

Les techniques de réduction de modèles et de programmation orientée objets rendent la simulation en multizone accessible aux professionnels, architectes ou BET. Un logiciel développé sur ces bases, Comfie (de l'anglais comfy, confortable), tourne sur IBM compatible et Mac Intosh. Il permet l'analyse globale d'un projet d'architecture solaire : calcul des besoins de chauffage/climatisation et évaluation du confort d'été.

Le logiciel a été utilisé dans diverses études, par exemple pour éviter la climatisation dans un bâtiment tertiaire, évaluer les performances de maisons bioclimatiques ou de toitures solaires, et tester de nouvelles technologies comme l'isolation transparente. Quelques applications sont présentées avec des références.

Un club d'utilisateurs a été créé, afin de constituer une gamme de services : diffusion du logiciel, utilisation en service bureau, développement d'une base de connaissances en architecture bioclimatique.

Une maison bien exposée en région Ile de France reçoit sur une saison de chauffe un rayonnement solaire égal à presque huit fois ses besoins de chauffage. Même en décembre, la ressource vaut environ 1,5 fois les besoins. Peut-on, grâce à une conception architecturale ap-

# COMFIE

## logiciel pour l'architecture bioclimatique

5733

Bruno PEUPORTIER  
Centre d'Energétique, Ecole des Mines de Paris



propriée, valoriser cette ressource tout en assurant un bon confort thermique en été ?

Pour répondre à cette question, il faut étudier une dynamique globale captage/stockage/restitution de l'énergie. La simulation numérique permet d'étudier cette dynamique, en fonction de la course du soleil et de l'inertie des matériaux de construction. Le modèle doit aussi considérer les échanges entre les différentes parties du bâtiment, par exemple entre les pièces sud et nord, entre une véranda et un séjour, etc. On parle alors de modèle multizone.

Afin d'être accessible aux professionnels, et de réduire le temps de calcul à quelques minutes sur micro-ordinateur, les modèles ont été simplifiés ici grâce à une technique nommée « analyse modale ». Mais il faut avant tout permettre à un non-physicien de décrire un bâtiment sur ordinateur, et la programmation orientée objets facilite ce travail.

Il est possible, au stade de la conception architecturale, de réduire la consommation d'énergie à la source, en réduisant les besoins du bâtiment en hiver comme en été. Si l'étude thermique est déléguée au BET en phase finale du projet, l'obten-

tion du confort reposera sur les équipements de chauffage et de climatisation, ce qui aboutit souvent au gaspillage. Nous proposons donc ici un travail en commun entre l'architecte et le bureau d'études, pour répondre aux nouvelles exigences des maîtres d'ouvrage en matière de protection de l'environnement.

Le logiciel peut également être utilisé pour comparer diverses solutions de réhabilitation et pour tester les nouvelles technologies de la transparence.

### La modélisation architecturale

Il s'agit de construire un bâtiment sur ordinateur, en utilisant des objets informatiques correspondant aux concepts habituels : matériaux, fenêtres, murs... [1]. En ce qui concerne la description géométrique, nous travaillons pour interfacer Comfie au logiciel de CAO ZZ-Volume.

L'utilisateur conçoit un projet selon son style, en choisissant les matériaux, les vitrages, les revêtements de façade. Ces éléments sont placés dans des bibliothèques, qui constituent l'équivalent des fournisseurs de matériaux (fig. 1 et 2).

Fig. 1.

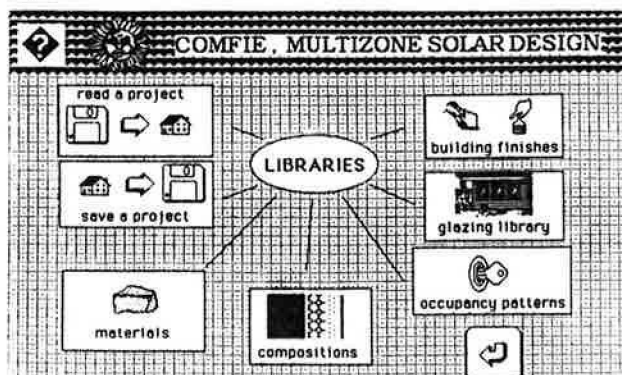
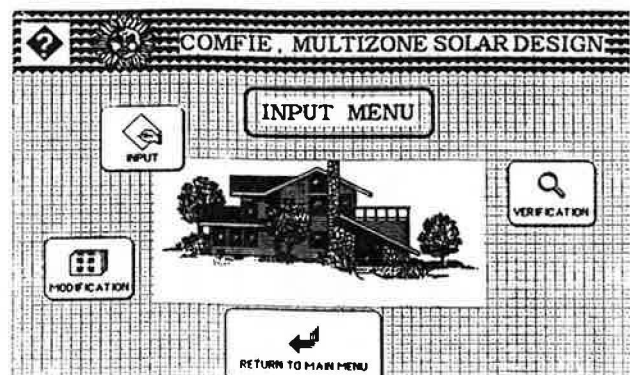


Fig. 2.



