

# Approches thermique, économique et architecturale de la réhabilitation des grands ensembles d'habitation

par L.M. CHOUNET (\*), J.L. DUFRESNE (\*), R. FRANCHISSEUR (\*),  
A. LAHELLEC (\*) et A. REGO-TEIXEIRA (\*\*)

## Nomenclature

$B_a$	bénéfice actualisé
$C$	flux de trésorerie annuel net : $C = pE - D$
$D$	dépenses additionnelles d'exploitation annuelle (énergie électrique des VMC, remplacements des filtres, etc.) ; pour l'évaluation globale, on en soustrait les recettes correspondant à la diminution du taux de roulement des logements et des refus d'occupation (ce sont les seuls facteurs sociaux pris en compte)
$E$	économie d'énergie annuelle dégagée par l'opération taux réel d'actualisation
$I$	investissement initial
$K = m5(i) \cdot C$	capital valeur de l'investissement $I$
$m5(i)$	matrice financière donnant la valeur actualisée d'une suite de $n$ placements périodiques de 1 F ( <i>Present Worth Factor</i> ) : $m5(i) = [1 - (1+i)^{-n}] / i$
$m6(i)$	annuité permettant de rembourser en $n$ fois un capital de 1 F ( <i>Capital Recovery Factor</i> ) : $m6(i) = 1 / m5(i)$
$n$	durée de vie de l'installation
$p$	prix moyen de l'énergie de chauffage arrivée au bas de l'immeuble
$q$	coût de l'énergie économisée : $q = [m6(i) \cdot I + D] / E$
$\delta i, \delta n, \delta p, \delta E, \delta I$	incertitude à priori sur les valeurs, respectivement, de $i, n, p, E$ et $I$
$\delta B_a, \delta q$	effet, respectivement sur $B_a$ et $q$ , des incertitudes paramétriques

## 1. Introduction

La consommation énergétique du secteur résidentiel et tertiaire représente plus de 40 % de la facture énergétique nationale (74,1 Mtep sur 170,4 en 1988). L'exploitation de ce gisement d'économie est liée au renouvellement du parc immobilier. En ce qui concerne le neuf, la réglementation thermique a progressivement exigé l'amélioration de l'isolation pour ce secteur (H2E 85, H3E 90). En ce qui concerne l'ancien, un récent rapport [1] fixe l'effort de rénovation à 1 million de logements en 5 ans dans le secteur social constituant le cadre de notre étude, qui en compte actuellement 3 millions. La part d'investissement de l'Etat serait alors de 25 GF.

Ces chiffres illustrent à eux seuls l'actualité et l'importance de ce dossier.

D'emblée donc, les aspects énergétiques sont à situer dans les actions d'amélioration du cadre de vie et de l'économie nationale. En combinant les améliorations architecturales et thermiques, on peut espérer améliorer le confort (thermique, acoustique,...), augmenter la rentabilité des investissements nécessaires, diminuer l'effort d'installation de sources primaires de puissance (et donc diminuer les nuisances, les fuites de devises,...). Le travail présenté ici a consisté à proposer un ensemble méthodologique de conduite rationnelle de rénovation de l'habitat social.

En 1981, l'Office Public de H.L.M. de Dreux réunissait les moyens d'une opération pilote de réhabilitation d'un ensemble de 593 logements, « La Cité du Lièvre d'Or ». Le succès de l'ensemble de l'opération lui valut de nombreux articles dans la presse internationale. Parallèlement, l'AFME et le MULT demandaient à notre équipe de développer des moyens d'évaluation des aspects énergétiques de cette opération.

Le résultat brut de cette opération s'est traduit par une réduction de moitié des consommations de chauffage et a nécessité 31 MF hors taxes d'investissements aidés par des subventions de diverses origines (PALULOS, CIL, CNLI, CAF, Caisse d'Epargne, Caisse des Dépôts). D'une consommation primaire moyenne annuelle corrigée de 10,70 GWh avant réhabilitation, on est passé à une consommation de 5,24 GWh.

Ces chiffres traduisent au niveau régional l'importance des investissements. L'analyse détaillée de ces résultats vise à rationaliser les choix d'investissement par la prise en compte des aspects énergétiques et à en fixer le montant global possible, cas par cas.

On peut cependant signaler l'aspect *conservatif* de nos résultats qui sous-estiment la rentabilité réelle sous trois aspects importants dans l'économie nationale :

— l'aspect socio-professionnel : le choix consistant à faire travailler de nombreuses entreprises régionales du secteur bâtiment (secteur en difficulté), par opposition — pour fixer les idées — aux grands chantiers de construction de centrales nucléaires utilisant une main d'œuvre mobile, est un choix politique qui dépasse nos compétences ;

(\*) Equipe RAMSES, CNRS, Centre Universitaire, Bât.508, F-91405 Orsay Cedex.

(\*\*) L.N.E.T.I., 22 Estrada do Paço do Lumiar, P-1699 Lisboa Codex, Portugal.

Article reçu le 10.07.1989, accepté le 26.10.1989.

— l'amélioration du cadre de vie et du vécu de l'habitant et les heureuses conséquences économiques qui en découlent ne sont que très partiellement prises en compte dans nos résultats à travers les améliorations comptables de l'Office Public Régional ;

— enfin, la quantification macro-économique de l'effort de remplacement d'installation de puissance par des investissements à but d'économie d'énergie reste à établir.

## 2. Présentation du cas étudié

L'OPHLM de Dreux, qui gère un patrimoine immobilier de 5 000 logements environ abritant 18 500 personnes (soit 56 % de la population de cette ville), a dû affronter, avec la crise économique, les conséquences de l'urbanisation sauvage qui a résulté de l'essor économique d'après guerre et de l'effort national de décentralisation industrielle.

En effet, les bâtiments construits à la hâte à cette époque étaient, dix ans après, entrés dans un processus de dégradation rapide. Les charges croissantes de chauffage laissaient présager une gestion de plus en plus périlleuse dans des ensembles HLM que de nombreux habitants commençaient à abandonner et où l'atmosphère sociale se dégradait avec l'apparition de phénomènes de délinquance et de marginalisation sociale.

L'ensemble de ces facteurs a conduit la municipalité à mettre sur pied, pour la « Cité du Lièvre d'Or », une opération de réhabilitation globale traitant à la fois la dégradation de l'architecture, le problème des surconsommations de chauffage et la désaffection de la population vis-à-vis de son cadre de vie.

C'est ainsi que naquit l'idée de *financer une grande proportion de la rénovation par des économies d'énergie*.

L'avant-projet détaillé faisait appel à des solutions proches du courant de l'architecture bioclimatique (adjonction sur les façades ensoleillées de serres ou de capteurs à air en préchauffage d'air neuf) en plus des solutions plus traditionnelles : isolation extérieure, pose de doubles vitrages, ventilation mécanique contrôlée (VMC), etc. Le coût moyen de ces travaux était conforme aux objectifs financiers définis par l'étude économique et permettait de bénéficier des aides de l'Etat. Ainsi, un premier aspect du problème fut de quantifier l'enjeu économique national de la rénovation.

En cohérence avec les objectifs précédents, le problème posé au Génie Thermique s'énonce de la manière suivante :

— rechercher les solutions architecturales les plus énergétiquement performantes, et les améliorer (recherche d'optimums économiques) ;

— prédire le gisement d'économies de chauffage généré par ces solutions, actualisé en début d'opération.

Le passage des données énergétiques à leur impact financier nécessite l'emploi d'indicateurs économiques dont le choix dépend des phases de conduite de la rénovation par le maître d'œuvre :

— état des lieux et demandes de financement ;



Un exemple de bâtiment réhabilité

- conception architecturale de la rénovation ;
- attribution des marchés ;
- bonne gestion de la cité rénovée.

Nous allons présenter la méthode adoptée en partant des problèmes spécifiquement thermiques et en montrant qu'un outil d'analyse énergétique détaillé est nécessaire pour rationaliser les choix économiques, puis nous montrerons comment chacune des phases de la rénovation peut s'appuyer sur les résultats de simulation.

## 3. Démarche adoptée

### 3.1. Spécificité des problèmes thermiques dans le cas de l'analyse d'une opération de réhabilitation

Du point de vue de la thermique, le système bâtiment présente des phénomènes hétérogènes très fortement couplés (convection, conduction, rayonnement, transfert de masse,...), en régime instationnaire. De plus, le bâtiment est un système réel (par opposition aux montages de laboratoire) qui est soumis à des perturbations pseudo-aléatoires (habitants, météo,...) et pour lequel certaines données sont mal définies (propriétés des matériaux de construction, caractéristiques géométriques, phénomènes de vieillissement,...).

