectif du point de vue sobriété énergétique car il permet à l'utilisateur de proposer des alternatives (profil d'usage virtuel sobre) où il augmenterait sa satisfaction rationnelle (en utilisant correctement les veilles) tout en économisant de l'énergie.

On peut évaluer également le bilan énergétique des trois scénarios d'utilisation afin de pouvoir estimer l'impact énergétique de l'utilisateur réel ainsi que sa marge de progression. Ainsi, sur notre exemple, l'utilisateur réel consomme 22% moins d'énergie que le profil non économe ce qui signifie que notre usager doit être sans doute un minimum sensibilisé au gaspillage d'énergie. Mais, avec le scénario optimal, correspondant à ce que pourrait réaliser un système de gestion énergétique ou une meilleure éducation des usagers, on pourrait économiser jusqu'à 30% par rapport au scénario basique (en passant de 72Wh à 50Wh) ce qui serait encore meilleure au niveau de l'EUE.

Annexe 29 Détermination de la présence d'un usager en fonction de sa consommation électrique pour un OUE a moindre influence thermique (Exemple de l'ordinateur)

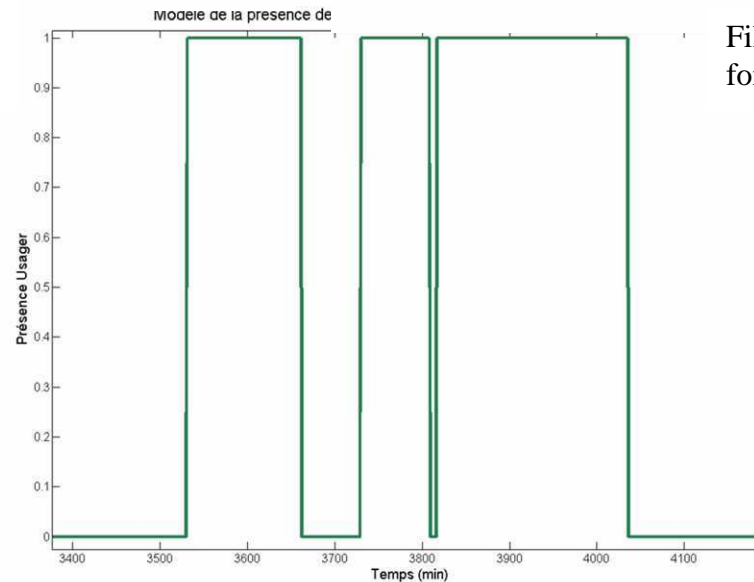


Relevé de consommation électrique



Filtrage par modes de fonctionnements

Construction scénario de présence de l'usage



Annexe 30 : Présentation succincte de G-HomeTech

La problématique de gestion d'énergie dans un bâtiment de type résidentiel est de réussir à manager les différents types de charges du point de vue service et fréquence. Ainsi, on peut retrouver, synthétisé dans la figure 91 :

- les charges de types permanentes comme les systèmes de chauffage et de ventilation, qui peuvent cependant être modulable en terme de consigne. D'autre part, ces types de charges peuvent bénéficier d'une certaine inertie (par exemple pour le chauffage de l'eau chaude sanitaire) permettant ainsi d'alimenter par intermittence de telles charges.

- Les charges temporaires sont les charges dont l'usage sera davantage occasionnel à l'échelle de la journée ou de la semaine. On rassemble dans ce type de charges celles qui auront la particularité de fonctionner par cycle et qui seront alors indépendantes de l'usage une fois que la charge aura été mise en marche (par exemple le lave-vaisselle ou le lave-linge) Un telle propriété sera utile pour décaler dans le temps une ce type de charge afin de fonctionner lorsqu'il n'y a pas de pics de consommation électrique. Ces charges correspondent aux OUE à puissance thermique imposée décrites précédemment.

- Dans le cadre de BEPOS, nous aurons également des énergies de stockage disponibles qui sont autant de charges pilotables à la demande.

Enfin, il y a des charges dont l'usage en particulier est directement lié à l'action des usagers. Ainsi, par exemple, lorsque l'on allume l'éclairage, il n'y a pas d'inertie de fonctionnement et l'utilisateur souhaite le service de suite. C'est pour cela que ce sont des charges non contrôlables car leur allumage, fonctionnement et extinction sont intrinsèquement liés à l'activité de l'utilisateur (ordinateurs, etc...) Ces équipements correspondent en particulier aux OUE à moindre influence thermique décrites précédemment.

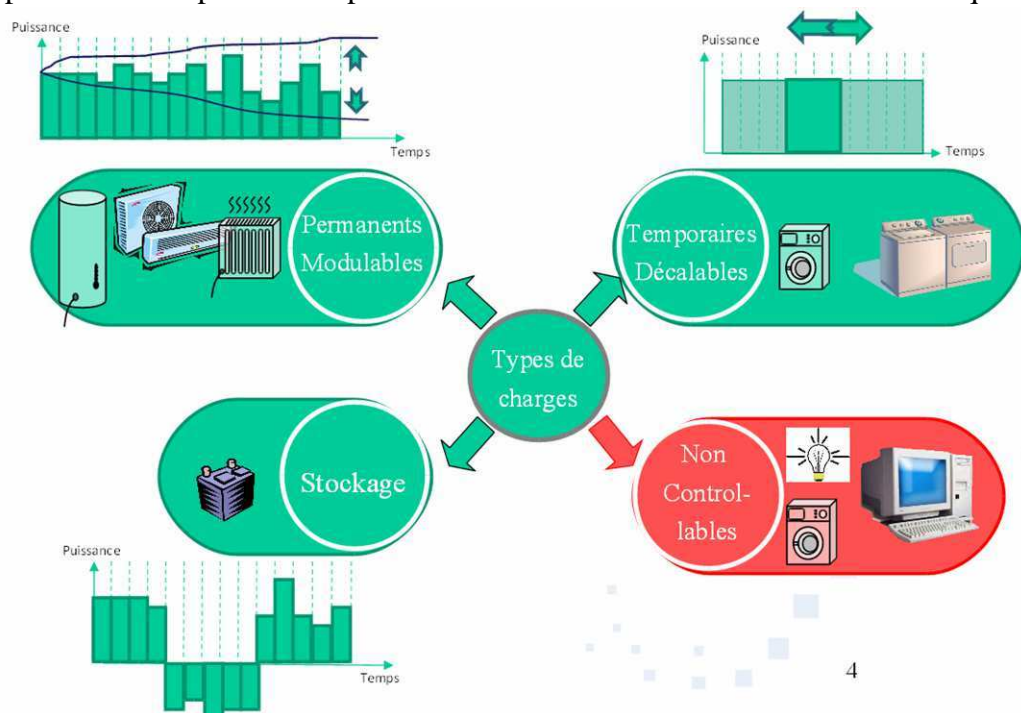


Figure 91 : Charges électriques commandables et non-commandables dans les bâtiments résidentiels