L'utilisateur peut alors associer les différents éléments pour constituer des objets plus complexes : parois, zones, bâtiment entier. Le comportement des occupants, lié à l'utilisation du bâtiment (habitations, bureaux...), est défini dans un scénario d'occupation, contenant les profils de températures de consigne, de ventilation et de gains internes pour chaque jour de la semaine.

Chaque objet est relié aux autres par un pointeur : une zone thermique contient des pointeurs par ses parois, chaque paroi contenant elle-même des pointeurs sur des vitrages, des masques, etc.

La description d'un projet peut être plus ou moins complexe : une grande façade par exemple peut être découpée en plusieurs parois de zone pour évaluer plus précisément l'effet d'un masque (fig. 3).

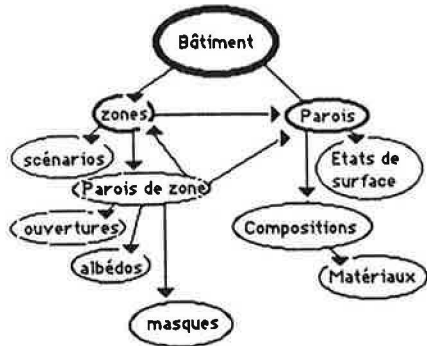


Fig. 3. Structure de données du bâtiment.

L'intérêt d'une telle structure est de faciliter la modification, l'addition, la suppression ou le remplacement d'un objet à n'importe quel niveau. Cette modification est structurée : si un matériau est modifié, cette modification se propage automatiquement dans toutes les compositions de parois concernées. Mais on peut aussi ne modifier que l'une des compositions, toutes les parois constituées par cette composition seront alors modifiées. Enfin, on peut ne modifier qu'une seule paroi en remplaçant sa composition par une autre. Grâce à cette grammaire, il est très facile de comparer des variantes de conception, et donc d'affiner une esquisse en prenant en compte l'analyse thermique.

## De l'évaluation à la conception

Les modèles numériques permettent d'évaluer la performance énergétique d'un bâtiment. Le degré zéro de la conception consiste alors à évaluer toutes les variantes possibles d'un projet puis à choisir la meilleure.

Une « interface experte », premier prototype encore très sommaire, propose dans Comfie quelques pistes pour l'analyse. Dans le module « déperditions thermiques », le coefficient de pertes est calculé pour chaque zone et pour le bâtiment entier. L'utilisation de la matrice statique permet de prendre en compte le multizone, en particulier les espaces tampons. Les principales causes des déperditions sont données (paroi la moins isolée, vitrage le plus déperditif, taux de renouvellement d'air le plus élevé) et des modifications sont proposées, que l'utilisateur peut tester ou rejeter. Après le test, il est

possible de revenir à la version précédente du projet si la modification n'est pas satisfaisante.

Le module « gains solaires » propose une étude de sensibilité sur la surface des vitrages au sud et calcule la surface équivalente sud.

Le module « confort d'été » permet de tester un accroissement de l'inertie des parois sud, d'évaluer l'effet d'une ventilation nocturne et le rôle de divers types de masques (casquette, végétation, store).

Le module « multizone » donne quelques indications sur l'agencement des différentes ambiances thermiques, afin de choisir leur exposition solaire en fonction de leur utilisation. Le graphe de ventilation est également étudié pour minimiser les irréversibilités thermodynamiques.

Chaque module fait appel à des calculs de niveau de complexité approprié : simple analyse de la structure de données (module « multizone »), calcul de paramètres synthétiques (modules « déperditions » et « gains solaires »), simulation (module « confort d'été », « calcul des besoins de chauffage »).

