



PROBLEMES ET PERSPECTIVES

CONSERVATION DE L'ENERGIE

RECHERCHES ET REALISATIONS TECHNIQUES
DANS L'HABITAT ET L'EQUIPEMENT MENAGER

A.GSPONER, B.GIOVANNINI, J.BRANCH.



CONSERVATION DE L'ENERGIE

RECHERCHES ET RÉALISATIONS TECHNIQUES
DANS L'HABITAT ET L'ÉQUIPEMENT MÉNAGER

A. GSPONER ^{1),2)}, B. GIOVANNINI ¹⁾, J. BRANCH ²⁾

Ce rapport a été préparé dans le cadre
de la coopération dans la recherche avec
l'Agence internationale de l'énergie sous
mandat de l'Office fédéral de l'énergie
avec le soutien financier partiel du
Fonds National pour
la recherche énergétique (NEFF)

Juin 1981

1) CUEPE, 5, rue Saint-Ours, 1205 Genève

2) GIPRI, 41, rue de Zurich, 1201 Genève

TABLE DES MATIERES

	<u>page</u>
INTRODUCTION	1
CHAPITRE I - BÂTIMENTS ENTIERS	4
PROBLEMES FONDAMENTAUX	5
1) <u>Méthodes de calcul</u>	5
2) <u>Instrumentation</u>	10
a) généralités	10
b) immeubles instrumentés	11
3) <u>Renouvellement de l'air</u>	12
a) instrumentation	13
b) qualité de l'air	13
c) Air Infiltration Center	14
d) comportement des habitants	14
e) tendances de la recherche	15
4) <u>Climat intérieur et confort thermique</u>	15
5) <u>Normes de constructions</u>	19
6) <u>Rénovation thermique des bâtiments existants</u>	22
a) méthodologie et politique de la rénovation thermique	23
b) diagnostic énergétique	25
c) technique de la rénovation	26
ETUDES-PILOTE	27
7) <u>Bâtiments-pilote à basse énergie</u>	27
a) Angleterre	29
b) Canada	30
c) Danemark	31
d) Etats-Unis	32
e) République Fédérale Allemande	33
f) Suède	33
g) Suisse	34

	<u>page</u>
8) <u>Rénovations-pilote</u>	36
a) Angleterre	36
b) Canada	37
c) Danemark	37
d) Etats-Unis	38
e) France	39
f) Suède	39
g) Suisse	40
Conclusion	41
CHAPITRE II - RECHERCHES ET DÉVELOPPEMENTS DANS LE DOMAINE DU BÂTIMENT ET DE SES COMPOSANTS ... PASSIFS	42
1) <u>Fenêtres: pertes par transmission et par infiltration</u> ..	42
2) <u>Matériaux et isolation thermique de l'enveloppe</u>	44
3) <u>Diminution des pertes par rayonnement des surfaces opaques</u>	46
4) <u>Masse thermique des bâtiments et stockage de la chaleur</u>	47
5) <u>Quelques notes sur l'architecture bioclimatique et le solaire passif</u>	48
CHAPITRE III - TECHNIQUES DE CHAUFFAGE, CLIMATISATION, VENTILATION ET ÉCLAIRAGE	51
1) <u>Contrôle et comptabilisation de l'énergie dans les bâtiments</u>	51
2) <u>Chauffage central classique</u>	55
3) <u>Autres systèmes de chauffage</u>	59
a) comparaison de systèmes de chauffage	60
b) développements techniques	62
4) <u>Air conditionné, ventilation et récupération de la chaleur de l'air vicié</u>	64

	<u>page</u>
5) <u>Eau chaude domestique et récupération de la chaleur des eaux usées</u> ...	67
6) <u>Eclairage électrique et naturel</u>	68
CHAPITRE IV - ÉQUIPEMENTS MÉNAGERS	72
1) <u>Facteurs déterminants de la consommation énergétique dans les ménages</u> ..	74
2) <u>Consommations spécifiques et taux d'utilisation</u>	77
3) <u>Efficacité énergétique et étiquetage énergétique des appareils ménagers</u>	79
4) <u>Possibilités d'améliorations techniques des appareils ménagers</u> ..	82
a) réfrigérateurs et congélateurs	82
b) machines à laver le linge et la vaisselle	83
c) appareils à sécher le linge	84
d) cuisinières et fours de cuissons	85
e) éclairage	86
f) examen des mesures proposées	86
CHAPITRE V - ÉTUDES STATISTIQUES ET ÉCONOMIQUES	88
1) <u>Statistiques de consommation</u>	88
2) <u>Études typologiques</u>	92
3) <u>Le "Budget Énergie"</u>	92
4) <u>Rentabilité économique des mesures de conservation de l'énergie</u> ..	94
5) <u>Indicateurs de rentabilité économique</u>	97
a) prix équivalent de l'énergie	97
b) période de remboursement	97
c) taux de rendement interne	98
d) exemples d'applications	99

	<u>page</u>
6) <u>Optimisation des mesures de conservation de l'énergie...</u>	101
a) <u>minimisation du coût annuel total</u>	102
b) <u>minimisation du coût du cycle de vie</u>	103
c) <u>optimisation du coût énergétique</u>	105
7) <u>Potentiel global de la conservation de l'énergie</u>	105
 CHAPITRE VI - ESSAI DE SYNTHÈSE ET RECOMMANDATIONS	 107

APPENDICE I

PROGRAMME DE L'AGENCE INTERNATIONALE DE L'ENERGIE
RELATIF A LA CONSERVATION DE L'ENERGIE DANS LES AI.1-AI-9
BÂTIMENTS ET LES ENSEMBLES COMMUNAUTAIRES

APPENDICE II

ELEMENTS DE THERMIQUE DES BÂTIMENTS	AII.1
1) <u>Pertes par transmission et par renouvellement d'air..</u>	AII.1
2) <u>Bilan énergétique global d'un bâtiment</u>	AII.4
3) <u>Indice énergétique et signature énergétique d'un bâtiment</u>	AII.9
4) <u>Rendement des installations de chauffage</u>	AII.10
5) <u>Rendement saisonnier d'une chaudière</u>	AII.12

APPENDICE III

ASPECTS ECONOMIQUES ELEMENTAIRES DE LA CONSERVATION DE L'ENERGIE ..	AIII.1
1) <u>Fonction de coût annuel</u>	AIII.1
2) <u>Indicateurs et critères de rentabilité</u>	AIII.2
a) <u>prix équivalent de l'énergie (c_e)</u>	AIII.3
b) <u>période de remboursement (n_r)</u>	AIII.3
c) <u>taux de rendement interne (r_i)</u>	AIII.4
3) <u>Minimisation du coût annuel total</u>	AIII.4
4) <u>Minimisation du coût du cycle de vie</u>	AIII.5

BIBLIOGRAPHIE

Conférences	
Adresses des groupes de recherche et des organisations cités	
Références	

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX HORS-TEXTE

INTRODUCTION

Lorsqu'on parlait des économies d'énergie il y a quelques années, on en parlait comme d'un aspect certes psychologiquement et politiquement important, mais quantitativement assez secondaire. Quelques pour cents dans un raz de marée d'augmentation inéluctable. Les choses ont bien changé! On parle maintenant du "gisement des économies d'énergie". Il se trouve en effet que ce gisement est énorme, et que si l'on se réfère à ce qui est techniquement accessible et économiquement rentable, les économies d'énergie sont une de nos "ressources énergétiques" les plus prometteuses pour les prochaines décennies. En effet les études de plus en plus nombreuses faites dans ces domaines situent en général les possibilités d'économies d'énergie entre 30 et 50% selon les utilisations et jusqu'à 80% dans certains cas. Ces pourcentages sont énormes, et s'il est vrai que la récession a également joué son rôle, la plupart des observateurs estime généralement que la diminution importante de consommation de pétrole dans le monde ces dernières années est due avant tout à la mise en oeuvre de mesures d'économies. Et pourtant ce "gisement des économies d'énergie" est à peine effleuré. Il se trouve que tirer de ce gisement le maximum ne sera ni facilement ni rapidement réalisé. Il faudra faire des recherches approfondies et détaillées, développer des technologies nouvelles, les industrialiser, les vendre dans un marché très vaste où les décideurs sont nombreux, dispersés et très différents les uns des autres. Et il faudra renseigner un grand nombre de personnes, à tous les niveaux, sur ce qui se sait et se fait aujourd'hui. Il est à l'heure actuelle difficile, même parfois pour les spécialistes, de répondre rapidement à des questions concrètes sur les techniques d'économies d'énergie, car les informations disponibles sont très dispersées. Il est difficile de savoir, pour telle ou telle application pratique,

comme les maisons-pilote par exemple, quelles sont les références, quels sont les sujets de recherche, où se fait cette recherche et ce qu'on en attend.

Le but que nous poursuivons dans ce travail est de présenter les résultats de la recherche actuelle. On sait que l'Agence Internationale de l'Energie (AIE) anime un grand nombre de projets de recherche dans beaucoup de pays. Ces recherches se font dans tous les domaines, de la fusion au solaire en passant par les pompes à chaleur. Dans ce bref volume, de caractère relativement général, et qui sera, nous l'espérons, complété par une étude plus fouillée et plus technique, nous avons essayé, en présentant les travaux de l'AIE dans le domaine des économies d'énergie, de dresser un tableau d'ensemble sur les résultats acquis et la recherche en cours en matière d'économies d'énergie dans les domaines du bâtiment et des équipements ménagers. Le lecteur pourra juger par lui-même, en parcourant les chapitres qui suivent, de l'importance et de l'intérêt de ces recherches. Il pourra également juger des très nombreux domaines dans lesquels elle doit être parrainée et approfondie: contrôle de la qualité et du renouvellement de l'air, comportement des habitants, normes de construction, statistique sur les rénovations effectivement réalisées, rentabilité économique de ces rénovations, etc. etc.

L'Office Fédéral du Logement a publié en 1978 un rapport intitulé "Economies d'énergie dans les bâtiments - état, lacunes et priorités de la recherche" (1). Dans le même esprit que ce rapport, la présente étude s'adresse autant aux professionnels du bâtiment qu'aux profanes intéressés par la conservation de l'énergie. Nous utiliserons souvent ce terme de "conservation de l'énergie", dont l'acceptation est de plus en plus large, et qui recouvre l'ensemble des actions qui peuvent être entreprises en vue d'une utilisation aussi efficace que possible des ressources en énergie: les économies d'énergie, l'utilisation rationnelle de l'énergie, la substitution d'une forme d'énergie par une autre, etc.

Dans un premier chapitre, nous analyserons d'abord les recherches ayant trait aux bâtiments dans leur ensemble pour analyser ensuite les composants "passifs" du bâtiment (murs, fenêtres, etc) dans un deuxième chapitre, et ses composants "actifs" (systèmes de chauffage et de ventilation) dans un troisième chapitre. Un quatrième chapitre sera consacré aux économies d'énergie dans l'équipement électroménager. Dans un cinquième chapitre, nous présenterons les études statistiques et économiques. C'est dans ce chapitre que l'on trouvera notamment les mesures d'économies d'énergie avec leur rentabilité et l'impact qu'elles pourraient avoir sur la consommation d'énergie dans les bâtiments. Enfin un dernier chapitre sera consacré à la présentation de quelques réflexions de synthèse. Les lecteurs intéressés trouveront dans l'Appendice I une description sommaire de l'ensemble des projets de l'AIE relatifs à la conservation de l'énergie dans le domaine bâti. Dans les Appendices II et III on trouvera un rappel de quelques notions de base concernant le chauffage des bâtiments et les aspects économiques de la conservation de l'énergie.

Il faut dire enfin que ce document a été préparé dans un temps relativement court et qu'il comporte inévitablement des lacunes. Nous espérons que nous pourrions l'améliorer dans des éditions ultérieures et nous comptons beaucoup sur nos lecteurs pour nous envoyer leurs remarques et surtout pour nous signaler telle expérience-pilote ou telle recherche dont nous n'aurions pas fait état.

CHAPITRE I

BÂTIMENTS ENTIERS

Le but principal de la recherche dans ce domaine est d'étudier la faisabilité de basses consommations énergétiques. On peut aborder ce problème de façon fondamentale, en étudiant de manière approfondie le pourquoi et le comment de la consommation énergétique d'un bâtiment. C'est à cette démarche fondamentale que nous consacrons la première partie de ce chapitre, en considérant tour à tour les méthodes de calcul, l'instrumentation d'immeubles-test, les problèmes de renouvellement d'air, du confort thermique, des normes de construction et de la rénovation thermique.

On peut aussi prendre devant ces problèmes un point de vue plus pragmatique et considérer que les bâtiments-pilote à basse énergie jouent un rôle très important, même si on n'en comprend pas tous les détails. Pour apprécier les résultats de ces bâtiments-pilote, il suffit en général de connaître la consommation spécifique*) (avant et après la rénovation s'il s'agit d'un bâtiment rénové), les degrés-jour à l'endroit où le bâtiment se trouve, les caractéristiques du bâtiment en matière d'isolation et de chauffage et le surcoût économique attribué aux améliorations thermiques. En fait, même ces renseignements élémentaires sont souvent très difficiles à obtenir. Dans une deuxième partie, nous présentons brièvement quelques bâtiments et rénovations pilotes particulièrement intéressantes en Suisse et dans le monde.

*) La consommation spécifique (indice énergétique) se mesure en mégajoules par m² chauffé par an. 1000 MJ/m² an correspondent à peu près à 24 kg(mazout)/m² an. La consommation par m³ s'obtient en divisant par 2,5 : 10 kg/m² an = 4 kg/m³ an.

PROBLEMES FONDAMENTAUX

Comprendre de façon approfondie le comportement énergétique d'un bâtiment c'est en fait être capable d'en calculer très exactement sa consommation énergétique en tenant compte de différents facteurs tels que caractéristiques du bâtiment, comportement des habitants, données climatiques etc. C'est être capable également de dire de combien cette consommation sera réduite si telle ou telle mesure d'amélioration thermique est prise. Pour approfondir nos connaissances dans ces domaines, on est amené à étudier en particulier les problèmes suivants: les méthodes de calcul numérique, capables de calculer le comportement énergétique d'un bâtiment, les mesures détaillées (instrumentation) dans des bâtiments-test, qui permettent de confronter la réalité aux prédictions théoriques, et les problèmes de renouvellement d'air et de confort thermique dans lesquels le comportement des habitants joue un rôle primordial. Finalement, la mise en pratique de ces connaissances nouvelles pose un certain nombre de problèmes fondamentaux au niveau de leur application à grande échelle, il y a donc lieu d'examiner certains problèmes liés au développement de nouvelles normes de construction et de la rénovation thermique des bâtiments existants.

Voyons ces problèmes tour à tour.

1) Méthodes de calcul

On peut dire que la recherche dans ce domaine se fait dans trois directions principales.

- La conception de programmes de calcul qui soient aussi complets et aussi proches de la réalité que possible. Ce genre de programmes est très complexe, nécessite un personnel de haut niveau et devrait être mis à disposition dans des services spécialisés. Etant cher, ce service se justifie pour les bâtiments complexes avec climatisation par exemple.

- La conception de programmes de calcul simplifiés, exécutables par exemple avec un microprocesseur, et qui devraient être l'outil principal de l'ingénieur énergétique de demain. Les limites d'application de ces programmes simplifiés doivent être soigneusement évaluées, en particulier en comparant leurs résultats à ceux de programmes plus complets ou à des mesures expérimentales.

- La conception de programmes de calcul dont le but n'est pas de calculer la consommation mais de donner directement la liste des mesures d'économies d'énergie que l'on peut prendre par ordre de rentabilité.

Il existe déjà un grand nombre de programmes d'ordinateurs développés dans de nombreux pays. Le but d'un des projets de recherche de l'AIE (*Projet I*) a été de récolter ces différents programmes et d'en déterminer la cohérence. Ce projet a permis à l'EMPA d'installer et d'utiliser le programme DOE-II développé à Berkeley (2) afin de l'adapter aux conditions suisses et d'éventuellement le mettre à disposition dans le cadre d'un service public qui est à l'étude actuellement. Ce genre de programme est particulièrement adapté aux immeubles complexes (immeubles de service) avec ventilation et climatisation.

La comparaison de programmes de calcul effectuée dans le cadre du *Projet I* a principalement porté sur un bâtiment administratif fictif à air conditionné. Les conditions de fonctionnement de cet immeuble ont été simplifiées à l'extrême: un seul secteur de climatisation par étage, température constante jour et nuit, étanchéité absolue (pas d'infiltrations), pas de mouvement de

stores, etc. L'examen des résultats montre des écarts de l'ordre de 10 à 15% par rapport à la moyenne pour des quantités telles que la puissance maximum requise pour le système de climatisation, ou la consommation énergétique totale. Certaines divergences initiales de l'ordre de 50 à 100% ont pu être expliquées par des erreurs dans les programmes. Mais les divergences résiduelles semblent être plus étroitement liées aux méthodes utilisées, en particulier pour le calcul du gain solaire (3).

La comparaison avec ce bâtiment fictif n'ayant pas été totalement satisfaisante, un projet de comparaison détaillée avec un immeuble réel a été mis sur pied (*Projet IV*). L'immeuble choisi par l'AIE se trouve à Glasgow, et il a été instrumenté au cours de l'année 1980 de sorte que les premières simulations pourront être faites en 1981. Il s'agit d'un immeuble commercial relativement complexe à air conditionné pour lequel il est prévu de simuler le fonctionnement avec une dizaine de programmes. La Suisse et les USA utiliseront chacun le programme DOE-II pour cette tâche.

A part le programme DOE-II, il existe de nombreux autres programmes d'ordinateurs dans différents pays. Ces programmes peuvent être classés en gros en deux catégories: les programmes complexes, mieux adaptés aux bâtiments compliqués, et qui exigent un temps de calcul et de préparation des données assez long, et les programmes simplifiés qui sont mieux adaptés aux maisons d'habitation.

Le *Projet III-A* de l'AIE a donné l'occasion de comparer entre eux deux programmes complexes dont DOE-II, deux programmes simplifiés calculant la charge thermique heure par heure, et sept programmes simplifiés utilisant des méthodes plus ou moins statiques. Les programmes sont confrontés à la simulation d'un immeuble locatif fictif de 64 appartements sur huit étages (le bâtiment "Teknikern") (5) et d'une villa instrumentée de 110 m² chauffée électriquement, située à Vetlanda en Suède (6). Pour cette villa, on a enregistré la consommation électrique avec et sans habitants, ainsi que les données météorologiques pendant plus de six mois. Diverses

études paramétriques sont aussi effectuées: modification des fenêtres, diminution de l'isolation, réduction nocturne de la température, installation d'un tapis isolant, augmentation de la ventilation. La Suisse participe à ce projet avec le programme JAENV de l'EMPA (7) et DOE-II. Le rapport définitif sera publié prochainement. Les premiers résultats montrent des écarts de plus de 30% entre certains programmes pour "Teknikern", et de l'ordre de 15 à 20% par rapport aux mesures pour la villa de Vetlanda (5).

Outre le projet de l'AIE, l'EMPA a publié récemment les résultats d'un programme d'ordinateur (7) sur la consommation d'énergie d'immeubles-type en Suisse. Ce programme, nommé JAENV se base sur les données climatiques journalières, et est plus simple que les programmes DOE-I et II. Les conclusions de ce travail sont intéressantes: la valeur k et la température intérieure sont réellement les paramètres déterminants, l'influence de la grandeur de fenêtre et de l'inertie thermique est faible. De plus, l'indice énergétique des maisons à plusieurs appartements devrait être environ deux fois plus faible que celui des villas. Il faut préciser que ce programme de calcul n'a pas encore été validé expérimentalement et que, en ce qui concerne les consommations relatives des grands bâtiments et des villas, les résultats des études statistiques des indices énergétiques sont en contradiction avec cette dernière prédiction. Les courbes calculées par JAENV sont reproduites à la fig. IV de l'Appendice II.

Une autre conclusion intéressante de ce travail est que pour des bâtiments de conception architecturale classique, il est possible de réduire la consommation en énergie de chauffage par un facteur deux en renforçant l'isolation des murs et en diminuant le taux de renouvellement d'air dans des proportions certainement acceptables:

murs extérieurs	k	: 0.9 → 0.3	W/m ² K
fenêtres	k	: 3.1 → 2.1	W/m ² K
murs de séparation	k	: 1.5 → 0.6	W/m ² K
ventilation	\bar{n}	: 0.72 → 0.45	h ⁻¹

Autres programmes à mentionner en Suisse: TRNSYS de l'EPFL (8), IGLOU de Motor-Colombus (9) et, pour l'étude des maisons solaires passives le programme DEROB de l'Université du Texas qui a été installé à l'EMPA (4).

Les recherches pour un programme simplifié, par exemple à l'intention d'un microprocesseur, ont été faites avant tout à l'étranger (10). Il faut surtout mentionner les programmes développés à Berkeley (11) pour faire le diagnostic d'une maison à l'aide d'un microprocesseur (portable). Le diagnostic fournit les mesures d'économies d'énergie par ordre de rentabilité. Egalement à l'aide d'un microprocesseur, il faut signaler un programme (12) pour le calcul de maisons solaires passives à basse énergie. Cette tendance à la simplification, étant donné le fait que les économies d'énergie sont avant tout un but à réaliser dans la pratique, ne peut que se développer, parallèlement par ailleurs à l'approfondissement des connaissances fondamentales. Ce développement des connaissances en physique du bâtiment est nécessaire car même si l'on connaît en principe parfaitement les équations qui décrivent les phénomènes qui entrent en jeu, le problème pratique qui se pose est que ces équations sont souvent très difficiles à résoudre exactement, même dans les cas les plus simples. Avec les approximations faites dans les méthodes de calcul classiques, les prédictions ne sont en général valables que pour la comparaison relative de variantes simples d'un même immeuble. Elles ne donnent aucune garantie sur la valeur absolue des résultats et sont de moins en moins fiables à mesure que la construction s'éloigne de l'architecture traditionnelle: par une isolation accrue, par des infiltrations réduites, par un apport solaire important, etc.

Diverses recherches théoriques ont été entreprises pour développer des programmes d'ordinateur qui soient réellement fiables et plus précis que les modèles classiques, en particulier aux Etats-Unis. Citons deux problèmes étudiés récemment:

Un premier exemple est celui des échanges de chaleur par convection naturelle. Une thèse récemment publiée sur ce sujet (13) montre que les échanges convectifs avec les surfaces d'une enceinte chauffée dépendent fortement de la distribution de la température superficielle. L'utilisation d'une température superficielle moyenne peut entraîner des erreurs de l'ordre de 100%. Ce genre d'effet est particulièrement important dans les cas où la surface est chauffée par le soleil dans une construction solaire passive.

Une autre catégorie de problèmes est celle de la prise en compte correcte des apports solaires dans les bâtiments. C'est ainsi que s'expliquent en partie les divergences observées entre les prédictions des divers programmes d'ordinateurs comparés entre eux dans le cadre du *Projet I* de l'AIE. Dans ce domaine, une thèse a été publiée en 1978 sur les modèles analytiques de maisons solaires passives (14). Ce travail a permis le développement d'un programme simplifié exécutable sur un micro-ordinateur que nous avons déjà mentionné (12).

2) Instrumentation

a) généralités

Pour comparer en détails les prédictions d'un calcul avec une maison réelle, il faut l'instrumenter de façon très complète. Instrumenter signifie équiper l'immeuble d'appareils qui mesurent notamment les données climatiques (température extérieure, ensoleillement, vitesse du vent), les températures intérieures, les durées d'ouverture des fenêtres, les apports énergétiques par comptage de chaleur ou comptage de gaz ou électricité, etc. En Suisse, les projets principaux sont La Sallaz (EPFL) (15), Maugwil (EMPA) (16) et les immeubles rénovés de la Limmatstrasse (EMPA) (17). Il existe en outre un assez grand nombre de projets entrepris de façon indépendante les uns des autres. Lorsqu'on parcourt ces projets, on se rend compte immédiatement que les mesures sont difficilement comparables les unes aux autres. Il est donc essentiel

d'établir des normes dans ce domaine. Le *Projet III-B* de l'AIE consiste précisément à rédiger un manuel pour la conception d'expériences, d'instruments et de techniques de mesure. La contribution suisse à ce projet est rédigée par l'EPFL (13).

b) immeubles instrumentés

En Suisse on a en premier lieu les immeubles étudiés dans le cadre du *Projet III-C* de l'AIE (Maugwil et La Sallaz) ainsi qu'un projet financé par la Ville de Zurich et le NEFF à la Limmatstrasse.

Immeuble de La Sallaz: Ce projet est conduit par l'EPFL et a pour buts principaux l'étude détaillée du bilan thermique en ses composantes principales, la comparaison avec les calculs théoriques de consommation et l'influence du comportement des habitants. Il s'agit d'un immeuble locatif comportant 24 appartements. L'immeuble (qui a été construit en 1957) a été instrumenté en 1980 et on espère dans une étape ultérieure procéder à des rénovations contrôlées (15).

Immeubles de la Limmatstrasse: Ce projet est conduit par PLENAR et l'EMPA. Le but de l'expérience pilote de la Limmatstrasse est d'étudier et de comparer les possibilités d'amélioration thermique dans des immeubles urbains. Il s'agit de 25 maisons à neuf appartements chacune, construites en 1908-1909, et qui ont été rénovées selon différents schémas (17). Avant la rénovation (1976-77), on a mesuré les données climatiques (température extérieure, ensoleillement, vitesse du vent, etc), les températures intérieures et les apports énergétiques (comptage de chaleur, comptage de gaz, apports de l'énergie solaire, etc). Dans cette rénovation, l'isolation supplémentaire des murs extérieurs a été rapportée à l'intérieur ($k = 0.5$ à $0.4 \text{ W/m}^2\text{K}$) et on a installé des fenêtres à triple vitrages. Parmi les systèmes expérimentés, on compte des pompes à chaleur, des collecteurs d'énergie solaire et des systèmes de chauffage contrôlés par microprocesseurs.

La maison de Mauwil: Les travaux sont menés par l'EMPA (16).

Il s'agit d'une maison non habitée, sur laquelle on effectue des mesures depuis l'été 1979 que l'on prévoit de terminer en 1981. Ces mesures sont très détaillées, notamment en ce qui concerne les échanges d'air. Elles ont permis de constater, quand bien même la construction de cette maison a été particulièrement soignée, que seulement 20% des infiltrations se produisaient par des ouvertures connues (joints des fenêtres, etc) et 80% par des ouvertures inconnues (123). L'ensemble des données enregistrées permettront une comparaison détaillée avec des simulations pour le programme DOE-II dans le cadre du *Projet III-A* de l'AIE et de mettre au point des règles de calcul réalistes pour les infiltrations d'air. Finalement, les résultats de consommation de cette maison non habitée seront comparés à ceux de maisons habitées très semblables situées dans le voisinage pour en déduire des renseignements sur le comportement des habitants.

D'autres maisons ont été instrumentées en Suisse, à Begnins (18), Payerne (19) et Zug (20).

A l'étranger, il existe naturellement un grand nombre de maisons instrumentées. Rappelons les projets de l'AIE à Glasgow et à Vetlanda (6) dont le rôle principal est la confrontation aux programmes de calcul comme nous l'avons vu ci-dessus.

3) Renouvellement de l'air

La consommation d'énergie pour le chauffage dépend en bonne partie du taux de renouvellement d'air. Dans un bâtiment standard cette partie correspond à 20-30% du total. Cependant, dans un bâtiment à basse consommation d'énergie, et au fur et à mesure que l'isolation est augmentée, la fraction de l'énergie de chauffage utilisée pour réchauffer l'air frais augmente rapidement au-dessus de 50%. Afin de pouvoir continuer à réduire la consommation d'énergie de chauffage, il est donc nécessaire d'étudier attentivement toutes sortes de problèmes fondamentaux liés au taux de renouvellement d'air.

a) instrumentation

D'abord il faut pouvoir déterminer le taux de renouvellement d'air avec précision dans un bâtiment donné, et l'instrumentation et les méthodes nécessaires nécessitent d'être normalisées afin que des comparaisons valables puissent être faites entre pays différents. L'AIE, dans le cadre de son *Projet V*, prépare ainsi un manuel sur les infiltrations d'air, leur réduction et les méthodes et instruments de mesure. La contribution Suisse à ce manuel est rédigée sous mandat de l'Office Fédéral de l'Energie et les techniques de mesures sont étudiées à l'EMPA (21, 123).

b) qualité de l'air

Un problème très important dans ce contexte est celui de la qualité de l'air. Le renouvellement d'air est nécessaire à cause des polluants chimiques et peut-être radioactifs, et à cause du simple confort (odeurs). De nombreux travaux ont déjà été faits à l'étranger dans ce domaine (22). Un projet est en cours en Suisse à l'ETHZ (23).

Un résultat important qui semble se dégager de ces travaux est qu'il est difficile d'abaisser le taux de renouvellement d'air en-dessous d'environ 0.5 changements d'air par heure. Pour cette raison, la plupart des habitations-pilote à très basse consommation énergétique réalisées ces dernières années utilisent des échangeurs de chaleur air-air pour assurer un renouvellement d'air compatible avec les exigences de la qualité de l'air tout en récupérant un maximum de la chaleur de l'air vicié expulsé de l'habitation (24).

Le *Projet IX* de l'AIE qui a été proposé par l'Allemagne est destiné à déterminer le taux minimum de renouvellement de l'air dans les habitations. La Suisse participe à ce projet.

c) Air Infiltration Center

Pour rassembler l'information sur les problèmes d'infiltration (renouvellement non contrôlé) de l'air, le *Projet V* de l'AIE a créé l' "Air Infiltration Center" en Angleterre (25). Ce centre publie un périodique d'information et des publications techniques que l'on peut obtenir auprès de l'EMPA. La coordination sur le plan est également assurée par l'EMPA.

d) comportement des habitants

Une autre question est naturellement le comportement des habitants, qui, indépendamment de données scientifiques, ont certaines habitudes qu'il conviendrait de connaître. Les projets de Maugwil et de La Sallaz sont partiellement consacrés à étudier ce comportement.

Dans les bâtiments à basse énergie, les habitudes de ventilation peuvent modifier de façon notable le taux moyen de renouvellement d'air et augmenter ainsi considérablement la consommation en énergie. Dans une étude faite en Allemagne sur 2000 appartements (26), on a noté, par exemple, que dans 40% des cas, la fenêtre de la salle à manger était ouverte pendant 15 minutes environ une ou plusieurs fois dans une journée au plus. Par contre, dans près de 50% des cas, la fenêtre de la chambre à coucher pouvait facilement rester ouverte pendant plus d'une heure par jour.

Afin d'approfondir ces questions, la Suisse, à l'initiative de l'EMPA (27), a proposé un nouveau *Projet VIII* à l'AIE dont le but est précisément l'analyse du comportement des habitants en ce qui concerne la ventilation. Plusieurs pays ont déjà annoncé leur participation éventuelle à ce projet et il est donc possible que son contenu définitif soit accepté en 1981 peut-être déjà.

e) tendances de la recherche

Dans les domaines du renouvellement et de la qualité de l'air, on peut noter les tendances suivantes (28):

- construction de bâtiments à infiltrations incontrôlées réduites;
- ventilation mécanique avec contrôle du débit en fonction des besoins et récupération de la chaleur;
- mesure de la qualité de l'air;
- mesure du nombre d'occupants;
- amélioration de la ventilation pour l'élimination des polluants et des fumées de tabac;
- création de secteurs réservés aux fumeurs;
- développement de nouveaux appareils pour la purification de l'air;
- contrôle et élimination des sources de pollutions;
- amélioration des systèmes de distribution de l'air.

4) Climat intérieur et confort thermique

Du point de vue sensoriel, les occupants des habitations sont soumis à un environnement caractérisé par un certain niveau d'éclairage et de bruit ainsi que par ce que l'on appelle le climat intérieur. Cet environnement et ce climat intérieur doivent satisfaire à certaines exigences dictées par l'hygiène, le confort et, le cas échéant, le genre d'activité (travail) des occupants. Pour le climat intérieur, on peut distinguer deux éléments principaux qui sont la qualité de l'air (dont nous avons parlé au paragraphe précédent) et le confort thermique.

Six facteurs déterminent le confort thermique, c'est-à-dire la façon dont les occupants perçoivent les caractéristiques de l'air ambiant (29):

1. le niveau d'activité des occupants;
2. le mode d'habillement des occupants;
3. la température de l'air;
4. la vitesse relative de l'air;
5. le rayonnement thermique;
6. l'humidité de l'air.

Les 2 facteurs personnels 1. et 2. sont conventionnellement caractérisés par des unités correspondant à une activité métabolique (1 "met" = 60 W/m² : activité métabolique d'une personne assise au repos) et à un habillement standard (1 "clo" = 0.155 m²K/W : niveau d'habillement d'un homme revêtu d'un complet-veston-cravate, ce qui correspond à un coefficient k de 6.5 W/m²K).

Plusieurs recherches importantes ont été faites ces dernières années en vue de déterminer scientifiquement les exigences du sentiment de confort en fonction des six facteurs susmentionnés. Dans une étude danoise (30) on a déterminé que la température "optimum" pour un habillement de 1 clo et une activité de 1.2 met (travail de bureau assis) était de 22°C. Dans les mêmes conditions, d'autres expériences ont montré des résultats semblables, quoique parfois indiquant des températures optimales plus faibles de l'ordre de 21° (31). Plusieurs conclusions remarquables se dégagent de ces études:

- Pour des conditions d'activité et d'habillement donnés, les divers facteurs de confort (température, humidité, vitesse relative de l'air, etc) sont pratiquement indépendants du sexe et de l'âge des personnes ainsi que des autres paramètres de l'environnement (bruits, couleurs, etc).

- L'organisme humain est extraordinairement sensible à des petites variations des facteurs de confort. Par exemple: des courants d'air de vitesse supérieure à 15 cm/s, une différence de température de 5° C entre la tête et les pieds... peuvent engendrer un sentiment d'inconfort.

- Un niveau d'activité ou d'habillement même légèrement accru permet de diminuer facilement la température de confort optimum de plusieurs degrés. Sur la figure 1, on peut constater par exemple que pour une activité de bureau (1.2 met), l'adjonction d'un pull-over de laine (0.3 clo environ) permet d'abaisser de 2°C environ la température de confort optimum (29).