Si ces différentes caractéristiques rendent la modélisation difficile et complexe, l'expérimentation est également de mise en œuvre délicate :

— les entrées du système et les conditions aux limites ne sont ni bien contrôlées ni pilotables ;

— il existe des perturbations dues aux habitants, aux chantiers éventuels, etc. ;

— les problèmes se posent à différentes échelles : cité, immeuble, appartement, composant, etc. ;

— le système étant vaste, quelles mesures réaliser pour qualifier son comportement ?

L'articulation modèle-mesure apparaît ainsi comme la clé de la maîtrise de ces problèmes de natures diverses. Les grandeurs mesurées doivent être comparables à celles calculées par le modèle pour permettre un bon calibrage. A l'inverse, le modèle doit permettre d'exhiber certaines grandeurs inaccessibles à la mesure (bilan énergétique complet d'une surface vitrée par exemple).

L'outil de simulation devra donc :

— modéliser de façon globale les composants et les phénomènes thermiques existants afin de fournir des informations cohérentes avec le problème posé et les mesures réalisables ;

— modéliser de façon exhaustive le système bâtiment (enveloppe, système de chauffage-distribution-régulation, apports gratuits, rôle des habitants et des équipements divers) ;

— prendre en compte les couplages thermiques entre composants en régime dynamique ;

— accepter comme entrée des valeurs météo réelles ainsi que d'autres types de mesures.

### 3.2. Présentation de l'outil de simulation

Nous avons pour cette étude utilisé le code CALECO-DOE.2 [2, 5 et 9], très répandu dans les bureaux d'étude internationaux, mettant à profit une bonne connaissance de cet outil acquise au cours d'une collaboration de dix années avec l'équipe du *Simulation Research Group* de Berkeley qui l'a originellement développé. Il permet de traiter la simulation énergétique des bâtiments de manière réaliste, à un coût de mise en œuvre acceptable. Parmi ses avantages, signalons :

— entrées détaillées, dans un langage d'accès aisé, avec de nombreux diagnostics (Building Design Language : BDL) ;

— traitement complet : enveloppes, systèmes, habitant, météo, installations diverses ;

— régime dynamique à pas de temps horaire par l'utilisation de techniques de facteurs de réponse-facteurs de pondération [5] ;

— sortie très riche de résultats intermédiaires (annuels, mensuels, horaires, sous forme de tableaux et de pseudo-graphiques).

En rapport avec le travail présenté ici, le code a subi divers développements qui ont été intégrés dans la dernière version diffusée (version 1D — août 1989) [13] :

— modèle de serres de façade ;

— modèle de radiateurs de chauffage central ;

— développement d'un module de traitement statistique des résultats, autorisant en particulier des comparaisons mesure-modèle heure par heure.

### 3.3. La conduite d'une opération de réhabilitation et les apports du Génie Thermique

Nos premiers travaux nous avaient montré que le code CALECO-DOE.2 répondait aux objectifs de

l'étude envisagée. Nous avons intégré ce code en tant qu'outil d'aide à la décision dans la conduite de l'opération de réhabilitation. On peut dès lors mettre en parallèle les aspects du génie thermique correspondant aux diverses phases de la rénovation.

#### 3.3.1. Etat des lieux et demande de financement.

##### *Diagnostic thermique et calibrage des modèles*

Nous montrons comment le calibrage constitue une aide au diagnostic et permet d'évaluer de façon globale puis de hiérarchiser les gisements d'économie d'énergie.

#### 3.3.2. Conception des opérations de réhabilitation.

##### *Evaluation détaillée des économies d'énergie*

Ensuite, les grandes lignes du traitement architectural de la réhabilitation étant posées, l'outil de simulation permet son amélioration thermique à partir d'une analyse paramétrique en coût global. Il permet également de s'assurer que la réhabilitation ne dégradera pas l'ambiance thermique (surchauffe en été par exemple).

#### 3.3.3. Attribution des marchés.

##### *Etude détaillée en coût global*

L'outil de simulation permet de rechercher rapidement le *mieux disant énergétique* à partir d'une analyse en coût global. A la modélisation thermique vient s'associer des problèmes techniques (durée de vie des composants), prévisionnels (évaluation du coût de l'énergie), économiques (choix des indicateurs).

#### 3.3.4. Gestion de la cité rénovée.

##### *Suivi et entretien du système de chauffage*

Le modèle complet de la cité (système de chauffage et de distribution, enveloppe des bâtiments,...) permet d'optimiser la régulation du système complet de chauffage et de gérer précisément son entretien (diagnostic de la défaillance d'un composant ou de vieillissement prématuré).

## 4. Mise en œuvre

### 4.1. Dispositif expérimental

Il est à noter que le nombre de mesures effectuées dans les HLM de Dreux serait exagéré pour une étude de réhabilitation courante. L'objectif était alors de savoir si le code choisi serait suffisamment précis pour constituer le moteur d'analyse thermique dans l'approche précédemment décrite.

La cité étudiée est constituée de 19 bâtiments (tours ou barres). Un réseau de chaleur distribue à l'ensemble des bâtiments l'énergie produite par une chaufferie centrale au gaz (*figure 1*).

Outre la consommation hebdomadaire de gaz, l'énergie distribuée aux différents bâtiments est mesurée par 11 compteurs de thermies à impulsion placés sur les échangeurs de chaleur qui alimentent les bâtiments, en assurant la liaison entre le circuit primaire lié à la chaudière et le circuit de chauffage.

Une station météorologique est installée en haut d'une tour. Un appartement F4, sans occupant, a fait

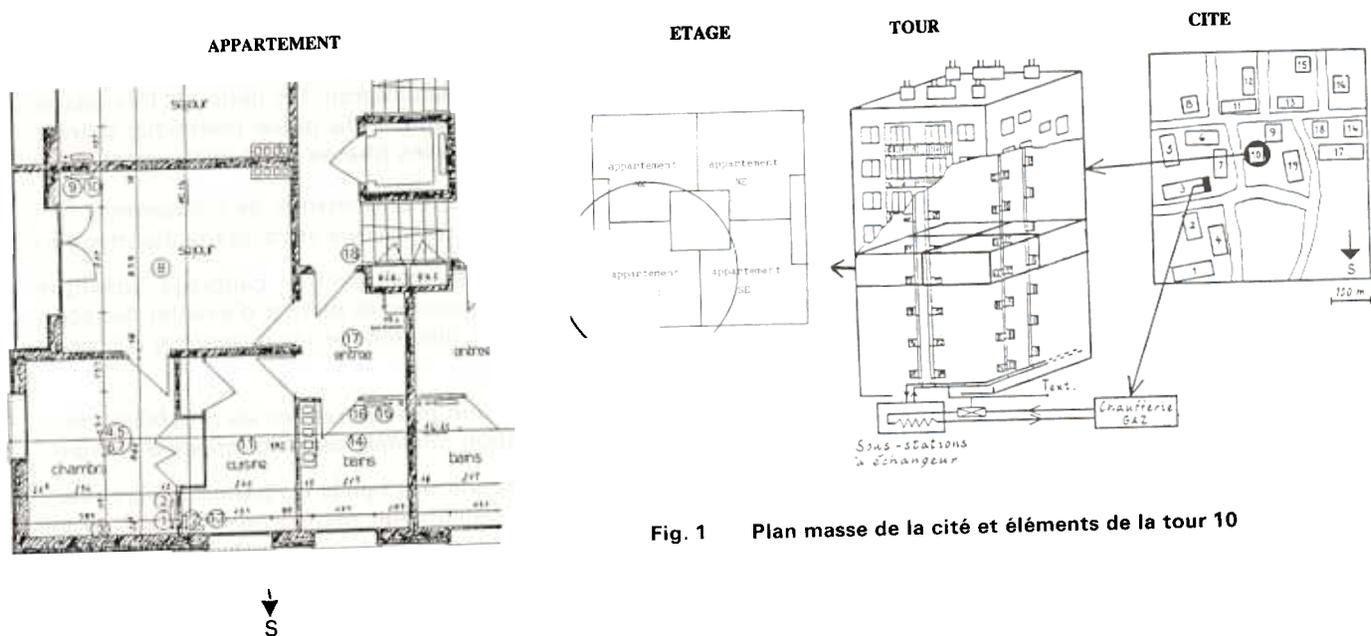


Fig. 1 Plan masse de la cité et éléments de la tour 10

l'objet d'un suivi particulier tout au long de l'expérimentation (une vingtaine de points de mesures ont été relevés pendant 2 ans, tous les 1/4 d'heure). Enfin, quelques suivis ponctuels ont été effectués pour étudier des cas particuliers : un appartement F5 avec une serre (pendant 2 mois), un appartement avec mur trombe (3 semaines).

Ces études ont été partiellement conduites pendant le chantier, ce qui nous a permis des calibrages en cours de rénovation de bâtiment, en contrepartie d'une exploitation plus complexe des mesures (aléas divers, perturbation des mesures,...).