## Validation des calculs

La méthode d'analyse modale a été initialement développée pour la mécanique avant d'avoir été appliquée à la thermique [2, 3, 4, 5]. Plusieurs études de validation ont eu lieu pour tester l'ensemble des hypothèses de la simulation simplifiée, et en particulier la réduction des modèles. Le logiciel européen de simulation détaillée ESP [6] a constitué notre principale référence, ainsi que plusieurs résultats expérimentaux :

- comparaison avec des mesures expérimentales sur cellule test Passys à l'université de Stuttgart [7] ;
- comparaison avec ESP dans le cas d'une véranda (fig. 4), par Santi Vitale (Enel, Italie) ;
- comparaison des consommations énergétiques annuelles par rapport à d'autres outils simplifiés (Suncode, Apache) et étude de sensibilité sur la surface vitrée sud, effectuée par John Littler (Polytechnic of Central London, Grande-Bretagne) ;
- validation dans le cas de l'isolation transparente par Bernd Polster (université de Stuttgart, RFA) [8].

Une validation est en cours pour tester les corrélations concernant les échanges par convection naturelle [9] dans une véranda accolée à une cellule test au Centre

d'études nucléaires de Cadarache. Ces corrélations viennent compléter les modèles modaux réduits dans le module de simulation. Comfie est également en cours de test selon la procédure préconisée par l'Agence internationale de l'Energie.

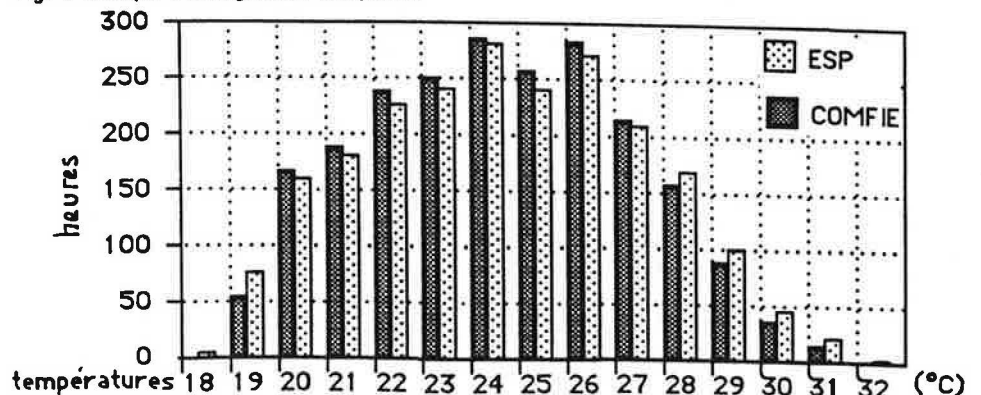
Les principales conclusions de ces études sont les suivantes. Certaines hypothèses simplificatrices affectent peu la précision des calculs, par exemple le fait de négliger l'inertie des vitrages et même des isolants transparents, de combiner les échanges convectifs et radiatifs, de considérer le rayonnement solaire transmis par les vitrages comme diffus, ou de réduire à trois le nombre de modes dans les modèles réduits.

En appliquant les résultats d'une étude effectuée dans le cadre de la commission des Communautés européennes [10], le climat a été lui aussi simplifié : une année type est modélisée par une SRY (Short Reference Year) constituée par huit semaines représentatives, deux par saison. La comparaison entre TRY (Test Reference Year, année entière) et SRY donne les résultats suivants. L'écart sur les valeurs absolues des besoins annuels de chauffage se situe entre 2 et 4 % mais on obtient en valeur relative un écart de 10 % lorsqu'on calcule la productivité d'un mur solaire par différence entre deux valeurs absolues. Pour augmenter la précision, on peut donc effectuer une simulation sur une TRY, mais la durée du calcul est augmentée.

En ce qui concerne l'analyse du confort d'été, les SRYs donnent une période type ; la présentation des résultats en histogrammes de températures est donc intéressante. Par contre, elles ne donnent pas de période critique (par exemple deux semaines de canicule). L'utilisateur peut cependant constituer des fichiers appropriés, en particulier pour évaluer des charges de climatisation (puissances maximales en W).

La principale limite du modèle est qu'il ne concerne que les échanges thermiques, il ne fait pas intervenir les équations de la mécanique des fluides. On ne peut donc pas étudier la stratification de l'air d'une zone, l'influence du vent sur les infiltrations d'air, la diffusion d'eau dans les parois... Les changements d'état ne sont pas non plus pris en compte, donc le stockage par chaleur latente n'est pas traité, ni l'effet des variations d'humidité. Les équipements sont définis uniquement par une puissance maximale, en chauffage et en climatisation, et par des températures de consigne. C'est donc exclusi-

Fig. 4. Exemple d'histogramme comparatif



vement l'enveloppe qui est étudiée. L'objectif est de réaliser des économies à la source, sur les besoins énergétiques du bâtiment.