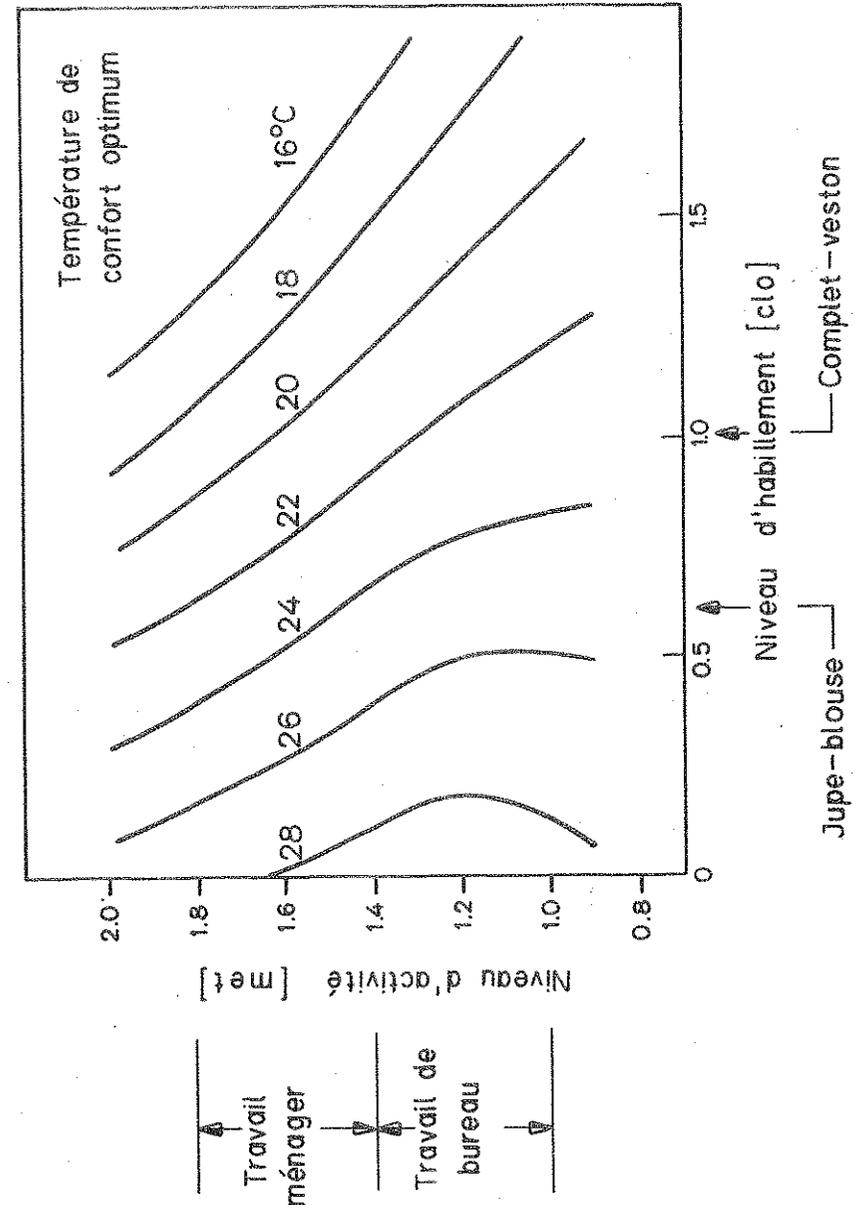


Figure 1

Une considération importante en rapport avec ces études est que les efforts fournis en vue de la conservation de l'énergie, devraient garantir non seulement une consommation en énergie réduite mais également un confort accru. Dans ce sens, il est important de distinguer le confort thermique, tel qu'il est défini dans ce paragraphe, du "confort social" (qui correspond par exemple à l'habitude de chauffer toutes les pièces d'une habitation toute la journée) et du "confort d'exploitation" (qui correspond par exemple à l'habitude d'ignorer les possibilités d'interventions manuelles sur le fonctionnement des systèmes de chauffage).

Il est bien connu qu'une diminution de la température intérieure de 1°C entraîne une réduction de la consommation énergétique de l'ordre de 5% (7). Tout comme la réduction du taux de changement d'air, cette diminution a des conséquences directes sur le climat intérieur et le confort thermique. Pour ces raisons, la recherche dans ce domaine se développe actuellement dans les directions suivantes (28):

- chauffage et refroidissement localisés permettant d'assurer le confort là où se trouve l'occupant du local;
- diminution de la vitesse des courants d'air;
- réalisations de profils de température en fonction des heures du jour;
- contrôles de température sophistiqués;
- contrôles de température individuels;
- contrôles de la température verticale;
- mise au point de nouveaux habits de travail;
- développement de normes basées sur les besoins humains, assurant un confort constant plutôt qu'une température constante.

5) Normes de constructions

En Suisse, les normes de constructions sont élaborées par la Société des Ingénieurs et des Architectes (SIA) (32). Ces normes sont ensuite éventuellement introduites dans les législations cantonales. Comme la durée de vie des bâtiments est relativement longue, il convient que les normes de constructions ainsi que leurs modifications ultérieures, soient étudiées au mieux. Depuis 1975, de nombreux pays ont adopté de nouvelles normes de constructions et, en 1977, la SIA a introduit la norme 180/1 (révisée en 1980) qui concerne l'isolation thermique des immeubles et en 1980 la norme 180/3 qui concerne le calcul de la consommation annuelle d'énergie thermique dans le bâtiment. Le dimensionnement des installations de chauffage est prescrit dans la norme 380 de 1975 (révisée en 1980).

Deux recherches en rapport avec ces normes sont en cours. D'une part, l'EMPA étudie la mise au point d'un appareil de mesure du coefficient k des murs construits (33). Un tel appareil de mesure permettra de vérifier l'application correcte des normes et de mesurer les caractéristiques de murs anciens en vue de leur rénovation thermique. D'autre part, dans le cadre du NEFF, la SIA étudie la révision de la norme 380 (34).

La méthode mise en oeuvre dans les normes SIA de la série 180 est celle dite du "k moyen admissible". Une autre méthode, utilisée entre autres en France (35), est celle dite du coefficient "G". Avec les définitions de l'Appendice II, on a:

$$G = \frac{A}{V} \bar{k} + 0.34 \bar{n}$$

Le paramètre G, qui tient compte des pertes par transmission (\bar{k}) et des pertes par renouvellement d'air (\bar{n}), caractérise les qualités thermiques du bâtiment car sa consommation en énergie de chauffage lui est approximativement proportionnelle. La méthode du coefficient G consiste à imposer une valeur maximale à ce coefficient en fonction de divers critères tels que la localisation géographique et le type du bâtiment.

La méthode du coefficient k moyen, utilisée en Suisse et en Allemagne entre autres, consiste à déterminer une valeur maximale admissible pour le paramètre \bar{k} en fonction du facteur de forme A/V du bâtiment, du climat par l'intermédiaire de l'altitude du bâtiment et de la température de l'air à l'intérieur des locaux principaux.

Outre la valeur maximum du coefficient \bar{k} , les normes prescrivent des valeurs maximales pour les coefficients k respectifs de chacun des éléments de construction ainsi que pour la ventilation et les infiltrations d'air.

La justification du principe des méthodes du "k moyen admissible" ou du "coefficient G" est l'idée qu'elles permettent d'obtenir une consommation énergétique par unité de surface chauffée égale pour tous les bâtiments quelle que soit leur forme, leur localisation géographique, leur affectation. Ces méthodes tendent donc essentiellement à uniformiser l'indice énergétique.

Diverses remarques peuvent être formulées à l'égard de ces méthodes. En particulier, une analyse détaillée des normes SIA montre que l'isolation des grands immeubles situés sur le Plateau suisse pourrait être encore améliorée (36).

Du point de vue de la conservation de l'énergie, d'autres méthodes de normalisation sont en principe possibles. En particulier, on peut envisager des méthodes qui minimisent la consommation énergétique des bâtiments de façon absolue, en imposant des conditions d'isolations uniformes par l'intermédiaire de coefficients k maximum plus sévères pour chacun des éléments de construction respectifs. Le tableau ci-après compare les coefficients k maximum admissibles pour la Suisse, le Danemark et la Norvège. Pour la Suisse, le modèle d'ordonnance pour des prescriptions cantonales sur l'isolation thermique proposé par la Confédération (37) prescrit des valeurs k maximum plus sévères pour certains cas de rigueur.

coefficients k maximum admissibles

	Suisse (1977)	Danemark (1979)	Norvège (proposé)
Murs extérieurs	0.6	0.25 0.35	0.4
Fenêtres	3.3	2.7 2.0	2.6
Toits	0.5	0.2	0.2
Dalles sur cave	0.8	0.3	0.3
Dalles sur sol	0.8	0.4	0.3

Une autre conception, liée au développement de programmes de calcul, consiste à favoriser l'optimisation d'un plus grand nombre de paramètres (en particulier de l'apport solaire), de sorte à permettre la minimalisation non seulement du coût initial du bâtiment, mais encore de celui de son fonctionnement intégré sur sa durée de vie. Aux Etats-Unis, le département de l'énergie est en train d'élaborer une nouvelle norme nationale qui, si elle est acceptée, sera l'un des plus exigeante du monde, et qui fait précisément appel à ce genre d'idées nouvelles (38). La nouvelle norme, appelée BEPS (Building Energy Performance Standard) se contente de spécifier des performances minimales: chaque nouveau bâtiment doit être construit de façon à ce que son indice énergétique soit inférieur à une norme qui dépend entre autres du climat. Le constructeur est libre de choisir la solution qui lui convient pour se conformer à cette norme. Ce projet de standard est actuellement l'objet de nombreuses critiques, en particulier de la part des associations de constructeurs (39).

En ce qui concerne les infiltrations d'air, les normes actuelles suisses prescrivent des niveaux d'étanchéité minimum pour les fenêtres et les battues. En Suède, une approche différente a été adoptée en imposant un taux d'infiltration maximum admissible pour l'ensemble du bâtiment. Pour une différence de pression de 50 Pascal, le taux d'infiltration maximum est ainsi de trois changements d'air par heure pour les villas, et de un changement d'air par heure pour les bâtiments de plus de trois étages.

De façon générale, les nombreux résultats théoriques et expérimentaux enregistrés ces dernières années indiquent que les normes récemment acceptées ou en cours d'élaboration, dans de nombreux pays, sont encore très modestes par rapport aux possibilités et à la rentabilité de la conservation de l'énergie dans les bâtiments (40).

6) Rénovation thermique des bâtiments existants

Selon une estimation faite en 1976, la construction d'immeubles nouveaux de 1975 à l'an 2000 ne remplacera que le 25% du volume bâti suisse total (41). Ce chiffre souligne l'importance primordiale de la rénovation thermique des bâtiments existants et suggère même que la quantité d'énergie susceptible d'être économisée durant ce laps de temps est probablement plus importante par la rénovation thermique que par les améliorations dans la construction de nouveaux bâtiments.

Une autre caractéristique du parc immobilier suisse est la proportion relativement importante des immeubles locatifs.

En fonction des surfaces chauffées respectives, on avait en 1975 la répartition suivante (42):

Maisons à 1 appartement	28%
Maisons à 2 appartements	10%
Bâtiments à appartements multiples	38%
Bâtiments divers avec appartement	24%

Les pays anglo-saxon et nordiques sont actuellement parmi les plus actifs pour la conservation de l'énergie dans le bâtiment. La majorité des recherches dans ces pays concerne les maisons individuelles et les bâtiments administratifs ou commerciaux. De plus, dans certains de ces pays, et en particulier aux Etats-Unis, la qualité des immeubles existants est médiocre par rapport aux standards helvétiques. Il est donc essentiel de tenir compte de ces différences lors de l'analyse des résultats de ces travaux, surtout en ce qui concerne l'assainissement thermique.

a) méthodologie et politique de la rénovation thermique

Dans chaque cas particulier d'assainissement thermique, on peut envisager un ensemble de mesures parmi lesquelles il faut choisir celles qui sont techniquement les plus éprouvées et économiquement les plus rentables. Au niveau micro-économique d'un bâtiment donné, une simple analyse coût-bénéfice peut être suffisante pour déterminer cet optimum. Au niveau macro-économique d'un grand ensemble de bâtiments, et en particulier d'une région ou d'un pays, il faut aussi envisager les problèmes socio-politiques posés par la rénovation thermique et étudier les diverses mesures qui permettent d'encourager ce type de rénovation à grande échelle. La recherche dans ce domaine doit aboutir à l'élaboration de concepts et de stratégies détaillés, autant pour la technique même de la rénovation thermique que pour l'approche globale du problème au niveau d'une région ou d'un pays.

Dans le cadre du secteur I du Programme national "Recherche et développement dans le domaine de l'énergie", le FNRS finance trois projets touchant ces questions:

- "Effets des instruments de la politique énergétique" (36). Cette recherche aborde l'ensemble des problèmes de la conservation de l'énergie dans le domaine bâti. Elle analyse l'impact probable de diverses mesures technico-économiques ou législatives en vigueur ou proposées.

- "Stratégies pour les économies d'énergie" (42). Cette recherche examine en détail 27 cas d'immeubles susceptibles d'être améliorés thermiquement dans le but de déterminer les mécanismes socio-économiques qui encouragent ou freinent leur rénovation. Parmi les problèmes mis en évidence, on trouve entre autres ceux de la rentabilité économique, de la motivation des promoteurs, des conflits possibles entre locataires et propriétaires, etc.

- "Economies d'énergie dans les bâtiments existants" (43). Cette étude considère en détail les possibilités d'amélioration thermique de 19 bâtiments administratifs correspondant à 3820 places de travail. Cette recherche montre que si le potentiel d'économies d'énergie techniquement réalisable pour ces bâtiments est de 52%, la rentabilité économique ne permet que 29% d'économies.

Toutes ces études font clairement ressortir le besoin d'une approche méthodique du problème de la rénovation. Celle-ci comporte en général quatre ou cinq phases:

- I Analyse grossière des bâtiments
- II Analyse fine des bâtiments
- III Sélection des mesures d'assainissement
- IV Rénovation proprement dite
- V Vérification des résultats

Dans le cadre de son "Programme d'Impulsion", l'Office fédéral pour les questions conjoncturelles a organisé des cours de perfectionnement en matière de rénovation thermique des bâtiments. Ces cours enseignent précisément une méthodologie basée sur l'approche ci-dessus et un manuel a été publié à cet effet (44).

Une approche semblable est utilisée pour l'amélioration thermique des 10'200 bâtiments appartenant à la Confédération suisse (45).

Le *Projet VII* de l'AIE qui est proposé par la Suède est centré sur les problèmes socio-politiques posés par la planification de la conservation de l'énergie dans les communautés urbaines. Ce projet étudiera en particulier le cas des bâtiments pour lesquels il existe des relations du type "propriétaire/locataire": immeubles locatifs, multi-appartements, petits bâtiments commerciaux, bâtiments publics, etc. D'autre part, pour l'étude des relations du type (gouvernement / communauté", ce projet examinera les conditions permettant de renforcer la coordination avec les acteurs non-gouvernementaux: fournisseurs d'énergie, grands consommateurs, associations professionnelles et de consommateurs, ...

b) diagnostic énergétique

Les considérations méthodologiques que nous venons d'évoquer soulignent l'importance de la phase initiale du processus de rénovation thermique: il s'agit du diagnostic énergétique, c'est-à-dire de l'évaluation précise des caractéristiques thermiques d'un bâtiment, des mesures d'assainissement possibles et de la sélection des mesures optimum à prendre (46). Des chercheurs américains considèrent que ce genre de travail devrait correspondre à une profession nouvelle: "House doctor". Ils estiment en effet que les constructeurs immobiliers, les chauffagistes ou les fabricants de matériaux isolants ne sont pas forcément les mieux placés pour effectuer ce genre d'évaluation globale (47). La Suède a proposé qu'un nouveau projet de l'AIE soit consacré au diagnostic énergétique de l'habitat.

Pour faciliter le diagnostic énergétique (en anglais "energy audit"), nous avons déjà mentionné le développement de programmes d'ordinateur simplifiés susceptibles d'assister les diagnosticiens. Un tel diagnostic peut être dressé par deux personnes travaillant pendant quatre heures; il comprend des mesures de pertes par infiltration d'air, d'efficacité de la chaudière, de la résistance thermique des murs et l'historique de la consommation énergétique de la maison. Il se termine par un choix optimal des mesures d'assainissement (11).

En Suisse, une firme offre un système d'optimisation de mesures d'assainissement thermique à l'aide d'un micro-processeur. Le système travaille sur la base des plans de construction unique-ment et ne saurait en aucun cas remplacer la visite d'un diagnosticien "in situ" (48).

L'AIE a organisé un séminaire sur le diagnostic énergétique en avril 1981 auquel la Suisse a présenté plusieurs contributions (181).

c) technique de la rénovation

Les aspects techniques de la rénovation thermique posent un certain nombre de problèmes dont la solution n'est que partiellement liée au développement de nouvelles techniques de construction pour les bâtiments neufs à faible consommation d'énergie. Comme le nombre de cas de rénovation thermique intéressants et de grande envergure est encore limité à l'heure actuelle dans le monde, un effort considérable est entrepris pour analyser et généraliser les résultats obtenus dans les rénovations pilotes. Pour cette tâche, l'AIE est appelée à jouer un rôle important et le *Projet III-C* consiste précisément à favoriser de tels échanges. C'est ainsi que du côté suisse, les immeubles instrumentés de Maugwil et de La Sallaz pourront éventuellement devenir l'objet de rénovations-pilote. De même, les résultats de la "Limmatstrasse" et de la "Maison Solaire" de Zug pourront être valorisés de cette façon.

Toujours dans le cadre de ce projet de l'AIE, un séminaire sur la rénovation thermique des fenêtres a été organisé en 1980. Le Danemark prépare une contribution sur l'isolation supplémentaire des murs et les U.S.A. pour celle des toits. Finalement, la Suède étudie la récupération de la chaleur dans les systèmes de ventilation.

Nous avons déjà noté l'importance pour la Suisse de la rénovation thermique des grands immeubles locatifs. Il est intéressant de constater qu'il n'existe malheureusement encore que très peu de cas de rénovation de tels immeubles pour lesquels des résultats chiffrés complets sont disponibles.

Dans le paragraphe 8 ci-après nous examinerons un certain nombre de rénovations-pilote qui nous donneront l'occasion d'illustrer certains des problèmes techniques les plus importants de l'amélioration thermique des bâtiments existants.

ETUDES-PILOTE

Comme il a été écrit dans l'introduction, un bâtiment-pilote devrait fournir un certain nombre de données telles que consommation spécifique (avant et après la rénovation s'il y a lieu), caractéristiques générales du bâtiment, nombre de degrés-jour et surcoût économique. En fait, il est malheureusement souvent très difficile d'obtenir ces renseignements.

Pour cette raison, nous allons nous contenter dans les deux paragraphes suivants de présenter quelques exemples choisis de constructions et de rénovations pilote pour lesquelles les chiffres sont en général disponibles. En faisant cette sélection, nous nous sommes restreints en général aux études pour lesquelles des établissements universitaires ou des collectivités publiques ont été associées et ont conduit à des publications. Parmi ces études, nous avons retenu celles qui nous ont paru les plus intéressantes, soit du point de vue des performances obtenues, soit du point de vue de leur importance pour la recherche dans le domaine de la conservation de l'énergie dans le bâtiment.

7) Bâtiments-pilote à basse énergie

Il existe certainement dans le monde à l'heure actuelle des milliers de constructions dont la consommation énergétique est nettement inférieure à celle de bâtiments conventionnels construits dans leur voisinage. Pour ces constructions à basse énergie, il est souvent difficile de séparer en pratique celles que l'on qualifie de "constructions solaires" de autres. La présente étude ne couvre pas l'énergie solaire proprement dite, nous n'allons donc prendre en considération que les "constructions à haute isolation", bien que, en général, on aura dans ces cas bien entendu procédé à une optimisation de l'apport solaire passif.

TABLEAU I

Références	Symbole	Nombre	Type du chauffage	Isolation (W/m^2K)			échangeur de chaleur à air-air	Degrés-jour local	Indice énergétique (MJ/m^2)	
				murs	toit	sol			local	normalisé
Canada	CA1	1	Electrique	0.14	0.09	0.18	X	6463	27	15
USA	US1	1	Electrique	0.17	0.14	0.26		3860	87	82
USA	US2	1	Gaz	0.16				4201	103	90
Canada	CA2	5	Electrique	0.14	0.09	0.19	X	6157	168	100
USA	US3	1	Electrique	0.16	0.15	0.11		5060	156	113
Ecosse	GB1	24	Electrique	0.33	0.22	0.22		3638	83	83/165
Canada	CA3	2	Gaz	0.14	0.09	0.19	X	6157	210	125
Allemagne	AL1	1	Electrique	0.17	0.23	0.3	X	3400	124	133
Danemark	DA1	1	Electrique	0.19	0.15	0.14	X	5000	164	200
Suède	SUI	5	Electrique	0.28	0.16	0.29		4583	270	215
Angleterre	GB2	20	Electrique	0.31	0.31	0.41		3915	135	126/285

Dans le tableau I nous avons classé, en fonction de leur indice énergétique, une sélection de maisons-pilote particulièrement intéressantes. On peut constater qu'il est possible de réaliser des maisons habitables dont l'indice énergétique de chauffage normalisé à la moyenne suisse (3654 degrés-jour par rapport à 20°) est voisin de 100 MJ/m^2 an. Cet indice énergétique est inférieur à la moitié de celui qui est mesuré pour des maisons construites selon les normes suédoises actuelles (SUI sur le tableau). Les chiffres de ce tableau sont reportés sur la figure II du chapitre V qui montre également les résultats de diverses statistiques de consommation et des prédictions correspondantes aux nouvelles normes proposées pour les Etats-Unis.

Nous allons maintenant passer en revue quelques exemples de réalisations-pilote.

a) Angleterre

- Près de 600 maisons préfabriquées, isolées par 10 à 15 cm de laine de verre, ont été construites en Ecosse dans la région de Aberdeen. Ces maisons sont chauffées électriquement et leurs performances ont fait l'objet de plusieurs publications (49). Dans ces maisons, la consommation électrique pour le chauffage ne représente que 25 à 35% de la consommation totale. Le taux de renouvellement de l'air est d'environ 0.2 à 0.3 changement d'air par heure et la température intérieure est maintenue à des valeurs différentes suivant les pièces (voir chapitre III, § 1). 24 de ces maisons ont été étudiées particulièrement en détails: mesure séparée de la consommation énergétique pour le chauffage, l'eau chaude et le ménage, observation des habitudes de ventilation, etc. Les indices énergétiques mesurés dans cette étude sont inclus dans les tableaux I et IV. Des variations individuelles de plus d'un facteur deux sont observées pour ces indices et peuvent être mis en rapport avec le comportement des habitants.

- L'École d'Architecture de l'Université de Newcastle a été chargée de réaliser un groupe de 38 maisons à faible consommation d'énergie sans dépasser de plus de 10% le coût d'une construction traditionnelle (50). L'analyse des consommations pour la première année d'utilisation (1977/1978) de 20 maisons a montré que l'indice énergétique de chauffage mesuré de 135 MJ/m^2 était en fait 30% plus élevé que l'indice calculé. Un examen détaillé d'une des maisons semble indiquer que cet excès de consommation est dû à une qualité plus mauvaise que prévue de l'isolation.

NB: Une des caractéristiques importantes des deux séries de maisons anglaises décrites ci-dessus est que la température intérieure est différente suivant les pièces et que généralement, seule la salle de séjour est chauffée à 20°C . Dans le tableau I, nous avons donc normalisé l'indice énergétique du groupe de maisons écossaises GB1 pour le cas où la température intérieure moyenne reste à 15.6°C , ce qui donne 83 MJ/m^2 , et pour le cas où, comme en Suisse, elle est de 20° dans toute la maison, ce qui donne 165 MJ/m^2 . Pour les maisons de Newcastle GB2, dont la température intérieure moyenne est de 14.5°C , les indices normalisés sont respectivement de 126 et 285 MJ/m^2 . Dans le calcul de ces indices normalisés, nous avons admis que le 50% de l'énergie utilisée pour l'eau chaude et les usages domestiques contribue effectivement au chauffage.

b) Canada

- L'Université de Saskatchewan a conçu une maison super-isolée de 188 m^2 dont l'indice énergétique de chauffage mesuré en 1978/79 n'a été que de 15 MJ/m^2 . Cette maison expérimentale (51) n'est pas à proprement dire habitée quoique le nombre des visiteurs et l'apport énergétique ($5'500 \text{ kWh/an}$) des appareils qui s'y trouvent simulent pratiquement une occupation normale. L'apport solaire passif est évidemment optimisé au maximum et l'on estime que le système solaire actif qui est prévu permettra de fournir l'eau chaude nécessaire

pour le chauffage et les besoins domestiques. Cette maison est équipée de systèmes de récupération de la chaleur de l'air et de l'eau. Le taux de ventilation est de 0.6 changement d'air par heure et la totalité de l'enveloppe est scellée par une barrière de vapeur. Une autre particularité de cette maison est qu'elle utilise des volets isolants qui permettent de réduire le coefficient k des fenêtres à $0.35 \text{ W/m}^2\text{k}$ pendant la nuit (CA1 sur le tableau I).

- L'expérience acquise avec la construction de la maison ci-dessus a permis la réalisation d'environ 50 maisons super-isolées dans le Saskatoon. Dans cette région, dont le nombre de degrés-jour est d'environ 6160°C par rapport à 20°C , l'indice énergétique de chauffage est de 670 MJ/m^2 an pour les maisons conventionnelles à chauffage électrique. La mesure de l'indice énergétique de 13 de ces maisons a montré qu'à l'exception de deux d'entre elles, celui-ci variait de 121 à 240 MJ/m^2 avec une moyenne de 218 MJ/m^2 pour les 13 (52). L'indice énergétique de chauffage correspondant pour la Suisse serait de 130 MJ/m^2 . (CA2, CA3. Voir aussi Chapitre II, § 5).

c) Danemark

- De nombreuses maisons à basse énergie ont été récemment construites au Danemark (53) et la maison DA1 du tableau I est l'une des premières dont les résultats ont été publiés (54).

- Le Ministère du Commerce a chargé l'Université Technique du Danemark de concevoir et de construire six maisons à basse énergie de 120 m^2 dont la consommation énergétique totale pour le chauffage, l'eau chaude et la ventilation ne doit pas dépasser 150 MJ/m^2 (53, 55). Ces maisons diffèrent les unes des autres dans leurs détails et dans les moyens de chauffage utilisés. Les bonnes performances sont obtenues grâce à une forte isolation (20 à 30 cm dans les murs et les planchers, 40 cm dans les toits), à une réduction des infiltrations incontrôlées au-dessous de 0.1 changement d'air par heure et à l'utilisation d'un échangeur de chaleur pour la ventilation. Des textes détaillés sont en cours sur ces maisons depuis 1979 et il était prévu de les mettre en vente à la fin 1980. Le prix de

ces maisons devrait être de 20 à 50% plus élevé que celui de construction comparable pour un prix total allant de 200.000 à 300.000 francs.

- Deux petits blocs totalisant 34 appartements ont été construits pour la ville de Skire dans le Jutland (53). La consommation énergétique prévue devrait être inférieure à 270 MJ/m^2 . Le système énergétique central fournit aux appartements de l'eau chaude pour le chauffage à basse température et les usages domestiques ainsi que de l'air frais de ventilation préchauffée par un système de récupération de la chaleur. L'eau est chauffée par des pompes à chaleur et des capteurs solaires.

d) Etats-Unis

- Plusieurs maisons à basse énergie telles que US1 et US2 (56) ont été construites aux Etats-Unis. Elles sont caractérisées par une isolation semblable à celle des maisons canadiennes, par des infiltrations très réduites, mais n'utilisent pas d'échangeurs de chaleur air-air. Les bonnes performances de ces maisons sans récupération de la chaleur de l'air de ventilation sont probablement dues au climat moins froid.

- Une centaine de maisons du type US3 ont été construites dans la région de New York (57). Ces maisons de 215 m^2 sont construites en bois et reposent sur un lit de sable de 50 tonnes isolé du sol qui permet de stocker la chaleur solaire éventuellement excessive captée passivement par le bâtiment afin de stabiliser la température intérieure.

- Les maisons US3 que nous venons de décrire ne sont pas à proprement parler des maisons solaires passives du type dont il existe maintenant des milliers aux Etats-Unis. Ces maisons solaires passives sont surtout situées dans les régions plus tempérées et elles ne consomment guère plus de 20 à 50 MJ/m^2 par an sous forme d'énergie d'appoint les jours les plus froids. Une compilation

de réalisations-pilote de maisons solaires passives a été récemment publiée par le laboratoire de Los Alamos (58).

e) République Fédérale Allemande

Le laboratoire de recherche Philips à Aachen a construit en 1974 une maison expérimentale hautement isolée afin de tester diverses techniques telles que celles de la récupération de la chaleur de l'air et de l'eau, diverses pompes à chaleur, des capteurs solaires, etc. Les performances mesurées en 1975/1976 pour cette maison sont indiquées en All dans le tableau I (59).

f) Suède

- De nouvelles normes de construction ont été introduites en Suède en 1975 (SN-75). La particularité principale de ces normes est qu'elles imposent non seulement des conditions d'isolation très strictes mais encore des taux de renouvellement de l'air. Afin de vérifier l'effet attendu des nouvelles normes sur la consommation énergétique, l'Institut Royal de Technologie a participé à la construction et à la mesure des performances de 5 maisons de 140 m^2 situées à proximité de Stockholm. Des mesures très complètes ont été faites pour les saisons de chauffage 78/79 et 79/80, et viennent d'être publiées (60). Les coefficients k des murs, toits, dalles et vitrages sont respectivement de 0.28, 0.16, 0.29 et $1.90 \text{ W/m}^2\text{K}$. Le coefficient k moyen est de $0.28 \text{ W/m}^2\text{K}$. Le taux de renouvellement d'air moyen mesuré pour les cinq maisons sur les deux ans est de 0.46 changement d'air par heure. L'indice énergétique total mesuré dans les mêmes conditions est de 425 MJ/m^2 (pour l'indice de chauffage, voir SUI sur le tableau I). Toutes ces maisons ont été normalement occupées durant les mesures et il a été possible d'étudier en détail toutes sortes de paramètres tels que les taux d'humidité et de concentration du CO_2 , le confort thermique, etc.

- Un autre groupe de 41 maisons a été construit à Täby, près de Stockholm d'après les nouvelles normes avec 15 cm d'isolation dans les murs extérieurs et 25 cm dans les toits (61). Parmi ces maisons, 26 d'entre elles ont été instrumentées à partir de 1977 et équipées de sept systèmes de chauffage différents (voir Chapitre III, § 3a)).

- La maison-pilote de Vetlanda est utilisée comme maison de référence par l'AIE pour ses projets. Cette maison de 113 m² est pourvue d'une ossature en bois posée sur une dalle de béton. L'isolation consiste en 19 cm de laine de verre dans les murs, 30 cm dans le toit et 12 cm dans le sol. Le taux d'infiltration d'air incontrôlé mesuré est de 0.03 - 0.08 changements d'air par heure. L'indice énergétique mesuré pendant l'hiver 76/77 a été de 328 MJ/m² avec la maison inoccupée. Cette consommation énergétique a été comparée avec la prédiction de 12 programmes d'ordinateur dans le cadre du *Projet III-A* de l'AIE. Le rapport préliminaire sur cette comparaison montre que les calculs théoriques s'écartent en moyenne de 15% de la valeur mesurée (5,6).

- La tendance actuelle de construction de maisons à basse énergie en Suède s'oriente vers la très forte isolation. Un groupe de 32 maisons ainsi qu'un immeuble locatif de 32 appartements sont en construction avec les paramètres thermiques suivants: isolation des murs et des toits 0.18 et 0.10 W/m²K, fenêtres de petite taille, taux d'infiltration de 0.1 changement d'air par heure et ventilation mécanique avec récupération de la chaleur. L'indice énergétique de chauffage escompté est de 110 à 130 MJ/m² an (176).

g) Suisse

Il existe en Suisse, comme c'est le cas dans les autres pays, de nombreuses maisons et bâtiments à relativement basse consommation d'énergie. Ces constructions sont en général issues d'initiatives privées individuelles ou d'efforts entrepris par des collectivités

publiques telle que la Confédération ou certains cantons. Le Mouvement suisse pour l'économie d'énergie (SAGES) a entrepris une compilation et compte publier une sélection de bâtiments suisses à faible consommation d'énergie particulièrement intéressants. A l'exception de diverses réalisations mettant en oeuvre l'énergie solaire active ou passive, il n'existe pas réellement en Suisse à l'heure actuelle, d'études pilote d'importance comparable à celle que nous venons de décrire pour les autres pays et qui correspondent aux critères définis dans l'introduction de ce paragraphe. Néanmoins, sans avoir la prétention d'être complet, on peut tout de même mentionner quelques exemples:

- Dans le domaine du solaire actif et passif: les maisons de Payerne (19) et Begnins (18) et de Minusio au Tessin (62).

- Dans le domaine des maisons à forte isolation: trois maisons-pilote à Hinteregg, près de Zurich, équipées d'une pompe à chaleur collective et dont l'indice énergétique mesuré pour le chauffage et l'eau chaude est de 170 MJ/m² (63). Un ensemble de 2 maisons à 5 appartements, également fortement isolé et chauffé par une pompe à chaleur, vient d'être terminé à Gossau (64). Parmi les maisons chauffées au mazout, l'un des meilleurs résultats mesuré que nous ayons trouvé semble être celui d'une maison rénovée à Rudolfstetten dont l'indice énergétique de chauffage est de 305 MJ/m² (65). Il existe également plusieurs exemples de villas à chauffage électrique dont les occupants utilisent la flexibilité de contrôle de la température des pièces offertes par ce moyen de chauffage et qui obtiennent des indices énergétiques de chauffage aussi bas que 220 MJ/m² (66).

- Dans le domaine non-résidentiel: mentionnons tout d'abord les efforts de la Confédération qui ont abouti par exemple à de fortes économies dans la construction de nouveaux bâtiments administratifs à Berne (67) et à l'EPF de Lausanne. Dans le cas de l'EPFL, des

mesures de longue durée concernant l'énergie utilisée pour le chauffage et la ventilation sont en cours (68). Un autre exemple est le Laboratoire cantonal de chimie à Zurich dont la consommation énergétique ne représente que le 50% de celui d'un bâtiment semblable de conception classique (69).

8) Rénovations-pilote

Un certain nombre de rénovations thermiques réalisées il y a quelques années, en particulier aux Etats-Unis, ont obtenu des résultats spectaculaires et ont fait l'objet d'une publicité considérable. Certaines rénovations effectuées depuis lors n'ont par contre pas toujours rencontré le succès escompté. Il apparaît ainsi de plus en plus clairement que la rénovation thermique nécessite un diagnostic thermique préalable approfondi et un soin considérable au niveau de l'exécution des travaux. Pour ces raisons, la réalisation d'un nombre suffisant de rénovations-pilote est indispensable.

a) Angleterre

- L'*Electricity Council Research Center* à Capenhurst dispose de six maisons groupées, semblables et représentatives du parc immobilier actuel de l'Angleterre. Les six maisons sont toutes isolées thermiquement à des niveaux différents de sorte que le coefficient k moyen de celles-ci s'étale entre 0.69 et 1.28 W/m²K. Ce genre de situation permet un grand nombre d'expériences intéressantes et, des études ont été faites en particulier pour la comparaison de calculs simplifiés avec des mesures (70) et l'influence du niveau d'isolation sur l'apport solaire (71). A l'heure actuelle, une expérience de rénovation est en cours sur la meilleure de ces maisons dont l'isolation a été renforcée de sorte à abaisser son k moyen de 0.69 à 0.47 (72). Les premières mesures ont montré qu'en fait, le k moyen obtenu en réalité était seulement de 0.61 W/m²K. Une analyse détaillée a montré que cet écart était dû principalement à la performance médiocre des murs isolés au moyen d'injections de mousse isolante, aux ponts de chaleur résiduels et à d'autres causes secondaires.

- Le *Building Research Establishment Scottish Laboratory* a entrepris une expérience de rénovation portant sur 38 maisons semblables (73). 20 maisons ont été gardées comme témoins (coefficients k des murs, toits et dalles de respectivement 1.7, 0.7 et 0.7 W/m²K) et 18 autres ont été isolées (coefficients k des murs, toits et dalles de 0.45, 0.3 et 0.7 W/m²K). La diminution de la consommation énergétique devrait être théoriquement de 35%, mais les mesures ont montré que l'économie réalisée n'était que de l'ordre de 22%. Cette différence a été expliquée par le fait que la température moyenne dans les maisons super-isolées était en général plus élevée qu'auparavant. Pour ces maisons dont les pièces sont maintenues à des températures différentes, ce phénomène est dû pour une part au fait qu'une isolation renforcée de l'enveloppe extérieure augmente nécessairement la température d'équilibre des pièces non chauffées.

b) Canada

- Le Canada a entrepris un vaste programme de rénovation thermique portant sur un million de maisons. La réduction de la consommation énergétique obtenue en moyenne pour les rénovations effectuées a été de l'ordre de 17% (74).
- Un problème essentiel sur lequel le Canada s'est particulièrement penché est celui du surdimensionnement des chaudières à mazout. C'est ainsi qu'avec le support du gouvernement, diverses techniques de modification des chaudières et des brûleurs ont été mise au point. On peut maintenant se procurer des jeux de pièces de remplacement et les instructions nécessaires pour diminuer la puissance installée d'un grand nombre de modèles de chaudières et de brûleurs. Par cette technique, il est facile, sans remplacer la chaudière, de faire des économies de l'ordre de 8 à 16% (177).

c) Danemark

Plusieurs rénovations-pilote sont en cours au Danemark. L'une d'elles porte sur un bloc de 24 appartements, identique à quatre autres blocs voisins (75). Une rénovation complète comprenant entre autre une isolation supplémentaire de l'enveloppe, l'instal-

lation de fenêtres à triple vitrages et de vannes thermostatiques, a permis de baisser l'indice énergétique de 714 à 428 MJ/m² pour le chauffage. Ce groupe d'immeubles est pourvu d'une chaufferie commune aux 5 blocs, de sorte que cette diminution de la consommation est essentiellement due à des mesures sur les composants passifs du bloc en question.

d) Etats-Unis

- Trois cas de rénovations-pilote portant sur des maisons individuelles ont permis de baisser la consommation énergétique de plus d'un facteur 2. Ces rénovations particulièrement soignées ont été réalisées pour le Bureau National des Standards (47), l'Université de Princeton (76) et l'Université d'Oregon (77). Pour ces trois cas, la consommation énergétique après la rénovation a été réduite à 41%, 33% et respectivement 42% de la consommation initiale.