#### 4.2. Modélisation

Comme nous le remarquons précédemment, l'articulation mesure-modèle est la clé pour la réussite de l'analyse thermique de la réhabilitation. Outre la modélisation de la zone étudiée, le code de simulation doit permettre d'interroger et de compléter les mesures.

Lors du calibrage par exemple, la mesure ne permet pas de découpler totalement une zone particulière : l'appartement-test F4 étudié en détail, situé au milieu de la Tour 10 (figure 1) est ainsi soumis, d'une part, aux sollicitations thermiques extérieures (grandeurs météo) et, d'autre part, à celles des appartements voisins dont l'influence, non mesurée, sera définie par la simulation. Le F4 étudié est donc déterminé en partie par la mesure et en partie par la modélisation elle-même. Il faudra s'assurer que les erreurs induites par la simulation de l'environnement sur le F4 sont négligeables devant les effets directement testés.

La Tour 10, schématisée sur la figure 1, a été découpée en 12 zones thermiques. Pour le 4<sup>e</sup> étage, nous avons trois zones : l'appartement témoin F4, l'appartement Sud-Est et l'ensemble des deux appartements Nord. Les autres étages ont été répartis en zone Nord — zone Sud. Enfin, la cage d'escalier et les espaces en sous-sol font l'objet de deux zones supplémentaires. En ce qui concerne les appartements occupés, les équipements, l'éclairage, la présence des habitants et l'ouverture des fenêtres sont

décrits en entrée du logiciel à l'aide de profils horaires-types sur toute l'année.

### 5. Calibrage : mise en œuvre et résultats

La première étape du calibrage a consisté à établir une modélisation de bâtiment à partir des plans d'exécution et à comparer les consommations mensuelles calculées aux consommations mensuelles mesurées. Le seul problème rencontré a été l'impossibilité de modéliser précisément la régulation réelle de température d'eau des colonnes montantes ; il s'agissait d'une loi classique de dépendance d'une prise de température extérieure et qui présentait une très forte dispersion [3]. Ainsi, ne pouvant simuler la régulation, nous avons utilisé directement la température horaire mesurée des radiateurs dans le calcul des puissances. Nous avons dès lors obtenu des accords à 1 % entre les valeurs mesurées et calculées des consommations mensuelles, et cela avant la fin des travaux [4].

En réalité, ce résultat est trompeur, car les distributions d'écartes horaires sur la température moyenne de la zone témoin F4 restaient importantes (> 3 K) ; or, l'analyse paramétrique mettant en jeu des composantes de ce bilan, le calibrage devra porter sur la justesse des modèles détaillés.

En ce qui concerne la justesse de consommation globale, on retrouve là un résultat connu en thermique des bâtiments classiques (sans régulations sophistiquées) qui justifie d'ailleurs l'utilisation de méthodes simplifiées des estimations de consommations annuelles de chauffage [2].

Nous allons illustrer la démarche suivie pour le calibrage de l'appartement témoin de la Tour 10.

#### 5.1. Description du problème posé

Comme nous l'indiquions précédemment, un premier problème est lié à l'absence de mesure des flux conductifs entre l'appartement témoin et ses voisins ; nous les avons calculés en utilisant le modèle com-

TABLEAU I

Détail de l'analyse des facteurs d'influence sur l'écart *TZONE* mesurée-calculée via les composantes du bilan énergétique

Facteurs d'influence	Préparation des données	Simulation par CALECO-DOE.2	Composantes du bilan énergétique	Paramètres de conception
<p><i>Liés à l'environnement du bâtiment</i></p> <p>Masques et albédo</p> <p>Ombres portées</p> <p>Flux global Flux diffus</p> <p>Température de ciel</p> <p>Vent</p> <p>Pluie</p> <p>Température et débit d'eau de chauffage</p> <p><i>Liés à l'environnement de l'appartement-témoin</i></p> <p>Autres appartements -habitants -équipements -éclairage -ouverture fenêtres -toitures -sous-sol</p> <p>Cage d'escalier</p> <p>Vide-ordures (scotchés)</p> <p>V.M.C.</p>	<p>Estimés</p> <p>Décrites (BDL*)</p> <p>Effet bande pare-soleil</p> <p>Calculée à partir de la nébulosité estimée (Trappes)</p> <p>Mesuré</p> <p>Négligée</p> <p>Mesurés</p> <p>Niveaux et profils horaires estimés (données statistiques CSTB)</p> <p>Description BDL*</p> <p>Description BDL*</p> <p>Débit mesuré globalement en toiture</p>	<p>Calcul des flux verticaux et horizontaux</p> <p>Transmission vitrage</p> <p>Pertes radiatives GLO en toiture</p> <p>Pertes surfaciques</p> <p>Modèles d'infiltration</p> <p>Modèles divers ; résultante en flux surfacique sur les murs mitoyens</p> <p>Echanges porte palière</p> <p>Renouvellement d'air</p>	<p><i>Sources de chaleur</i></p> <p>Flux solaire instantané entrant</p> <p>Radiateur chauffage central</p> <p>Convecteur électrique</p> <p>Acquisition de données</p> <p><i>Echange avec l'extérieur</i></p> <p>Vitrage-conduction</p> <p>Infiltrations</p> <p>Renouvellement d'air</p> <p>Murs extérieurs</p> <p><i>Echanges avec le reste du bâtiment</i></p> <p>Murs mitoyens</p> <p>Plafond-Plancher</p> <p>Porte palière</p>	<p>Surface et type de vitrage</p> <p>Régulation (pour manip)</p> <p>(pour manip)</p> <p>Nbr de vitrages et volets</p> <p>Joints d'ouvrants</p> <p>VMC simple et double flux</p> <p>Isolation extérieure</p> <p>Robinets thermostatiques</p> <p>Vois de calories</p> <p>Sas d'entrée de l'immeuble</p>

\* BDL : Building Design Language; langage d'entrée pour la description du bâtiment

plet de l'immeuble. Leur contribution au bilan thermique de l'appartement témoin est faible devant celle des autres puissances (flux solaire, pertes vers l'extérieur, etc.) ; nous négligerons donc leurs incertitudes sur l'écart mesure-modèle de l'appartement témoin.

Un autre aspect du problème est son caractère pseudo-aléatoire :

— dû à l'aspect réduit du dispositif métrologique (absence de mesure d'infiltrations d'air, moyennes horaires déterminées à partir de l'échantillonnage des mesures effectuées tous les 1/4 d'heure,...) ;

— du fait de la non-exhaustivité de la description du système (petit bois de fenêtre, murs hétérogènes, pluie non prise en compte,...) ;

— lié à la connaissance statistique de certains facteurs (habitants, équipements, ouverture des fenêtres, interventions dans l'appartement témoin, pannes de la VMC).

En cohérence, le calibrage utilise des épreuves statistiques : un facteur d'influence sera pris en compte si son poids statistique est tel qu'il ait un impact sur l'effet étudié (consommation mensuelle ou confort d'été).

Le modèle est éprouvé à partir d'une température moyenne de zone que nous appellerons *TZONE*. Sa mesure correspond à la moyenne pondérée de 8 sondes de température réparties dans l'appartement. Dans le code de simulation, *TZONE* est calculée à partir de la déconvolution de transformées en Z des puissances énergétiques horaires [5].

Nous avons rassemblé dans le *tableau I* le détail de l'analyse des facteurs d'influence sur l'écart *TZONE* mesurée-calculée via les composantes du bilan énergétique.

## 5.2. Développement d'une heuristique sophistiquée de calibrage

Elle a pour but de déterminer les facteurs principalement responsables d'un écart significatif mesure-modèle en utilisant :

— des *découplages dynamiques* : les phénomènes interviennent dans le bilan thermique avec des constantes de temps diverses (de quelques minutes pour le renouvellement d'air à plusieurs heures pour les échanges à travers les parois) ; pour un modèle linéaire, on peut donc supprimer les fluctuations rapides en intégrant l'écart mesure-modèle sur un grand pas de temps ;

— des *découplages phénoménologiques* : le choix de *fenêtres d'observation* permet de minimiser certains facteurs ; par exemple, une étude sur l'ensemble des nuits d'un mois donné permet de négliger les erreurs dues à la prise en compte des flux solaires.

Nous donnons, dans le *tableau II*, le schéma de l'ensemble des tests effectués sur la tour 10.

On soupçonne aisément la richesse et les difficultés de ce type d'approche. Il nous est impossible de détailler ici l'analyse différentielle de plusieurs centaines de simulations et du million de mesures effectuées sur deux années. Nous poserons de façon abrupte nos clauses de validité de la méthode, que nous demandons au lecteur de prendre comme un résultat acquis. Nous montrerons, dans un article ultérieur, en quoi cette heuristique sophistiquée de calibrage débouche sur une méthodologie plus rigoureuse, que l'évolution des moyens informatiques rendra prochainement accessible. On éclairera à cette occasion la frontière entre *calibrage* et *validation*, distinction que nous abandonnons sciemment dans cet article.