- De nombreuses rénovations systématiques ont été entreprises aux Etats-Unis, en particulier avec la collaboration de diverses compagnies de production et de distribution de l'électricité ou du gaz, qui font office de conseillers en rénovation thermique et de bailleurs de fonds. Une compilation récente, effectuée pour le laboratoire Lawrence à Berkeley, a recensé les plus importants résultats actuellement disponibles de ces programmes de rénovations à grande échelle (74):

Lieu	Nombre de maisons	Consommation après Consommation avant
Portland	20	62 %
Tennessee	60'000	86 %
Oregon	4'300	77 %
Denver	30	92 %
Washington	520	91 %
Maryland	750	98 %
New York	60	86 %

e) France

- Un accord conclu en avril 1977 avec le Ministère de l'Environnement et de l'Agence pour les économies d'énergie visait à économiser, sur l'ensemble du parc immobilier, 15% d'énergie en 1985. D'ores et déjà, 65'000 logements HLM ont été améliorés en 1977 et 85'000 en 1978. Sept opérations expérimentales ont été lancées sur 21'000 logements: isolation par l'extérieur, par l'intérieur, régulation et programmation, amélioration des installations, etc (78).

f) Suède

- Dans le cadre du programme national des économies d'énergie, on peut recevoir en Suède des prêts ou des subventions pour, par exemple, entreprendre une isolation supplémentaire des maisons. Une thèse a été soumise à l'Ecole Polytechnique de Chalmers (79) et porte sur 20 bâtiments arbitrairement choisis pour lesquels une isolation supplémentaire a été réalisée grâce à un prêt ou à une subvention. L'étude montre que les économies sont en moyenne doubles (21 - 22%) de ce à quoi on peut s'attendre avec de telles isolations (environ 12%). L'étude relève trois facteurs explicatifs pour ces économies inattendues: (i) volonté subconsciente d'économiser l'énergie; (ii) température plus élevée à la surface interne des murs extérieurs; (iii) diminution des infiltrations incontrôlées à la suite de l'installation de l'isolant.

- Une enquête portant sur 341 maisons rénovées entre 1975 et 1978 a permis de comparer les résultats obtenus avec une isolation thermique supplémentaire par rapport aux économies théoriquement escomptées (178). Pour une économie théorique moyenne de 700 ± 100 l de mazout par an, on a ainsi constaté une économie réelle de 500 ± 150 l de mazout par an. En plus de ce résultat, la conclusion la plus importante de cette enquête est que les maisons pour lesquelles les plus fortes économies ont été réalisées, ne sont pas celles pour lesquelles les économies possibles étaient théoriquement les plus importantes, mais celles dont l'indice énergétique était le plus mauvais au départ.

g) Suisse

- Plusieurs études-pilote sont directement ou indirectement consacrées à la rénovation thermique. C'est en particulier le cas des projets de la Limattstrasse et de La Sallaz, que nous avons mentionnés au paragraphe 2b) de ce chapitre, ainsi que de la maison solaire de Zug(20). Dans ce dernier cas, après une rénovation complète qui a permis d'abaisser le coefficient k moyen à $0.44 \text{ W/m}^2\text{K}$, la consommation énergétique a été réduite d'un facteur 2. Il s'agit d'un petit bâtiment locatif de six appartements sur trois étages, situé au voisinage de quatre autres bâtiments identiques.

L'immeuble rénové sera équipé d'un système de chauffage bivalent comprenant une pompe à chaleur capable de couvrir le 80% des besoins et d'une chaudière à mazout d'appoint.

- Un exemple de rénovation que nous avons déjà cité concerne une maison de 152 m^2 à Rudolfstetten, chauffée au mazout. L'indice énergétique de chauffage a été abaissé de 900 à 300 MJ/m^2 par diverses mesures dont principalement une isolation supplémentaire donnant un coefficient k de 0.2 pour les murs et de $0.18 \text{ W/m}^2\text{K}$ pour le toit. (65).

- Dans le paragraphe 6 du présent chapitre concernant la rénovation, nous avons mentionné plusieurs études théoriques et programmes d'amélioration thermique. Par exemple, dans le cadre d'un effort systématique d'amélioration thermique du parc immobilier de la Confédération, une première série de mesures entreprises sur 31 bâtiments de l'administration fédérale à Berne a permis d'abaisser de 24% leur consommation en mazout (80). Un autre exemple est fourni par la Ville de Genève dont les achats de mazout ont passé de 7'400 tonnes en 1973 à 4'500 tonnes en 1979, bien que le volume des bâtiments appartenant à la Ville ait augmenté dans l'intervalle (81).

Conclusion

On peut dire qu'il existe une évidence scientifique écrasante, théorique et pratique, qu'une rénovation faite de manière très compétente par des chercheurs de haut niveau mène à une réduction remarquable de la consommation énergétique, et que cette rénovation passe nécessairement par une amélioration de l'isolation thermique. Les conséquences de ce fait sur le niveau pratique sont beaucoup plus nuancées. Une rénovation dont les différents aspects n'ont pas été réfléchis de manière approfondie peut très bien avoir des effets décevants. Une isolation thermique par exemple prise séparément peut même amener à une augmentation de la consommation d'énergie si des effets secondaires (changement du rendement de l'installation de chauffage, changement de la température des pièces froides, etc) ne sont pas prévus et corrigés d'emblée. Cette disparité entre ce qu'on peut attendre si tout est fait très bien et ce qui est réalisé dans la pratique par des ingénieurs ou des architectes qui n'ont par nécessité pas une formation approfondie dans ces domaines est un problème fondamental de toute campagne d'économies d'énergie et mérite d'être étudié à fond sur le plan national.

CHAPITRE II

RECHERCHES ET DÉVELOPPEMENTS DANS LE DOMAINE DU BÂTIMENT ET DE SES COMPOSANTS PASSIFS

On peut distinguer dans un bâtiment ses qualités passives (qualité de l'isolation, position et qualité des vitrages, intégration dans le climat local, etc) et ses qualités actives (installations de chauffage, de ventilation, etc). Pour faciliter l'exposé des recherches, nous avons en conséquence distingué les composants passifs des maisons, qui seront analysés dans ce chapitre, et les composants actifs, qui seront analysés dans le chapitre suivant. Nous discuterons tout d'abord le problème des fenêtres, puis celui de l'isolation de l'enveloppe et celui des revêtements qui diminuent les pertes par rayonnement, et enfin celui de la masse thermique des bâtiments. Bien que le solaire passif soit en fait en dehors du sujet des économies d'énergie au sens strict, nous donnons tout de même quelques informations qui nous ont paru intéressantes.

1) Fenêtres: pertes par transmission et par infiltration

Dans une maison typique, les pertes thermiques à travers les fenêtres sont de l'ordre de 30-50% du total. Dans le cas d'une maison bien isolée, cette fraction est susceptible d'augmenter, à moins que les performances thermiques des fenêtres soient améliorées. Pour ceci, quatre aspects sont à prendre en considération:

- Le coefficient de transmission de la chaleur k d'une fenêtre à double vitrage avec cadre en bois de type courant est d'environ $3 \text{ W/m}^2\text{K}$, c'est-à-dire pratiquement dix fois plus élevé que le coefficient de transmission d'un mur bien isolé.
- Les joints d'une fenêtre peuvent être la source d'importants renouvellements d'air non contrôlés.

- La fenêtre est l'un des éléments de confort les plus importants des habitations: elle permet à la lumière du jour d'entrer, elle assure le contact visuel avec l'extérieur, elle permet l'aération individuelle directe des appartements.

- Finalement, la fenêtre permet un apport d'énergie solaire intéressant qui peut, même en hiver, compenser les déperditions.

L'importance des problèmes posés par les fenêtres a incité l'AIE à organiser un séminaire sur les fenêtres à Delft en Hollande en juin 1980. Les comptes-rendus des participants suisses à cette réunion relèvent les points suivants (82):

- Le cadre, qui selon sa constitution peut représenter un pont thermique important, doit être perfectionné parallèlement à la mise au point de nouvelles vitres.

- Parmi les divers types de joints disponibles, les bandes tubulaires ("O-rings") semblent être les joints les plus efficaces.

- En ce qui concerne les verres et le nombre de couches de vitres, la tendance actuelle s'oriente vers des fenêtres à double vitrage, évacuées, et utilisant des verres avec couches sélectives. Seule une combinaison de ce genre permet d'envisager des coefficients de transmission comparables à ceux des murs super-isolés ($k < 0.3 \text{ W/m}^2 \text{ K}$).

- Les problèmes posés pour la réalisation de vitrages super-isolés sont nombreux :

- . obtention de couches sélectives de très faible émissivité;
- . maintien d'un vide poussé ($< 10^{-4} \text{ mm Hg}$) durant de nombreuses années;
- . développement de cadres ayant des caractéristiques thermiques comparables à celles du vitrage;
- . coûts de fabrication.

Plusieurs recherches sont en cours en Suisse sur les fenêtres:

- Une industrie de Lausanne étudie la faisabilité de fenêtres doubles évacuées (83);
- L'EPFL réalise une station d'essai solaire "STESO" qui permettra en particulier d'étudier les fenêtres (82);
- A Zurich, une recherche examine les avantages et inconvénients de doubles fenêtres évacuées pour les bâtiments (83);
- Des travaux de l'EPFZ montrent qu'avec un revêtement sélectif approprié, il serait possible de réduire en principe les pertes thermiques d'une vitre par un facteur 2 environ, tout en conservant une bonne transparence à la lumière du jour et à la chaleur du soleil. Une telle vitre aurait certaines caractéristiques d'une espèce de "diode thermique". En effet, elle serait transparente à la chaleur du soleil mais opaque aux rayons infrarouges de longueur d'onde plus grande qui tenteraient de s'échapper de l'intérieur de la pièce chauffée. Ce genre de revêtement peut toutefois poser des problèmes en été, et imposer l'installation d'un système de contrôle actif qui adapterait les propriétés de grandes surfaces vitrées aux conditions estivales/hivernales ou diurnes/nocturnes (84).

2) Matériaux et isolation thermique de l'enveloppe

La recherche et le développement de nouveaux matériaux isolants sont principalement effectués dans l'industrie. Les seules études faites par des établissements universitaires suisses dans ce domaine concernent les propriétés du bois à l'EMPA (85) et la fabrication d'isolants thermiques à partir de verre récupéré à l'EPFZ (86).

Dans la technique de l'isolation thermique, des problèmes particuliers se posent au niveau des ponts thermiques et des risques de condensation.

On appelle ponts thermiques les zones de construction où une isolation plus faible cause des déperditions calorifiques localisées et un abaissement de la température. Les ponts thermiques se produisent principalement aux jonctions des dalles avec les murs et diverses recherches sont en cours pour minimiser leur contribution aux déperditions de la chaleur (87).

Les problèmes de condensation se posent plus particulièrement au voisinage des ponts thermiques ainsi qu'aux interfaces entre des couches de matériaux de nature différente tels que les murs et les isolants qui les recouvrent. Ces condensations internes sont particulièrement néfastes à la durabilité des bâtiments et ne se produisent en principe pas dans des parois homogènes. Dans les cas de forte isolation thermique, il y a donc lieu d'examiner en détail les risques de condensation éventuelle et d'installer, le cas échéant, une barrière de vapeur du côté chaud de la paroi. Plusieurs recherches sur la condensation et les barrières de vapeur sont en cours et, en Suisse, plus particulièrement à l'EPFL (88).

L'EMPA et le laboratoire des matériaux pierreux de l'EPFL font des mesures sur les caractéristiques thermiques, mécaniques, hygrothermiques, etc. de divers matériaux de construction. Ces mesures sont faites en particulier dans le but d'homologuer les caractéristiques de ces matériaux et de vérifier leurs compatibilités avec les normes en vigueur. Divers appareils de mesure sont en cours de développement dans des instituts universitaires, en particulier pour mesurer la conductibilité thermique des matériaux et de systèmes tels que les parois (33).

Dans la construction de bâtiments nouveaux, il est en principe facile d'utiliser les matériaux existants pour obtenir une isolation renforcée. Dans le cas de la rénovation thermique, des problèmes subsistent encore et diverses solutions sont proposées.

Du point de vue thermique, l'application d'une isolation supplémentaire est nettement plus favorable à l'extérieur qu'à l'intérieur de murs existants: les ponts thermiques sont éliminés, les risques de condensation sont plus faibles et la capacité thermique des murs est utilisée favorablement. D'autres avantages s'ajoutant à ceux pré-cités, l'isolation supplémentaire des murs par l'extérieur s'impose de plus en plus pour la rénovation (89).

3) Diminution des pertes par rayonnement des surfaces opaques

Les phénomènes qui se produisent à la surface des parois, et en particulier les problèmes d'échange thermique entre les solides et l'air ambiant, sont parmi les plus complexes de la physique des bâtiments. Dans ces processus, les radiations thermiques émises et absorbées par les surfaces ainsi que les mouvements convectifs de l'air près de celles-ci jouent un rôle essentiel.

Un groupe de chercheurs de l'EPFZ étudie l'influence du pouvoir d'émission thermique des surfaces extérieures des bâtiments et des vitrages sur leur consommation en énergie (84). Les calculs montrent qu'en principe, une réduction de la consommation de l'ordre de 15% est possible par l'application d'une couche sélective sous forme d'un revêtement ou d'une peinture à la surface du bâtiment. Une telle réduction de la consommation en énergie est équivalente à 3 cm d'isolation supplémentaire. Dans certains cas de rénovation thermique, un tel revêtement permettra de réduire d'autant l'épaisseur de l'isolation extérieure supplémentaire requise. Malheureusement, il n'est pas encore possible de savoir si la fabrication de tels revêtements serait économiquement compétitive.

Dans le domaine des matériaux et des propriétés des surfaces, tout comme dans celui de la technique d'isolation des parois extérieures, des découvertes sont encore en principe possibles. Par exemple, le développement d'éléments de construction à conductivité thermique variable (90) permettrait de contrôler les gains et les pertes vers le sol ou l'atmosphère, en fonction du moment de la journée et des conditions météorologiques.

4) Masse thermique des bâtiments et stockage de la chaleur

La capacité thermique des matériaux de construction permet de stocker une certaine quantité de chaleur dans le gros oeuvre des bâtiments. Si la construction est "lourde", c'est-à-dire si les murs et les dalles sont épais, la "masse thermique" du bâtiment sera grande et pourra accumuler une quantité importante de chaleur. Cette chaleur stockée crée une certaine inertie thermique qui atténue l'effet des variations brusques de températures extérieures, ce qui améliore le confort et diminue la puissance maximum requise pour l'installation de chauffage, mais empêche aussi un réchauffement ou un refroidissement rapide du bâtiment.

De nombreuses recherches ont été effectuées ces dernières années afin de déterminer l'influence de la masse thermique des bâtiments sur leur consommation en énergie de chauffage et de climatisation (91).

- Pour des bâtiments chauffés de manière permanente, la consommation énergétique annuelle est la même (à quelques pourcents près) pour des constructions lourdes ou légères.
- Pour des bâtiments chauffés de manière intermittente (arrêt du chauffage la nuit par exemple) l'économie d'énergie possible est de l'ordre de 10% pour les constructions lourdes, et de 20% pour les constructions légères.

5) Quelques notes sur l'architecture bioclimatique et le solaire passif

L'architecture bioclimatique et solaire passive est en dehors du sujet de ce travail. Nous avons tout de même ajouté ici quelques informations qui nous paraissaient intéressantes.

Du point de vue de l'architecture et de l'étude de la physique des bâtiments, les développements les plus importants de ces dernières années concernent sans nul doute l'architecture solaire. A l'aide de programmes d'ordinateur très complets, il est maintenant possible de simuler et d'optimiser le gain solaire passif des bâtiments en tenant compte des données météorologiques locales sur l'ensoleillement, les précipitations et le vent.

Selon une estimation du Département de l'énergie, il existe actuellement entre 10'000 et 20'000 maisons solaires aux USA et ce chiffre pourrait dépasser le million au-milieu des années 80.

En Suisse, une coordination concernant l'architecture solaire passive a été amorcée par l'EMPA (92). Dans le chapitre précédent, plusieurs exemples de réalisations suisses mettant l'apport solaire passif à profit ont été décrits.

Tout comme la chaleur du soleil peut être utilisée pour diminuer la charge de chauffage des immeubles, on peut mettre à profit la température du sol. Celle-ci, à une certaine profondeur, est de l'ordre de 10 à 15°C durant toute l'année. On peut ainsi également tirer parti de la fraîcheur du sol, par exemple, pour refroidir le bâtiment en été (93). Une suggestion non conventionnelle consiste à construire des habitations entièrement sous-terre à l'exception du toit qui, au ras du sol, assurerait l'éclairage naturel et le chauffage solaire passif de la maison. Un calcul montre qu'une telle "caverne" devrait être chauffée toute l'année, mais consommerait moins du tiers d'une maison conventionnelle identique construite au-dessus du sol (94). Si cette proposition n'est peut-être pas acceptable du point de vue économique ou social

pour des habitations, elle démontre l'intérêt de l'utilisation de la terre comme un isolant naturel qui amortit les fluctuations de températures extérieures en été comme en hiver.

La prise en compte simultanée des possibilités de l'apport solaire et de l'utilisation du sol conduit à encourager la construction de bâtiments bas et à grande surface (95), ce qui pose évidemment d'autres problèmes.

Une caractéristique importante des constructions solaires passives est leur capacité de stockage de la chaleur solaire ou de la fraîcheur nocturne dans les murs et dans les dalles. Une extension de ces idées consiste à utiliser des systèmes passifs ou actifs pour stocker la chaleur ou le froid naturel. Un complexe administratif d'une surface de bureaux de 17'200 m² construit aux Etats-Unis d'après ces principes, consomme moins de 180 MJ/m² (96). Dans ce projet, bien qu'une grande partie du volume bâti soit souterraine, l'éclairage est essentiellement procuré par la lumière du jour.

Un groupe de 50 maisons solaires passives a été construit au Canada entre 1977 et 1979 (52). Ces maisons ont un indice énergétique de chauffage moyen de 220 MJ/m² pour un climat de 6000°C-jour, c'est-à-dire semblable à celui de Davos ! Les maisons sont très bien isolées, avec des infiltrations d'air incontrôlées extrêmement réduites. La ventilation est assurée par un échangeur de chaleur air-air qui récupère près de 70% de la chaleur de l'air vicié. La construction est relativement légère et la surface vitrée au sud qui assure le gain solaire ne représente que 6% de la surface du sol chauffé. Avec une telle surface de fenêtre, les problèmes de surchauffe en été sont limités de même que les pertes nocturnes. Ces maisons en bois et à faible inertie thermique sont des exemples types de systèmes solaires passifs à gain direct.

Les immeubles-tour d'appartements ou de bureaux posent des problèmes intéressants du point de vue de l'architecture solaire passive qui doivent encore être étudiés. Il existe pourtant déjà quelques exemples isolés:

- Un immeuble de bureaux de 14 étages a été achevé en 1979 pour IBM à Detroit. Il possède une surface vitrée limitée, et pourtant l'essentiel de l'éclairage est fourni par la lumière naturelle. De plus, les façades sont telles que le gain solaire est maximum d'un côté et les pertes minimum de l'autre (97).

- Le plus grand bâtiment solaire du monde sera bientôt terminé à Singapour. Il aura 40 étages et consommera 38% moins d'énergie qu'une construction semblable de type conventionnel (98).

En ce qui concerne les possibilités solaires passives en Suisse, une particularité intéressante du parc immobilier est la masse thermique importante des immeubles anciens ou à rénover. L'adjonction d'une serre ou d'un mur Trombe sur la façade sud permet alors de capter l'énergie solaire et de la stocker dans ce mur. Cette technique a été mise en oeuvre aux Etats-Unis en particulier, pour l'assainissement thermique de petites usines et d'entrepôts (99).

CHAPITRE III

TECHNIQUES DE CHAUFFAGE, CLIMATISATION,

VENTILATION ET ÉCLAIRAGE

1) Contrôle et comptabilisation de l'énergie dans les bâtiments

Il arrive souvent que des appartements entiers ou des pièces d'appartements ne soient occupés qu'une petite partie du temps. Des économies importantes pourraient être obtenues en réduisant le chauffage, la ventilation, le conditionnement de l'air ou l'éclairage dans ces locaux durant ces périodes. Une autre source d'économie importante possible est la régulation automatique des apports énergétiques dans une pièce donnée en fonction des apports supplémentaires occasionnels ou imprévisibles: personnes, ensoleillement, machines, etc. Finalement, on juge généralement que les décomptes individuels de frais de chauffage pourraient être un moyen d'encourager les consommateurs à faire des économies.

Toutes ces idées ont en commun le fait qu'elles nécessitent:

- . des systèmes de mesures qui permettent de déterminer les conditions locales ou les débits d'énergie dans une zone donnée;
- . des systèmes de contrôles qui permettent d'ouvrir/fermer des circuits ou d'enclencher/déclencher des appareils;
- . des systèmes de décisions qui permettent de programmer ou de régler le fonctionnement des ensembles considérés.

Dans tous ces domaines, il semble que l'électronique peut jouer un rôle important, à condition que les problèmes posés par les interfaces électro-mécaniques (transducteurs de mesures, vannes télécommandées, etc) puissent être résolus, aussi bien du point de vue technique qu'économique.

Des dispositifs plus simples, basés sur des principes thermomécaniques, permettent aussi de réaliser des fonctions analogues. C'est notamment le cas des vanes thermostatiques qui adaptent l'émission thermique des corps de chauffe en ajustant le débit de l'eau chaude aux besoins effectifs.

Selon l'état des connaissances dans ce domaine il y a deux ou trois ans, on pouvait affirmer que ces vanes apportaient des économies de l'ordre de 10-20% (100). Toutefois, il faut être prudent en généralisant ces résultats, car souvent plusieurs mesures d'économies d'énergie sont prises en même temps. Par exemple, dans une expérience qui a lieu dans le canton de Genève, où la moitié d'un groupe de 4 immeubles semblables a été équipée de vanes thermostatiques et de répartiteurs de consommation de chauffage (81).

Les expériences réalisées avec les vanes thermostatiques ne sont en fait pas toujours concluantes, en raison notamment de l'influence du comportement des habitants et des effets secondaires des vanes sur le fonctionnement et l'équilibre global du système de chauffage. Par exemple, dans une expérience suédoise, trois immeubles locatifs de 64 appartements ont été équipés de vanes thermostatiques et deux autres semblables gardés comme témoins (101). Après réglage optimum des systèmes de chauffage dans les cinq immeubles, des mesures détaillées ont montré que les immeubles équipés de vanes thermostatiques consommaient en fait +10% d'énergie de plus que les immeubles témoins !

Une autre expérience en Suède portant sur 4 groupes de 100 à 1000 habitations chacun a montré que dans un cas la consommation avait augmenté de +5% alors que dans les autres, elle avait diminué de -4, -7, et -7,5% (102). Diverses études sont actuellement en cours pour déterminer l'origine de ces résultats contradictoires (103). Ces études examinent en particulier l'influence des vanes thermostatiques sur l'équilibre du système de distribution.

En ce qui concerne les grands ensembles commerciaux ou de bureaux, les économies obtenues par des systèmes de contrôles sophistiqués utilisant des ordinateurs au lieu des systèmes classiques (veilleur de nuit pour éteindre la lumière, concierge pour réduire la température du chauffage pendant les week-ends, etc) sont de l'ordre de 20% (104).

Dans les habitations individuelles ou collectives, peu d'expériences vraiment concluantes utilisant des systèmes de contrôles élaborés ont été rapportées à ce jour. Pourtant, des simulations effectuées dans les pays nordiques montrent que le potentiel d'économie offert notamment par le chauffage intermittent des habitations est de l'ordre de 15 à 20% (105). Le problème principal posé pour le chauffage intermittent est celui de la condensation et de l'inertie thermique. Il semble qu'il soit difficile de descendre en-dessous de 10° si l'on veut éviter ces problèmes et que les types d'habitations devraient être à faible inertie thermique (106,91).

Des systèmes simples par lesquels les pièces dans les habitations sont maintenues à des températures constantes mais différentes selon les utilisations permettent de réaliser des économies substantielles d'énergie. Par exemple, 600 maisons à haute isolation ont été construites en Ecosse en 1975/76 (49). Dans ces maisons à chauffage électrique, la température de la salle de séjour est maintenue à 21°C et celle des chambres à coucher à 15,5°C. La consommation totale d'énergie de ces maisons, dont le tiers environ correspond au chauffage, est de 360 MJ/m² en moyenne.

Pour la programmation simple des systèmes de chauffages centraux en fonction d'un calendrier hebdomadaire et des heures du jour, un certain nombre de maisons proposent des appareils qui permettent d'économiser de 10 à 15% par rapport aux systèmes plus classiques tels que les minuteries (107). Avec ces systèmes il est possible de modifier la température de l'eau de chauffage en fonction de la température extérieure et de la température intérieure désirée. Cette technique permet d'optimiser le rendement de la chaudière qui est meilleur lorsque la température de l'eau est plus basse.

Dans le cadre de l'AIE, la Suède prépare une étude sur les systèmes de contrôle de la température individuelle dans les pièces d'habitations.

Les systèmes que nous venons d'examiner ci-dessus et qui concernent le contrôle et la régulation de la température dans les locaux sont en général suffisants pour les bâtiments pour lesquels ne se pose pas le problème de la répartition des frais de chauffage. Cette répartition entre en ligne de compte pour les maisons connectées à un réseau de chauffage à distance et les immeubles locatifs. Dans ce cas, pour la comptabilisation de la chaleur, on peut distinguer trois groupes de méthodes (108):

- Les compteurs de chaleur qui sont en principe étalonnables. Leur principe est basé sur la différence entre la température de l'eau de départ et de l'eau de retour, combinée avec une mesure du débit. La précision de ces appareils est de l'ordre de 1% (109), précision donnée par les constructeurs et qui n'est pas confirmée par des mesures indépendantes.

- Les répartiteurs de frais de chauffage basés sur le principe de l'évaporation. Ils sont montés sur les radiateurs et leur emploi est, par conséquent, limité à ce système de chauffage. Ces appareils bon marché doivent être ajustés aux conditions locales et ne procurent qu'une mesure relative. Une étude allemande estime que pour des répartiteurs de chaleur bien construits et convenablement installés, l'erreur maximale sur la répartition des frais était comprise entre +2% et -5% (110).

- Les répartiteurs de frais de chauffage basés sur les différences de températures mesurées: la température du local moins la température extérieure ou les gradients de température dans les coprs de chauffe muraux. Une variante simplifiée de cette méthode consiste à mesurer la température des locaux et à utiliser celle-ci comme base pour la répartition (111).

Ces systèmes de mesure peuvent en général être combinés avec des organes de contrôles qui permettent alors de régler les températures désirées dans les locaux (108). Dans le cas du chauffage électrique, ce genre d'installation est en principe particulièrement simple à réaliser. On a ainsi pu se rendre compte que de nombreux problèmes techniques, socio-économiques et juridiques restent encore en suspens en ce qui concerne les décomptes individuels de chauffage. Certaines expériences montrent que dans les blocs d'appartements, l'enregistrement de la température effective (111) est peut-être tout aussi "acceptable" que la facturation directe de la chaleur fournie aux locataires. L'inconvénient majeur d'un tel système "universel" est qu'il ne tient pas correctement compte des habitudes de ventilation des locataires. Il semble donc une fois de plus que l' "air frais" soit un des paramètres cruciaux déterminant les limites du contrôle et de la conservation de l'énergie dans les habitations.

A Lancy, dans le canton de Genève, un immeuble a été instrumenté en compteurs d'eau chaude et répartiteurs de chaleur dans le but de faire une expérience sur le décompte individuel de frais de chauffage (81). A Genève également une expérience comparative est en cours pour le compte de la Commission cantonale de l'énergie. Elle met en comparaison plusieurs systèmes de décompte.

Le Mouvement Suisse pour l'économie d'énergie (SAGES) a publié récemment une brochure dans laquelle de nombreux conseils et exemples pratiques sont donnés pour les décomptes individuels des frais de chauffage (124)

2) Chauffage central classique

Près de 65% des besoins en chauffage de la Suisse sont couverts par des installations de chauffage central. Dans ces systèmes, l'ensemble des radiateurs d'un immeuble est connecté à un réseau de distribution en circuit fermé dans lequel une pompe met en circulation de l'eau chauffée par une chaudière unique. Une des caractéristiques dominante du chauffage central est son faible

rendement global, qui est de l'ordre de 50% seulement pour des installations courantes. Pour comprendre ce chiffre, il faut tenir compte de la totalité des pertes, c'est-à-dire de l'énergie perdue, qui même si elle reste en partie dans le bâtiment, n'est pas utilisée pour créer le climat thermique désiré à l'endroit souhaité. On peut définir cinq sortes de pertes et affecter un rendement partiel à chacune d'elles. Si Q est la quantité d'énergie nette requise pour chauffer le bâtiment, le rendement global s'écrira alors comme suit (Voir Appendice II pour la définition mathématique des termes):

$$\eta = \frac{Q}{Q + P_A + P_B + P_C + P_D + P_E} = \eta_A \eta_B \eta_C \eta_D \eta_E$$

- A) Pertes auxiliaires ($\eta_A \approx 0.97$): Ces pertes correspondent à l'électricité utilisée par les appareils auxiliaires tels que la pompe de circulation et le moteur du brûleur.
- B) Pertes du brûleur ($\eta_B \approx 0.70$): Ces pertes dues à la combustion incomplète, au tirage et à la mauvaise isolation de la chaudière, ainsi qu'au surdimensionnement éventuel, sont analysées en détail ci-dessous.
- C) Pertes de contrôle ($\eta_C \approx 0.90$): Les systèmes de chauffage fonctionnent de telle sorte que le brûleur s'arrête lorsqu'une température donnée est atteinte. A ce moment, la température continue de croître et dépasse la valeur désirée.
- D) Pertes de distribution ($\eta_D \approx 0.90$): La chaleur perdue dans le réseau de distribution contribue pour une part à chauffer les vides techniques, les gaines de ventilation, les tuyaux d'eau froide, etc.
- E) Pertes à l'émission ($\eta_E \approx 0.95$): Une partie de l'énergie émise contribue à surchauffer l'air au voisinage des corps de chauffe.

Les ordres de grandeur donnés ci-dessus pour les rendements partiels correspondent à des moyennes raisonnables pour des systèmes courants (112). Leur produit donne bien un rendement global de l'ordre de 50% environ.

Les installations de chauffage central au mazout et au gaz sont actuellement l'objet de plusieurs recherches en Suisse comme à l'étranger. A Lausanne, les résultats concernant des mesures de rendement d'installations de chauffage modernes de grands immeubles d'habitation ont été récemment publiés (113). Les auteurs de cette étude définissent le rendement η_{AB} des chaudières de la façon suivante :

$$\eta_{AB} = \eta_A \eta_B = \frac{\text{Energie nette sortant dan l'eau chaude}}{\text{Energie du combustible} + \text{Energie électrique}}$$

Des mesures effectuées sur une période d'une année montrent que η_{AB} est de l'ordre de 80 à 85%, mais que durant l'été, le rendement n'est que de 65% pour la fabrication de l'eau chaude. Ces chiffres montrent que les installations de chauffage, même bien réglées, sont en général surdimensionnées car le rendement théorique d'une chaudière à plein régime est facilement supérieur à 90%. Une des conclusions de cette étude Lausannoise est que l'on devrait renoncer dans la mesure du possible à l'utilisation de chaudières combinées pour la fabrication de l'eau chaude domestique et de chauffage. L'utilisation d'une installation indépendante de fabrication d'eau chaude domestique devrait, selon ces auteurs, permettre une économie d'énergie de l'ordre de 1 à 3% (113). Ce chiffre est à mettre en rapport avec les statistiques (114) sur les indices énergétiques qui donnent des indices de l'ordre de 1000 MJ/m² pour les immeubles locatifs avec chaudières combinées et 910 MJ/m² pour les immeubles avec fabrication de l'eau chaude par un boiler électrique. Les chiffres correspondants pour les villas sont respectivement de 986 et 915 MJ/m², c'est-à-dire aussi différents de 10%.

Les pertes dans les chaudières sont principalement de deux sortes:

- Le rendement propre de la chaudière qui tient compte des pertes liées au principe même du système utilisé, tels que la combustion incomplète du mazout ou du gaz, et la chaleur perdue par la cheminée ou cédée au local de chauffe;

- Le rendement d'exploitation qui tient compte entre autres des pertes liées au fonctionnement intermittent de la chaudière. En effet, lorsqu'elle s'arrête de fonctionner, le tirage naturel de la cheminée refroidit la chaudière qui doit être réchauffée à nouveau lors de la remise en route suivante pour atteindre son efficacité maximum. Cet effet est particulièrement important si la chaudière est surdimensionnée et explique le mauvais rendement global actuel des systèmes de chauffage.

Plusieurs études sont en cours en Suisse pour augmenter l'efficacité des chaudières, en particulier en cas de fonctionnement intermittent. Une étude de l'Institut de Thermodynamique et des Brûleurs (ITV) de l'EPFZ résume la situation et les possibilités en matière de chauffage des locaux sous la forme du tableau suivant (115):

- A : Chauffage central classique moyennement bien installé;
- B : Chauffage central classique très bien installé;
- C : Chauffage central équipé d'une chaudière perfectionnée à fonctionnement continu et à réglage automatique.

Rendement des chaudières			
	Rendement Propre	Rendement d'exploitation	η_B
A	81 %	86 %	69 %
B	92 %	95 %	87 %
C	97 %	~ 100 %	97 %

Des recherches sont aussi en cours dans l'industrie et des chaudières à mazout ou au gaz avec des rendements de l'ordre de 90% sont déjà disponibles sur le marché (116).

Des mesures du rendement des installations de chauffage sont en cours à Zurich (125) et à Genève (126). Ces mesures sont moins détaillées qu'à Lausanne mais portent sur des milliers d'installations. A Zurich, on s'est rendu compte que sur 600 installations examinées, plus de la moitié étaient surdimensionnées d'un facteur 3 ou plus (127). A Genève, 28% d'économies d'énergie ont été réalisées entre 1973 et 1979 par un ensemble de mesures dans les bâtiments appartenant à la Ville, notamment en diminuant la température de certains locaux, mais aussi en assurant un réglage et un entretien optimum des installations de chauffage (81).

A l'EPFL, une recherche vient de débiter sur les pertes de circulation et de distribution de l'eau chaude (68).

Une campagne d'information est actuellement organisée à l'échelle nationale par la Société Suisse pour les Economies d'Energie (SAGES), le Comité d'action Suisse pour le chauffage économique et l'Office fédéral de l'énergie, pour améliorer le rendement global de l'exploitation des installations de chauffage.