TABLEAU II			
Récapitulatif des tests de calibrage de l'appartement témoin ; recherche de corrélations entre fonctions d'erreur et facteurs d'influence, pour différentes périodes d'intégration, différents horizons et fenêtres d'observation.			
Fonction d'erreur <sup>(1)</sup>	Facteur d'influence	Période d'intégration	Horizon et fenêtre d'observation
$\sigma G = G_{\text{mesuré}} - G_{\text{calculé}}$ $\Delta \sigma G / \Delta t$ $\Delta^2 \sigma G / \Delta t^2$	. TZONE - $T_{\text{extérieur}}$	1 h	. Le mois, la saison
	. $T_{\text{radiateur}} - \text{TZONE}$	2 h	
	. TZONE - $T_{\text{escalier}}$	6 h	. De 10 h à 20 h
	. Vitesse du vent	12 h	. De 23 h à 7 h
	. Flux solaire entrant	La journée	. Sans vent
	. Heure de la journée		
(1) Avec $G = \text{TZONE}$ ou puissance de chauffage ou température de l'escalier.			

### Clauses de validités

Elles reposent sur la cohérence mesure-modèle-méthode de calibrage-objectifs, à travers trois aspects principaux :

— l'aspect statistique que nous définissons précédemment ;

— les objectifs, liés à l'évaluation énergétique, qui permettent de fixer le niveau métrologique indispensable et les poids statistiques significatifs ;

— la possibilité de comparaison entre grandeurs mesurées et calculées, qui détermine en principe la finesse du modèle requis.

Nous donnerons pour terminer, sur les figures 2 et 3, deux illustrations du type d'épreuve possible.

### 5.3. Résultats globaux de calibrage

Nous avons choisi de présenter trois types de résultats de calibrage.

L'histogramme de la différence horaire  $\Delta(\text{TZONE}) = \text{TZONE}_{\text{mesurée}} - \text{TZONE}_{\text{calculée}}$  est représenté sur les figures 4 et 5 pour les mois de janvier et avril ; l'écart type, d'une valeur de 0,4 K, est comparable aux erreurs de mesures.

Sur la figure 6, on peut vérifier la bonne corrélation entre les valeurs mesurées et calculées de la consommation totale de la Tour 10, moyennée sur 6 heures. (L'écart type de la différence entre ces deux consommations est de 6 kWh).

La figure 7 présente les résultats d'une épreuve plus sévère : un convecteur électrique de 2 kW génère des créneaux de puissance durant chacun 3 h, chaque jour, en intersaison, dans l'appartement témoin. Bien que les sollicitations soient importantes (flux solaire, convecteur électrique), la dynamique est bien conservée.

En conclusion, et à ce stade de description de la méthode, l'heuristique vise, à travers résultats, tests, contre-tests, étude de sensibilité, etc., à établir la conviction intime de l'analyste. Notre propre conviction est en forme de paradoxe : il nous a été possible d'aller beaucoup plus loin que prévu dans le calibrage des modèles mis en œuvre, à partir d'un dispositif métrologique léger. Cela nous a conduit, pour le calibrage des appartements avec serres en façade Sud, à pousser la modélisation au niveau des pièces, et nous a ainsi permis de mettre en défaut les modèles de serres de DOE2.1C. La figure 8 illustre les

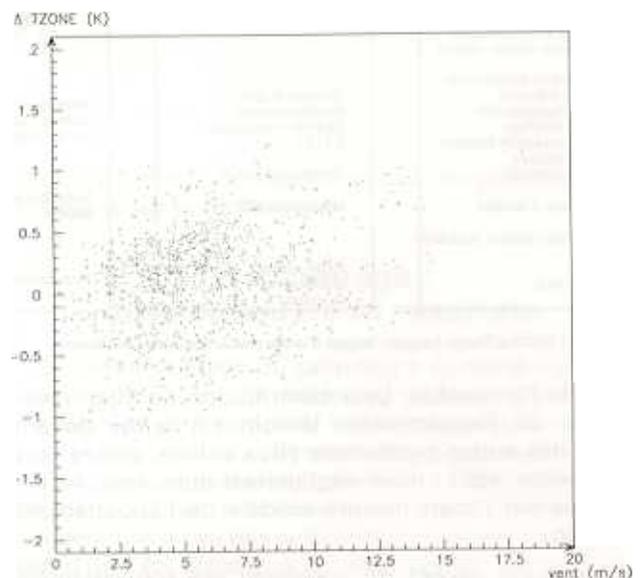


Fig. 2. — Diagramme de corrélation entre l'écart horaire mesure-calcul sur TZONE et la vitesse du vent (mois de janvier) : absence de corrélation évidente

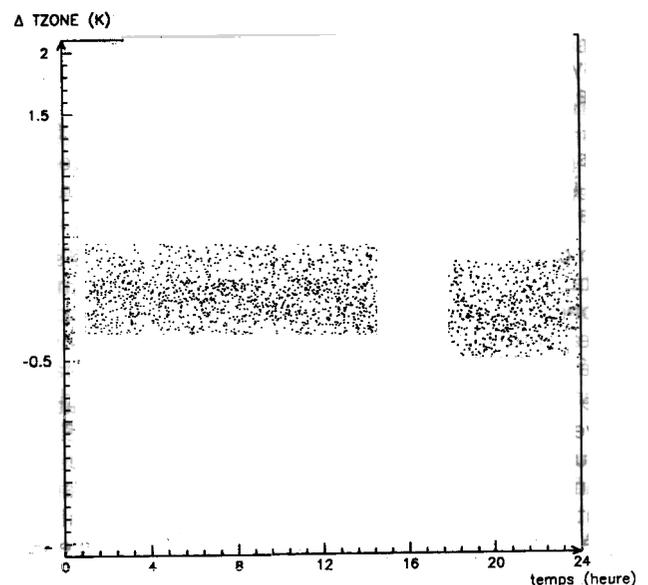


Fig. 3. — Dépendance de l'écart horaire mesure-calcul sur TZONE avec l'heure solaire : on a pu expliquer le biais observé de 16 h à 18 h par l'insolation de 3 sondes de température équivalente

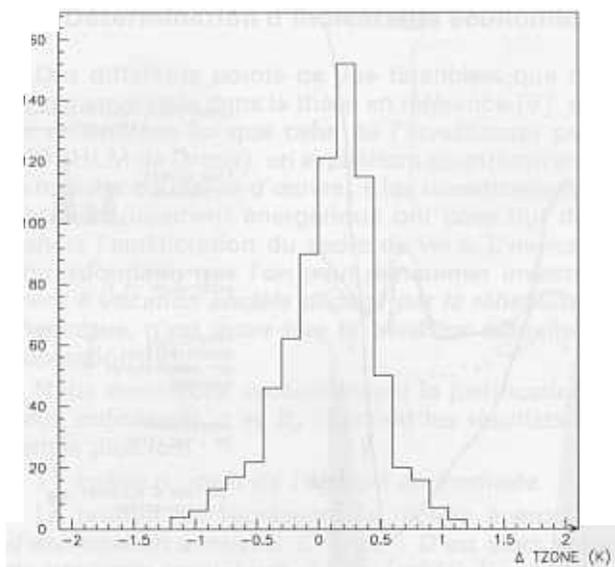


Fig. 4. — Histogramme de la différence horaire entre les valeurs mesurées et calculées de  $T_{ZONE}$ , pour le mois de Janvier (744 événements ; valeur moyenne : 0,1 K ; écart type : 0,4 K)

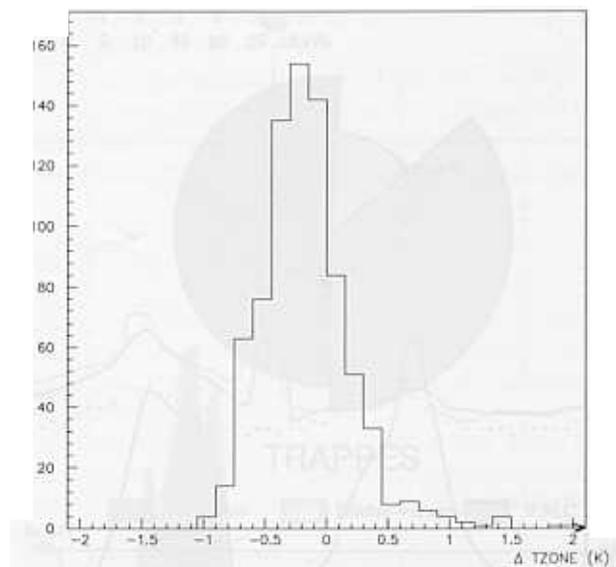


Fig. 5. — Histogramme de la différence horaire entre les valeurs mesurées et calculées de  $T_{ZONE}$ , pour le mois d'avril (792 événements ; valeur moyenne : 0,17 K ; écart type : 0,4 K)

résultats que nous obtenions alors, qui provoquaient une erreur standard sur la température moyenne d'environ 2 K sur l'année. Ce serait à la rigueur acceptable pour une analyse énergétique mensuelle, mais non satisfaisant pour une analyse paramétrique précise ou une étude de loi de commande de circulation d'air entre la serre et les pièces adjacentes par exemple. Un nouveau modèle est actuellement à l'épreuve et fournit des résultats satisfaisants.