3) Autres systèmes de chauffage

La nécessité de trouver des alternatives aux systèmes de chauffage traditionnels au mazout étant acquise, il n'est pas simple d'évaluer les avantages et inconvénients respectifs des solutions nouvelles proposées. On peut, dans ce contexte, définir trois types de problème:

- a) Quelle est la combinaison optimum de substitution et d'économie d'énergie qui assure une conservation maximale de l'énergie ? Par exemple: Faut-il construire des maisons solaires, utiliser des pompes à chaleur, ou simplement super-isoler les bâtiments et utiliser des chaudières perfectionnées ou le chauffage électrique ?
- b) Quel est le "meilleur" système de chauffage pour un bâtiment dans une région donnée ? Faut-il utiliser un chauffage central ou le chauffage à distance ? Quelles formes d'énergie faut-il choisir ? Quelle est la meilleure combinaison dans un cas pour lequel un système binaire s'impose ? Par exemple: chauffage solaire/mazout d'appoint, pompe à chaleur/électrique d'appoint, ... ?
- c) Quel est le "meilleur" système de chauffage dans une pièce ou un appartement d'un immeuble donné ? Par exemple: central ou pièce-par-pièce, par radiateurs ou convecteurs, à basse ou haute température, dans le sol ou dans le plafond, par corps de chauffe ou à air chaud ?

Tous ces problèmes sont encore mal étudiés et nécessitent des recherches théoriques et expérimentales.

a) comparaison de systèmes de chauffage

La complexité du problème de la comparaison des mérites respectifs de divers systèmes de chauffage est telle que plusieurs expériences sont en cours de réalisation dans lesquelles, des bâtiments semblables sont équipés avec des systèmes différents.

Par exemple:

- La rénovation de la "Limmatstrasse" à Zurich permet de tester toute une série de systèmes installés dans différents immeubles: chauffage central classique, chauffage solaire, pompe à chaleur, décompte et régulation individuelle de la consommation (17).
- Les PIT sont en train d'équiper huit centrales téléphoniques de quatre systèmes de chauffage différents: mazout, électrique, pompe à chaleur, collecteurs solaires (117).

- En Suède, un projet de grande envergure comprenant 41 maisons expérimentales est maintenant en cours d'évaluation (61). Quatre systèmes de base sont testés dans ces maisons: chauffage solaire, ventilation avec récupération de chaleur, contrôle avancé (variation systématique) du climat intérieur, pompe à chaleur. Sept des combinaisons possibles avec ces systèmes ont été réalisées dans plusieurs maisons et peuvent ainsi être comparées.

- Lors d'une expérience danoise, une pièce donnée a été chauffée avec neuf systèmes de chauffage différents (118). Les mesures indiquent des différences de perte de l'ordre de 15% par la fenêtre et de 20% par infiltrations. Les systèmes de chauffage les plus économiques semblent être les systèmes par le sol ou par radiateurs, et les plus mauvais, ceux à convecteurs et à air chaud. Les différences d'expliquent entre autre par le fait que dans les systèmes à air chaud et à convecteurs, les masses d'air mises en mouvement ont tendance à se refroidir davantage à proximité de surfaces froides telles que les fenêtres.

- En Belgique, l'efficacité d'émission des radiateurs et des convecteurs a été mesurée dans des conditions réelles (179). On a ainsi trouvé une efficacité de 87% pour les convecteurs et de 81% pour les radiateurs à une différence de température entrée/sortie de 30°C. Ce résultat semble être en contradiction avec les conclusions de l'expérience danoise précédente (118).

D'autres recherches abordent le problème de la comparaison des systèmes sous l'angle théorique. Ces études se font sous la forme d' "exercices d'intégration", c'est-à-dire de simulations dans lesquelles on compare un grand nombre de variantes possibles en intégrant un maximum de données connues. Un tel exercice d'intégration a été récemment réalisé pour le compte du gouvernement belge (112). Pour une petite maison familiale, on a comparé onze systèmes différents comprenant le chauffage central classique, le

chauffage à air chaud, le chauffage électrique, les pompes à chaleur et des capteurs solaires sous diverses formes. Une analyse économique détaillée a montré que parmi tous ces systèmes, le plus avantageux du point de vue économique restait encore le chauffage central classique, à condition de bien isoler la maison. La mauvaise rentabilité économique des énergies alternatives pour le projet considéré semble provenir entre autres des consommations électriques auxiliaires (pompes, ventilateurs, etc).

En Suisse, une étude théorique sur le remplacement du chauffage individuel par d'autres modes de chauffage a été faite par l'Institut de thermodynamique de l'EPFL (119). Le même institut, dans le cadre d'une étude globale des pompes à chaleur récemment publiée (120), vient de faire une comparaison de quatre techniques de chauffage pour une agglomération hypothétique entièrement nouvelle de 400 maisons individuelles, 100 locatifs et 10 grands bâtiments administratifs et commerciaux (121): un chauffage collectif utilisant un système bivalent pompe à chaleur/chaudière à huile légère semble être économiquement deux fois plus avantageux que le chauffage électrique individuel dans chaque bâtiment. Finalement, une comparaison de la rentabilité de divers systèmes de chauffage pour les habitations bien isolées est effectuée par un bureau d'ingénieurs de Baden (122).

Dans l'état actuel des discussions des objectifs du *Projet X* de l'AIE, il semble que ce projet s'oriente vers l'exécution d'un certain nombre d' "exercices d'intégration". Comme cas particulier, il est possible que la maison de Vetlanda et l'immeuble de Glasgow, qui sont instrumentés et pour lesquels des données expérimentales existent, seront pris comme point de départ de diverses simulations.

b) développements techniques

De nombreux développements techniques sont à l'étude dans le but d'augmenter l'efficacité des systèmes classiques et de mettre au point des systèmes alternatifs. Nous ne nous pencherons pas dans ce rapport sur le développement de ces nouveaux systèmes (pompes à chaleur, systèmes à couplage chaleur-force, chauffage solaire) et considérerons les systèmes de conditionnement de l'air dans le paragraphe suivant. Nous nous contenterons donc de mentionner quelques développements en rapport avec les systèmes de chauffage non-centraux:

- Chauffage pièce-par-pièce: de façon tout à fait générale, le chauffage direct des pièces habitées a des avantages de principe très net du point de vue de la conservation de l'énergie. Il permet en particulier d'adapter directement l'énergie fournie aux besoins, de faciliter le décompte individuel de l'énergie, et de supprimer les pertes de distribution inhérentes aux chauffages collectifs central ou à distance. Ces avantages ont été largement reconnus pour le chauffage électrique mais existent aussi pour les autres systèmes, qu'ils soient au bois, au charbon, au mazout ou au gaz. Dans ce domaine, des développements intéressants ont été faits avec le chauffage pièce-par-pièce au gaz, notamment en France (129). Comme chauffage d'appoint des systèmes solaires ou autres, il est important de développer de nouvelles chaufferettes à haut rendement, et ceci pour divers agents énergétiques. Finalement, des recherches fondamentales devraient être entreprises pour étudier la faisabilité de radiateurs à combustion catalytique, lesquels permettraient, en principe, une conservation maximale de l'énergie.

- Chauffage local: tant du point de vue du confort et des possibilités de réglage individuel, que de la conservation de l'énergie, le chauffage local est très intéressant. Il consiste à créer un "micro-climat" thermique sur le lieu même où se trouvent les personnes. C'est ainsi que l'on étudie en particulier l'utilisation de chaises chauffantes dans des bureaux ou des ateliers à température d'ambiance réduite (130). On pourrait de même envisager des habits chauffants.

4) Air conditionné, ventilation et récupération de la chaleur de l'air vicié

Les systèmes de conditionnement de l'air et de chauffage à air chaud sont réputés dispendieux du point de vue de la conservation de l'énergie. Cela est dû en particulier au mauvais rendement des appareils de chauffage et de refroidissement de l'air qui est limité à 85-90% pour des raisons techniques. Toutefois, dans certains cas, les installations de conditionnement de l'air sont nécessaires, notamment dans des grands bâtiments de service. Tout comme pour les systèmes de chauffage central classiques, des progrès importants dans le domaine des installations de conditionnement de l'air sont difficiles. C'est pourquoi les développements les plus intéressants dans les domaines du conditionnement de l'air, du chauffage à air chaud et la ventilation concernent les échangeurs de chaleur air-air qui, dans l'état actuel de la technique, permettent de récupérer 60 à 80% de la chaleur de l'air vicié expulsée des bâtiments. Les échangeurs de chaleur peuvent être utilisés dans trois circonstances principales:

- . pour récupérer la chaleur perdue à la cheminée des brûleurs de chauffage et la ventilation dans les grands immeubles;
- . pour récupérer la chaleur (ou le froid) dans les systèmes à air conditionné de grands ensembles commerciaux, industriels ou sportifs;
- . pour récupérer la chaleur perdue par la ventilation contrôlée dans les habitations à faible consommation d'énergie.

Vu l'importance de toutes ces applications, de nombreuses recherches sont en cours à plusieurs niveaux:

- Dans le cadre du *Projet III* de l'AIE qui fait une étude sur la récupération de l'énergie dans les systèmes de ventilation (131);

- A l'étranger, diverses recherches portant sur l'étude des échangeurs de chaleur air-air, en particulier dans le cadre de maisons à faible énergie (132);

- A l'Institut de thermique appliquée de l'EPFL, on étudie la chaleur perdue par les rideaux d'air (68) et les performances, en service réel, de récupérateurs d'énergie rotatifs dans les installations de ventilation et climatisation (133). Des efficacités supérieures à 90% ont été mesurées pour des durées d'utilisations faibles, et de l'ordre de 85% sur des durées supérieures à 3 mois.

- A Genève, une étude sur la récupération de la chaleur dans les bâtiments locatifs faite pour le compte de la Commission Cantonale de l'Energie, essaie de déterminer la validité de la récupération de la chaleur de l'air extrait, tant du point de vue technique que de sa rentabilité énergétique et économique.

En Allemagne, une étude vient d'être publiée sur le potentiel de récupération de la chaleur sensible perdue pour la ventilation et la préparation de l'eau chaude (134). Celui-ci est de 15% de ce qui est techniquement réalisable pour les bâtiments existants et de 30% pour les bâtiments nouveaux.

Nous avons déjà noté l'intérêt des bâtiments très étanches à l'air du point de vue de la conservation de l'énergie. Ces bâtiments nécessitent alors un système mécanique de ventilation. Il se pose donc la question du bilan énergétique et de la rentabilité économique globale, surtout en ce qui concerne les grands immeubles. Les résultats d'une comparaison détaillée d'un système de ventilation mécanique par rapport à une ventilation naturelle pour un

immeuble locatif (135) sont nettement en faveur d'une ventilation mécanique centrale avec récupération de la chaleur. La consommation énergétique est diminuée de moitié alors que le coût annuel de la ventilation, amortissement et entretien de l'installation compris, n'augmente que de 10%.

Les performances des systèmes de ventilation à récupération de la chaleur demandent évidemment un comportement raisonnable des habitants s'ils ont la possibilité d'ouvrir les fenêtres. Des mesures approfondies, sur une maison anglaise de construction standard à ventilation naturelle, ont montré que le taux moyen de 0.4 échanges d'air par heure pour ventiler toute la maison augmentait à 3 échanges d'air par heure quand la fenêtre de la chambre à coucher est ouverte au maximum (136). L'augmentation résultante mesurée d'énergie de chauffage a été de l'ordre de 64%.

Plus le volume V d'un bâtiment est grand, plus sa consommation énergétique de chauffage devient fonction de la ventilation. Pour une isolation donnée, ceci provient de la diminution du rapport A/V (voir Appendice II) auquel s'ajoute, dans le cas des immeubles-tours, l'effet de cheminée. La différence de pression intérieur/extérieur due à cet effet provoque des infiltrations d'air supplémentaires qui peuvent être sensiblement réduites en équilibrant convenablement le système de ventilation mécanique (183). La distribution des différences des pressions dans un grand immeuble locatif dépend aussi de l'état d'ouverture des fenêtres. Il est donc important que les systèmes de ventilation centraux soient étudiés de sorte à minimiser ces interactions.

Un aspect du confort domestique qui est souvent négligé en rapport avec les systèmes de climatisation et de ventilation est le bruit. Dans ce sens, alors que la plupart des nouveaux systèmes de chauffage sont essentiellement silencieux, l'avènement de systèmes de ventilation forcée avec échange de chaleur pour le maintien de la qualité de l'air et la conservation de l'énergie, doivent être particulièrement bien étudiés du point de vue du bruit et des vibrations (137). Une technique possible qui permettrait de résoudre élégamment ce genre de problème est constituée par les échangeurs de chaleur/ventilateurs passifs qui permettent un transfert de chaleur latente à travers une membrane poreuse. De tels systèmes sont disponibles au Japon et ont une efficacité de l'ordre de 75% (132).

5) Eau chaude domestique et récupération de la chaleur des eaux usées

L'utilisation de l'eau chaude domestique est, tout comme les habitudes de ventilation, extrêmement dépendante du mode de vie et de la structure familiale des habitants. Au fur et à mesure que la fraction de l'énergie consommée par les ménages pour le chauffage diminuera, la fraction consacrée à l'eau chaude et aux appareils ménagers deviendra plus importante. Dans le cas des maisons super-isolées, la préparation de l'eau chaude domestique durant toute l'année peut constituer une dépense énergétique plus importante que le chauffage. Pour ces raisons, deux remarques sont particulièrement importantes:

- Si l'énergie solaire n'est pas suffisante pour satisfaire les besoins en chauffage pendant l'hiver, elle peut néanmoins être utilisée dans nos climats pour la préparation de l'eau chaude. Cette solution était d'ailleurs fort répandue aux USA au début de ce siècle, et plusieurs réalisations pilote et recherches (117) en Suisse en démontrent l'intérêt et la haute rentabilité;

- La chaleur de l'eau chaude domestique peut être récupérée par des échangeurs de chaleur.

Plusieurs études sur les récupérateurs de la chaleur des eaux usées sont en cours en Suisse (138) et à l'étranger (139). Le rendement des échangeurs de chaleur eau-eau peut être de l'ordre de 80%.

De nouveaux concepts pour la fabrication de l'eau chaude sont aussi en train de faire leur apparition. Par exemple, le Département de l'Energie aux Etats-Unis a mis au point un chauffe-eau domestique qui utilise une pompe à chaleur et dont la consommation n'est que la moitié de celle d'un boiler électrique traditionnel à résistance (180). Une autre idée consiste à combiner un congélateur et un chauffe-eau électriques dans un seul appareil capable de fournir simultanément le froid et l'eau chaude nécessaire à un ménage (126 , voir aussi IV.4.a).

Un problème important qui concerne non seulement l'eau chaude domestique mais aussi l'eau chaude de chauffage est celui de sa distribution par les tuyaux.

Dans ce contexte, des études intéressantes sont en cours sur l'isolation thermique des tuyaux et en particulier sur la possibilité de mettre au point des tuyaux en matières plastiques nouvelles pour l'eau chaude (140).

Un problème annexe qui peut être une source non négligeable de pertes dans les grands immeubles est celui des "court-circuits thermiques", c'est-à-dire du couplage thermique entre les tuyaux d'eau chaude et d'eau froide qui font qu'à certains étages, l'eau chaude n'est pas chaude, et l'eau froide n'est pas froide !

6) Eclairage électrique et naturel

Le problème de l'éclairage artificiel vu sous l'angle de la conservation de l'énergie consiste à fournir de la lumière qui soit agréable à l'oeil, c'est-à-dire ayant un spectre de fréquence bien défini, avec une efficacité aussi grande que possible. Pour les trois types de lampes les plus importantes, cette efficacité, exprimée en pourcentage de l'énergie électrique transformée en lumière visible et en lumens par watt est la suivante, dans les meilleures conditions (141):

Efficacité des lampes électriques

	%	lumen/watt
Lampe à incandescence	7	17.5
Lampe à fluorescence	23	80
Lampe à sodium	36	183

Les lampes à sodium donnant une lumière jaune ne sont pas utilisables pour l'éclairage général, seules les lampes à fluorescence sont susceptibles de remplacer avantageusement les lampes à filament incandescent. L'économie d'énergie potentielle d'un facteur 80/17.5 est réduite de 10 à 20% par l'inefficacité de l'équipement électrique auxiliaire (ballast) qui est nécessaire pour entretenir la fluorescence mais représente tout de même un facteur 4 au moins. Le problème majeur posé par le remplacement des lampes à incandescence par des lampes à fluorescence est celui de la miniaturisation. C'est désormais chose faite. Les caractéristiques techniques d'une lampe qui sera commercialisée au milieu 1981 sont les suivantes (142):

Comparaison des lampes miniaturisées fluorescentes et à filament

principe technique	fluorescent	filament
durée de vie moyenne (h)	5'000	1'000
consommation nominale (watts)	18	75
flux lumineux émis (lumens)	900	900
efficacité (lumens par watt)	50	12
température de couleur (Kelvin)	2'900	2'700

Evidemment, ces nouvelles lampes seront plus chères à l'achat; toutefois, en raison de leur durée de vie cinq fois plus élevée et de leur faible consommation de courant, leur prix initial sera rapidement amorti.

L'efficacité des ballasts actuels pour les lampes à fluorescence est de l'ordre de 70-75% pour les modèles standard, et de l'ordre de 80-85% pour les modèles améliorés (143). Dans le but d'augmenter cette efficacité, ainsi que pour diminuer le bruit du ballast et permettre un réglage continu du flux lumineux, des ballasts à circuits électroniques fonctionnant à une fréquence de l'ordre de 20 kHz sont à l'étude. Le rendement de ces ballasts électroniques étant voisin de 100%, des économies d'énergie de l'ordre de 20% ont été mesurées lors de l'expérimentation à grande échelle d'un prototype aux USA (144).

Dans les grands bâtiments commerciaux ou administratifs, près de 50% de la consommation énergétique est consacrée à l'éclairage. Etant donné le faible rendement énergétique de l'éclairage électrique, plus de 75 % de l'énergie d'éclairage aboutit finalement à chauffer le bâtiment, ce qui contribue à augmenter la charge de refroidissement du bâtiment en été (145).

Pour diminuer la consommation électrique de l'éclairage artificiel, un grand nombre de mesures sont possibles:

- Remplacer les lampes à incandescence par des lampes fluorescentes;
- Réduire le niveau d'éclairage (lumen/m^2) partout où cela est possible;
- Installer des systèmes de contrôle du flux lumineux pilotés par des cellules photoélectriques pour moduler la lumière artificielle en fonction des apports de lumière naturelle;
- Supprimer les éclairages généraux pour les remplacer par des éclairages individuels;
- Installer des minuteries et des contrôles pour éteindre ou baisser la lumière lorsqu'elle n'est plus nécessaire;
- Recourir à l'éclairage naturel le plus possible.

L'utilisation de l'éclairage naturel, à l'intérieur de grands immeubles est actuellement l'objet d'importantes recherches (146). Tout comme l'utilisation de la chaleur solaire pour le chauffage, de la température du sous-sol pour diminuer les charges thermiques, l'utilisation de la lumière solaire pour l'éclairage de l'intérieur des bâtiments offre des possibilités de confort et de conservation de l'énergie importantes. En particulier, l'éclairage naturel est reconnu comme intéressant en raison de l'affinité bien connue de l'oeil humain pour la lumière naturelle et la difficulté de reproduire le spectre de la lumière naturelle avec des éclairages artificiels. L'éclairage naturel peut être facilement combiné à des systèmes d'énergie solaire. En effet, après concentration des rayons solaires, les composantes pour le chauffage (infrarouge) et pour l'éclairage (visibles) peuvent être séparées. La lumière naturelle peut alors être dirigée à l'intérieur des immeubles par des moyens optiques et diffusée à l'endroit où elle est nécessaire (147).

Pour l'avenir, dans l'hypothèse de la mise au point de guides de lumière adéquats, on peut envisager des sources de lumière centrale utilisant des lasers, à condition que le rendement de ces derniers puisse être augmenté (148).

CHAPITRE IV

ÉQUIPEMENTS MÉNAGERS

La consommation électrique annuelle moyenne des ménages est relativement bien connue, en particulier pour la Suisse, par les statistiques publiées par l'Union des Centrales Suisses d'Electricité (UCS) et par les indices énergétiques compilés par la SAGES. Les indices énergétiques montrent que cette consommation électrique, qui comprend celle des appareils électro-ménagers et de l'éclairage, est de l'ordre de 10 à 15% des dépenses énergétiques pour le chauffage (voir tableau IV). La consommation électrique annuelle moyenne par ménage, indiquée par l'UCS pour 1977 (149) est de 3'300 kWh/an. Pour l'ensemble des ménages suisses, cette consommation correspondait la même année à 22.5% de la consommation électrique totale du pays.

Lorsque l'on considère le potentiel des économies d'énergie possibles pour le chauffage, on constate que la quantité d'énergie consommée par les appareils ménagers pourrait devenir une fraction de plus en plus importante des dépenses énergétiques du ménage. C'est ce qui apparaît sur le tableau IV où l'on voit que dans des maisons à haute isolation, la consommation électrique autre que pour le chauffage atteint 20 à 30% de la consommation énergétique totale. Il faut préciser qu'une partie (estimée à environ 35% (150) de l'énergie utilisée pour les appareils ménagers est dissipée sous forme de chaleur et contribue donc au chauffage.

Plusieurs études importantes ont été récemment publiées sur les possibilités de conservation de l'énergie dans les appareils électro-ménagers. L'une d'elles, qui concerne principalement le Danemark (151), considère qu'une consommation électro-ménagère de 3'000 kWh/an pourrait être abaissée aux environs de 1'000 kWh/an, sans réduction du confort, et en ne recourant qu'à des améliorations d'ordre technique possibles à l'heure actuelle. Aux États-Unis, le Département de l'Energie (DOE) a publié une étude considérable qui conduit à proposer des standards de performances minimales pour les équipements ménagers utilisant l'électricité ou le gaz (152).

Dans le cadre de l'AIE, le *Projet X* proposé par la Belgique considère dans son ensemble le problème de la consommation électrique dans les bâtiments. Celui-ci comprend en effet non seulement la consommation des appareils électroménagers et de l'éclairage, mais encore celle des différents moteurs, pompes et équipements qui servent à la ventilation, à la circulation de l'eau de chauffage, au fonctionnement des ascenseurs, etc. Par exemple, le moteur du circulateur de l'eau chaude dans un chauffage central fonctionne pendant toute la saison de chauffage. La consommation électrique annuelle qui lui correspond est alors facilement 5 à 10% de la consommation électrique totale d'une villa (150). Si ce projet de l'AIE est accepté, il consistera à simuler des bâtiments complets habités et de comparer du point de vue énergétique et économique un grand nombre de variantes en introduisant pour chacune d'elles les efficacités des différentes composantes, et, en particulier, celles des appareils ménagers et de services. Dans la perspective de ce projet, une étude bibliographique préliminaire qui couvre la consommation électrique des bâtiments a été publiée par l'Université de Liège (153).

Dans ce chapitre, nous examinerons principalement les appareils ménagers utilisant l'électricité. Les appareils utilisant le gaz ne doivent cependant pas être négligés du point de vue de la conservation de l'énergie: des améliorations techniques sont aussi possibles pour ceux-ci et ils offrent des possibilités de substitution intéressantes, en particulier pour la cuisson des aliments.

1) Facteurs déterminants de la consommation énergétique dans les ménages

L'analyse de la consommation énergétique des ménages est difficile car elle concerne toute une série d'appareils dont les caractéristiques techniques et les modes d'utilisation sont très différents les uns des autres. En ce qui concerne les besoins en énergie de chauffage et en eau chaude, on a introduit des indices énergétiques exprimés en MJ/m² an qui sont actuellement de plus en plus utilisés. Une évolution semblable est en train de se faire pour les autres besoins ménagers et l'on s'achemine de même vers la définition de "facteurs d'efficacité énergétique" pour les appareils ménagers. Ceux-ci permettent aux fabricants et aux utilisateurs de ces appareils d'en comparer les performances. La définition de ces facteurs d'une façon cohérente nécessite un examen de la structure de la consommation énergétique dans les ménages. Cette structure est généralement analysée en fonction de trois facteurs (149,154):

$$(\text{consommation}) = \left(\begin{matrix} \text{facteurs} \\ \text{d'implantation} \end{matrix} \right) \times \left(\begin{matrix} \text{facteurs} \\ \text{d'utilisation} \end{matrix} \right) \times \left(\begin{matrix} \text{facteurs} \\ \text{technique} \end{matrix} \right)$$

Le facteur d'implantation est en général défini de la même façon dans la plupart des analyses et consiste à définir un taux d'implantation exprimé en nombre d'appareils d'un type donné en service par ménage ou en nombre d'appareils en service pour une population de ménages donnée. Les deux autres facteurs par contre, sont définis de façon assez différente suivant les auteurs et le type d'analyse.

Par exemple, pour les appareils électriques, le facteur technique est généralement la puissance installée moyenne d'un type d'appareils donné, et le facteur d'utilisation, le temps d'utilisation moyen par année de cette puissance installée. Cette décomposition a l'avantage de permettre une analyse systématique de la consommation électrique des ménages en fonction de facteurs qui sont en principe facilement mesurables. Elle est en particulier couramment utilisée pour l'établissement des statistiques de l'UCS (149) et de l'UNIPED (155) sur les appareils ménagers. Le produit du facteur d'utilisation et du facteur technique est généralement appelé consommation spécifique par appareils. Pour les appareils électro-ménagers, on a donc le plus souvent:

$$\begin{matrix} \left(\begin{matrix} \text{consommation} \\ \text{spécifique} \end{matrix} \right) & = & \left(\begin{matrix} \text{temps} \\ \text{d'utilisation} \end{matrix} \right) \times \left(\begin{matrix} \text{puissance} \\ \text{installée} \end{matrix} \right) \\ \text{[kWh/an, appareil]} & & \text{[h/an]} \quad \text{[kW/appareil]} \end{matrix}$$

Lorsqu'on s'intéresse aux performances relatives de divers appareils ménagers d'une même catégorie, la puissance installée n'est pas toujours le meilleur facteur technique à prendre en considération. Pour cette raison, on introduit actuellement comme facteur technique caractéristique d'un appareil son efficacité énergétique défini de telle sorte que la consommation énergétique spécifique s'écrive de la manière suivante (151,154):

$$\left(\begin{matrix} \text{consommation} \\ \text{spécifique} \end{matrix} \right) = \frac{\text{service demandé (service/an)}}{\text{efficacité énergétique (service/énergie)}}$$

Le service demandé dépend évidemment du genre d'appareil (volume à réfrigérer pour un frigo, poids du linge à laver pour une machine à laver, nombre d'heures d'écoute pour une radio, etc) et doit être choisi de façon à permettre une définition judicieuse du facteur d'efficacité énergétique. Le facteur d'efficacité énergétique introduit de cette façon, et exprimé en "service" par unité d'énergie,

correspond directement aux besoins de l'étiquetage énergétique en ce qui concerne la perception du consommateur: le service procuré par unité d'énergie est d'autant plus grand que l'efficacité énergétique de l'appareil est grande. Au paragraphe 3) ci-après, nous passerons en revue quelques définitions possibles pour ces efficacités énergétiques.

En regroupant les facteurs ci-dessus avec les définitions que nous venons d'introduire, on obtient pour la consommation énergétique ménagère annuelle, l'expression suivante:

$$\text{Consommation} = \sum_i \frac{\text{Implantation}_i \cdot \text{Utilisation}_i}{\text{Efficacité énergétique}_i}$$

et, pour chaque type d'appareil i:

Implantation: nombre d'appareils en service par ménage;

Utilisation : service demandé à l'appareil par ménage et par an;

Efficacité énergétique : service procuré par unité d'énergie, ou rendement énergétique si le service demandé s'exprime en unités d'énergie.

L'analyse de la structure de la consommation en fonction des trois paramètres ci-dessus présente plusieurs avantages intéressants:

- Le numérateur dépend essentiellement de facteurs socio-économiques. Le premier terme, le taux d'implantation, dépendant d'ailleurs surtout de facteurs économiques: taux, de renouvellement du stock des appareils, prix relatif des appareils, publicité, etc. Le second terme, le facteur d'utilisation, surtout des caractéristiques du ménage: nombre de personnes, habitudes et préférences, etc.
- Le dénominateur dépend essentiellement des performances techniques des appareils.

Comme nous le verrons en détail plus loin, une réduction de la consommation énergétique ménagère peut être obtenue en agissant sur ces trois paramètres, soit en diminuant les taux d'implantation et d'utilisation, soit en augmentant l'efficacité énergétique des appareils.

2) Consommations spécifiques et taux d'utilisation

Le tableau II donne les consommations spécifiques annuelles de quelques appareils ménagers courants pour la Suisse, quelques pays européens et les Etats-Unis. Ce tableau permet de faire quelques constatations intéressantes:

- Les consommations spécifiques sont relativement semblables pour les pays européens et les Etats-Unis à l'exception des réfrigérateurs et des machines à laver pour ce dernier pays;
- La consommation spécifique des réfrigérateurs américains est nettement plus élevée que celle des européens du fait que les réfrigérateurs américains sont généralement plus grands et sont souvent équipés de divers accessoires;
- La consommation spécifique des machines à laver le linge américains est beaucoup plus faible que celle des machines à laver utilisées en Europe. Cela provient du fait qu'aux Etats-Unis, la lessive est faite à basse température et qu'il n'est alors pas nécessaire de chauffer l'eau de lavage comme en Europe où l'habitude consiste à "cuire" le linge.

Ce genre de comparaisons montre que les technologies utilisées et les habitudes d'utilisation ne sont en général pas très différentes pour certains appareils, ce qui permet de transposer les résultats qui les concerne d'un pays à l'autre. Elles montrent aussi que pour certains besoins domestiques, comme le lavage du linge par exemple, des solutions radicales existent.

TABLEAU II

CONSUMMATIONS ENERGETIQUES SPECIFIQUES [kWh/an]

APPAREIL	ANGLETERRE	BELGIQUE	DANEMARK	FRANCE	SUEDE	SUISSE	USA
Cuisinière	1200	655	950	1400	970	1400	1200
Réfrigérateur	500	550	550	350	420	400	1583
Lave-linge	135	320	575	400	1000	780	83
Lave-vaisselle	850	720	650	450	830	410	361
Télévision	195	180	165	150	140	135	444
Eclairage	300	530	300	700	880	400	2000

Références: Suisse (149,155) ; autres pays (153)

L'institut d'Economie et d'Aménagement énergétiques (IENER) de l'EPFL a effectué une enquête avec mesures détaillées dans environ 200 ménages de la région lausannoise (156). Le but de cette recherche était de déterminer les consommations spécifiques et les taux d'implantations des appareils électro-ménagers utilisés dans ces ménages et d'analyser les relations possibles entre ces données et les variables socio-économiques (revenu, nombre de personnes, situations professionnelles). La consommation électrique annuelle moyenne mesurée dans cette étude est de 2'400 kWh/an.

3) Efficacité énergétique et étiquetage énergétique des appareils ménagers

L'augmentation de l'efficacité énergétique des appareils ménagers est essentiellement un problème industriel consistant à fabriquer de nouveaux appareils selon des techniques qui sont en principe disponibles. D'après les diverses études entreprises, ces mesures de conservation sont économiquement rentables (150,152) et procurent donc aux fabricants la possibilité de renouveler le stock des appareils ménagers. Il n'est donc pas étonnant que les fabricants soient les premiers intéressés ainsi que l'a affirmé l'Association Suisse des Fabricants et Fournisseurs d'Appareils Electro-domestiques (FEA) lors d'une récente conférence de presse (157). Ce genre d'attitude se retrouve dans d'autres pays et en Allemagne, par exemple, les représentants de l'industrie des appareils domestiques se sont engagés devant le Ministère des Affaires économiques à réaliser toute une série d'économies d'énergie d'ici à 1985 (entre autres: réfrigérateurs, 15-20%, lavés-vaisselle, 10-15%, etc) (158).

Afin que le remplacement des anciens appareils par des appareils nouveaux plus performants puisse se faire efficacement et à la satisfaction des consommateurs comme des fabricants, un effort important d'information est nécessaire. Cette information requiert la collaboration des fabricants, des unions de consommateurs, des organisations commerciales et de certains offices gouvernementaux.

L'un des premiers problèmes est celui de la définition d'indices énergétiques pour les appareils domestiques, par exemple sous la forme de facteurs d'efficacité énergétique tels que ceux introduits au paragraphe 1). Le problème directement associé à l'utilisation de ces facteurs d'efficacité est celui du marquage de ces indices sur les appareils, ce que l'on appelle couramment "étiquetage énergétique", de manière à ce que les consommateurs puissent comparer et choisir entre différents appareils. De nombreuses organisations sont intéressées et concernées par ce problème. La CEE a ainsi adopté une directive générale qui comprend une liste des appareils qui devraient être marqués de la sorte, ainsi qu'une directive s'appliquant aux fours électriques (les deux directives entreront en vigueur en 1982) (159). Le principe d'étiquetage énergétique proposé par la CEE consiste à marquer sur chaque appareil la consommation énergétique en kWh mesurée pour des conditions de test définies. L'Association des Consommateurs de Londres a effectué trois enquêtes intéressantes pour le compte du Gouvernement anglais à propos de l'étiquetage énergétique: la compréhension des étiquettes par les consommateurs; la vérification de la concordance des méthodes de tests des appareils avec les habitudes d'utilisation des consommateurs; l'impact possible de l'étiquetage énergétique sur les choix des consommateurs (160).

Indépendamment des problèmes posés par la définition des efficacités énergétiques et de leur étiquetage, le problème pratique majeur est celui du test des appareils pour la certification officielle de leurs performances. Les organisations de consommateurs

insistent sur le fait que ces tests doivent correspondre aux conditions d'utilisation réelles des appareils. Le format de la présentation des indices énergétiques doit aussi être facilement interprétable par les consommateurs et l'enquête effectuée par l'Association des consommateurs de Londres indique que ceux-ci préfèrent nettement une étiquette indiquant un coût pour un usage-type plutôt que la quantité d'énergie qui lui correspond. Un indice révélateur des difficultés posées par l'étiquetage énergétique et des méthodes de tests associés est donné par les Etats-Unis qui ont adopté un système obligatoire d'étiquetage énergétique en 1975. Ce système n'a pas encore été mis effectivement en vigueur car il n'a pas été possible de définir à ce jour de manière acceptable les conditions de tests des appareils et la présentation des résultats sur les étiquettes (161).

Une partie des difficultés que nous venons d'évoquer provient du fait qu'un étiquetage énergétique basé sur des consommations spécifiques mesurées dans des conditions données fait intervenir à la fois des facteurs techniques et des facteurs socio-économiques liés aux conditions de test et à la présentation des résultats. Des indices d'efficacité énergétique décrivant uniquement les performances techniques des appareils permettent d'éviter certaines de ces difficultés. C'est par exemple le cas des facteurs d'efficacité énergétique introduits aux Etats-Unis par le Département de l'Energie afin d'établir pour les fabricants des normes de performances minimales pour les appareils ménagers:

	Facteurs d'efficacité énergétique
Réfrigérateurs, Congélateurs	$\frac{\text{Volume refroidi [l} \times \text{jours]}}{\text{Energie requise par jour [kWh]}}$
Boilers, Chauffe-eau, Cuisinières, Fours	$\frac{\text{Chaleur transférée au produit}}{\text{Energie total requise}} \quad [\%]$
Sèches-linge, Laves-linge, Laves-vaisselle	$\frac{\text{Poids du produit traité [kg]}}{\text{Energie totale requise [kWh]}}$

La définition de ces indices d'efficacité énergétique est consistante avec d'autres efficacités couramment utilisées comme celles des voitures exprimées en km parcourus par litre d'essence ou des ampoules électriques exprimées en lumen par watt.

4) Possibilités d'améliorations techniques des appareils ménagers

Dans ce paragraphe, nous allons passer en revue les améliorations techniques possibles pour les appareils ménagers dont les consommations énergétiques spécifiques annuelles sont les plus importantes. Ces possibilités ont été principalement étudiées à l'Université Technique du Danemark (150) et par le Département de l'Energie (DOE) aux Etats-Unis (152). Seules les améliorations qui en principe ne changent pas le niveau de confort procuré par les appareils sont pris en considération.

a) réfrigérateurs et congélateurs

Dans les réfrigérateurs et congélateurs de conceptions actuelles, entre 70 et 80% de l'énergie consommée est perdue par transmission à travers les parois et la porte. Malgré cette caractéristique dominante, la consommation énergétique n'est pas une fonction simple de paramètres tels que le volume car elle dépend aussi du principe de réfrigération utilisé, des accessoires tels que le dégivrage automatique et des détails de construction. Les études montrent que la consommation électrique des réfrigérateurs peut être abaissée de 50%, principalement en portant l'épaisseur de l'isolation à 6-9 cm et en augmentant la surface de l'évaporateur. La faisabilité de cette technique a été démontrée par le Département de l'Energie des Etats-Unis en réduisant la consommation d'un réfrigérateur de 500 l de 1400 kWh/an à 660 kWh/an (180). Une étude danoise (150) montre que la consommation peut être réduite au 1/5 de la valeur actuelle par des mesures plus radicales comprenant une isolation de 10 cm d'épaisseur et un triplement de la surface de l'évaporateur et du condenseur. Les études du DOE (152) conduisent à des résultats similaires et toutes les deux prédisent une consommation annuelle de 90 kWh/an pour un réfrigérateur de 130 l au lieu des 550 kWh/an consommés actuellement.

L'inconvénient majeur de ce genre de mesures radicales est le volume extérieur plus important impliqué par l'épaisseur accrue de l'isolation.

Les mêmes techniques permettent d'obtenir des résultats similaires pour les congélateurs. Dans le cas des mesures radicales, l'épaisseur de l'isolation est alors portée à 20-25 cm. Un avantage indirect de cette isolation supplémentaire est que le temps nécessaire pour que la température augmente de -18°C à -10°C en cas de coupure accidentelle de l'électricité est alors de l'ordre de 4 à 5 jours.

Un constructeur allemand a récemment annoncé un congélateur dont la chaleur du condenseur est utilisée pour préparer de l'eau chaude domestique. Un tel congélateur de 300 l serait ainsi capable de fournir 46% de l'eau chaude nécessaire à une famille de quatre personnes. Relativement au prix d'un chauffe-eau traditionnel, la période de remboursement des coûts additionnels serait de 2.6 an (128).

b) machines à laver le linge et la vaisselle

La caractéristique principale des machines à laver le linge européennes courantes est que pour celles-ci, seulement 10 à 15% de l'énergie consommée est utilisée par le moteur qui élimine le dur travail manuel de la lessive. Le reste de l'énergie consommée est pratiquement totalement utilisé pour chauffer l'eau. La comparaison de l'énergie consommée pour un cycle de lavage donné par des machines de constructeurs différents montre que la consommation énergétique varie de plus de 50% de l'une à l'autre, ce qui indique aussi des variations considérables en ce qui concerne les programmes.

Les mesures de conservation de l'énergie envisagées considèrent une isolation thermique accrue, une réduction de l'utilisation de l'eau chaude aussi bien en volume qu'en durée, et la possibilité d'une modification des programmes eux-mêmes. Une réduction de 50% de la consommation est techniquement possible mais requiert une suppression du prélavage qui ne semble pas être nécessaire si le programme principal est modifié en conséquence. Par des mesures radicales (150), il est possible d'abaisser la consommation électrique

1/8 du niveau actuel. Ces mesures consistent à renoncer totalement au chauffage électrique de l'eau et à se contenter des 50 à 60°C produits par le chauffage central ou par l'eau chaude domestique. La lessive à cette température, ou même à l'eau froide, est très répandue aux Etats-Unis et avec les produits de lessives modernes semble donner pleine satisfaction.

En Suisse, l'enquête de l'IENER (156) a mesuré la consommation énergétique de différents types de machines à laver le linge. Les machines sans chauffage de l'eau consommaient en moyenne 1/5 des machines usuelles. A l'EMPA, des mesures sont en cours sur la consommation en eau et en électricité des machines à laver (162).

Les machines à laver la vaisselle sont en principe très semblables aux machines à laver le linge. Des mesures de conservation semblables s'appliquent à elles, et des mesures radicales permettent d'en abaisser la consommation au 1/7 de la valeur actuelle (150).

c) appareils à sécher le linge

Il existe deux types de sècheurs à linge: les machines à tambour et les armoires de séchage. Alors que le premier type de machine est assez répandu dans certains pays comme les Etats-Unis, il est peu utilisé en Suisse dans les ménages. Les statistiques de l'UCS (155) estiment par contre que près du 15% des ménages ont accès à un sècheur électrique collectif. Pour ce genre d'appareil, plus de 80% de l'énergie est utilisée pour chauffer l'air et le reste principalement par le moteur du tambour ou le ventilateur des armoires séchantes. Les mesures de conservation possibles comprennent la recirculation d'une partie de l'air chauffé, l'utilisation d'un récupérateur de la chaleur et l'augmentation de l'efficacité du moteur. L'application de l'ensemble de ces mesures permet en principe d'abaisser la consommation énergétique à 50% de la valeur initiale (150). Une réduction de la consommation électrique allant jusqu'au 1/5 de la valeur initiale est possible si, au lieu de chauffer l'air à une température de 80-100°C, on se contente de la température de 50-60°C de l'eau chaude domestique ou de chauffage. Dans ce cas, la durée du séchage sera toutefois environ 30% plus longue (150).

Une autre possibilité de conservation de l'énergie est procurée par les appareils qui, au lieu d'évaporer l'humidité par de la chaleur déshydratant l'atmosphère de l'enceinte de séchage par condensation (163).

Des mesures de la consommation électrique des sèches-linge à tambour sont en cours à l'EMPA (162).

d) cuisinières et fours de cuissons

Le but de la cuisson sur des plaques électriques chauffantes ou dans un four est d'amener une quantité donnée de nourriture à une température donnée et de l'y maintenir éventuellement pendant un certain temps. Dans l'état actuel de la technique, seulement 15% de l'énergie consommée par les cuisinières et les fours domestiques est en fait utilisée à cette fin. Diverses mesures de conservation proposées tendent à augmenter cette efficacité énergétique aux alentours de 30%, ce qui, en réduisant simultanément les pertes par une meilleure isolation, permettrait de diminuer la consommation électrique pour la cuisson par un facteur deux (150).

Plus spécifiquement pour les fours, les mesures de conservation consistent à diminuer la grandeur des fenêtres et à utiliser un double vitrage, à augmenter l'épaisseur de l'isolation thermique et diminuer la capacité thermique du four. Une proposition radicale consiste à placer un four bien isolé plus petit, pour les usages courants, à l'intérieur du four standard.

Pour les plaques chauffantes, les mesures radicales comprennent en plus d'une meilleure isolation des plaques, l'utilisation de casseroles isolées et à faible capacité thermique.

Il est intéressant de comparer du point de vue énergétique les cuisinières électriques et les cuisinières à gaz. L'efficacité énergétique des fours à gaz n'est que de 6% comparé à 15% pour les fours électriques actuels. Par contre, l'efficacité énergétique pour la cuisson dans des casseroles est de 30% pour le gaz comparé à 15% pour l'électricité. Aux Etats-Unis, le standard proposé par le Département de l'Energie est d'amener en 1986 l'efficacité énergétique de la cuisson au gaz à 45% au minimum (152).

e) éclairage

Nous avons examiné les possibilités de conservation pour l'éclairage dans le chapitre précédent. On estime que le remplacement des lampes à filament par des lampes à fluorescence dans les cas où cela est possible (environ 80% des besoins en éclairage) permettra de réduire de 50% la consommation électrique pour l'éclairage (151).

f) examen des mesures proposées

Le tableau III résume l'effet des mesures de conservation proposées pour les deux principales études citées dans ce paragraphe.

L'étude américaine (152) considère principalement les mesures qui peuvent être entreprises essentiellement sans modifier les caractéristiques mécaniques globales des appareils et qui agissent plutôt sur leurs composants actifs. Par exemple, elle ne propose pas de renforcer l'isolation des appareils au-delà d'un certain niveau afin de ne pas trop augmenter l'épaisseur des parois.

L'étude danoise (150) propose trois niveaux de mesures. Les mesures modérées et fortes consistent principalement à améliorer les appareils existants alors que les mesures radicales demandent une modification de la conception des appareils.

Les deux études n'envisagent que les mesures qui sont économiquement rentables et en particulier l'étude danoise estime que la période de remboursement des mesures radicales est de l'ordre de 6 à 9 ans suivant les appareils.

Sur la base des résultats escomptés pour les mesures radicales, une estimation de la consommation électrique d'un ménage danois indique que celle-ci pourrait être de 850 kWh par an, alors que le même ménage équipé des meilleurs appareils disponibles en 1979 consommerait 2800 kWh par an (151).

TABLEAU III

POSSIBILITES D'AMELIORATIONS TECHNIQUES DES APPAREILS MENAGERS

	Etude Américaine (152)		Etude Danoise (150)				Mesures radicales	%
	1978	Mesures proposées	1978	Mesures modérées	Mesures fortes	Mesures radicales		
Réfrigérateurs 411\$/220\$	FEE	634	146	233	402	892	2/kWh/j	
	CR	34	100	63	36	16	%	
Congélateurs 690\$/250\$	FEE	642	114	190	338	629	2/kWh/j	
	CR	52	100	60	34	18	%	
Laves-linge	FEE	-	1.25	1.57	3.6	10.3	kg/kWh	
	CR	-	100	79	35	12	%	
Sèches-linge	FEE	1.45	1.15	1.64	2.77	5.54	kg/kWh	
	CR	82	100	70	42	21	%	
Four électriques 111\$/50\$	FEE	14	15	20	22	35	%	
	CR	86	100	75	62	45	%	
cuisson à l'électricité	FEE	-	15	16	28	28	%	
	CR	-	100	94	54	54	%	
cuisson au gaz	FEE	45	-	-	-	-	-	
	CR	68	-	-	-	-	-	

FEE = facteur d'efficacité énergétique

CR = consommation relative aux appareils actuels

CHAPITRE V

ÉTUDES STATISTIQUES ET ÉCONOMIQUES

S'il est important d'acquérir une connaissance approfondie du pourquoi et du comment de la consommation énergétique d'un bâtiment donné, il est également essentiel d'avoir une idée d'ensemble du parc immobilier, de sa consommation énergétique, des possibilités d'amélioration thermique, des coûts et de la rentabilité économique de ceux-ci, etc.

1) Statistiques de consommation

Dans ce domaine un travail très important a été entrepris par la SAGES (114) qui a pu, sur la base de questionnaires envoyés aux propriétaires d'immeubles, établir des statistiques de consommation en terme d'indice énergétique. La valeur moyenne pour l'énergie de chauffage et l'eau chaude s'établit à 825 MJ/m² an (767 pour les maisons individuelles, 825 pour les immeubles d'habitation, 800 pour les écoles, 800 pour les immeubles administratifs sans climatisation et 1100 pour les immeubles administratifs avec climatisation). Ces valeurs doivent être comparées à celles des bâtiments-pilote comme nous le faisons à la figure II.

Trois conclusions intéressantes sortent des détails de l'étude: 1) la dispersion de consommation est très grande (par exemple le nombre de maisons avec E plus petit que 500 est à peu près égal au nombre de maisons avec E plus grand que 1000 et égal au quart des maisons avec E = 850). 2) la corrélation avec l'année de construction est très nette, les immeubles construits en 1965 consomment un bon tiers de plus que les immeubles construits en 1940. 3) la consommation augmente fortement avec la puissance installée (en W/m²), ce qui montre clairement l'effet du surdimensionnement des chaudières. Ce surdimensionnement est aussi illustré par la valeur moyenne de la puissance installée qui est de 150 W/m², alors que 60 à 80 W/m² sont en général suffisants.

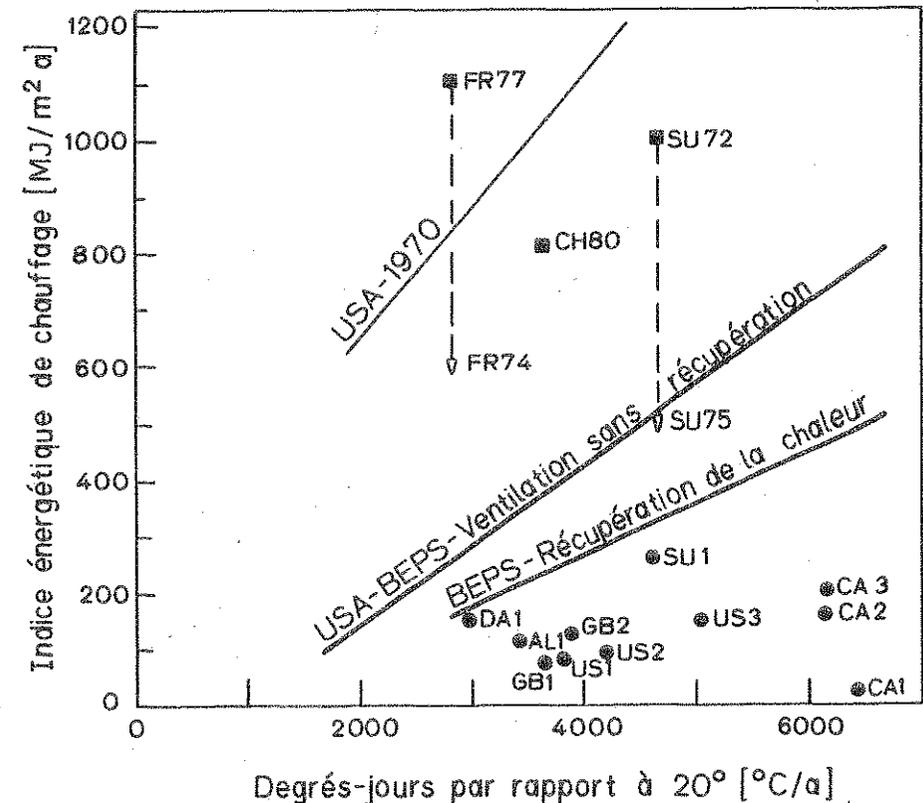


Figure II

Indices énergétiques de chauffage en fonction du climat pour le parc immobilier (■) et des maisons-pilote (●)

Ce genre de statistiques existe aussi à l'étranger. En corrigeant les données pour tenir compte de la différence du nombre de degrés-jour (40), on a

Pays	Année	Indice Energétique Equivalent
France	1977	1500 MJ/m ² an
Etats-Unis	1970	1100 MJ/m ² an
Suisse	1979	825 MJ/m ² an
Suède	1972	800 MJ/m ² an

Dans ce tableau, le nombre de degrés-jours moyens en Suisse a été pris à 3650 (par rapport à 20⁰) et les données internationales ont été normalisées à cette valeur.

Ce tableau montre que la moyenne suisse (825 MJ/m²an) est relativement bonne par rapport aux moyennes internationales.

Les statistiques de consommation internationales (40) sont données dans la figure II , qui donne l'indice énergétique en fonction des degrés-jours(rapportés à 20⁰). Les lignes donnent la moyenne aux USA en 1970, les résultats théoriques de normes de construction à infiltration d'air normal et à basse infiltration avec récupération de la chaleur, la moyenne en France est FR77, le résultat (estimé) des nouvelles normes françaises est FR74. La moyenne suédoise est SU72, le résultat (estimé) des nouvelles normes suédoises est SU75. La moyenne suisse est CH72. D'autres points sur la figure correspondent à des maisons-pilote que nous avons décrites dans le Chapitre I.

TABEAU IV

INDICES ENERGETIQUES NORMALISES DE BÂTIMENTS SUISSES STANDARDS
ET DE MAISONS A HAUTE ISOLATION

MJ/m ²	Chauffage	Eau Chaude	Electricité	Total
1500 villas Suisse (114)	767	100	108	975
20'000 appartements Suisse (114)	825	80/35	35/80	940
24 maisons Ecosse (49)	120	124	124	368
5 maisons Suède (60)	215	125	85	425

Les indices énergétiques établis en Suisse peuvent aussi être comparés de façon plus détaillée à ceux de diverses maisons expérimentales à haute isolation. C'est ce que nous avons fait dans le tableau IV.

2) Etudes typologiques

Un autre type d'étude statistique consiste à classer le parc immobilier en types d'immeubles selon un certain nombre de critères: âge, consommation d'énergie, possibilités d'améliorations thermiques, possibilités d'appoint solaire etc., afin de pouvoir prédire avec précision les effets éventuels d'une campagne d'amélioration thermique.

Une étude de ce genre est en cours dans le canton de Genève par le groupe Energo pour le compte de la Commission Cantonale en matière d'énergie et sera terminée en été 81. Des études semblables sont en cours dans d'autres cantons, en particulier dans le canton de Vaud par l'Institut de Recherche sur l'Environnement Construit (IREC). Au niveau national, l'Institut Battelle à Genève a fait une compilation des données existantes concernant la répartition de la consommation d'énergie des bâtiments en Suisse selon les différents types (164).

3) Le "Budget Energie"

De grands efforts ont été faits ces dernières années pour évaluer la rentabilité économique des mesures de conservation de l'énergie. C'est ainsi que de nombreuses méthodes ont été élaborées afin de pouvoir comparer entre elles diverses mesures possibles ou optimiser l'application d'une ou d'un ensemble de mesures dans le cas d'une construction ou d'une rénovation donnée.

Dans les paragraphes suivants, nous allons exposer de façon élémentaire les principales méthodes utilisées, sans entrer dans les complications inévitables qui s'introduisent lorsqu'on veut tenir compte de façon complète de facteurs économiques tels que l'augmentation du prix de l'énergie, l'inflation, les mesures fiscales, etc.

Afin de situer le problème économique dans un contexte concret, il est intéressant de dresser le "budget énergie" d'un ménage habitant dans une villa-suisse-type, telle qu'elle est définie par la moyenne des statistiques de consommation présentée au paragraphe précédent:

"Budget énergie" annuel d'une villa suisse de 180 m ² chauffée par une chaudière combinée au mazout				
	Indice Énergétique	Consommation Annuelle	Prix de l'Énergie	Dépense Annuelle
Chauffage	753 MJ/m ²	3227 kg	0.7 Fr/kg	2256.- Fr
Eau chaude	126 MJ/m ²	540 kg	0.7 Fr/kg	378.- Fr
Electricité	108 MJ/m ²	5400 kWh	0.12 Fr/kWh	648.- Fr
Voiture	10 l/100km	1500 l	1.2 Fr/l	1800.- Fr

A titre de comparaison, nous avons inclus dans ce tableau la consommation d'essence d'une voiture parcourant 15'000 km par année.

Les chiffres de ce budget correspondent uniquement aux dépenses faites pour les achats de combustibles et d'électricité. Il faudrait, pour être complet, leur ajouter les frais de fonctionnement et d'entretien des installations. Toutefois, même sous cette forme, ces chiffres montrent qu'à l'heure actuelle encore, les dépenses pour l'énergie ne représentent qu'une petite fraction du budget total d'un ménage. Cette situation change quelque peu si l'on compare ce "budget énergie" au loyer. En 1978, c'est-à-dire avant la forte hausse du prix du mazout de 1979/1980, le "budget énergie" moyen suisse représentait déjà près de 20% du loyer total (42). Cependant, pour diminuer de façon sensible la consommation énergétique pour des mesures de conservation de l'énergie, il faut souvent investir une somme d'argent relativement considérable par rapport à la réduction du "budget énergie" annuel escomptée. Dans ces conditions, la rentabilité économique des mesures de conservation de l'énergie doit être soigneusement étudiée de façon à ce que les mesures les plus rentables puissent être appliquées en priorité et avec succès.

4) Rentabilité économique des mesures de conservation de l'énergie

Considérons par exemple un projet de construction ou de rénovation pour lequel l'investissement initial total est de $I(\text{Fr})$ et la consommation énergétique annuelle de $Q(\text{MJ}/\text{a})$. Le premier problème économique consiste à établir des critères qui permettent d'évaluer la rentabilité d'un investissement supplémentaire $\Delta I(\text{Fr})$ consenti dans le but de réduire la consommation énergétique annuelle par une quantité $\Delta Q(\text{MJ}/\text{a})$. Une telle réduction peut être obtenue par une ou par plusieurs combinaisons de mesures qui concernent, soit les composants actifs ou passifs du bâtiment (mesures d'ordre technique), soit la façon dont l'énergie est utilisée dans le bâtiment (mesures d'ordre organisationnel, par exemple: formation des chauffeurs, installation de répartiteurs pour les décomptes individuels de frais de chauffage, régulation programmée de la température des locaux,

prescriptions imposant des réserves minimales de combustible de chauffage, etc. Certaines de ces mesures peuvent impliquer des frais d'exploitation pour le fonctionnement et l'entretien. Finalement, pour chaque mesure ou ensemble de mesures, il se pose le problème du mode de financement. Ce dernier problème n'est pas simple, en particulier du fait que certaines mesures de conservation concernent des composants dont les durées de vie physiques sont différentes. Par exemple, alors que la durée de vie physique du corps d'un bâtiment est de l'ordre de 80-100 ans, celle des fenêtres est de l'ordre de 30-50 ans et celle d'un brûleur à mazout de seulement 10-20 ans. Cette durée de vie physique détermine la période maximum de l'amortissement possible. Toutefois, dans les calculs économiques, on ne peut pas envisager des périodes plus longues que la durée maximum des prêts consentis pour les banques. Il y a donc lieu, pour chaque mesure de conservation, de faire intervenir une durée de vie économique (qui correspond en général à la durée de l'amortissement), par rapport à laquelle la mesure en question doit être rentable.

Un calcul de rentabilité économique fait ainsi intervenir au moins six paramètres principaux, en général spécifiques à une mesure donnée:

- $\Delta I(\text{Fr})$: Investissement initial supplémentaire total
- $\Delta M(\text{Fr}/\text{a})$: Frais d'exploitations annuels
- $\Delta Q(\text{MJ}/\text{a})$: Energie conservée par année
- $c(\text{Fr}/\text{MJ})$: Prix unitaire de l'énergie
- $n(\text{a})$: Durée de vie économique
- $r(\%)$: Taux d'intérêt

Le critère fondamental sur lequel se base la majorité des calculs de rentabilité économique est l'idée que pour être "rentable", la somme totale d'argent escomptée, équivalente à l'énergie conservée pendant toute la durée de vie économique de la mesure considérée, doit être supérieure à l'investissement initial total.

En négligeant, pour commencer, l'effet des taux d'intérêts, d'augmentation des prix de l'énergie ou d'inflation, etc., ce critère s'écrit simplement de la façon suivante:

$$\Delta I \leq n (c \Delta Q - \Delta M)$$

Comme la quantité entre parenthèses n'est autre que la somme maximum disponible chaque année pour rembourser l'investissement initial et n le nombre d'années considérées, ce critère doit être absolument satisfait, quelles que soient les autres conditions, pour que la mesure puisse être rentable. Il est intéressant de noter, par rapport à ce critère très simple, que l'effet de l'augmentation du prix de l'énergie, de l'inflation ou des mesures d'encouragements, ne peuvent que renforcer la rentabilité. Par contre, l'effet du taux d'intérêt correspondant à l'investissement initial, si celui-ci est couvert par un emprunt, ou en compétition financière avec un autre type d'investissement, va dans le sens opposé. Cela est évidemment dû au fait que le paiement de l'intérêt de la dette diminue la somme d'argent disponible chaque année pour l'amortissement de la dette. Il est donc indispensable de faire intervenir ce taux d'intérêt et la méthode généralement utilisée consiste à admettre un remboursement de l'investissement par des annuités constantes. Cette méthode permet de garder le critère ci-dessus sous la même forme, à condition d'y remplacer n par un facteur d'actualisation* (*discount factor*) $D(n,r)$ qui est fonction de ce nombre d'années et du taux d'intérêt:

$$\Delta I \leq D(n,r) \cdot (c \Delta Q - \Delta M)$$

*
$$D(n,r) = \sum_{t=1}^{t=n} (1+r)^{-t} = \frac{1}{r} [1 - (1+r)^{-n}] \leq n$$

5) Indicateurs de rentabilité économique

A partir d'un critère de rentabilité tel que celui introduit au paragraphe précédent, on peut définir divers indicateurs de rentabilité. Ces indicateurs se calculent en résolvant la relation finale du paragraphe précédent, prise au seuil de rentabilité, par rapport à l'une des trois variables n, r ou c, en gardant les deux autres fixes (voir Appendice III pour les détails). Les trois indicateurs ainsi obtenus ont chacun une signification simple et permettent la comparaison de plusieurs mesures entre elles du point de vue économique:

a) prix équivalent de l'énergie (*equivalent energy cost*)

Cet indicateur est obtenu en divisant le coût total annuel de l'investissement (amortissement + intérêts + frais d'exploitation) par la quantité d'énergie conservée:

$$c_e = (\Delta I/D + \Delta M) / \Delta Q = \Delta I/n \Delta Q$$

Ce coût équivalent permet de comparer l'effet de la mesure de conservation au prix de l'énergie. En particulier, ce coût équivalent doit être inférieur ou égal au prix actuel ou futur de l'énergie. Cet indicateur est aussi à la base de certaines méthodes simplifiées d'optimisation des mesures de conservation de l'énergie (44).

Dans certains cas, il arrive que l'on utilise comme indicateur non pas c_e mais son inverse $1/c_e$. On parle alors du rendement énergétique (*energy return*) de la mesure de conservation (165).

b) période de remboursement (*pay-back period*)

Cet indicateur n'est rien d'autre que la période minimum nécessaire pour que la somme totale d'argent économisée par la mesure de conservation considérée soit égale au capital initial investi. En première approximation:

$$n_r = \Delta I / (c \Delta Q - \Delta M)$$

En pratique, pour des taux d'intérêts et d'augmentation du prix de l'énergie raisonnables, il se trouve que cette approximation est relativement bonne pour des mesures rentables dont la période de remboursement est de l'ordre de 5 ans (166).

L'intérêt majeur de cet indicateur est qu'il permet de mettre en perspective la rentabilité de la mesure de conservation avec l'horizon économique de celui qui fait l'investissement. En effet, et ceci plus particulièrement pour les consommateurs, cet horizon est en général très court, de quelques années au plus (166). Dans ces conditions, la "période de remboursement" est probablement le "meilleur" indicateur car il indique la durée minimum qui permet aux économies réalisées de couvrir l'investissement initial, et le moment à partir duquel la totalité de ces économies constitue un bénéfice net pour le consommateur.

c) taux de rendement interne (*internal rate of return*)

Cet indicateur consiste à calculer le taux d'intérêt d'un placement qui aurait le même rendement financier que celui procuré pour la somme nette équivalent à l'énergie conservée annuellement. En première approximation:

$$r_i = (c \Delta Q - \Delta M) / \Delta I$$

Cet indicateur est souvent utilisé par les économistes car il permet à un investisseur de comparer le rendement du capital investi pour réaliser une ou plusieurs mesures de conservation au rendement d'un autre investissement possible pour le même capital. D'autre part, ce taux de rendement interne est aussi directement comparable à des taux tels que celui de l'inflation, de l'augmentation du prix de l'énergie. Ainsi, en première approximation, le taux d'inflation et le taux d'augmentation du prix de l'énergie s'ajoutent au taux de rendement interne (167). De cette façon, par exemple, on peut estimer quel devrait être le taux d'augmentation du prix de l'énergie pour qu'une mesure non rentable (r_i inférieur au taux d'intérêt du marché) devienne rentable.

d) exemples d'applications

Afin d'illustrer l'utilisation pratique des différents indicateurs ci-dessus, nous avons rassemblé ceux-ci pour un ensemble de mesures de conservation possibles (166) dans le tableau V. En présentant ces chiffres sous forme d'un tableau ordonné selon l'un de ces indicateurs, on constate que ceux-ci ne sont pas strictement équivalents. Néanmoins, en examinant ce tableau ainsi que d'autres semblables établis par divers économistes (168) on peut faire les constatations suivantes:

- Les mesures de conservation les plus rentables sont en général celles qui concernent d'abord des mesures organisationnelles, ensuite celles par lesquelles l'efficacité de composants actifs est augmentée, finalement celles qui concernent l'augmentation de l'isolation thermique et le recours aux énergies alternatives.
- Les mesures de conservation sont en général plus rentables pour les bâtiments neufs que pour les bâtiments à rénover.
- La diminution de la consommation énergétique des équipements ménagers est en général très rentable.

Afin que ce genre de comparaison et de classification ne conduise pas à des conclusions erronées, il y a lieu de faire deux remarques importantes:

1. Les calculs ci-dessus sont faits avec des coûts actuels qui sont en général nettement défavorables pour les techniques nouvelles. De plus, les indicateurs sont très sensibles au prix de l'énergie. Une augmentation sensible de celui-ci peut complètement changer la situation.
2. Toute mesure de conservation de l'énergie même faiblement rentable, est toujours intéressante du point de vue de l'énergie conservée. Celle-ci peut même, et c'est en particulier le cas de l'isolation supplémentaire des murs, entraîner une économie considérable d'énergie, lorsque l'on intègre celle-ci sur toute

TABLEAU V

	Q (GJ)	ΔQ (%)	ΔQ (GJ)	ΔI (Fr)	ΔI/ΔQ (Fr/GJ)	n	c _e (Fr/GJ)	n _r	r _i	c _e (Fr/t)
Formation des chauffeurs	14'720	30	4'416	8'150	1.85	3	0.53	0.14	6.90	22
Contrôle amélioré de l'air conditionné	138	6	8.28	196	23.62	10	2.48	1.6	0.61	104
Remplacement des moteurs électriques	51	30	15.18	872	57.45	10	6.73	2.1	0.18	285
Amélioration de l'éclairage	15'180	12	1'822	57'050	31.52	15	2.66	2.2	0.40	112
Réduction des infiltrations d'air	207	10	20.70	652	31.50	15	2.48	2.5	0.41	104
Décompte individuel des frais de chauffage	1'656	20	331	12'062	36.42	15	3.19	3.1	0.33	134
Vannes thermostatiques	945	10	9.66	4'173	432	15	3.89	3.7	0.28	163
Amélioration de l'équipement ménager	5,51	12	0.37	52.60	88.59	10	9.56	4.3	0.09	402
Récupération de la chaleur de l'air	16'560	15	2'484	174'410	70.21	15	5.84	6.0	0.17	245
Remplacement de la chaudière	460	25	115	9'128	79.37	15	6.73	7.0	0.14	283
Isolation d'une villa à la construction	166	33	55.20	7'661	139	30	7.08	13.3	0.08	297
Pompe à chaleur	230	58	133	18'745	141	15	10.97	13.7	0.04	461
Double ou triple vitrage	2'392	15	359	54'605	152	30	7.79	15.1	0.07	327
Isolation d'une villa existante	129	15	19.32	3'260	169	30	8.67	17.1	0.06	364
Chauffage à distance	258'980	25	64'745	20.10 ⁶	302	50	11.68	> 25	0.03	491

Taux d'intérêt réel, r = 3%. Prix actuel de l'énergie, c = 12.8 Fr/GJ = 535 Fr/t de mazout

la durée de vie du bâtiment, même si l'investissement initial qui est amorti sur une partie seulement de cette durée de vie, n'est pas très attractif du point de vue financier.

6) Optimisation des mesures de conservation de l'énergie

Dans le cas d'un bâtiment complet, le problème de l'optimisation globale d'un ensemble de mesures de conservation de l'énergie est un problème en apparence très complexe. En fait, si les calculs nécessaires sont en effet généralement volumineux et font intervenir un grand nombre de paramètres, les principes de base sont relativement simples. Il faut d'abord constater qu'il y a trois niveaux d'optimisation possibles.

1. Minimisation du coût initial total. C'est la méthode traditionnelle utilisée à l'époque où les prix de l'énergie étaient suffisamment bas pour que le "budget énergie" des locataires resta négligeable par rapport au loyer. Dans ce cas, seuls les coûts initiaux de la construction et des installations de chauffage/ventilation interviennent directement et la consommation en énergie joue un rôle secondaire.

2. Minimisation du coût annuel total. Dans ce cas, on minimise le coût annuel total en additionnant les coûts d'amortissements et les intérêts annuels correspondant aux composants actifs et passifs qui contribuent à la consommation énergétique du bâtiment, les frais d'exploitation éventuels et finalement le coût de la consommation énergétique annuelle totale.

3. Minimisation du coût du cycle de vie (life cycle cost method). Dans ce cas, on procède de la même façon que dans le cas précédent, avec toutefois la différence que l'on additionne aux coûts des investissements initiaux, l'ensemble des coûts annuels d'exploitations et de consommation énergétique totalisés sur toute la durée de vie économique du bâtiment. Cette méthode permet d'optimiser le

le bâtiment en y incorporant simultanément toutes les mesures de conservation de l'énergie effectivement rentables, et de minimiser du même coup le budget énergie globale des locataires.

Reprenons en détails des ceux dernières méthodes dont les descriptions mathématiques sont résumées dans l'Appendice III:

a) minimisation du coût annuel total

Dans cette méthode, qui est aussi appelée "méthode des annuités", on suppose le plus souvent que le remboursement des dettes se fait par annuités constantes. Comme aussi on ne considère en général avec cette méthode que le coût annuel moyen, on néglige en première approximation les effets possibles de l'augmentation du prix de l'énergie et ceux des autres paramètres économiques. Dans ce cas, le coût annuel total s'écrit sous la forme d'une somme de termes qui sont les annuités correspondantes à chacun des investissements partiels, les frais d'exploitations annuels correspondant éventuels et les dépenses énergétiques annuelles totales. Le processus d'optimisation consiste alors à calculer cette somme pour chaque configuration possible (épaisseur de l'isolation, double ou triple vitrage, pompe à chaleur ou chauffage au mazout, etc) jusqu'à ce que le minimum soit trouvé.

L'intérêt principal de cette méthode est qu'elle permet de faire une optimisation globale d'un bâtiment sans avoir nécessairement recours pour cela à un programme d'ordinateur. Elle est aussi en général suffisante pour l'optimisation d'un cas de rénovation thermique pas trop compliqué ou en tout cas pour optimiser une mesure de conservation isolée. Cette méthode est aussi celle qui est préconisée, pour les cas les plus simples, par divers manuels techniques de la Confédération (44,45).

b) Minimisation du coût du cycle de vie

Si on veut faire une optimisation plus complète qui puisse éventuellement tenir compte de paramètres tels que:

- la durée de vie individuelle de chacun des composants;
- l'augmentation des prix de l'énergie (mazout, électricité etc);
- les paramètres économiques tels que l'inflation, les taxes, les frais d'assurance, les mesures fiscales d'encouragements, etc;
- etc.

il est alors utile de faire une analyse économique qui minimise le coût du cycle de vie. Avec une telle méthode, chaque terme de la somme qui constitue la fonction de coût total à minimiser est en général affecté d'un facteur d'actualisation différent, de telle sorte que la valeur actuelle initiale de chacun de ces termes tient compte de tous les paramètres ci-dessus. Les calculs sont alors assez laborieux et nécessitent en pratique de recourir à un ordinateur. Comme le plus souvent ce genre de calcul complet ne peut se concevoir que conjointement à une analyse énergétique détaillée du bâtiment avec un programme d'ordinateur, cette nécessité n'est pas un handicap réel.

Par exemple, la méthode du coût du cycle de vie a été utilisée aux Etats-Unis par le Département de l'Energie, avec le programme DOE-II, pour analyser du point de vue économique son nouveau standard de performance énergétique des bâtiments (BEPS) (169). La figure III donne un exemple de résultat de cette étude pour une maison individuelle située à Chicago. Elle montre qu'avec des mesures conventionnelles, la consommation énergétique peut être abaissée de 33% et qu'avec une diminution des infiltrations incontrôlées et l'installation d'un récupérateur de chaleur air-air pour la ventilation, de 58% au-dessous de la consommation calculée d'après les standards de 1975. Les calculs sont faits avec les prix de l'énergie américains de 1978 et pour un comportement des habitants et un confort constant. Dans cette figure chaque point représente une configuration donnée (genre de chauffage, genre de vitrage, épaisseur d'isolation,...) pour laquelle on a calculé l'indice énergétique et le coût du cycle de vie divisé par la durée de l'amortissement.