#### 5.4. Calibrage et aide au diagnostic

Il nous semble que l'aspect anecdotique reflète le mieux l'aide au diagnostic que fournit la simulation. Il nous est maintes fois arrivé, sur divers bâtiments, de retourner sur les lieux du chantier pour tenter de comprendre les écarts mesure-modèle observés. Inmanquablement, des points avaient échappé à notre description :

- hauteurs des bois de portes-fenêtres,
- vitrages cassés, poussiéreux,
- sondes de température non protégées du soleil à certaines heures, etc.,
- retours d'infiltrations par les vide-ordures,
- stockage provisoire de baignoires dans un appartement témoin,
- pannes de la VMC, etc.

On a constaté ainsi que des aberrations du bâtiment étaient décelables grâce au calibrage.

### 6. Interface thermique-économique

Disposant de modèles calibrés, sensibles aux paramètres de la rénovation et ayant la justesse suffisante, il restait à effectuer l'étude de coût global.

L'évaluation de la contribution de l'économie d'énergie due à chaque composant sur les consommations de chauffage est relativement directe ; le

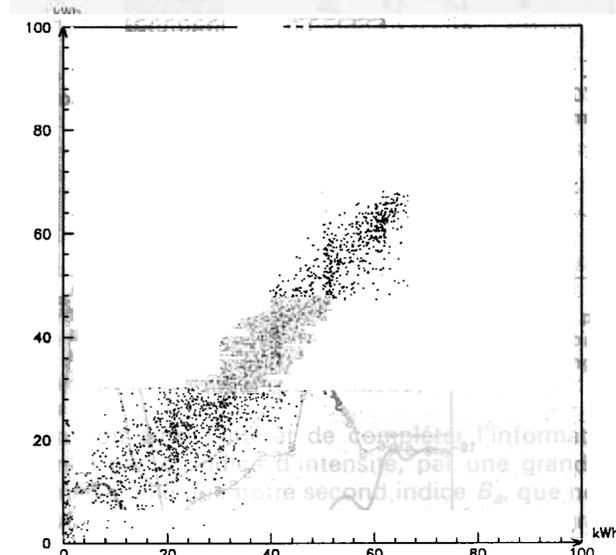


Fig. 6. — Diagramme de corrélation entre les énergies de chauffage, mesurées et calculées, pour la Tour 10. Ces énergies sont des moyennes mobiles sur 6 h, calculées heure par heure (mois de janvier à avril ; 2 928 événements)

calcul du coût global de chaque composant sur la durée de vie de l'installation nécessite :

- des simulations à l'aide de données météorologiques à pas horaire, représentatives d'une année moyenne [6] ;
- des données économiques ;
- des opérateurs comptables et des matrices d'intégration financières ;
- la définition du statut financier et juridique de l'investisseur.

En revanche, les conséquences de la rénovation sur le confort estival sont en général très mal traitées à l'aide de la définition de *coûts d'inconfort* et de *fonctions statistiques dérivées*.

Au lieu de rechercher à optimiser une fonction de coût généralisé, somme des coûts énergétiques et des coûts d'inconfort, très arbitraire, nous avons opté

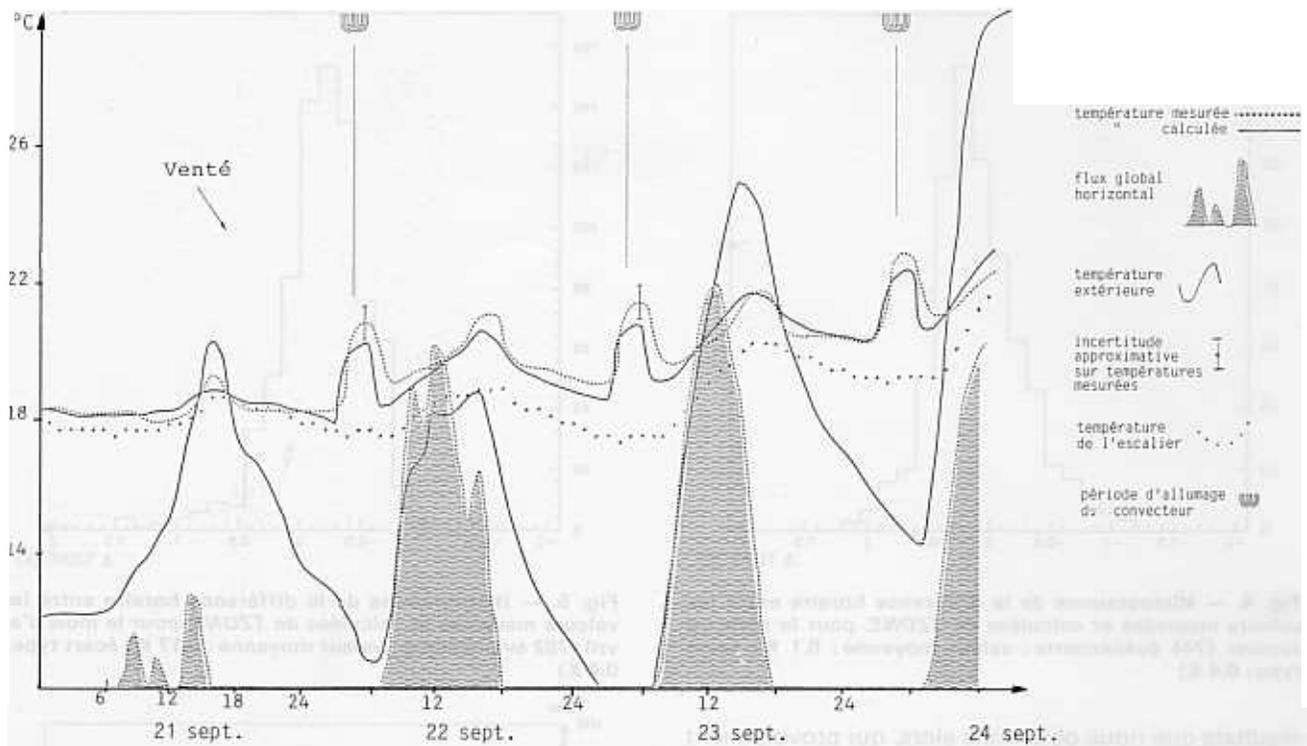
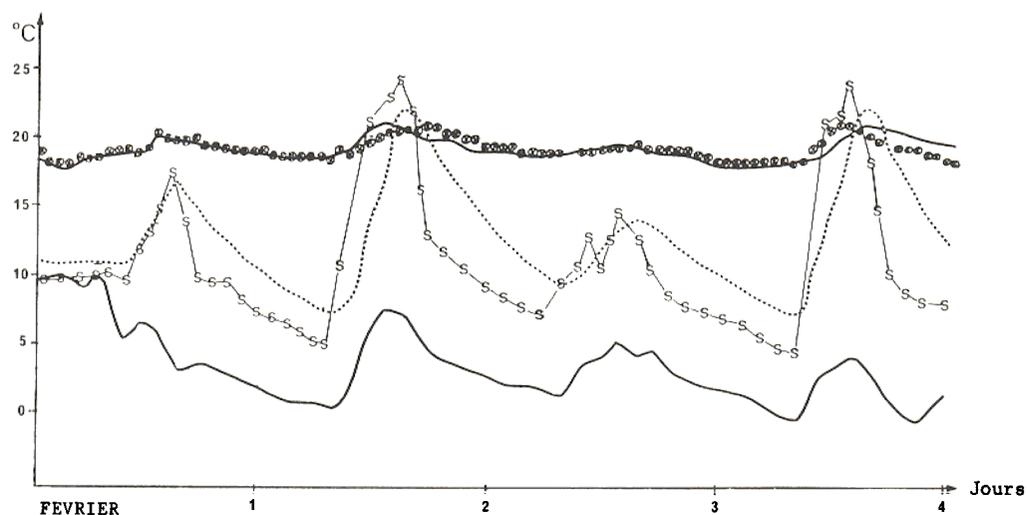


Fig. 7. — Comparaison entre les valeurs mesurées et calculées de la température équivalente de l'appartement témoin (TZONE), pour 4 journées du mois de septembre. Un convecteur électrique est allumé 3 h par jour afin d'éprouver la dynamique du modèle



— température extérieure  
 ssssss température moyenne mesurée de la serre  
 - - - température moyenne simulée de la serre  
 oooooo température moyenne mesurée de la pièce accolée à la serre  
 ——— température moyenne simulée de la pièce accolée à la serre

Fig. 8. — Mise en défaut du modèle de serre dans la version précédente de CALECO-DOE.2 (1C). L'écart standard sur la température moyenne de la serre est supérieur à 2 K sur l'année

pour une autre approche, dans le cas où un élément générateur d'économies d'énergie est responsable d'une dégradation des ambiances thermiques estivales. Nous proposons plutôt une règle qui est d'exiger du concepteur qu'il adjoigne à son projet de réhabilitation les améliorations nécessaires à la conservation du confort d'été : auvents, stores, pare-soleil, etc.