Coût du cycle de vie et indice énergétique de chauffage calculé pour différents types de chauffage en fonction du niveau de chauffage en fonction du niveau d'isolation et de récupération de la chaleur pour une maison située dans un climat de 3700 degrés-jours.

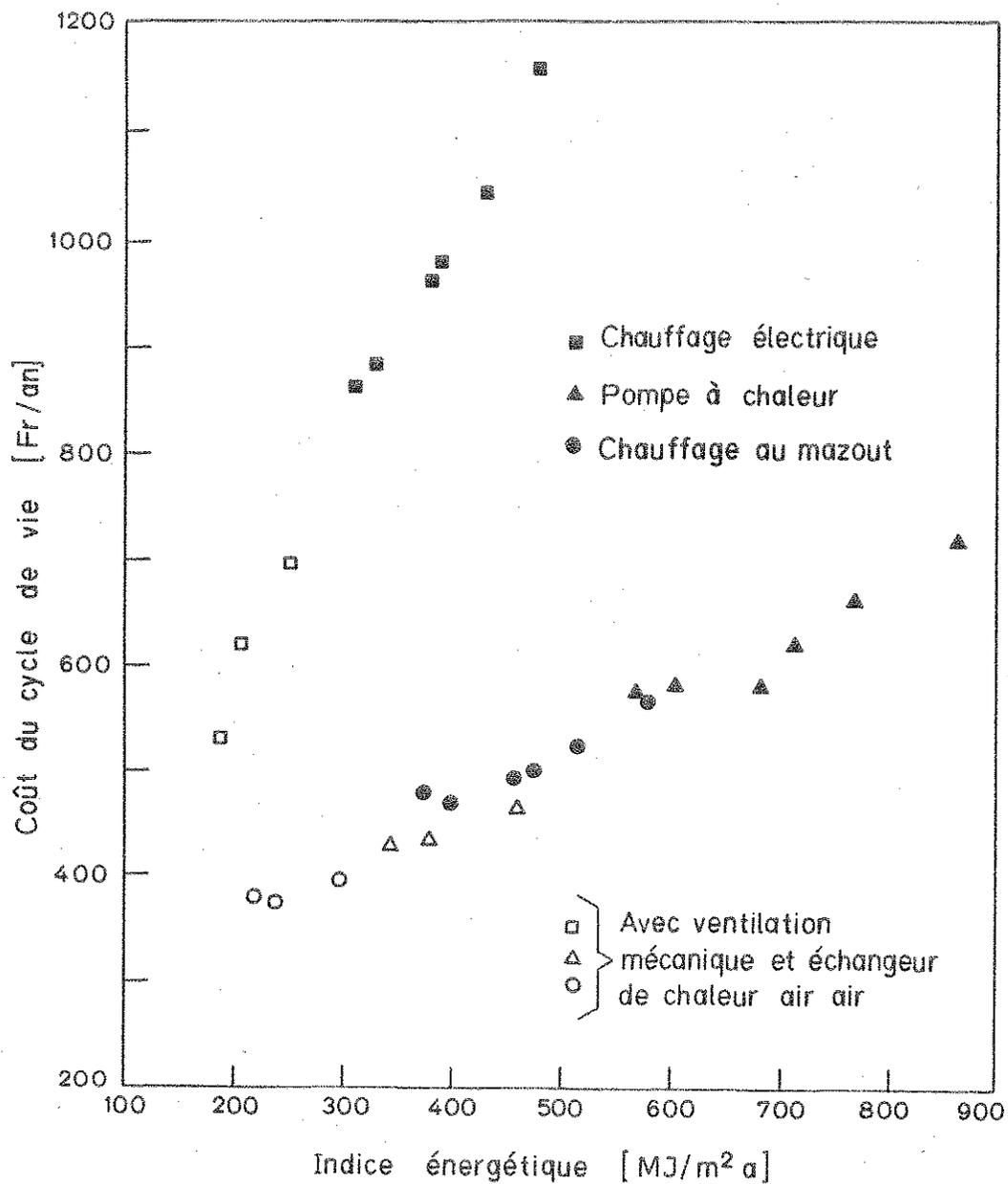


Figure III

Le concept du coût du cycle de vie peut aussi être utilisé sous diverses formes, entre autres pour comparer les rentabilités économiques de diverses solutions, par exemple dans le cadre d'un exercice d'intégration (112), ou pour les équipements ménagers (152).

c) Optimisation du coût énergétique

Une remarque finale sur le problème de l'optimisation énergétique globale des bâtiments s'impose. En effet, on peut faire une optimisation qui minimise soit l'investissement financier (par une des méthodes telles que celles décrites ci-dessus) soit directement la consommation énergétique. Dans le deuxième cas, il faut à la limite tenir compte du coût énergétique de la construction. Le coût énergétique tient compte des "énergies grises" c'est-à-dire de l'énergie dépensée pour la construction elle-même, pour la fabrication des isolants, etc. Cette énergie grise à la construction peut éventuellement dépasser celle qui est conservée au moment de l'exploitation. Une étude sur ce problème est en cours à l'EPFL et des résultats préliminaires montrent que les coûts énergétiques totaux de la construction diminuent en fait de manière quasi linéaire avec les coûts de l'énergie d'exploitation. Les coûts énergétiques n'ont donc pas une importance décisive pour les immeubles étudiés (170).

7) Potentiel global de la conservation de l'énergie

Un problème important en rapport avec l'impact possible des mesures de conservation de l'énergie est celui de leur effet global sur la consommation énergétique totale d'un pays. En Suisse, dans le cadre de la Conception Globale de l'Energie, la Confédération a financé une étude sur ce problème ainsi que sur l'influence des mesures fiscales et juridiques (171). En ce qui concerne ce deuxième aspect, une autre étude est financée par le Fonds National de la Recherche Scientifique (36).

Une thèse, présentée à fin 1979 par un économiste à l'Ecole des Hautes Etudes Commerciales de St Gall, a montré que si toutes les mesures de conservation de l'énergie possibles étaient réalisées, le niveau de consommation énergétique de la Suisse en l'an 2000 pourrait être au même niveau que celui relevé en 1975 (172). Des conclusions semblables ont été obtenues pour d'autres pays, et en particulier pour l'Angleterre (173).

CHAPITRE VI

ESSAI DE SYNTHÈSE ET RECOMMANDATIONS

Après avoir écrit une revue des recherches actuelles dans le domaine de la conservation de l'énergie, on est naturellement amené à certaines réflexions générales sur les résultats actuels de la recherche, et sur l'importance et l'orientation des recherches futures. Rappelons tout d'abord qu'il existe aujourd'hui de très nombreux exemples de maisons-pilote dont la consommation pour le chauffage est de l'ordre de $100 \text{ MJ/m}^2 \text{ an}$, alors que la moyenne suisse est de $750 \text{ MJ/m}^2 \text{ an}$. Ces maisons à basse énergie font appel à de très fortes isolations (10 à 30 cm d'isolant, $k \approx 0.1 - 0.3 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{K}$), à une architecture et à une orientation qui optimisent au mieux les apports solaires passifs, à une réduction maximale des infiltrations d'air incontrôlées et le plus souvent à des systèmes de ventilation mécanique avec récupération de la chaleur. On peut donc affirmer d'ores et déjà que la possibilité technique de construire des maisons neuves à basse énergie est très amplement démontrée.

Etant donné cependant que la grande majorité du parc immobilier actuel sera encore debout en l'an 2000, le problème de la rénovation thermique des bâtiments existants est évidemment lui aussi primordial. Dans ce domaine de nombreuses expériences ont été faites et des économies de l'ordre de 50% ne sont pas rares, et il est possible de faire descendre la consommation autour de $250 \text{ MJ/m}^2 \text{ an}$. Tout comme dans la construction des bâtiments nouveaux à très faible consommation d'énergie, l'aspect le plus important est celui de la qualité des travaux, aussi bien au niveau de la conception que de l'exécution. Dans certains cas le succès a été particulièrement bon, mais aussi parfois insignifiant ou nul. Il semble que souvent les mauvais résultats ont été dus soit au fait qu'on a laissé de côté une amélioration, pourtant souvent peu coûteuse, du

rendement de l'installation de chauffage, soit qu'on a favorisé l'isolation thermique sans prendre garde aux infiltrations d'air, que peu d'ingénieurs sont à même aujourd'hui de mesurer avec sérieux. Pour les bâtiments de construction relativement récente, les possibilités les plus grandes se trouvent au niveau de la réduction des pertes par échange d'air (infiltrations incontrôlées et ventilation) et de la rectification du dimensionnement des installations de chauffage, ce qui peut être fait en général sans qu'il soit forcément nécessaire de remplacer les chaudières surdimensionnées. Pour les immeubles plus anciens, l'application d'une isolation externe aussi forte que possible à l'occasion d'une réfection des façades doit être accompagnée par un ajustement correspondant du dimensionnement de l'installation de chauffage.

La majorité des expériences, que ce soit pour les bâtiments nouveaux ou la rénovation thermique, concerne les maisons individuelles. Peu d'expériences par contre ont été effectuées sur des grands immeubles locatifs. On sait pourtant déjà qu'ils devraient théoriquement consommer près de 50% de moins au m² que les villas. Cependant, ainsi que le montrent les mesures statistiques, l'indice énergétique mesuré des appartements est à peu près identique à celui des villas. Cette contradiction montre l'ampleur du travail qui reste à faire dans ce domaine.

Dans le domaine des appareils ménagers et de l'éclairage, les études démontrent également que des économies spectaculaires sont possibles, de l'ordre d'un facteur cinq ou plus; les équipements nouveaux à basse énergie peuvent représenter un marché très important dans l'avenir, et certaines compagnies, notamment japonaises, préparent de nouveaux équipements dont la faible consommation électrique pourra entraîner une diminution considérable de la consommation électrique des secteurs ménager et commercial.

Un aspect essentiel de toutes ces nouvelles techniques est évidemment leur rentabilité économique. Au prix actuel de l'énergie, cette rentabilité est déjà démontrée pour un bon nombre d'entre

elles. Pourtant, ainsi qu'il a été remarqué à la première conférence de l'AIE sur les Nouvelles Techniques de Conservation de l'Energie et leur Commercialisation à Berlin (6-10 avril 81), l'introduction de mesures intrinsèquement rentables dans le domaine résidentiel est remarquablement lent par comparaison au secteur industriel où pourtant les possibilités d'économies sont souvent plus faibles: la tendance actuelle est si modérée qu'il faudra de 15 à 20 ans pour généraliser les techniques qui sont rentables aujourd'hui déjà! Cette situation paradoxale résulte entre autre de la complexité du marché dans ce secteur et des intérêts contradictoires des nombreux acteurs dont il est composé: constructeurs, propriétaires, locataires, producteurs et revendeurs d'énergie, etc. Un autre paradoxe important relevé à la Conférence de Berlin est le fait que pratiquement partout dans le monde industrialisé, à l'exception du Japon, la consommation énergétique pour le chauffage est équivalente à environ 4000 l de mazout par logement et par an, indépendamment du climat ! Il en résulte que les économies d'énergie les plus importantes et les plus rentables pourraient être faites dans les régions relativement tempérées de ces pays, alors que les efforts les plus importants sont actuellement concentrés sur les régions les plus froides, où les maisons sont souvent déjà relativement bien isolées. On peut dire ainsi, en reprenant les conclusions d'une étude récente de la Commission des Communautés Européennes (183) que le secteur résidentiel est celui où "les économies sont à la fois les plus prometteuses et les plus incertaines". Prometteuses parce que les calculs et les études-pilote montrent sans ambiguïté qu'on peut descendre la consommation énergétique d'un facteur deux au moins, incertaines parce qu'il existe toutes sortes d'obstacles d'ailleurs assez bien répertoriés (variation des conditions locales, insuffisance de la formation des ingénieurs, inexistence de certificat de compétence pour les ingénieurs appelés à faire ces travaux, opposition locataire-propriétaire, insuffisance des possibilités de crédit à bas intérêt pour les améliorations thermiques, etc).

Quels peuvent être les buts de la recherche dans les années qui viennent ? Sans vouloir être ni exhaustif ni péremptoire, on peut avancer un certain nombre d'idées. Alors qu'on dispose aujourd'hui d'une information technique déjà très abondante, on ne sait que très peu de choses sur la faisabilité sociale des mesures d'économies d'énergie. Au niveau macro-économique d'un grand ensemble de bâtiments, et en particulier d'une région ou d'un pays, il faut ainsi envisager les problèmes socio-politiques posés par la rénovation thermique et étudier les diverses mesures qui permettent d'encourager ce type de rénovation à grande échelle. La recherche dans ce domaine doit aboutir à l'élaboration de concepts et de stratégies détaillés, autant pour la technique même de la rénovation thermique que pour l'approche globale du problème au niveau d'une région ou d'un pays. Il se fait semble-t-il aujourd'hui de nombreux travaux d'amélioration thermique. Il serait du plus grand intérêt de tirer le maximum d'informations statistiques de ce qui se fait de toute façon, et de savoir quelles en ont été les motivations, quel en est le succès, le coût et quelles sont les techniques employées. Il serait également utile qu'une équipe d'experts puisse analyser de plus près les cas où le succès a été particulièrement bon et également ceux où il a été insignifiant ou nul.

Ces informations statistiques seraient plus faciles à obtenir si on définissait, en collaboration avec les associations professionnelles, les données techniques minimales à établir lors d'une rénovation. Un bâtiment rénové devrait fournir un certain nombre de données telles que consommation spécifique (avant et après la rénovation s'il y a lieu), caractéristiques générales du bâtiment, nombre de degrés-jour et surcoût économique. En fait, il est malheureusement souvent très difficile d'obtenir ces renseignements. Ces études statistiques permettraient de mieux comprendre la disparité entre ce qu'on peut attendre si tout est fait très bien et ce qui est réalisé dans la pratique par des ingénieurs ou des architectes qui n'ont par nécessité pas une formation approfondie dans ces domaines.

Ceci est un problème fondamental de toute campagne d'économies d'énergie et mérite d'être étudié à fond sur le plan national. Ces études statistiques doivent être complétées et affinées en études typologiques qui permettraient de classer les types de rénovation en catégories dépendant de l'âge du bâtiment, sa situation géographique, ses caractéristiques de construction, sa destination et son occupation, etc. Ces études typologiques doivent être faites séparément pour les enveloppes et les systèmes de chauffage. Ainsi qu'il a été souligné dans le texte, on connaît peu de choses sur la rentabilité économique des rénovations de bâtiments. Des études micro-économiques sur ces rentabilités seraient extrêmement utiles.

Des études statistiques et des banques de données sont également nécessaires pour les appareils ménagers. Ces études seraient essentielles pour préparer des normes d'étiquetage, des normes de consommation ou simplement l'information des consommateurs.

Le développement et la mise à disposition de méthodes simples pour le diagnostic énergétique (mesures sur la maison et méthodes de calcul sur calculatrice portable) est une priorité absolue. Ces diagnostics doivent être à même de calculer non seulement les rénovations et leurs effets énergétiques, mais également de présenter ces rénovations par ordre de rentabilité décroissante. Il faut en effet que les agences officielles, les constructeurs et les futurs clients disposent de données solides sur ce que coûtera durant vingt ou trente ans ("life-cycle costs") une construction ou une autre, et disposent également de données précises sur la rentabilité économique des améliorations thermiques. Les conditions techniques et économiques pouvant varier d'une région à l'autre, et d'un type d'immeuble à l'autre au sein d'une même région, il importe de ne pas se limiter à un très petit nombre de rénovations-pilote mais au contraire de trouver une manière d'encourager un assez grand nombre de ces expériences-pilote de rénovation.

Ceci ne veut pas dire qu'il faut financer l'ensemble de ces opérations, ni d'ailleurs les instrumenter toutes de façon très complète, mais soutenir financièrement un contrôle technique et un contrôle des résultats qui soit scientifiquement crédible et dont on puisse tirer des enseignements valables. Les cantons ont d'ailleurs un rôle important à jouer dans ce domaine. Ces expériences-pilote doivent concerner de façon prioritaire les grands immeubles locatifs qui forment une part considérable du parc immobilier et qui n'ont fait l'objet jusqu'à présent que de très peu d'expériences de ce genre. Etant donné que la Suisse comporte une proportion élevée de ce genre d'immeubles, il serait naturel qu'elle joue un rôle de leader dans ce domaine. Le travail a d'ailleurs commencé avec les expériences de la Limmatstrasse et de La Sallaz, mais on pourrait et on devrait faire beaucoup plus. Il y aurait lieu également de faire une expérience sur un grand immeuble locatif neuf à très basse consommation d'énergie (moins de 100 MJ/m² an pour le chauffage). Cette expérience serait à notre connaissance une première mondiale.

Il faut souligner l'importance de développer les études fondamentales de physique du bâtiment. Il finit toujours par se poser des problèmes fondamentaux de compréhension ou de mise à jour sur les recherches acquises à l'étranger, et seules des équipes de haut niveau peuvent maintenir ces connaissances.

La consommation d'énergie pour le chauffage dépend en bonne partie du taux de renouvellement d'air. Dans un bâtiment standard cette partie correspond à 20-30% du total. Cependant, dans un bâtiment à basse consommation d'énergie, et au fur et à mesure que l'isolation est augmentée, la fraction de l'énergie de chauffage utilisée pour réchauffer l'air frais augmente rapidement au-dessus de 50%. Afin de pouvoir continuer à réduire la consommation d'énergie de chauffage, il est donc nécessaire d'étudier attentivement toutes sortes de problèmes fondamentaux liés au taux de renouvellement d'air. Il faut pouvoir déterminer le taux de renouvellement

d'air avec précision dans un bâtiment donné, et l'instrumentation et les méthodes nécessaires nécessitent d'être normalisées afin que des comparaisons valables puissent être faites entre pays différents.

Dans les domaines du renouvellement et de la qualité de l'air, on peut noter les tendances suivantes:

- construction de bâtiments à infiltrations incontrôlées réduites;
- ventilation mécanique avec contrôle du débit en fonction des besoins et récupération de la chaleur;
- mesure de la qualité de l'air; appareils de détection automatique de cette qualité;
- mesure du nombre d'occupants;
- amélioration de la ventilation pour l'élimination des polluants et des fumées de tabac;
- création de secteurs réservés aux fumeurs;
- développement de nouveaux appareils pour la purification de l'air;
- contrôle et élimination des sources de pollutions;
- amélioration des systèmes de distribution de l'air.

Pour notre pays, c'est l'étude de système de ventilation avec récupération de la chaleur pour grands immeubles locatifs qui est prioritaire (systèmes centralisés ou décentralisés (un récupérateur par appartement)).

Pour en revenir aux éléments de construction, il y aurait intérêt à développer une recherche sur des matériaux isolants particulièrement adaptés aux conditions suisses.

Les vitrages représentent aussi un sujet de recherche important. Les problèmes posés pour la réalisation de vitrages super-isolés sont nombreux:

- . obtention de couches sélectives de très faible émissivité;
- . maintien d'un vide poussé (< 10⁻⁴ mm Hg) durant de nombreuses années;
- . développement de cadres ayant des caractéristiques thermiques comparables à celles du vitrage;
- . coûts de fabrication.

Les systèmes de chauffage doivent également faire l'objet de recherches. Les études sur les rendements doivent être poursuivies, mais également sur les combinaisons optimales de systèmes bivalents ou multivalents du point de vue énergétique et économique. Les maisons à basse énergie du futur auront besoin de systèmes de chauffage à très basse puissance. Des recherches sont nécessaires pour identifier les systèmes optimaux à très basse puissance. Il faut remarquer ici que les résultats de recherche sur les maisons à basse énergie n'ont eu que peu d'impact sur d'autres aspects du problème énergétique. Ainsi il apparaît de plus en plus que le chauffage électrique direct par résistance (par opposition au chauffage électrique par accumulation) s'adapte très bien à des consommations très basses à cause de sa facilité de réglage et à sa rapidité de montée en température (ces remarques ne sont naturellement valables que si ce type de chauffage est soumis à des normes de construction beaucoup plus sévères qu'actuellement, ou mieux à des normes de consommation). Par contre le chauffage à distance semble devenir, selon de nombreux experts, non rentable dans ces conditions, ainsi d'ailleurs que l'appoint solaire actif (pour le chauffage). Ceci montre la nécessité de recherches sur les systèmes de fourniture de chaleur lorsque la consommation spécifique atteint ses valeurs optimales.

On peut expliciter ces problèmes de la manière suivante:

a) Quelle est la combinaison optimum de substitution et d'économie d'énergie qui assure une conservation maximale de l'énergie ? Par exemple: faut-il construire des maisons solaires, utiliser des pompes à chaleur, ou simplement super-isoler les bâtiments et utiliser des chaudières perfectionnées ou le chauffage électrique?

b) Quel est le "meilleur" système de chauffage pour un bâtiment dans une région donnée? Faut-il utiliser un chauffage central ou le chauffage à distance? Quelles formes d'énergie faut-il choisir? Quelle est la meilleure combinaison dans un cas pour lequel un système binaire s'impose? Par exemple: chauffage solaire/mazout d'appoint, pompe à chaleur/électrique d'appoint...?

c) Quel est le "meilleur" système de chauffage dans une pièce ou un appartement d'un immeuble donné? Par exemple: central ou pièce-par-pièce, par radiateurs ou convecteurs, à basse ou haute température, dans le sol ou dans le plafond, par corps de chauffe ou à air chaud?

Tous ces problèmes sont encore mal étudiés et nécessitent des recherches théoriques et expérimentales. Cette problématique amène naturellement aux questions d'intégration urbaine et régionale des systèmes énergétiques. La consommation de l'énergie réclame une remise en cause de certains aspects de l'urbanisme, notamment la distribution et la récupération de la chaleur de l'eau, les transports et la répartition des zones. Mentionnons en particulier les domaines de recherche suivants:

- prise en compte des besoins et rejets énergétiques de différentes industries pour leur implantation relative;
- prise en compte des rejets énergétiques industriels pour les autres besoins de la communauté urbaine;
- intégration du recyclage des matériaux dans l'organisation urbaine;
- étude de systèmes optimaux de distribution et récupération de chaleur (réserve de chaleur tiède pour pompe à chaleur, dimensionnement idéal de la chaleur à distance, etc.);
- étude de systèmes intégrés de production d'électricité et de chaleur dans le contexte urbain. (Quelle est la taille idéale d'une centrale chaleur-force étant données les autres contraintes urbaines et écologiques?);
- intégration des énergies renouvelables dans la distribution d'énergie urbaine. (Faut-il brancher le solaire, le biogaz et le géothermique ainsi que les pompes à chaleur sur des installations de quartier, de zone, de ville? A quelle température?);

Un certain nombre de recherches à mener conjointement par des économistes, des techniciens et des juristes sont à entreprendre en ce qui concerne la répartition des frais de chauffage et les normes de construction. Rappelons à ce propos que les normes actuelles en Suisse sont encore assez éloignées des normes suédoises que les spécialistes s'accordent à trouver excellentes. Les idées

contenues dans le BEPS américain, basé sur des normes de consommations, méritent également une étude juridique et technique sérieuse. Du point de vue technique la répartition des frais de chauffage requiert le développement de systèmes de mesure et de contrôle qui sera d'ailleurs probablement effectué par l'industrie privée.

Il reste à mentionner les thèmes généraux de recherche concernant l'impact d'une politique de conservation de l'énergie, sur l'évolution économique du pays et sa sécurité d'approvisionnement, en particulier l'impact sur l'emploi, la croissance, la sécurité en face de crises internationales (aspect très important souligné par plusieurs études récentes de très haut niveau (184,185)), la stabilité politique et sociale etc. Un tout nouveau programme national de recherche s'adresse en partie à ces questions, et il faut s'en féliciter. Pour conclure nous citerons ce passage d'un récent rapport de la Commission des Communautés Européennes (183):

"Il apparaît en effet - et c'est notre première conclusion majeure - que la gravité du risque couru par l'Europe du fait de sa dépendance à l'égard de l'extérieur exige une politique de rationalisation dans l'usage des énergies particulièrement vigoureuse et complète. La faiblesse des progrès faits en ce sens depuis cinq ans vient à l'appui de cette proposition.

Or il résulte des travaux effectués sur les possibilités techniques de diminution des consommations énergétiques que le potentiel d'amélioration est considérable et l'état actuel de nos connaissances - évalué par des gains de 15% à 50% de la consommation selon les secteurs. Il n'est donc pas vain d'agir pour exploiter ce véritable gisement. C'est là notre deuxième conclusion majeure.

La troisième conclusion a trait à la croissance économique: l'Europe a impérativement besoin que cette croissance soit soutenue - à un taux de progression de l'ordre de 4% par an - au moins jusqu'en 1990, pour créer suffisamment d'emplois et adapter son appareil de production aux conditions nouvelles de la concurrence internationale.

Mais il n'est possible de satisfaire cette exigence - d'assurer une croissance saine, suffisante et continue - que si, dans le même temps, on se donne véritablement les moyens de minimiser la consommation d'énergie".

APPENDICE IPROGRAMME DE L'AGENCE INTERNATIONALE DE L'ENERGIE RELATIF A LA
CONSERVATION DE L'ENERGIE DANS LES BATIMENTS ET LES ENSEMBLES
COMMUNAUTAIRES

Dans l'accord relatif à ce programme (*Implementing agreement*), l'Agence Internationale de l'Energie a défini une série de projets (*Annexes*) rassemblés ci-dessous avec la description des divers sous-projets (*Subtasks*) qui les composent.

PROJET I (terminé)EVALUATION DES METHODES DE CALCUL DES BESOINS ENERGETIQUES DES
BATIMENTS

Objectifs Rassembler, comparer et évaluer divers programmes d'ordinateurs et méthodes analytiques utilisés pour calculer les besoins énergétiques des bâtiments.

Sous-Projets

- I.1. Récolter les modèles et programmes;
- I.2. Déterminer la consistance des résultats sur des bâtiments fictifs;
- I.3. Echange des résultats et accès des participants au programme d'ordinateur du laboratoire de Berkeley (DOE-II).

Participants Angleterre, Belgique, Canada, Italie, USA, Suisse.

Contribution
suisse

L'exécution de ce projet a permis à l'EMPA d'installer et d'utiliser le programme DOE.II.

PROJET II (terminé)METHODOLOGIES POUR LA PLANIFICATION ENERGETIQUE DES ENSEMBLES
COMMUNAUTAIRES

La Suisse n'a pas participé à ce projet. Le Projet VI énoncé plus loin est la continuation du Projet II.

PROJET IIIEVALUATION DES MESURES D'ECONOMIE D'ENERGIE EN MATIERE DE CHAUFFAGE
DE L'HABITAT

Objectif Permettre aux participants d'échanger leurs expériences sur le potentiel de réduction de la consommation énergétique possible par diverses mesures de rénovation thermique des bâtiments.

Sous-projets III.A. Méthodes de calcul pour la prévision des économies d'énergie dans l'habitat.

- i) Méthodes de calcul en général;
- ii) Influence des habitants;
- iii) Recommandation de méthodes de calcul;

III.B. Manuel des principes directeurs concernant la conception d'expériences, l'instrumentation et les techniques de mesures.

III.C. Evaluation d'études-pilote nationales et généralisation aux autres pays.

Participants

III.A. Danemark, Hollande, Italie, Suisse, Suède, USA.

III.B. Belgique, Hollande, Italie, Suisse, Suède, USA.

III.C. Belgique, Danemark, Suède, USA.

Contribution suisse

- III.A. Instrumentation d'un immeuble locatif par l'EPFL à Lausanne et d'une villa par l'EMPA à Maugwil (SG). Les mesures effectuées avec ces bâtiments pourront être comparés à DOE-II en particulier. Ce programme, ainsi que JAENV de l'EMPA sont utilisés pour analyser une maison à Vetlanda en Suède, et un immeuble fictif "Teknikern".
- III.B. Rédaction d'un chapitre pour le manuel sur la conception d'expériences, d'instruments et de techniques de mesures par l'EPFL et l'EMPA.

Autres activités en cours ou proposées dans le cadre du Projet III

- III.A.ii. La Suède conduit une étude sur le comportement des habitants et présentera une étude-pilote sur la base d'un immeuble-test.
- La Belgique, le Danemark et l'Italie préparent un inventaire de maisons-test et préparent de nouvelles mesures.
- III.B. L'Italie rassemble les contributions des différents participants au manuel.
- III.C. A l'initiative des USA, un séminaire sur la rénovation thermique des fenêtres s'est tenu à Delft en Hollande du 9 au 10 juin 1980. De même, un séminaire sur le "diagnostic énergétique" ("Energy audit") et la "consultation énergétique" ("House doctor") pour la rénovation thermique s'est tenu du 13 au 15 avril 1981 à Elsinore au Danemark.

III.C (suite)

Le Danemark prépare une contribution sur l'isolation supplémentaire des murs et les USA pour celle des toits.

La Suède étudie la récupération de la chaleur dans les systèmes de ventilation et les équipements de contrôle de la température individuelle dans les pièces d'habitation.

La Suisse envisage de présenter quelques unes des rénovations thermiques-pilote réalisées en Suisse: l'assainissement de la "Limmatstrasse" à Zurich, la "Maison Solaire" de Zug et certains immeubles appartenant à la Confédération.

Une sous-tâche III.D est en préparation. Son objectif sera d'étudier de manière globale le bilan thermique des vitrages.

PROJET IV.ANALYSE DE LA CONSOMMATION ENERGETIQUE D'UN IMMEUBLE COMMERCIAL A GLASGOW

Objectif Mesurer en détail les flux d'énergies qui entrent, circulent et sortent d'un bâtiment commercial. Comparer en détail ces données avec les prévisions de divers programmes de calcul.

Sous-Projets

- IV.1. Instrumentation;
- IV.2. Enregistrement et analyse des données;
- IV.3. Préparation des spécifications du bâtiment et des bandes météorologiques;
- IV.4. Calcul des performances du bâtiment;
- IV.5. Assistance aux programmeurs;
- IV.6. Documentation des résultats;
- IV.7. Réunions périodiques.

Participants Angleterre, Belgique, Canada, Suisse, USA.

Contribution suisse Le comportement énergétique du bâtiment sera simulé avec DOE-II à l'EMPA et comparé avec les données mesurées fournies par l'Université de Glasgow aux participants.

PROJET VETABLISSEMENT D'UN CENTRE SUR LES INFILTRATIONS D'AIR (AIC)

Objectif Supporter les institutions actives dans la recherche sur les infiltrations d'air par la collection, l'analyse, l'évaluation et la dissémination de données expérimentales et techniques, et par l'assistance dans la coordination des activités de recherches nationales sur les infiltrations d'air.

Participants Angleterre, Canada, Danemark, Italie, Hollande, Suède, Suisse, USA.

Manuel sur les infiltrations d'air Le Centre assiste la Suède à rédiger un manuel sur les méthodes de réduction des infiltrations d'air dans les immeubles neufs et rénovés, et sur les méthodes et instruments de mesures pour les infiltrations d'air.

Contribution suisse

- 1) L'EMPA fonctionne comme relais de l'information diffusée par l'AIC.
- 2) Rédaction d'un chapitre sur les normes suisses en matière de renouvellement de l'air pour le manuel sur les infiltrations d'air.
- 3) Traduction en allemand des expressions techniques anglaises d'un glossaire sur les infiltrations d'air (*Aingloss*).

PROJET VIPLANIFICATION URBAINE ET SYSTEMES ENERGETIQUES

Objectif Etablissement de procédures de planification urbaine et de méthodes analytiques générales pour la conservation de l'énergie dans les communautés urbaines.

Participant Italie, Grèce, RFA, USA.
La Suisse ne participe pas à ce projet.

PROJET VIIPLANIFICATION ENERGETIQUE LOCALE

Objectif Analyser la dépendance des projets de conservation de l'énergie par rapport aux conditions politiques locales.

Sous-projets

- VII.1. Besoins et préférences des consommateurs;
- VII.2. Effets des règlements de construction et des facilités financières;
- VII.3. Rôle des gouvernements locaux pour la solution à court et à long terme des problèmes énergétiques;
- VII.4. Problèmes économiques, environnementaux, techniques et institutionnels associés au développement et à l'utilisation de systèmes d'approvisionnement en énergie pour divers scénarios;
- VII.5. Etude de la faisabilité de projets reflétant les concepts considérés ci-dessus.

Participants RFA, Suède, USA.
La Suisse a annoncé qu'elle ne participerait pas à ce projet.

PROJET VIII (proposé)COMPORTEMENT DES HABITANTS EN RAPPORT AVEC LA VENTILATION

<u>Objectifs</u>	Voir les sous-projets.
<u>Sous-projets</u>	VIII.1. Déterminer le comportement effectif des habitants en ce qui concerne la ventilation et corrélérer celui-ci au climat intérieur et extérieur; VIII.2. Estimer la quantité d'énergie perdue en raison de ce comportement; VIII.3. Etudier les motivations correspondantes des habitants; VIII.4. Etudier si ce comportement peut être modifié par des programmes d'éducation et estimer les économies d'énergie qui peuvent en résulter.

Pays intéressés Suisse, RFA, Belgique, Hollande.

Contribution préliminaire de la Suisse La Suisse procèdera en 1981 à une étude-pilote destinée à vérifier la "faisabilité" d'un tel projet.

PROJET IXTAUX MINIMUM DE VENTILATION

<u>Objectif</u>	Rassembler des données expérimentales et établir des critères objectifs en vue de normes sur le taux minimum de renouvellement de l'air dans les habitations.
<u>Participants</u>	Angleterre, Belgique, Canada, Hollande, Italie, RFA, Suisse, USA.
<u>Contribution suisse</u>	Pour l'instant, l'EPFZ procède à une recherche bibliographique destinée à définir l'état des connaissances et les besoins de la recherche dans ce domaine.

PROJET X (proposé)SIMULATION DE SYSTEMES

<u>Objectifs</u>	X.1 Améliorer les méthodes de simulation intégrées des bâtiments;
	X.2 Procurer quelques exemples de référence d'analyse globale de bâtiments résidentiels et commerciaux;
	X.3 Etablir des standards raisonnables pour les apports et les pertes énergétiques liées aux conditions d'éclairage, au comportement des occupants, à l'utilisation des machines de bureau, etc., qui peuvent influencer la simulation du système;

- X.4 Etablir une description standardisée de l'ensemble des composants actifs du bâtiment: systèmes d'éclairage, appareils ménagers, installations de fabrication de l'eau chaude et de chauffage, y compris les équipements auxiliaires (ventilateurs, pompes, etc.).

Pays intéressé

Belgique.

APPENDICE II

ELEMENTS DE THERMIQUE DES BATIMENTS

Cet appendice décrit deux modèles simplifiés permettant de calculer la consommation énergétique approximative des bâtiments. La présentation de ces deux modèles donne l'occasion d'introduire et de définir les concepts techniques les plus importants utilisés dans le présent rapport.

1) Pertes par transmission et par renouvellement d'air

Les deux sources principales de déperdition d'énergie des bâtiments sont les pertes par transmission de chaleur à travers les murs, fenêtre, portes, etc. qui forment l'enveloppe et celles dues au renouvellement de l'air déterminé par les infiltrations incontrôlées et le système de ventilation. Les déperditions peuvent être caractérisées par deux paramètres moyens \bar{k} et \bar{n} . En fonction de ceux-ci, la consommation énergétique annuelle s'écrit en première approximation de la manière suivante (7):

$$Q = 0.0864 (A\bar{k} + V\bar{n} 0.34) D \frac{1}{n} (1 - \tau) \quad [1]$$

- Q : Energie finale fournie au système de chauffage durant l'année [MJ/an];
- A : Surface extérieure de l'enveloppe chauffée du bâtiment [m^2];
- V : Volume chauffé du bâtiment [m^3];

\bar{k} : Coefficient de transmission de chaleur moyen (par unité de surface et d'écart de température) des éléments composant l'enceinte du bâtiment [W/m²K]

$$\bar{k} = \frac{1}{A} \sum k_i \quad A = \sum A_i$$

\bar{n} : Taux de renouvellement de l'air exprimé en "nombre de changements d'air par heure" [h⁻¹];

D : Nombre de "degrés-jour", c'est-à-dire la somme des différences positives $\bar{T}_{int} - \bar{T}_{ext}$ des températures intérieures et extérieures moyennes pour tous les jours de la période de chauffage considérée.