Pour poursuivre sur l'exemple mentionné de la Tour 10, les simulations ont porté sur des variations

paramétriques correspondant à quatre classes d'éléments de la rénovation :

- 1) épaisseur d'isolants extérieurs en façades et en toitures-terrasses ;
- 2) vitrages (simples, doubles, triples) ;
- 3) volets (plus ou moins isolants) ;
- 4) étanchéité des joints de fenêtre et ventilation mécanique contrôlée (simple ou double flux).

## 6.1. Détermination d'indicateurs économiques

Des différents points de vue financiers que nous avons envisagés dans la thèse en référence [7], nous ne retiendrons ici que celui de l'investisseur public (l'OPHLM de Dreux), en explicitant quantitativement la maxime du maître d'œuvre : « les investissements à vocation purement énergétique ont pour but de financer l'amélioration du cadre de vie ». L'indicateur correspondant, que l'on peut dénommer *investissement à vocation sociale dégagé par la réhabilitation thermique*, n'est autre que le bénéfice actualisé de l'opération [7].

Nous donnerons succinctement la justification de deux indicateurs  $q$  et  $B_a$  illustrant les résultats présentés plus loin.

*1<sup>er</sup> indice  $q$  : coût de l'énergie économisée*

Le produit  $pE$  représente la recette énergétique d'exploitation annuelle.  $C = pE - D$  est alors le flux de trésorerie annuel net et  $q = [m6(i).I + D]/E$  où  $m6(i) = 1/m5(i)$  [14] donne l'annuité permettant de rembourser en  $n$  fois un capital de 1 F (Capital Recovery Factor).

Ainsi,  $q$  est directement comparable au prix coûtant de l'énergie  $p$  et caractérise la rentabilité du gisement d'économie d'énergie recelé par un élément de réhabilitation.

*2<sup>e</sup> indice  $B_a$  : investissement à vocation sociale dégagé (bénéfice actualisé)  $B_a = K - I$*

C'est lui qui permet d'anticiper l'exploitation du gisement d'économies rendu possible par l'investissement  $I$ , sur la durée de vie de l'installation.

D'autres indicateurs prennent leur importance pour chaque phase de la rénovation : ils sont amplement détaillés dans la thèse en référence [7].

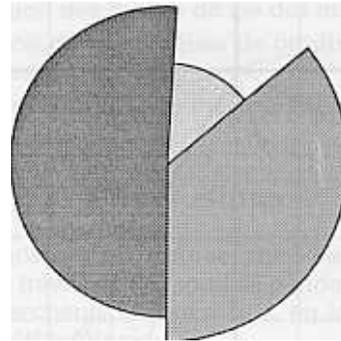
## 6.2. Analyse en coût global des résultats de la réhabilitation

Il s'agissait, pour la Tour 10, de doubles vitrages, de VMC simple flux, d'isolation extérieure (3 cm de polystyrène en façade, 5 cm en toiture). Les investissements initiaux  $I$  correspondants ont été calculés à partir des factures des entreprises, reventilées sur chaque classe d'élément de réhabilitation ; tous les prix indiqués sont en Francs 1980, année des pré-études.

Chacun de ces trois éléments de réhabilitation contribue à la diminution des consommations de chauffage ; sur le camembert de la *figure 9*, les secteurs sont proportionnels à cette contribution, et les rayons associés donnent l'indice  $q$  — prix unitaire de l'énergie économisée par la réalisation de ce seul élément. Le coût unitaire des 140 MWh annuels globalement économisés par les trois éléments est alors de 21,7 c/kWh. Ces quatre indices restent en-deçà du prix coûtant de l'énergie de chauffage (27,5 c/kWh) : l'opération est rentable.

La pose d'une double vitre est la source de réduction des consommations la moins chère, mais le gisement d'économies associé est limité puisqu'elle contribue pour moins de 15 % au total. A l'inverse, l'isolation extérieure, bien que plus coûteuse, a un gisement plus large.

0 5 10 15 20 25 c/kWh



## TRAPPES

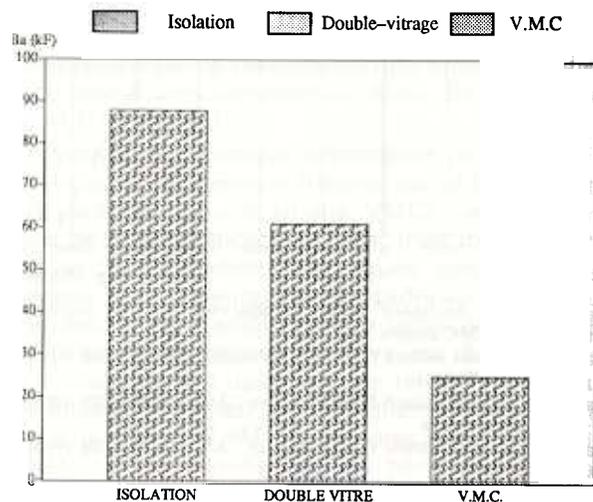


Fig. 9. — Indicateurs économiques et énergétiques pour trois éléments de réhabilitation thermique, calculés pour la tour 10, à Trappes. Les murs sont bâtis en parpaings à rupture de ponts thermiques (PRESEC)

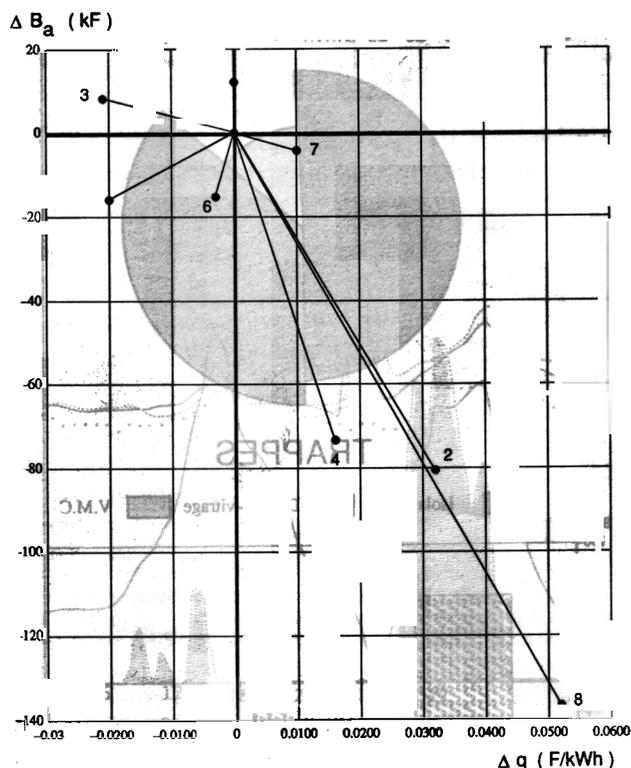
On voit ainsi l'intérêt de compléter l'information donnée par  $q$ , indice d'intensité, par une grandeur extensive telle que notre second indice  $B_a$ , que nous avons histogrammé (*figure 9*). Ainsi, des deux grandeurs retenues,  $q$  correspond à la notion de *rentabilité d'un placement*,  $B_a$  y ajoute les limites d'applicabilité pratique d'un investissement.

## 6.3. Recherche d'optimums

La *figure 10* donne les variations en  $\Delta q$  et en  $\Delta B_a$  pour les cas étudiés. On peut remarquer que seul le cas 5 augmente la rentabilité de l'opération et correspond à une offre faite par une entreprise d'installer 5 cm d'isolation en façade et 7 cm en toiture. Cette offre a dû être rejetée à l'époque par application de la règle juridique d'attribution des marchés *au moins disant*. C'est ce résultat qui nous a conduit à proposer une nouvelle règle d'attribution au *mieux disant* qui permet de choisir, plutôt que l'entreprise la moins chère, celle qui propose des travaux générant le coût global le plus faible. Cette règle a été adoptée par le Ministère en 1986.