En Suisse, le nombre de degrés-jour est calculé pour $\bar{T}_{int} = 20^{\circ}\text{C}$ et la période de chauffage est définie par $\bar{T}_{ext} < 12^{\circ}\text{C}$:

$$D = \sum_{\text{jours}} (20 - \bar{T}_{ext} \mid < 12^{\circ} \mid > 0)$$

La moyenne suisse pondérée par le volume bâti est de 3'654 degrés-jour par an;

η : Rendement global du système de chauffage. Pour un chauffage central au mazout de conception standard, la valeur moyenne de η sur une période de chauffage est de l'ordre de 0.5 à 0.6;

τ : Terme de correction intégrant les gains énergétiques supplémentaires apportés par le soleil, les personnes, les appareils électriques, etc.

En divisant [1] par la surface chauffée du bâtiment, on obtient son indice énergétique :

$$J = 0.0864 h (f \bar{k} + 0.34 \bar{n}) D \frac{1}{\eta} (1 - \tau) \quad [2]$$

$J = \frac{Q}{S}$: Indice énergétique [MJ/m²an];

S : Surface chauffée du bâtiment [m²];

$h = \frac{V}{S}$: Hauteur moyenne du volume chauffé [m];

$f = \frac{A}{V}$: Facteur de forme du bâtiment [m⁻¹].

Le facteur de forme des bâtiments varie entre 0.8 pour les petites villas et 0.4 pour les grands immeubles. Ce paramètre joue un rôle essentiel dans la détermination du coefficient \bar{k} moyen maximum admissible selon les normes de la Société des Ingénieurs et des Architectes (32).

Dans l'étude de l'EMPA pour l'Office Fédéral pour la Protection de l'Environnement (7), le paramètre τ a été évalué théoriquement pour une série de bâtiments-type construits avec une architecture traditionnelle et diverses conditions d'isolations. Une bonne corrélation entre ce paramètre et le produit $f \cdot \bar{k}$ est mise en évidence.

A l'aide des formules ci-dessus, il est facile de calculer l'indice énergétique approximatif d'une petite villa et d'un grand immeuble locatif, construits selon les normes actuelles :

	Villa	Grand immeuble locatif
f	0.8	0.4
\bar{k}	0.6	0.75
J	800 MJ/m ²	580 MJ/m ²

Pour ce calcul, on a admis les paramètres suivants :
 $h = 2.6$, $\bar{n} = 0.5$, $\eta = 0.5$, $\tau = 0.25$, $D = 3654$.

2) Bilan énergétique global d'un bâtiment

Pour l'étude globale du comportement énergétique d'un bâtiment, il est possible de construire des modèles particulièrement simples. De tels modèles sont utiles pour comparer les performances respectives de divers bâtiments du point de vue de leur consommation énergétique, pour calculer la variation de cette consommation d'une année à l'autre, ou pour quantifier les gains obtenus lors d'une rénovation thermique. Par contre, de tels modèles ne peuvent pas être utilisés pour calculer et optimiser avec précision la construction de bâtiments nouveaux surtout s'il s'agit de bâtiments complexes (avec ventilation, climatisation, etc.).

Pour un bâtiment dans lequel la température intérieure T_{int} est maintenue constante par un thermostat, on peut écrire un bilan énergétique sous la forme suivante (174):

$$\eta Q = (B + N + H \cdot D) - (E + P + F \cdot \phi) \quad [3]$$

Cette relation est exacte en régime stationnaire et exprime la quantité d'énergie Q fournie au système de chauffage (durant une certaine période de chauffage) comme la différence entre les pertes du bâtiment (vers le sol, le voisinage et l'atmosphère) et les gains supplémentaires (apportés par les appareils électriques, les personnes et le soleil):

- Q : Energie finale fournie au système de chauffage durant la période de chauffage considérée [MJ/an];
- η : Rendement global du système de chauffage. Ce paramètre tient compte non seulement de l'efficacité de l'installation proprement dite, mais encore des différents facteurs de récupérations ou de pertes caractéristiques de la construction de l'immeuble;

- B : Pertes d'énergie constantes vers le sol;
- N : Pertes d'énergie (en principe constantes) vers le voisinage lorsque l'habitation considérée est une maison mitoyenne. Dans le cas d'un appartement, situé au milieu d'un immeuble locatif, ce paramètre peut être plus important que B , voire au contraire constituer un gain;
- $H \cdot D$: Perte d'énergie vers l'atmosphère par conduction thermique (à travers les parois, les fenêtres, etc.) et par les échanges d'air dus aux infiltrations et à la ventilation. Cette perte s'exprime par le produit d'une constante H (mesurée en Joules/ $^{\circ}$ K-jour) caractéristique du bâtiment et le nombre de "degrés-jour" correspondant à la période de chauffage considérée;
- E : Apport énergétique des appareils électroménagers, de l'éclairage et des autres appareils de service utilisés dans le bâtiment;
- P : Apport énergétique métabolique des habitants (environ 100 W par personne);
- $F \cdot \phi$: Apport énergétique du soleil, principalement à travers les fenêtres exposées au sud du bâtiment. Si ϕ est le flux total d'énergie solaire (exprimé en J/m^2) durant la période de chauffage, F représente alors une surface caractéristique de l'immeuble équivalente à une surface vitrée idéale qui capterait l'ensemble de l'énergie solaire emmagasinée passivement par le bâtiment.

La détermination des paramètres thermiques caractéristiques d'un bâtiment η , B , F et H (par exemple par des mesures ou l'analyse des décomptes de chauffage et d'électricité), permet de calculer la consommation en énergie Q du bâtiment en fonction des variables météorologiques (le nombre de degrés-jour D et le flux d'ensoleillement total ϕ) et des conditions d'habitations caractérisées par N , E et P .

Indice énergétique total calculé en fonction du climat pour différents types de bâtiments d'habitation

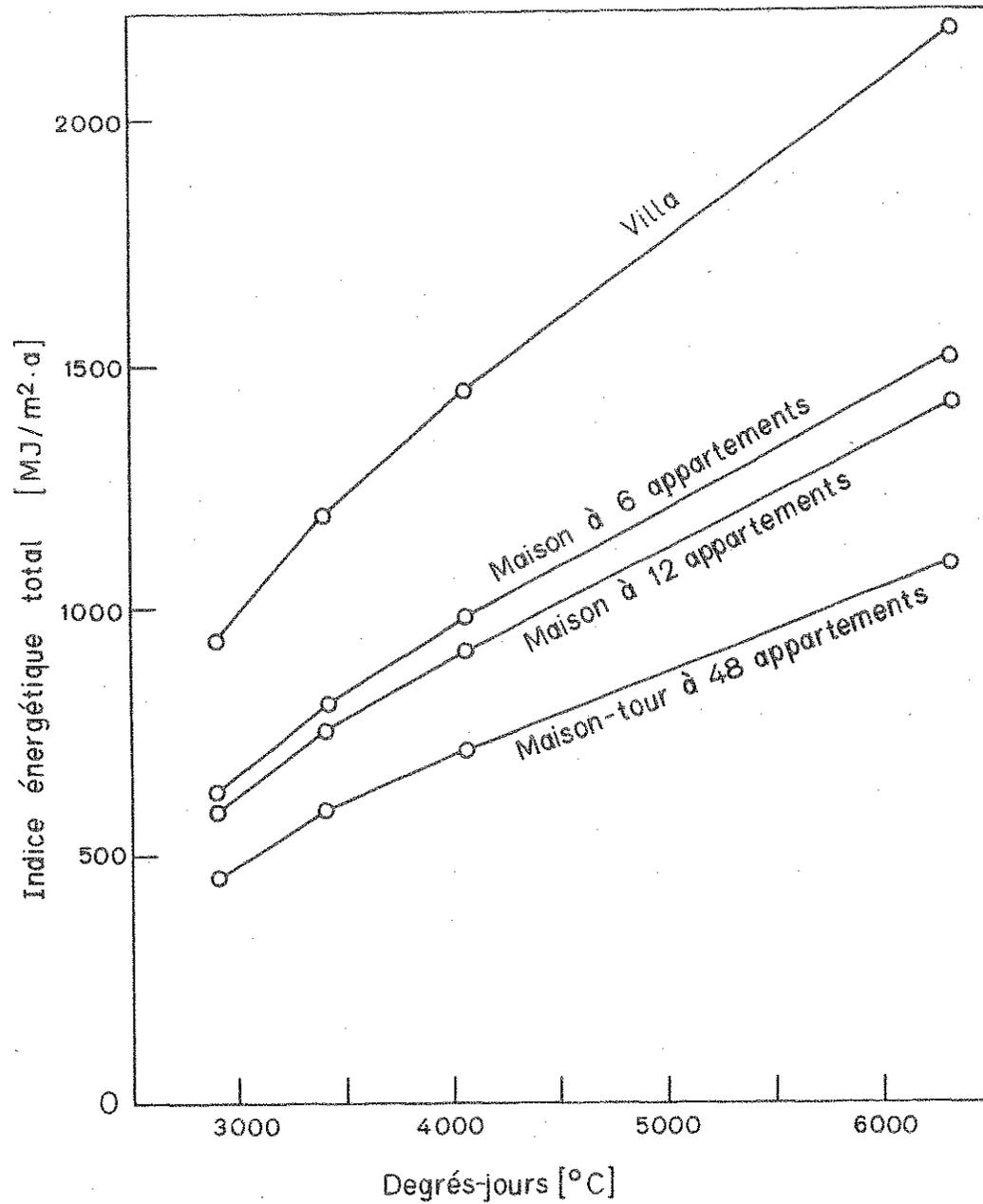


Figure IV

Consommation annuelle de mazout calculée en fonction de la température intérieure

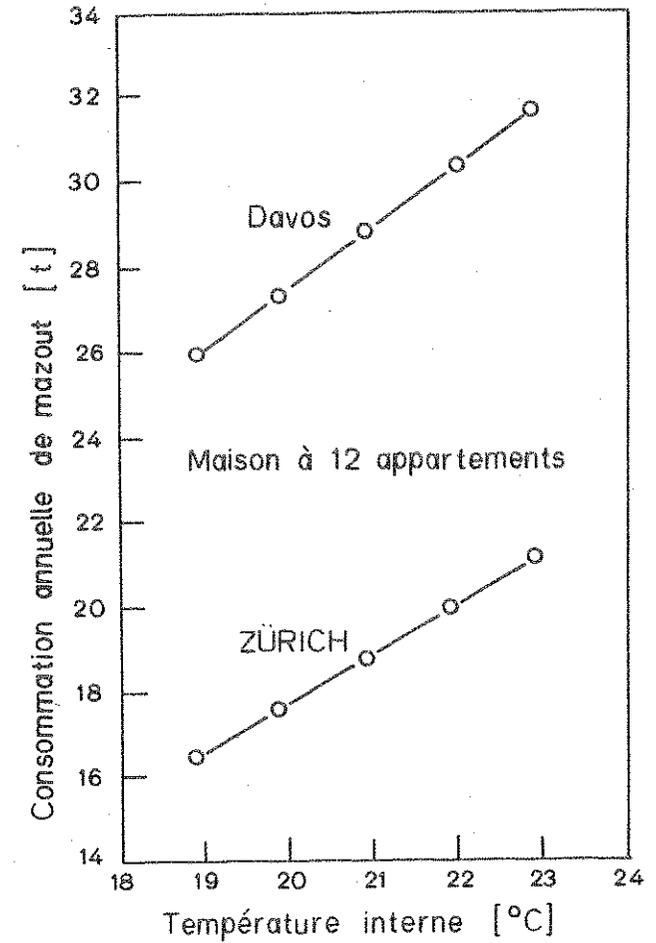


Figure V

Consommation hebdomadaire de mazout mesurée en fonction de la température externe moyenne pour un immeuble locatif et détermination de sa signature énergétique

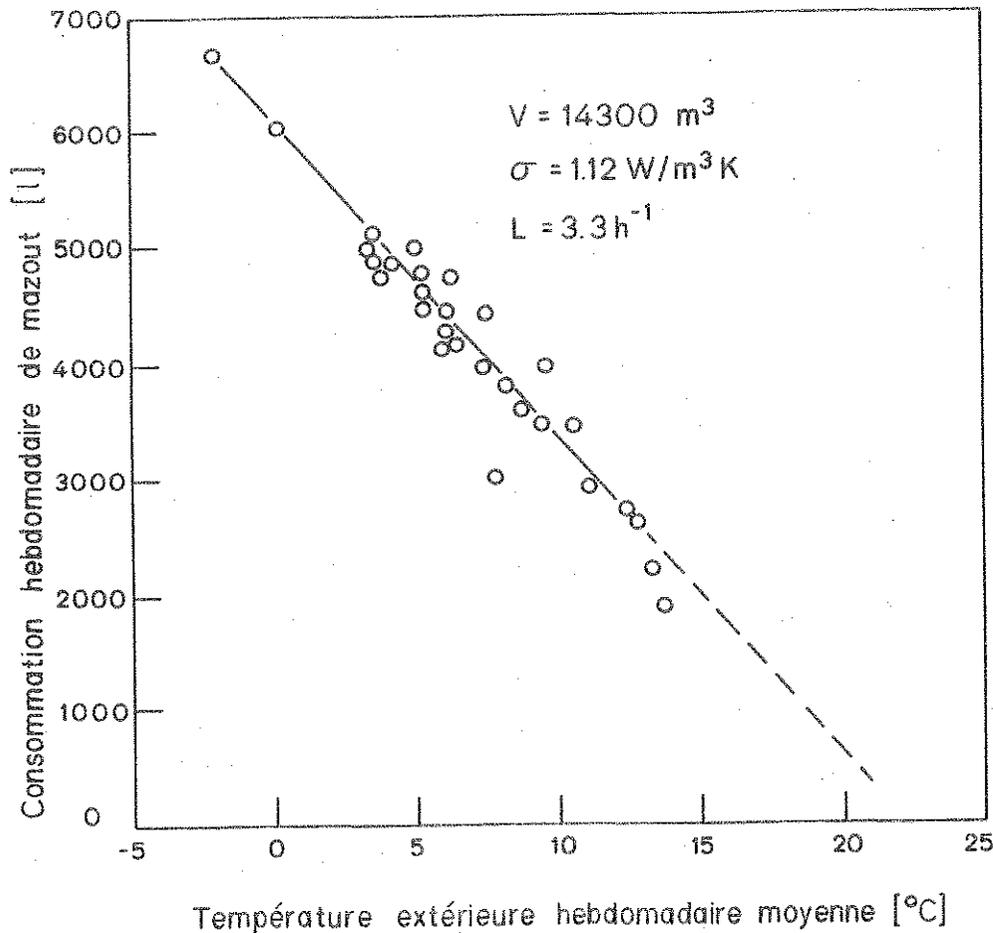


Figure VI

3) Indice énergétique et signature énergétique d'un bâtiment

L'indice énergétique [2], c'est-à-dire la consommation énergétique annuelle par unité de surface chauffée, est habituellement exprimée en $\text{MJ/m}^2 \text{ an}$. Cet indice est en fait une mesure de la puissance moyenne dissipée et peut donc s'exprimer en W/m^2 . On a ainsi:

$$1000 \text{ MJ/m}^2 \text{ an} = 31.71 \text{ W/m}^2$$

Exprimé en W/m^2 , l'indice énergétique de consommation peut être directement comparé à la puissance installée de l'installation de chauffage par m^2 .

L'inconvénient majeur de l'indice énergétique est qu'il mélange les caractéristiques thermiques de l'immeuble avec les effets des habitants tels que la préparation de l'eau chaude, la température intérieure etc. Un concept plus fin qui permet de mieux cerner les caractéristiques thermiques proprement dites de l'immeuble, et qui est indépendant du climat, est celui de la signature énergétique.

La signature énergétique d'un bâtiment est le taux d'accroissement de sa consommation énergétique en fonction de la température extérieure par unité de volume chauffé (182):

$$\sigma = -\frac{1}{V} \frac{\Delta Q}{\Delta T_{\text{ext}}} \quad [4]$$

D'après [1] et [3], Q est en bonne approximation une fonction linéaire de T_{ext} , on aura donc les relations de proportionalités suivantes:

$$\sigma \sim G = \frac{A}{V} \bar{k} + 0.34 \bar{n} \quad [5]$$

$$\sigma \sim H/\eta \quad [6]$$

Une méthode simple pour déterminer la signature énergétique d'un immeuble consiste à relever sa consommation énergétique hebdomadaire et à la reporter en fonction de la température extérieure moyenne comme cela est fait sur la figure VI. Il est intéressant d'exprimer cette signature en unités de nombre de changement d'air par heure (46), ce qui permet en principe une comparaison directe avec le taux horaire de renouvellement de l'air. Il suffit pour cela de diviser σ par la capacité thermique de l'air, $C_{air} = 0.34 \text{ Wh/m}^3\text{K}$:

$$L = \sigma / C_{air} \quad [7]$$

Dans le cas de l'immeuble de la figure VI, la signature énergétique est de $1.12 \text{ W/m}^3\text{K}$, ou de 3.3 changement d'air équivalent par heure (46)

4) Rendement global des installations de chauffage

Le rendement global d'une installation de chauffage fait intervenir un grand nombre de paramètres qui ne sont pas toujours faciles à mesurer. En ce qui concerne la définition des facteurs qui interviennent dans l'estimation de ce rendement, il y a aussi des différences considérables entre les auteurs. Un symposium se tiendra en septembre 1981 à Delft en Hollande sur ce sujet (175) et les organisateurs proposent les définitions ci-dessous afin de faciliter les comparaisons entre les résultats qui seront présentés.

Si Q est l'énergie utile effectivement utilisée pour maintenir une température donnée en un lieu d'un local chauffé, le rendement global peut être décomposé en 4 ou 5 facteurs qui correspondent chacun à un type de pertes différentes. On a alors:

$$\eta = \frac{Q}{Q + P_A + P_B + P_C + P_D + P_E} = \eta_A \eta_B \eta_C \eta_D \eta_E \quad [8]$$

En revenant depuis le local chauffé à la chaudière en passant par le système de distribution on a les pertes suivantes:

- P_E : Pertes des radiateurs à l'émission;
- P_C : Pertes du système de contrôle (la chaleur n'est pas toujours délivrée au bon moment);
- P_D : Pertes du système de distribution (la chaleur n'est pas toujours délivrée au bon endroit);
- P_B : Pertes du brûleur et de la chaudière;
- P_A : Pertes auxiliaires (électricité consommée par les pompes, les ventilateurs, le brûleur, les contrôles, etc)

Les rendements partiels s'écrivent alors:

$$\eta_E : Q / (Q + P_E) \quad [9]$$

$$\eta_C : (Q + P_E) / (Q + P_E + P_C) \quad [10]$$

$$\eta_D : (Q + P_E + P_C) / (Q + P_E + P_C + P_D) \quad [11]$$

$$\eta_B : (Q + P_E + P_C + P_D) / (Q + P_E + P_C + P_D + P_B) \quad [12]$$

$$\eta_A : (Q + P_E + P_C + P_D + P_B) / (Q + P_E + P_C + P_D + P_B + P_A) \quad [13]$$

Dans les chauffages centraux à gaz ou au mazout, les pertes auxiliaires sont souvent combinées à celles du brûleur de telle sorte que :

$$P_{AB} = P_B + P_A \quad \eta_{AB} = \eta_A \eta_B \quad [14]$$

Il est intéressant de constater que la décomposition en 4 ou 5 termes ci-dessus est en général possible pour tous les systèmes de chauffage, que la chaudière soit dans la maison ou dans une centrale.

5) Rendement saisonnier d'une chaudière

Lorsqu'on calcule la consommation énergétique annuelle d'un bâtiment par la formule [1], le rendement saisonnier global η fait intervenir le produit [8] des valeurs saisonnières moyennes des rendements partiels. Dans le cas d'un chauffage central, le plus important de ces rendements est celui de la chaudière η_B qui dépend notamment du dimensionnement de la chaudière par l'intermédiaire du facteur de charge α de l'installation. Celui-ci est défini de la manière suivante:

$$\alpha = t_b/t_o \quad [15]$$

où t_o : Durée totale de la période de chauffage;

t_b : Durée totale pendant laquelle le brûleur a fonctionné.

Dans la pratique, un dimensionnement correct de la puissance de la chaudière par rapport à la consommation en chauffage du bâtiment correspond à un facteur de charge $\alpha = 0.3$ à 0.4 .

En général, la température de la chaudière est maintenue constante, même lorsque la pompe de circulation de l'eau de chauffage est arrêtée. La durée t_b se décompose donc en deux périodes:

$$t_b = t_u + t_p \quad [16]$$

t_u : Durée utile pendant laquelle le brûleur a fourni de la chaleur au système de chauffage;

t_p : Durée pendant laquelle le brûleur a fonctionné pour maintenir la chaudière à une température constante sans fournir de chaleur utile au système de chauffage.

On peut alors définir un facteur de perte pour maintien en température:

$$q = (t_p / (t_o - t_u)) \quad [17]$$

où $t_o - t_u$ n'est autre que la durée pendant laquelle la chaudière n'a pas fourni de chaleur utile au système de chauffage. Ce facteur de pertes est une constante caractéristique de la chaudière qui se détermine en mesurant la fraction du temps pendant laquelle le brûleur doit fonctionner pour maintenir la température de la chaudière constante lorsque la circulation de l'eau de chauffage est arrêtée.

Le rendement saisonnier de la chaudière peut alors s'écrire comme le produit de deux termes:

$$\eta_B = \eta_x \eta_p \quad [18]$$

- où η_p : Rendement propre de la chaudière à pleine charge;
- η_x : Rendement d'exploitation de la chaudière qui tient compte du fonctionnement intermittent de la chaudière.

Avec nos définitions:

$$\eta_x = t_u/t_b \quad [19]$$

ce qui donne en introduisant les facteurs de charges et de pertes:

$$\eta_x = \frac{\alpha - q}{\alpha(1 - q)} \quad [20]$$

Exemple: Considérons une chaudière telle que $\eta_p = 0.85$ et $q = 0.03$. Si la durée de la période de chauffage a été de 240 jours et la durée pendant laquelle le brûleur a fonctionné de 1500 heures, le facteur de charge sera $\alpha = 1500/5760 = 0.26$, ce qui d'après [20] et [18] donne un rendement saisonnier $\eta_B = 0.78$.

Supposons que l'on procède maintenant à une rénovation thermique qui permette de réduire les pertes calorifiques du bâtiment de 50%. Si l'installation de chauffage et la chaudière ne sont pas modifiées, le facteur de charge diminuera d'autant, $\alpha' = 0.13$ et le rendement saisonnier de la chaudière deviendra plus mauvais : $\eta_B' = 0.67$.

Ainsi, si le système de chauffage n'est pas modifié en même temps que l'on procède à un renforcement de l'isolation thermique, les économies d'énergie seront inférieures à ce qu'elles auraient pu être. Dans cet exemple, 43% au lieu de 50%.

APPENDICE III

ASPECTS ECONOMIQUES ELEMENTAIRES DE LA CONSERVATION DE L'ENERGIE

Cet appendice donne quelques éléments sur les aspects économiques de la conservation de l'énergie dans le cas d'un remboursement de dettes par annuités constantes. Cette restriction n'est pas essentielle pour les objectifs que nous avons en vue (comparaison de la rentabilité relative de diverses mesures de conservation et optimisation d'un ensemble de mesures), elle permet par contre de simplifier les calculs. Les méthodes décrites ci-dessous sont évidemment applicables à des bâtiments ou à des parties de bâtiments; à une voiture ou à des équipements ménagers, etc.

1) Fonction de coût annuel

Considérons un objet dont l'acquisition correspond à un investissement initial $I[\text{Fr}]$ et qui nécessite pour son fonctionnement des frais annuels $M[\text{Fr}/a]$ et implique une consommation énergétique annuelle $Q[\text{MJ}/a]$. Supposons maintenant que l'on décide de procéder à une amélioration technique de cet objet afin d'en réduire la consommation énergétique. Cette mesure de conservation va nécessiter un investissement supplémentaire ΔI , augmentera éventuellement les frais annuels de fonctionnement et d'entretien de ΔM et entraînera une diminution ΔQ de la consommation énergétique annuelle. Nous allons maintenant faire l'hypothèse annoncée d'un remboursement de la dette supplémentaire ΔI par annuités constantes. Cette hypothèse implique que le total de l'intérêt et de l'amortissement annuel est gardé constant et que chaque année, on doit à la banque une somme fixe qui est l'annuité:

$$\text{annuité} = \Delta I/D(n,r)$$

Le facteur d'actualisation $D(n,r)$ dépend du taux d'intérêt r et de la durée du prêt $n[a]$ de la façon suivante:

$$D(n,r) = \sum_{t=1}^{t=n} (1+r)^{-t} = \frac{1}{r} [1 - (1+r)^{-n}] \leq n \quad [1]$$

(pour r très petit D est évidemment pratiquement égal à n , le nombre d'années correspondant à la durée du prêt).

Avec ces notations, on peut maintenant écrire la fonction de coût annuel correspondante à la mesure de conservation sous la forme suivante:

$$f_a = \Delta I/D(n,r) + \Delta M - c \Delta Q \quad [2]$$

Dans cette relation, nous avons introduit le prix de l'énergie $c[\text{Fr/MJ}]$ et le produit $c \Delta Q$ représente alors le gain financier virtuel réalisé par la mesure de conservation. De toute évidence, la mesure de conservation n'est rentable que si cette fonction de coût est négative, c'est-à-dire que si l'économie d'énergie correspond réellement à une diminution des dépenses annuelles.

Le seuil de rentabilité correspond donc à $f_a = 0$, et dans ce cas:

$$\Delta I/D(n,r) + \Delta M = c \Delta Q \quad [3]$$

2) Indicateurs et critères de rentabilité

Le seuil de rentabilité [3] dépend de trois paramètres que l'on peut qualifier de "techniques": ΔI , ΔM et ΔQ ; et de trois paramètres "économiques": n , r et c . Pour deux paramètres économiques donnés, il est donc possible de calculer le troisième au seuil de la rentabilité. De cette façon, on peut définir trois indicateurs et trois critères de rentabilité économique.

a) prix équivalent de l'énergie (c_e)

$$c_e = (\Delta I/D + \Delta M)/\Delta Q \approx \Delta I/n \Delta Q \quad [4]$$

c_e est le prix équivalent de l'énergie conservée. Pour que la mesure de conservation soit rentable, on doit avoir:

$$c_e \leq c \quad [5]$$

b) période de remboursement (n_r)

Cet indicateur est le nombre d'années minimum nécessaire pour que la somme d'argent correspondante à l'énergie conservée rembourse le capital investi. Ce minimum est obtenu au seuil de rentabilité et se calcule donc en résolvant [3] par rapport à n :

$$n_r = -\log(1 - r \Delta I/(c \Delta Q - \Delta M))/\log(1 + r) \quad [6]$$

En première approximation:

$$n_r \approx \Delta I/(c \Delta Q - \Delta M) \quad [7]$$

Pour que la mesure de conservation soit rentable, on doit évidemment avoir:

$$n_r \leq n \quad [8]$$

et n ne peut pas être choisi plus grand que la durée de vie physique de l'objet considéré et la durée des prêts consentis par les banques.

c) taux de rendement interne (r_i)

Cet indicateur correspond au taux d'intérêt d'un placement ΔI qui produirait un rendement financier égal à la somme nette économisée annuellement par la mesure de conservation, c'est-à-dire $c \Delta Q - \Delta M$. Le taux se calcule en résolvant [3] par rapport à r , ce qui n'est malheureusement pas possible analytiquement. Il est toutefois possible de faire ce calcul avec des tables ou un calculateur de poche programmable, et, en première approximation, on peut utiliser la formule approchée suivante:

$$r_i \approx (c \Delta Q - \Delta M) / \Delta I - n^{-2} \Delta I / (c \Delta Q - \Delta M) \quad [8]$$

Pour que la mesure de conservation soit rentable, on doit avoir:

$$r_i \geq 0$$

Toutefois, pour que l'investissement ΔI soit attractif à un investisseur potentiel, il faut que r_i soit aussi supérieur à un taux d'intérêt raisonnable, tel que celui pratiqué pour les prêts bancaires:

$$r_i > r \quad [9]$$

3) Minimisation du coût annuel total

La méthode du coût annuel total est une méthode d'optimisation qui consiste à minimiser la somme des frais annuels correspondant à l'investissement, à l'entretien et au fonctionnement en rapport avec l'énergie:

$$F = I/D(n,r) + M + c Q \quad [10]$$

Cette méthode se prête bien aux cas simples pour lesquels on peut négliger en première approximation les variations dans le temps du coût de l'énergie et des paramètres économiques.

4) Minimisation du coût du cycle de vie

La méthode du minimum du coût du cycle de vie (*minimum life cycle cost*) permet d'optimiser globalement les dépenses correspondantes aux frais de possession et d'utilisation d'un objet. Le coût du cycle de vie est calculé en ajoutant au coût initial de l'objet la somme des frais d'utilisation de cet objet convenablement capitalisés pour toute sa durée de vie économique. Pour qu'un tel concept ait un sens il faut tenir compte du fait que les dépenses correspondantes aux frais d'utilisation sont en fait réparties sur l'ensemble de la durée de vie de l'objet. Il est donc nécessaire d' "actualiser" ces dépenses, c'est-à-dire de calculer pour chaque dépense effectuée t années après une dépense initiale sa valeur actuelle correspondante au moment $t = 0$ de la dépense initiale. Pour une dépense D_t faite en l'année t , cette valeur actuelle initiale D_0 sera telle que :

$$D_t = D_0(1+r)^t \quad \text{ou} \quad D_0 = D_t(1+r)^{-t} \quad [11]$$

En effet, D_0 est la somme qu'il aurait fallu placer à un taux d'intérêt r au temps $t = 0$ pour pouvoir payer la somme D_t en l'année t .

Le cas le plus simple est celui d'un objet de coût initiale I dont l'utilisation correspond à des frais d'utilisation annuels fixes M . Son coût du cycle de vie sera alors:

$$LCC = I + \sum_{t=1}^{t=n} M(1+r)^{-t} \quad [12]$$

En utilisant la définition du facteur d'actualisation* [1], on obtient ainsi:

$$LCC = I + M \cdot D(n,r) \quad [13]$$

* Utilisé dans ce sens, les anglo-saxons appellent ce facteur "present worth factor".

Si de plus, à l'utilisation de cet objet correspond une dépense énergétique annuelle Q , il faudra tenir compte de l'augmentation du prix de l'énergie. En supposant une augmentation du coût de l'énergie c de e % par année, la valeur actualisée de la dépense énergétique pour l'année t sera:

$$E_t = c(1+e)^t Q(1+r)^{-t} \quad [14]$$

On peut donner au terme correspondant du coût du cycle de vie la même forme que [1]; c'est-à-dire:

$$\sum_{t=1}^{t=n} E_t = c \cdot Q \cdot D(n, \frac{r-e}{1+e}) \quad [15]$$

Finalement, pour un objet auquel correspondent à la fois des frais d'exploitation fixes et une dépense énergétique, le coût du cycle de vie sera:

$$LCC = I + M \cdot D(n, r) + c \cdot Q \cdot D(n, \frac{r-e}{1+e}) \quad [16]$$

Jusqu'ici nous n'avons considéré qu'un objet simple. Dans le cas général, par exemple d'un bâtiment, le coût du cycle de vie total sera une somme de termes correspondant à chaque composants:

$$LCC = \sum_i LCC_i(I_i, M_i, Q_i, c_i, e_i, n_i, r_i) \quad [17]$$

- I_i : investissement initial pour le composant i ;
- M_i : frais d'exploitation annuels fixes correspondants;
- Q_i : consommation énergétique annuelle correspondante;
- c_i : prix actuel de l'énergie correspondante (mazout, électricité...);
- e_i : taux d'augmentation du prix de l'énergie;
- n_i : durée de vie économique du composant;
- r_i : taux d'intérêt.

Pour chaque composant de l'objet ces paramètres seront en général différents. En choisissant pour e et r des valeurs convenables on pourra aussi tenir compte de l'inflation et de l'augmentation réelle du prix de l'énergie. Le coût du cycle de vie total peut ainsi tenir compte de l'ensemble des paramètres et son minimum correspondra à la rentabilité économique optimum.

Afin d'illustrer le calcul d'un coût du cycle de vie et son utilisation pour optimiser une mesure de conservation, nous allons prendre comme exemple la détermination de l'épaisseur optimum d'une isolation.

Soit donc I_1 et Q_1 le coût et la déperdition d'énergie par transmission correspondant à une épaisseur initiale l_1 . Pour une épaisseur l on aura:

$$I = I_1 l/l_1$$

$$Q = Q_1 l_1/l$$

Le coût du cycle de vie sera:

$$LCC = I_1 l/l_1 + c Q_1 l_1/l D(n, \frac{r-e}{1+e})$$

Le minimum de cette fonction s'obtient par simple annulation de la dérivée, ce qui donne:

$$l_{opt} = l_1 \sqrt{c Q / I D(n, \frac{r-e}{1+e})}$$

BIBLIOGRAPHIEConférences

Un grand nombre de travaux récents auxquels nous nous référerons ont été présentés dans les conférences ci-dessous pour lesquelles nous définissons un sigle qui sera repris dans la liste des références.

- EUE : Efficient Use of Energy (the APS Studies on the Technical Aspects of the More Efficient Use of Energy) AIP Conference Proceedings, No 25. American Institute of Physics, Inc. New York/1975.
- IC : Indoor Climate, Proceedings of the First International Indoor Climate Symposium in Copenhagen, August 30 - September 1, 1978.
- ECBE : Energy Conservation in the Built Environment. Proceedings of the Second International CIB Symposium on Energy Conservation in the Built Environment, May 28 - June 1, 1979, Copenhagen, Denmark. Danish Building Research Institute. 6 volumes.
- CEUF : Changing Energy Use Futures. Proceedings of the Second International Conference on Energy Use Management, October 22-26, 1979, Los Angeles, California. Pergamon Press. New York/Paris 1979. 4 volumes.
- BRWW : Building Research World Wide. Proceedings of the Eighth CIB Triennial Congress, June 1980, Oslo, Norway. Norwegian Building Research Institute. 3 volumes.
- WFH : Wärmschutz-Forschung im Hochbau. Schweizerisches Status-Seminar, 24 October 1980 EMPA, Abteilung Bauphysik, 8600 Dübendorf.
- EENB : Economies d'Energie et Energies Nouvelles dans le Bâtiment. Expériences et Résultats. Séminaire: Formation Universitaire Continue des Ingénieurs et des Architectes, Genève, 31 octobre 1980.
- NECT : New Energy Conservation Technologies and their commercialisation, International Energy Agency, Berlin 6-10 April 1981.

Adresses des groupes de recherche et des principales organisations cités

La liste ci-dessous donne par ordre alphabétique les adresses des groupes de recherche suisses ainsi que des principales organisations cités dans cette étude.

Dans la liste de références qui suit, les numéros entourés par un cercle renvoient à cette liste d'adresses.