## 6.4. Généralisations

L'extension des simulations à d'autres sites météorologiques est peu risquée, tout au moins dans une



Cas de base : épaisseur isolant façade/toiture : 3/5 ; nombre de vitrages : 2 ; VMC simple flux  
 Cas 1 : épaisseur isolant façade/toiture : 3/5 ; nombre de vitrages : 2 ; pas de VMC  
 Cas 2 : épaisseur isolant façade/toiture : 3/5 ; nombre de vitrages : 2 ; VMC double flux  
 Cas 3 : épaisseur isolant façade/toiture : 3/5 ; nombre de vitrages : 3 ; pas de VMC  
 Cas 4 : épaisseur isolant façade/toiture : 5/7 ; nombre de vitrages : 2 ; pas de VMC  
 Cas 5 : épaisseur isolant façade/toiture : 5/7 ; nombre de vitrages : 2 ; VMC simple flux  
 Cas 6 : épaisseur isolant façade/toiture : 10/12 ; nombre de vitrages : 2 ; pas de VMC  
 Cas 7 : épaisseur isolant façade/toiture : 10/12 ; nombre de vitrages : 2 ; VMC simple flux  
 Cas 8 : épaisseur isolant façade/toiture : 10/12 ; nombre de vitrages : 3 ; VMC double flux, avec en plus des volets isolants fermés la nuit

Fig. 10. — Variation des indicateurs économiques dans la recherche d'optimum

même région méso-climatique, du fait des résultats mensuels de calibrage qui reflètent des variabilités comparables.

La figure 11 étend les résultats commentés au paragraphe 6.2 à trois autres sites météorologiques. On constate que le coût associé à l'isolation extérieure reste plus important que pour le double vitrage ; la cause en est le procédé constructif initial des immeubles en parpaings à rupture de ponts thermiques [8], qui procure déjà une isolation de qualité moyenne. Nous avons refait l'étude à partir de parpaings de béton standards plus couramment utilisés. Les résultats, rassemblés sur la figure 12, mettent alors en évidence — s'il en était besoin — l'aberration que constitue la mauvaise isolation des parois extérieures sur l'ensemble du territoire métropolitain, et donc l'avantage manifeste de son amélioration.

En conclusion, on peut noter à la fois la variabilité de la hiérarchie et du niveau de la rentabilité des éléments de réhabilitation étudiés sur un même immeuble, en fonction de sa situation et de son état

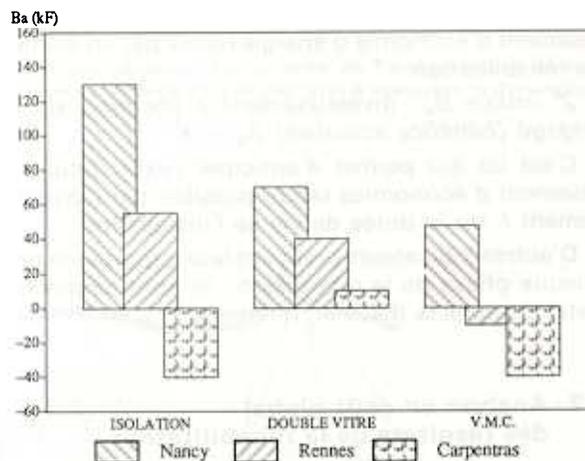
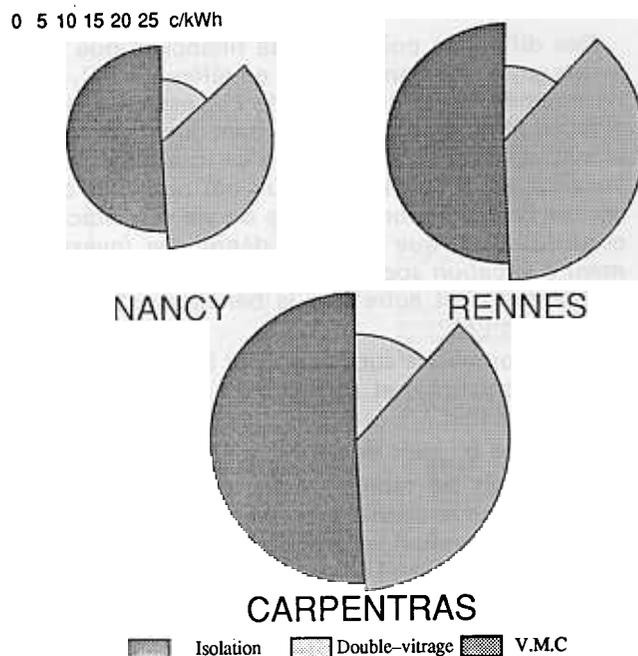


Fig. 11. — Indicateurs économiques et énergétiques pour trois éléments de réhabilitation thermique, calculés pour trois autres sites (Nancy, Rennes, Carpentras)

initial. On comprend, au vu de ces résultats, qu'il est exclu de donner des règles générales de procédés de réhabilitation, et que chaque cas d'espèce devra faire l'objet d'une étude : c'est à ce prix que la rénovation des logements peut prendre toute sa force dans l'efficacité économique d'une région.

## 7. Analyse de crédibilité

Nous avons résumé la sensibilité des indicateurs présentés en fonction des variations plausibles des paramètres pour la seule isolation extérieure de la Tour 10 (tableau III).

On constate que le prix de l'énergie économisée ( $q$ ) est moins sensible aux aspects prévisionnels que le bénéfice actualisé ( $B_a$ ).

De plus, les incertitudes du calcul énergétique ont une incidence relativement faible sur ces deux indicateurs.

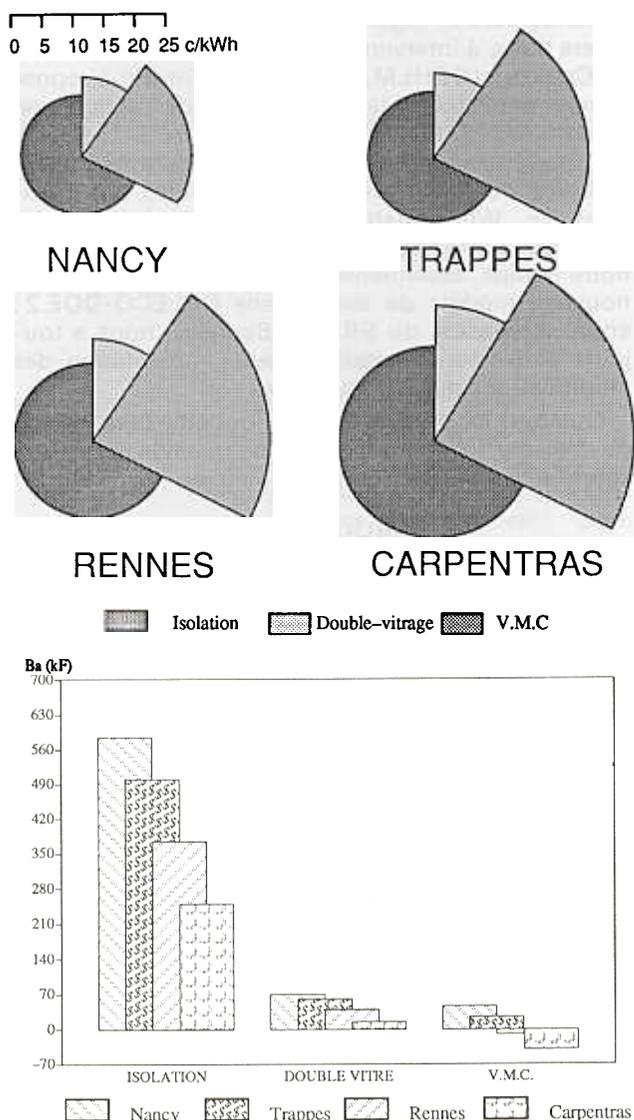


Fig. 12. — Indicateurs économiques et énergétiques pour trois éléments de réhabilitation thermique, calculés pour quatre sites météorologiques. Les murs sont bâtis en parpaings standards

Si la durée de vie de l'installation est le facteur le plus sensible, il faut noter qu'une étude complète devrait prendre en compte l'augmentation plausible de cette valeur du fait de la rénovation — ce qu'il ne nous a pas été possible de faire.

En conclusion, l'analyse énergétique permet de préciser les aspects économiques, sans introduire de biais imputables aux incertitudes inévitables à toute simulation. On retrouve, en revanche, de grandes incertitudes inhérentes à toute prévision à long terme,

caractéristique essentielle de toute politique énergétique nationale sur :

- l'estimation des durées de vie des installations ;
- l'évolution des techniques de production et du savoir-faire des entreprises ;
- l'évolution des prix du marché énergétique.