- ① AIC - Air Infiltration Center
Old Bracknell Lane
Bracknell, Berks,
RG12 4 AM
England
- ② AIE - Agence Internationale de l'Energie
2, rue André-Pascal
F 75775 Paris Cédex 16 Tél. 524'82'00
Pour la Suisse, p.a. OFEN, 3003 Berne
- ③ AMI S.A.
12, chemin du Salève
1004 Lausanne Tél. 021/24'53'06
- ④ ATAL - Amt für technische Anlagen und Lufthygiene
8090 Zurich Tél. 01/259'29'85
- ⑤ BASLER & HOFMANN
Ingenieure und Planer AG
Forchstr. 395
8029 Zurich Tél. 01/55'11'22

- 6 BBS - Balzari Blaser Schudel
Ingenieurs et planificateurs
Krambungstrasse 14
3006 Berne Tél. 031/44'69'11
- 7 Commission Cantonale en Matière d'Energie
Département de l'Economie Publique
14, rue de l'Hôtel-de-Ville
1211 Genève 3
- 8 CUEPE - Centre Universitaire d'Etude des Problèmes de
l'Energie
5, rue Saint-Ours
1205 Genève 022/20'93'33
- 9 EDMZ - Eidgenössische Drucksachen und Material zentrale
3000 Berne
- 10 EIR - Eidg. Institut für Reaktor forschung
Abt. Wärmetechnik
5303 Würenlingen
- 11 EMPA - Eidgenössische Materialprüfungs- und Versuchsanstalt
für Industrie, Bauwesen und Gewerbe.
Laboratoire fédéral d'essai des matériaux et Institut de
recherche industrielle, Génie civil, Arts et Métiers
Überlandstrasse 129
8600 Dübendorf Tél. 01/823'55'11
- 12 EMPA
9000 St-Gallen
- EPFL - Ecole Polytechnique Fédérale Lausanne
- 13 Institut de Thermique Appliquée (ITA)
1015 Lausanne Tél. 021/43'35'06
- 14 Laboratoire des Matériaux Pierreux
32, chemin de Bellerive
1007 Lausanne 021/47'28'24

- 15 Laboratoire de physique théorique
1024 Lausanne Tél. 021/47'34'31
- 16 Groupe de Recherche en Energie Solaire
14, avenue de l'Eglise Anglaise
1006 Lausanne Tél. 021/47'34'32
- 17 Institut de Recherches sur l'Environnement Construit (IREC)
1015 Lausanne Tél. 021/47'32'96
- 18 Institut de Thermodynamique
1015 Lausanne Tél. 021/47'35'07
- 19 Institut de Production de l'Energie (IPEN)
1015 Lausanne Tél. 021/47'26'06
- EPFZ - Ecole Polytechnique Fédérale Zurich
- 20 Institut für Flugzeugstatik und Leichtbau
8092 Zurich Tél. 01/256'26'71
- 21 Institut für Thermodynamik, und Verbrennungsmotoren
8092 Zurich Tél. 01/256'24'82
- 22 Laboratorium für Festkörperphysik
8093 Zurich Tél. 01/377'23'46
- 23 Institut für Apparatebau und Electrotechnik
PES D 12
8005 Zurich Tél. 01/47'96'20
- 24 Institut für Mess- und Regeltechnik
8092 Zurich
- 25 Institut für Hygiene und Arbeitsphysiologie
8092 Zurich

- 26 FEA - Fachverband Elektroapparate (Association Suisse des Fabricants et Fournisseurs d'Appareils électro-domestiques)
Bahnhofquai 11
8001 Zurich Tél. 01/211'79'19
- 27 FNRS - Fonds National Suisse de la Recherche Scientifique
3000 BERNE
- 28 Gesundheitsinspektorat der Stadt Zürich
Walchestrassen 33
8035 Zurich
- 29 GIPRI - Geneva International Peace Research Institute
41, rue de Zurich
1202 Genève Tél. 021/32'14'38
- 30 IBE - Institut Bau + Energie
Höheweg 17
3006 Berne Tél. 031/44'57'58
- 31 INFRAS - Infrastruktur- und Entwicklungsplanung
Dreikönigstrasse 51
8002 Zurich
- 32 MOTOR COLOMBUS
Parkstrasse 27
5401 Baden
- 33 NEFF - Nationaler Energie-Forschungs-Fonds
Bäumleingasse 22
4051 Basel
- 34 OFEN - Office Fédéral de l'Energie
3003 Berne Tél. 031/61'56'11
- 35 Office Fédéral du Logement
Postfach 38
3000 Berne 15

- 36 PLENAR - Planung-Energie-Architektur
Fortunagasse 20
8001 Zurich Tél. 01/211'43'13
- 37 PLENAR
Im Hubäcker 7
8967 Widen Tél. 057/5'51'22
- 38 Prüf- und Forschungsinstitut
Schweiz. Ziegelindustrie
Postfach
6210 Sursee Tél. 045/21'37'85
- 39 SAGES - Schweizerische Aktion Gemeinsinn für Energiesparen
(Mouvement suisse pour les économies d'énergie)
Rämistrasse 5
8001 Zurich Tél. 01/251'02'60
- 40 Service d'information économies d'énergie CH
Höheweg 17
3006 Berne Tél. 031/44'57'58
- 41 Service du Chauffage
Ville de Genève
1211 Genève 3 Tél. 022/20'22'11
- 42 SIA - Société Suisse des Ingénieurs et des Architectes
Postfach
8039 Zurich Tél. 01/201'15'70
- 43 Stiftung Sonnenenergiehaus Zug
Schönbühl 6
6300 Zug Tél. 042/21'26'88
- 44 Suisselectra
Malzgasse 32
4010 Basel

45 UCS - Union des Centrales Suisses d'Electricité
Bahnhofplatz 3
8023 Zurich

46 Université de Genève
Groupe énergie solaire
24, quai Ernest Ansermet
1211 Genève 4 Tél. 022/21'93'55

Références

- 35 (1) : BRUNNER C., Energie-Sparen in Gebäuden, Stand, Lücken und Prioritäten der Forschung, Eidg. Drucksachen- und Materialzentrale, EDMZ, 3000 Bern, 1978.
- 11 (2) : VON ALLMEN B., Vorstellung des Rechenprogramms DOE-2. In WFH, p. 259.
- VON ALLMEN B., Erste Erfahrungen mit dem Rechenprogramm DOE-2, EMPA No 41643, Juni 1980.
- FRANK T. et al., Rechenprogramme zur Ermittlung des Gebäudeenergiebedarf, Schw. Blätter für Heizung und Lüftung, Nr. 3, 1981.
- (3) : CONSTANT Ph., Calculation of air conditioning loads in an office building by the LPB-1 program. Comparison with the results of other computer programs. Université de Liège, Belgium, 30 November 1979.
- 11 (4) : HASTINGS R., Communication privée, EMPA, Dübendorf.
- (5) : IEA Confidential Report: Evaluation of Energy Conservation Measures for Heating of Residential Buildings. October 1980.
- (6) : JOHANSSON B., The solar energy house in Vetlanda - a passive system. In ECBE, vol. 5, p. 55.
- 11 (7) : GASS J., Heizenergieverbrauch von Wohnbauten, theoretische Untersuchungen anhand von Modelrechnungen, EMPA No 39200, Dübendorf, Februar 1980.
- 16 (8) : HADORN J. et al., Simulation d'une maison solaire avec le programme TRNSYS, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne. Groupe de recherche en énergie solaire. 2ème symposium, Ecublens, 20 octobre 1980.
- 32 (9) : LANZ J., SCHOPFER A., et al. Projekt Iglou In WFH, p. 155.
- (10) : ECBE, vol. 4, diverses contributions.

- (11) : SONDEREGGER R. et al., Energy Audits of Existing Residential Buildings in Situ With a Microprocessor. Lawrence Berkeley Laboratory, Contract No W-7405-Eng-48, Circa, June 1980.
- (12) : GOLDSTEIN D. et al., Design Calculations for Passive Solar Buildings by a Programmable Hand Calculator. Lawrence Berkeley Lab. LBL-9371. August 1979.
- (13) : HODGIL A., On Convective Heat Transfer in Building Energy Analysis. Lawrence Berkeley Lab. LBL-10900, May 1980.
- (14) : Some Analytic Models of Passive Solar Building Performance. A theoretical approach to the design of energy conserving buildings. Lawrence Berkeley Lab. LBL-7811, November 1978.
- (16) (15) : FAIST A. et al. Immeuble Instrumenté "La Chaumière", In WFH, p. 203.
- (11) (16) : HARTMANN P., HeizungKlima, No 5, 1980, p. 60.
- (11) (17) : GASS J., Messtechnische Ueberprüfung der Sanierung der "Wohnkolonie Linmatstrasse". In WFH p. 109
- (36) BRUNNER C.U., HeizungKlima, no 5, 1980, p. 56.
- (18) : STUBY F., Presentation de cas concernant l'énergie solaire: maison solaire avec utilisation de l'énergie passive. Architecte DESA, Begnins. In EENB.
- (19) : MULLER J. et al., Performances d'une villa chauffée à l'énergie solaire, Payerne. In EENB.
- (43) (20) : STEBLER A., Sonnenenergiehaus Zug. In WFH, p. 187.

- (30) (21) : WENGER B., GYGAX P., Air Infiltration Handbook, Swiss Contribution, Institut bau + energie, 3006 Bern, Dez. 1980.
- (11) HARTMANN P., Luftwechsel messung in mehr-klimatisierten Räumen, EMPA Bericht no. 36630.
- (11) BAUMGARTNER et al., Lüftungswärme verluste: wie sind sie messtechnisch erfassbar?, Schw. Blätter für Heizung und Lüftung, nr. 2. 1981.
- (22) : HOLLOWEL D.D. et al, Indoor Air Quality in Energy-Efficient Buildings, ECBE, vol. 1, p. 217.
- BERK J.V., The impact of reduced ventilation on indoor quality in residential buildings, LBL-10527, March 1980.
- (25) (23) : WANNER H., Taux minimum d'aération dans les habitations et les ateliers. Ingénieurs et Architectes Suisses, 31 Juillet 1980.
- (24) : ROSEME G et al., Air-to-air heat exchangers: saving energy and improving indoor air quality, in CEUF, 3, p. 1229.
- (25) : LIDDAMENT M., A survey of current research into air infiltration in buildings. Air Infiltration Centre, Technical Note AIC-TN-2-80, October 1980. Air Infiltration Centre, Old Bracknell Lane, Bracknell, Berkshire, GB, RG12 4AH.
- (26) : KUNZEL, H. Repräsentativumfrage über die Heiz- und Lüftungsverhältnisse in Wohnungen, Institute für Bauphysik, Holzkirchen.
- (11) (27) : HARTMANN P., Rationelle Energieverwendung in Gebäuden und Siedlungen, Schweizer Ingenieur und Architekt, 26/79, p. 506
- (8) (28) : FANGER P., Séminaire du CUEPE, 30 octobre 1980.
- (29) : FANGER P., Human Comfort and Energy Consumption in Residential Buildings. In EUM, vol. I. p. 427.

- (30) : OLESEN B., THORSHAUGE J., Differences in Comfort Sensations in Spaces Heated by Different Methods: Danish Experiments. In IC, p. 645.
- (31) : LEBRUN J., Differences in comfort sensations in spaces heated in different ways. Belgian experiments. In IC, p. 627.
- (42) (32) : Société suisse des ingénieurs et des architectes, case postale, 8039 Zürich.
- (33) : SZABO P., k-Wert Messungen am Bau. In WFH, p. 87.
- (23) KERN H., Institut für Apparatebau und Elektrotechnik, ETHZ.
- (33) (34) : Projet NEFF no 119 "Révision 380".
- (35) : RUBINSTEIN M., Development of the French regulations for energy conservation in buildings. In ECBE, vol. 2. p. 327.
- (31) (36) : MAUCH S., Steuerungsinstrumente und ihre Wirkungen auf Infrastruktur- und Entwürfungsplanung: Umwelt und Wirtschaftsfragen (INFRAS) Dreikönigstr. 51, 8002 Zürich. October 1980.
- (6) (37) : BALZARI BLASER SCHUEDEL, Ingénieurs et planificateurs, et al., Directive concernant le modèle d'ordonnance pour des prescriptions cantonales sur l'isolation thermique, Office fédéral de l'énergie, Berne, Juillet 1980.
- (38) : Normes de constructions américaines (BEPS). US Department of Energy, Office of Conservation and Solar Energy, 1979. Energy Performance Standards for New Buildings: Proposed Rulemaking and Public Hearings. Federal Register, Vol. 44, no 230 (Wednesday, Nov. 28, 1979). IOCFR Part 435, pp. 68120-68181.
- (39) : CARTER L., Energy Standards for Buildings Face Delay, Science, 209, 15 August 1980, p. 784.

- (40) : ROSENFELD A., et al. Building Energy Use Compilation and Analysis. An International comparison and critical review. part A. LBL-8912, October 1979.
- (41) : ANGELINI T., Wohnungsbedarf und Wohnungsproduktion 1976-1990, St Gallen 1976.
- (36) (42) : BRUNNER C., Auslöser und Nebenwirkungen beim Energiesparen. In WFH, p. 47.
- (44) (43) : SCHAUB O., Energie-Einsparung in bestehenden Gebäuden, In WFH, P. 245.
- (44) (44) : Amélioration thermique des bâtiments: Manuel - Etudes et Projets, mai 1980. EDMZ, No 724500 f.
- (45) : Manuel d'amélioration du comportement énergétique des bâtiments existants, Office des constructions fédérales, Berne, Juin 1979, EDMZ, no 314.1 f.
- (34) (46) : DUBAL L., Exploiter les ressources énergétiques de notre parc immobilier. Office fédéral de l'énergie, Berne, 1980.
- DUBAL L., Die Energiequellen in unseren Gebäuden: können wir sie nutzen? Schweizer Ingenieur und Architekt 3/81, p. 23.
- (47) : WILLIAMS R., ROSS M., Drilling for Oil and Gas in Our Houses, Technology Review, March/April, 1980.
- (48) : PIRCHIL G., Optimierung von Waermeschutz-Massnahmen der Romay AG. Oberkulm, 8 April 1980.
- (49) : BRUNDRETT G., User experience of well insulated houses, In ECBE, vol. 5, p. 33.
- ANDERSON B., Case study of temperatures and energy consumption in a highly insulated timber-framed house. The Heating and Ventilating Engineer. 54, September 1980. p. 6.

- (50) : MILLER A., Report on the Washington Highly Insulated Housing Project. In ECBE, 5, p. 93
- (51) : Operational Saskatchewan Solar-conservation house yields further data on energy efficient building designs Soft Energy Notes, 2, 1979.
- (52) : DUMONT R., et al., Measured energy consumption of a group of low energy houses. National research council of Canada. Division of Building Research. Ottawa, May 1980.
- (53) : MADSEN P., GOSS K., Low Energy Houses in Denmark. Solar Age, February 1980, p. 22.
- (54) : CHRISTENSEN G., An unscheduled report on an experiment of the Danish building research Institute at Hørsholm, Denmark, in ECBE, 5, p. 157.
- (55) : Low energy houses in Denmark. Air Infiltration Review, 1, (3) May 1980.
- SAXHOF B. et al., six low-energy houses at Hjortekaer, Denmark, 7th International Congress of Heating and Air Conditioning "CLIMA-2000"
- (56) : HARDING J., Housing Revisited. Soft Energy Notes, 3, August/September 1980. p. 22.
- (57) : JONES R., et al., Case study of the Brownell Low Energy Requirement House: Brookhaven National Lab. BNL 50968, May 1979.
- (58) : Passive Solar Buildings, Sandia Labs. Albuquerque, New Mexico, 87185, SAND 79-0824, July 1979.
- (59) : BRUNO R., et al., The Philips experimental house: results and experience. In EUM, 3, p. 299.
- (60) : ELMROTH A., LOGDBERG A., Well insulated airtight buildings, Energy consumption, indoor climate, ventilation and air infiltration. In BRWW, 1c, p. 30.

- (61) : LINDSKOUG N., Projet à grande échelle de maisons expérimentales en Suède. Bull. ASE/UCS 69, (1978) no 5, 11 mars, p. 217, Voir aussi ECBE, 5, p. 79.
- (62) : ROUSCH VON E., et al., Energieanlage für das Objekt "Motto di Lena" in Minusio/Tessino, HLH 28 (1977, no 8. August.
- (36) (63) : BRUNNER C., Planungs und Ausführungsprobleme, Aktiv und passiv. Der Architekt, 11, 1980.
- (64) : Mehrfamilienhäuser in Gossau (SG), das wohnen, 9, September 1980. p. 174.
- (65) : FISCHER A., Grossbuch 14, 8064 Rudolfstetten, communication privée.
- (66) : GRIVAT J., Compagnie Vaudoise d'Electricité, 1002 Lausanne. Communication privée. FISCHER Ø. Genève, communication privée.
- (34) (67) : Courrier de l'Antigaspillage, no 16, novembre 1980, p. 10.
- (13) (68) : SUTER P., Institut de Thermique Appliquée, EPFL.
- (4) (69) : ARBENZ B., Amt für technische Anlagen und Lufthygiene (ATAL) 8090 Zurich, voir aussi "Tages Anzeiger" 9.12.78.
- (70) : SIVIOUR J., Energy Flows in Six Experimental Houses. In ECBE, vol. 5, p. 23.
- (71) : SIVIOUR J., Houses as passive solar collectors, Energy Conservation in Heating, Cooling and Ventilating Buildings, Hoogendoorn and Afgan (editors), Hemisphere publishing, Washington/London 1978, p. 749.

- (72) : SIVIOUR J., Theoretical and experimental heat losses of a well-insulated house. In BRWW, 1a, p. 329.
- (73) : ANDERSON B., Field studies on the effect of increased thermal insulation in some electrically heated houses. The Heating and Ventilating Engineer, 52, (613) November 1978, p. 6.
- (74) : ROSENFELD A. et al. Appendix III, Residential retrofit survey. LBL 7/30/80.
- (75) : NØRREGARD M., et al., Internal and external insulation of existing blocks of flats. In ECBE, vol. 1. p. 243.
- (76) : SOCOLOW R., The twin rivers program on energy conservation in housing: highlights and conclusions, Energy and Buildings, 1, (1977/78) p. 207.
- (77) : MACDUFF R., Observed Results of Home Insulation, In CEUF, Vol. 3, p. 1310.
- (78) : Les HLM dressent le bilan de leurs efforts d'économie. 150'000 appartements améliorés en deux ans. Le Monde, 22 juin 1979. Gazette Nucléaire, GSIEN.
- (79) : PERSSON A., Supplementary insulation of the exteriors of one family houses. In ECBE, 1, p. 167.
- (80) : Energiesparen im umbauten Raum: was tut der Bund? Direction des constructions fédérales, Berne, mai 1979.
- (41) (81) : KREBS G., Ville de Genève, communication privée.
- (16) (82) : GAY J., Windows Workshop, IEA meeting, Delft, 9-10 Juin 1980. Compte rendu pour le Groupe Energie Solaire de l'EPFL.
- (36) BRUNNER C., Bericht über den "Window-Workshop" der Internationalen Energieagentur (IEA) in Delft. Schweizer Ingenieur und Architekt, 46, 1980 p. 1141.

- (3) (83) : FREIHOLDT H., Evakuiertes Doppelfenster, $k < 0,3 \text{ W/m}^2\text{K}$. $\tau > 0.7$. In WFH, p. 77.
- (22) (84) : KNEUBUEHL F., et al., Thermal Radiation and Building Envelopes. In ECBE, vol. 2. p. 173.
- (11) SAGELSDORFF R., et al., Nationalfondsprojekt Strahlungshaushalt der Gebaeudehuelle. In WFH, p. 169.
- (11) (85) : SELL J., EMPA, Dübendorf, Abteilung Holz.
- (20) (86) : KOSE S. Institut für Flugzeugstatik und Leichtbau, ETHZ.
- (87) : MARTINELLI R. et MENTI K., Schweizer Ingenieur und Architekt 41/80. Voir aussi ECBE 2, p. 291, 301, 327.
- (14) (88) : ROULET C. Lab. des Matériaux Pierreux, EPFL.
- (89) : ROBERTS J.J., The external insulation of buildings, in ECBE, 2, p. 77.
- (90) : FORD K.W., et al., Energy indoors, in EUE, p. 81.
- (91) : HOLZ D., KUNZEL H. Einfluss der Wärmespeicherfähigkeit von Bauteilen auf die Raumlufttemperatur in Sommer und Winter und auf den Heizwärmeverbrauch, Gesundheits-Ingenieur, 101 (1980) Heft 3, p. 50.
- CURTIS B., et al., Thermal Mass: its role in residential construction. Lawrence Berkeley Lab. LBL-9290. June 1979.
- Plusieurs articles dans ECBE, vol. 4, p. 219, vol. 4, p. 187, vol. 2, p. 7.

- (92) : HASTINGS R., Planning and coordination of swiss passive solar research. In WEH, p. 3.
- (93) : ARATANI N., Utilisation of thermal capacity of the ground under the floor for cooling the dwelling in summer, in ECBE, 4, p. 209.
- (94) : VARDE K., A study of energy usage in underground dwellings. In CEUF, 3, p. 1317.
- (95) : LAND P., Economic Garden Houses: High density development, Illinois Institut of Technology, Chicago, 1977.
- (96) : SETTY B., The Nations Most Energy-Efficient Office Building, ASHRAE Journal, November 1979, p. 31.
- (97) : FLAVIN C., Energy and Architecture. The solar and conservation potential. Worldwatch paper 40, november 80, p. 33.
- (98) : ibid.
- (99) : The Keller Warehouse: in Passive Solar Buildings, Sandia Labs, Albuquerque, New Mexico, SAND 79-0824, July 1979, p. 183.
- The Kalwall Direct-Gain Warehouse, in Passive Solar Buildings, Sandia Labs. Albuquerque, New Mexico, SAND 79-0824, July 1979, p. 171.
- (100) : PEDERSEN F., Danfoss, KHW/HJS/ho, Nordborg den 5 mai 1976.
- (101) : LANGE E., Energy saving achieved by the use of thermostatic valves in a hot water radiator system, in ECBE, vol. 3, p. 193.
- (102) : SVENSSON A., Thermostatic radiator valves-functions and requirements. In BRWW, vol. 1a, p. 118.

- (103) : MANDORFF Sven, The function of heating systems with thermostatic radiator valves having no present maximum flow, in BRWW, vol. 1a, p. 100.
- Lauridien N., Radiator thermostats in large heating systems, in ECBE, 3, p. 203.
- (104) : Control and Instrumentation; August 1980, p. 38, and p. 47. March 1980, p. 52.
- (105) : LARSEN B., Energy savings by using automatic control in small residential buildings. In ECBE, 3, p. 229.
- (106) : SPOONER D., Energy consumption and temperatures in intermittently heated buildings. In ECBE, 3, p. 57.
- (107) : Energytex S.A., Monthey. Landis & Gyr, Basel.
- (108) : BECKER H.H., Economiser de l'énergie en mesurant la consommation ? La Revue Polytechnique, 8/79.
- (109) : EVEFELT L, Modern Heat and Water Metering. In ECBE 3, p. 67.
- Compteurs électroniques de chaleur et de froid. Fabrique de compteurs à gaz et à eau S.A. Lucerne.
- (110) : ZOLLNER G., BINDLER J., Montageort für Heizkostenverteiler nach dem Verdunstungsprinzip HLH 31, (1980) 6, Juni.
- (111) : LUNDGREN, T., Room temperatures as the basis for heating charges in apartment houses-energy saving and consumer reactions. In ECBE 1, p. 231.
- (112) : LEBRUN J., et al. Energy savings in buildings. Intergration exercise. IEA-EC801112-01, Programmation de la Politique scientifique, rue de la Science, 8, 1040 Bruxelles, November 7, 1980.

- (13) (113) : BEZAT R., et al, Mesures du rendement d'installations de chauffage modernes de grands immeubles d'habitation. Services Industriels de Lausanne, Février 1979.
- BEZAT R., Long time tests in real installations of the efficiency of oil fired boilers. In WFH, p. 233.
- (37) (114) : WICK B., Energiekennzahlen. In WFH, p. 37.
- WICK B., BARDE O., Les statistiques de la Sages: une base pour juger des résultats. In EENB, 31 octobre 1980.
- WICK B., Energie im Schulwesen Untersuchungsphase (Feinanalyse), 8976 Widen, December 1980.
- WICK B., Sparobjekt Einfamilienhaus, Schweizerischer Spenglermeister- und Installateur- Verband, 8023 Zurich, 1981, 160 pp.
- (21) (115) : BRENN J., Zur Entwicklung eines regulierbaren ölgefeuerten Heizungs-systems kleiner Leistung, In WFH p. 225
- (116) : Chaudière Mirical, Etablissements Sarina, 1701 Fribourg.
- (13) (117) : SUTER J.M. et al., Messung an Sanitär- und Heizungsanlagen, in WFH, p. 215.
- (118) : OLESEN B., KJERULF-JENSEN P., Energy Consumption in a room heated by different methods. In ECBE, 3, p. 19.
- (18) (119) : BOREL L., YANNI G., Remplacement du chauffage individuel par d'autres modes de chauffage. EPFL, Institut de Thermo-dynamique, Décembre 1977.
- (18) (120) : BOREL L et al., Pompes à chaleur, EPFL, mars 1980.
- (18) (121) : BOREL L., et al., Wärmepumpen - Technologie, Wirtschaft-lichkeit und Anwendungsmöglichkeiten. In WFH, p. 269.

- (122) : BLUM W., MC Ing. Baden
- (11) (123) : HARTMANN P. et MÜHLEBACH H., Automatic measurements of air change rates (decay method) in a small residential buildings without any forced-air heating system, AIC-Conference, Windsor, 24 octobre 1980.
- (39) (124) : Verbrauchsabhängige Heizkosten abrechnung- Ja oder nein? SAGES, Feb. 1981.
- (28) (125) : HESS W., Erste Resultate von Wirkungsgradermittelungen an den Ölfeuerungsanlagen in der Stadt Zürich, SVG-Schriftenreihe, Nr 77, 1980.
- (41) (126) : KREBS G.P., Contrôle permanent de la consommation dans les grands ensembles locatifs: Rapport sur 8 années d'expérience, Service du chauffage de la Ville de Genève, Mars 1981.
- (28) (127) : HESS W., Gesundheitsinspektorat der Stadt Zürich, Presse unter lagen vom 26.6.1980.
- (128) : Supplying hot water from the domestic freezer, AEK-Telefunken, Buildings Services and Environmental Engineer, January 1981, p. 23.
- (129) : Le chauffage "pièce par pièce", Le Monde, 31 août 1980, p. 8.
- (130) : MASDEN T., SAXHOF B., An unconventional method for reduction of the energy consumption for heating of buildings. In ECBE, vol. 3, p. 31.
- (131) : LYBERG M., Heat recovery in ventilation systems. National swedish institute for buildings research. December 1979.
- (132) : ROSEME G., et al., Air to air heat exchangers: Saving energy and improving indoor air quality. Lawrence Berkeley Lab. In CEUF, 3, p. 1229.
- (13) (133) : GOTTSCHALK G., SUTER P., Betriebsmessung an Luft-Wärmeaustauschern. In WFH, p. 289.

- (134) : RUDOLPH R., et al. Abwärmennützung von Hochbauten, Bundesministerium für Forschung und Technologie, Februar 1979, pp. 140. Verlag TÜV Rheinland, Köln, RFA.
- (135) : ESDORN H., FEUSTEL H., Maschinelle und freie Lüftung von Wohngebäuden- ein Vergleich, Hermann-Rietschel. Institut der Technischen Univ. Berlin.
- (136) : DICKSON D., The Energy Implications of Ventilation in Houses. In BRWW, 1a, p. 67.
- (137) : HENDERIECKX F. et KLEPFISCH G., Le bruit dans le chauffage, C.S.T.C. - Revue, juin 1980. p. 24.
- BOMMES L., Lärminderung bei einem Radialventilator Kleiner Schnellläufigkeit, HHH 31, (1980) p. 173.
- (138) : GUISAN O., et al., Etude d'un échangeur pour récupération de chaleur des eaux usées. In WFH, p. 279.
- (139) : EBERSBAERS, Heat Recovery from Wast Water in Domestic Buildings, in EVE, 2, p. 199.
- (140) : RØSRUD T., Plastic pipes for hot water, Building Research and Practice, March/April 1980.
- (141) : ANDERSON J., SABY J., The electric lamp: 100 years of applied physics. Physics Today, October 1979, p. 32.
- (142) : Lampe Philips "SL", OFEL-Info, no 300, Lausanne, 12.12.1980.
- (143) : VERDERBER R., et al., Testing of energy conservation of electronic ballasts for fluorescent lighting; review of recent results and recommendations for design goals. Lawrence Berkeley Lab. LBL-8315, October 1978.

- (144) : JEWELL J., et al., Energy Efficiency and performance of solid state ballasts. LBL-9960, September 1979.
- (145) : Energy savings from optimum design and control of lighting in office buildings. Demonstration project energy conservation, Commission of European communities, December 4, 1980.
- (146) : BENNETT D., EIJADI D., Solar optics: Light as energy: energy as light, Underground space 4, no 6, p. 349.
- (147) : NEWCOMB J., ANDERSON M., Direct sun skylights. In CEUE, 3. p. 1222.
- (148) : SMITH C.B., Light energy sources, in Efficient Electricity Use, Pergamon 1976, p. 483.
- (149) : Perspectives d'approvisionnement de la Suisse en électricité 1979-1990. Union des centrales suisses d'électricité, Sixième "Rapport des Dix", Juin 1979.
- (150) : NØRGARD J., Improved efficiency in domestic electricity use, Technical University of Denmark, DK-2800 Lyngby, March 1979.
- (151) : NØRGARD J., Low electricity household future, Technical University of Denmark, DK-2800 Lyngby, April 1980.
- (152) : Energy conservation program for consumer products, US. Department of Energy Proposals, Federal Register, 45, No 127, Juin 30, 1980.
- Energy efficiency standards for consumer products, US. Department of Energy, Juin 1980.
- Technical support document no 1, Draft Regulatory Analysis DOE/CS-0172
- " " " no 3, Certification/Enforcement COE/CS-0170
- " " " no 4, Economic Analysis DOE/CS-0169
- " " " no 5, Engineering Analysis DOE/CS-0166

- (153) : BEGUIN M., Electricity consumption in building. Laboratoire de Physique, Université de Liège, Belgique, août/septembre 1980.
- (154) : SCHIPPER L., International analysis of residential energy use and conservation. LBL. In CUEF 1, p. 75.
- (155) : Communications statistiques de l'UCS du chauffage électrique, Bull. ASE/UCS 71, (1980) 10, 24 mai, p. 540.
- 19 (156) : BONNARD D., et al., Eléments de la structure de la demande d'électricité dans les ménages, IPEN, EPFL, 1 octobre 80.
- 26 (157) : Conférence de presse, FEA, du 29 mai 1980, Secrétariat: 8001 Zürich Bahnhofquai.
- (158) : SCHREIBER, T., Rapport sur les mesures d'encouragement ou de réglementation des économies dans le secteur domestique. Bureau Européen des Unions de Consommateurs (BEUC) 29, rue Royale Bte 3-1000 Bruxelles, 12-13 mai 1980, p. 7.
- (159) : Ibid, p. 10.
- (160) : Energy efficiency labelling. Consumers' association, 14, Buckingham Street, Londres WC2N 6DS, Avril 1978.
- Test methods for measuring energy consumption of domestic appliances: consideration of consumer usage. Consumers' association, Londres, Octobre 1979.
- (161) : The EEC Energy labels for domestic appliances: a pilot survey of consumer understanding. Consumers' association, Londres, Août 1980.
- 12 (162) : BRUSCHWEILER H., EMPA, St Gallen.

- (163) : Secomat, Krüger & Co., 9113 Degersheim.
- 34 (164) : STAHEL, W., Répartition de la consommation d'énergie des bâtiments en Suisse selon les différents types. Série de publications de l'Office fédéral de l'énergie, EDMZ, 1979.
- (165) : HEAP R., The "Energy return", a simple ranking parameter for energy conservation strategies. In ECBE, 6, p. 27.
- (166) : BELJIDORFF A., STUERZINGER P., Position paper on energy conservation. Improved energy efficiency: the invisible resource. 11th World Energy Conference, RT-6, Septembre 1980, Munich. World Energy Conference, Londres 1980.
- (167) : GRANUM H., Economic optimization of thermal insulation in buildings. In ECBE, vol. 2, p. 51.
- (168) : Divers articles dans ECBE, 6, p. 55, 69, 131 et 141.
- (169) : Economic analysis: energy performance standards for new buildings, US Department of Energy, DOE/CS-0129, Janvier 1980, pp. 250.
- 19 (170) : KOHLER N., ROULET C., Coût énergétique de la construction. Dans WFH, p. 323.
- 5 (171) : Energiesparmassnahmen, Basler & Hofman, Ingenieur und Planer AG, 8029 Zurich, Juillet 1977.
- (172) : LEDERGERBER, E., Thèse de doctorat présentée à l'Ecole des hautes études commerciales de Saint Gall.
- (173) : LEACH, G., et al., A low energy strategy for the United Kingdom, Science Reviews, LTD., Londres, 1979.
- (174) : SONDEREGGER R., Modeling residential heat load from experimental data: the equivalent thermal parameters of a house. Dans EUM, 2, p. 183.

- (175) : UYTENBROECK J., Seasonal Efficiency of a boiler, C.S.T.C. Belgique, Mai 1980.
- (176) : ADAMSON B., Approaches to achieve low-energy buildings in Sweden, in NECT, 1981.
- (177) : HAYDEN A.C.S. and BRAATEN R.W., Domestic Oil Heating System Retrofit to Save Energy, in NECT, 1981.
- HAYDEN A.C.S. et BRAATEN R.W., Efficient Residential Oil-Heating Systems, Report EI.79-8, Conservation and Renewable Energy Branch, 58 Both Street, Ottawa, Ontario K1A 0E4, Canada. Aussi disponible en français.
- (178) : NORLEN U. and HOLGERSSON M., Estimating Effects of Energy Conservation Measures: A Swedish experience, in NECT, 1981.
- (179) : GUILLAUME M. et GENOUX M., Efficiency of the emission of radiators, in NECT, 1981.
- (180) : SAVITZ M. and MILLHON J., Current U.S. National Energy Conservation Programme in the Residential/Commercial Sectors, in NECT, 1981.
- (181) : Energy audits: Swiss contribution to the IEA workshop at Elsinore (Danemark), 13-15 April 1981, Office Fédéral de l'Energie, 3003 Berne.
- (182) : DUBAL L. and FAVRE P., Is my house sick enough to call the doctor ?, Ref. 181. p. 36.
- (183) : SAINT-GEOURS J., Pour une croissance économe en énergie, Commission des Communautés Européennes, Collection Etudes, Série Energie no 4, Bruxelles 1979.
- (184) : HOLDEN C. "Energy, Security and War", Science 211, 13 February 1981, p. 683.
- (185) : YERGIN D. and STOBACH R., Energy Future, Report of the Energy Project of the Harvard Business School, Random House, 1979.

FIGURES

	<u>page</u>
Figure I : Température de confort optimum en fonction des niveaux d'activité et d'habillement.....	17
Figure II : Indice énergétique de chauffage en fonction du climat pour le parc immobilier et quelques maisons-pilote	89
Figure III: Coût du cycle de vie et indice énergétique de chauffage calculé pour différents types de chauffage en fonction du niveau d'isolation et de récupération de la chaleur pour une maison située dans un climat de 3700 degrés-jours.....	104
Figure IV : Indice énergétique total calculé en fonction du climat pour différents types de bâtiments d'habitation	AII.6
Figure V : Consommation annuelle de mazout calculée en fonction de la température intérieure	AII.7
Figure VI : Consommation hebdomadaire de mazout mesurée en fonction de la température externe moyenne pour un immeuble locatif et détermination de sa signature énergétique	AII.8

TABLEAUX HORS-TEXTE

	<u>page</u>
Tableau I : Performance de chauffage mesurées de quelques maisons-pilote à haute isolation	28
Tableau II : Consommation énergétique spécifique de quelques appareils ménagers	78
Tableau III: Possibilités d'améliorations techniques des appareils ménagers	87
Tableau IV : Indices énergétiques normalisés de bâtiments suisses standards et de maisons à haute isolation	91
Tableau V : Rentabilité économique de quelques mesures de conservation de l'énergie	100