## 8. Conclusions

Nous n'avons pu que résumer dans cet article les résultats d'un travail qui a mobilisé pendant 5 ans de nombreux chercheurs et ingénieurs, en insistant sur les aspects méthodologiques.

Cependant, bien que nos illustrations aient porté sur un seul immeuble, signalons que l'opération de rénovation de la Cité du Lièvre d'Or à Dreux est un succès, les choix judicieux, proches de l'optimum, s'expliquant par la consultation de bureaux d'étude et de thermiciens compétents (AURA, BELUARD, PERINIC et RAOUST) [10].

L'analyse économique précédente ne portait que sur les aspects purement thermiques de la réhabilitation (isolation, double vitrage, VMC). Les autres travaux de réhabilitation effectués, d'un montant proche de ceux purement thermiques, sont davantage orientés vers l'amélioration du cadre de vie : extension des façades, adjonction de serres, réfection des sanitaires et des cages d'escaliers, etc. Si l'on considère maintenant l'opération de réhabilitation dans son ensemble, elle est financièrement *blanche* (bénéfice actualisé de 3 MF, à comparer aux 31 MF coûtants), ce qui signifie que les bénéfices anticipés provenant de la réhabilitation thermique ont bien été réinvestis dans les aspects socio-architecturaux.

### Aspects méthodologiques

Nous avons démontré qu'il était crucial d'établir un diagnostic initial spécifique à chaque ensemble d'habitation à rénover (figures 9 et 11).

Nous avons établi :

- que le code de simulation CALECO-DOE.2, largement répandu dans les bureaux d'études internationaux, convenait remarquablement bien à ce type d'étude ;
- que la simulation permettait l'applicabilité de la règle d'attribution des marchés *au mieux-disant* ;
- qu'il est possible de calibrer les modèles de départ en situation réelle sans dispositif métrologique lourd et d'en bénéficier pour l'établissement correct du diagnostic thermique initial ;
- que, moyennant la définition d'indicateurs de coûts globaux, la simulation apporte un gain consi-

	$\delta i=0,5\%$	$\delta n=-5$ ans ( $=-25\%$ )	$\delta p=-0,03$ F/kWh ( $=-11\%$ )	$\delta E=-2$ MWh/an ( $=-3\%$ )	$\delta I=3$ kF ( $=1\%$ )
$\delta B_a$ (kF)	-20,3	-100	43,8	-11,0	-3,0
$\delta q$ (F/kWh)	0,011	0,071	0	0,006	0,002

dérable d'efficacité pour mener à bien les phases d'étude et de réalisation des rénovations ;

— enfin, que ces mêmes indicateurs permettent de traiter le gisement d'économie d'énergie sur le même plan que la production énergétique dans son ensemble.

### Aspects promotionnels

L'opération de rénovation de la Cité du Lièvre d'Or à Dreux figure dans la publication : « Project Monitor » de la CEE [11], consacrée à des opérations bio-climatiques européennes.

Lors du diagnostic énergétique de la cité, nous avons pu mettre en évidence l'importance des pertes thermiques dans le circuit primaire du réseau de chauffage et ainsi proposer une amélioration de sa régulation. Cette meilleure gestion du circuit primaire a ensuite été étendue aux autres cités de Dreux par la Compagnie Générale de Chauffage régionale.

### Axes de recherche

On peut signaler — à l'actif du calibrage — que nous avons pu mettre en défaut le modèle des serres de façade de CALECO-DOE.2 et que nous avons dû développer de nouveaux algorithmes qui ont été inclus dans la version 1.D du code [13].

De plus, de nombreux modèles restent encore très insatisfaisants, concernant notamment les aspects passifs du bâtiment :

- couplage sol-bâtiment ;
- modèle de ventilation ;
- transfert de chaleur et de masse dans les matériaux.

Cependant, ce code reste destiné aux analyses énergétiques, et un effort de modélisation sera nécessaire pour traiter convenablement les couplages convection-rayonnement-conduction, nécessaires à l'étude de régulations fines et de qualification des ambiances thermiques.

Le génie thermique représente un aspect particulier d'une analyse multicritères qui devrait intégrer fortement les aspects sociaux et professionnels, ainsi qu'une interface réaliste avec les aspects macro-économiques.

Nous terminerons donc en plaidant pour un développement théorique et pluridisciplinaire qui trouve un terrain fécond dans la mouvance de la récente création au CNRS de la commission AUS [12].

### REMERCIEMENTS

Cette étude n'aurait pu être réalisée sans le soutien actif et bienveillant du PIRDES/CNRS, de l'AFME (en particulier O. DESELLE, J.P. LEPOIVRE et B. PLAZY), et du Plan Construction (J.P. MARIE). Le Directeur de l'OPHLM de Dreux, J.P. HAMONT, a su faire partager à son entourage l'enthousiasme qu'il portait à nos travaux : en particulier, la Société Générale de Chauffage de Dreux nous a constamment aidés et soutenus.

De nombreux ingénieurs et chercheurs ont eu, à divers titres, à intervenir tout au long de cette étude : D. CLEMENT (OPHLM, puis AFME) sur qui a reposé le suivi périlleux de la métrologie et de l'acquisition de données ; J. NOPPE (OPHLM, puis AFME) qui n'a pas reculé devant le traitement de l'ensemble (considérable) des données et des premières modélisations ; F. WINKELMANN, coordinateur du SRG de Berkeley, a, au cours de son année sabbatique dans notre équipe, essentiellement conçu et développé le nouveau modèle de serres dans CALECO-DOE.2 ; enfin, J. HIRSCH, du SRG de Berkeley, nous a toujours activement soutenus pour l'implantation des modifications du code de calcul.

Que tous les participants, qui ont eu à faire montre de réalisme, de compétence et de qualités humaines, soient très chaleureusement remerciés.

### BIBLIOGRAPHIE

- [1] BLOCH-LAINE (J.M.). — Rapport au gouvernement. Mai 1989.
- [2] Arrêté du 28 décembre 1984 sur les méthodes de calcul des coefficients volumiques de déperditions thermiques (G) et des besoins de chauffage (B) des bâtiments d'habitation. Journal Officiel de la République Française, M.U.L., Paris, 20 janvier 1985.
- [3] Suivi et analyse de l'opération de rénovation thermique et architecturale de la Cité HLM du « Lièvre d'Or » à Dreux. Rapport d'exécution de la Convention n° 81 13028 2017, mars 1983.
- [4] CLEMENT (D.) et al. — *Réhabilitation de la Cité du Lièvre d'Or à Dreux*. Comptes rendus de la Conférence sur l'Architecture Solaire, réunie à Cannes du 13 au 16 décembre 1982, Techniques et Documentation (Lavoisier) édit., Paris, 1983, p. 142-157.
- [5] DOE.2 engineer's manual (version 2.1A). Lawrence Berkeley Lab., Energy Division, Building Energy Simulation Group, 1bl-11353 (DOE contract DE-ACO3-76SF00098), Los Alamos National Lab. Energy Division, Solar Energy Group, LA-8520-M (DOE contract W-7405-ENG-36), edited by York D.A. and Cappiello C.C., Nov. 1981.
- [6] BOURDEAU (L.) et al. — *Conventions unifiées pour le calcul du coefficient B*. C.S.T.B. éd., juillet 1984.
- [7] REGO-TEIXEIRA (A.). — *Etudes multi-paramétriques des facteurs d'économie d'énergie dans le bâtiment, fondées sur le logiciel CALECO/DOE.2*. Thèse de Doctorat, Université Paris VII, février 1987.
- [8] Procédé PRESEC (parpaing à rupture de ponts thermiques). Avis technique du Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, n° 2950, 1968.
- [9] DOE.2 - Version 1.C Supplement. Lawrence Berkeley Lab., Energy Division, Building Energy Simulation Group, 1bl-11353 (DOE contract DE-ACO3-76SF00098), Los Alamos National Lab. Energy Division, Solar Energy Group, LA-8520-M (DOE contract W-7405-ENG-36), edited by York D.A. and Cappiello C.C., May 1984.
- [10] RAOUST (M.). — *Réhabilitation d'un ensemble de logements collectifs par des techniques passives : l'opération du « Lièvre d'Or » à Dreux*. Comptes rendus du Colloque sur l'Architecture Solaire Passive, réuni à Cannes en décembre 1980.
- [11] CEE - Project Monitor - Issue 16, April 1988.
- [12] Commission transversale n° 49 du Comité National de la Recherche Scientifique « Architecture, Urbanistique et Société ».
- [13] DOE-2 user news. Lawrence Berkeley Lab., PUB 439, Vol. 9, n° 3, Fall 88.
- [14] CADIERGUES (R.). — *Méthode d'analyse économique des investissements énergétiques*. Promoclim-E, octobre 1980.