## Les sorties du logiciel

### Le choix de l'énergie

En simulation d'hiver, les calculs donnent les besoins de chauffage. Une évaluation des coûts annuels de chauffage est déduite grâce à des rendements et des coûts du kWh donnés par l'utilisateur (des valeurs par défaut étant disponibles). Cela permet de comparer très rapidement différentes énergies.

	gaz (cond.)	gaz	fioul
rendement	100	80	80
coût/kWh	23	23	19
coût annuel	1 600	2 000	1 652

	charbon	bois	électricité
rendement	80	80	100
coût/kWh	23	14	73
coût annuel	2 000	1 218	5 079

### La gestion de l'intermittence

Des profils de température peuvent être obtenus afin de vérifier que l'heure de redémarrage d'une chaudière permet de respecter la consigne (fig. 5). Sur la version Mac Intosh, les graphes sortent directement en mac paint et peuvent être utilisés pour le rapport d'étude thermique.

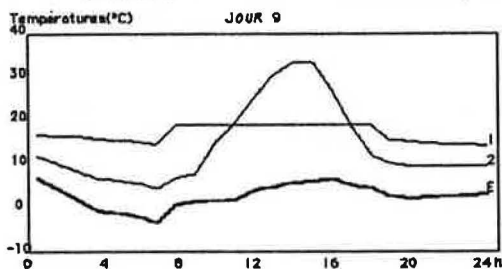


Fig. 5. Profils de température.  
1 : bureaux - 2 : atrium.

### L'évaluation du confort

La simulation d'été donne des histogrammes de température permettant d'évaluer le niveau de confort moyen sur l'été (fig. 6).

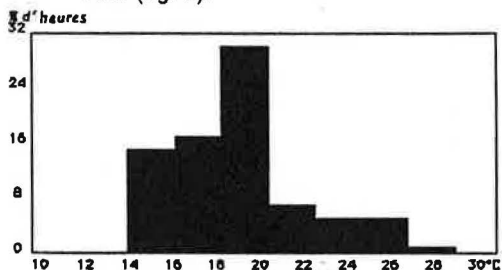


Fig. 6. Histogramme pour la zone atelier.

### Le dimensionnement des équipements zone par zone

Les équipements de chauffage/climatisation sont dimensionnés zone par zone par une méthode en dynamique.

zone	puissance maximale de chauffage	puissance maximale de climatisation
1	6 510 W	0 W
2	2 320 W	0 W

## Quelques applications : logements, bureaux, écoles...

L'étude thermique du lotissement solaire « Aurore » à Mouzon (architecte : Jacques Michel) a permis de comparer divers types de murs solaires et d'évaluer l'intérêt des isolants transparents [11] pour des murs Trombe et des toitures solaires. Une comparaison sera effectuée entre les simulations et les résultats des mesures sur site.

Malgré une productivité un peu plus faible que celle du mur stockeur simple, le mur Trombe à circulation intérieure offre l'avantage d'être facile à réguler (il suffit de fermer les registres d'air pour éviter les surchauffes d'été). Par une période froide et peu ensoleillée d'hiver, la contre-cloison isolée permet un fonctionnement en diode thermique (fig. 7).

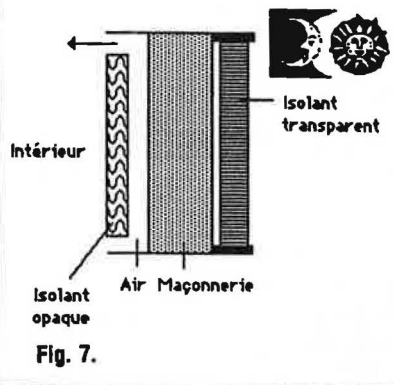


Fig. 7.

Une étude de sensibilité a été menée pour divers paramètres de conception : les performances du matériau isolant transparent, la surface absorbante, la maçonnerie, l'orientation et l'inclinaison du composant solaire.

D'autres maisons bioclimatiques ont été étudiées (architecte : Henri Mouette). Si la maçonnerie est relativement lourde, les gains directs ou les toitures solaires peuvent diminuer les besoins de moitié.

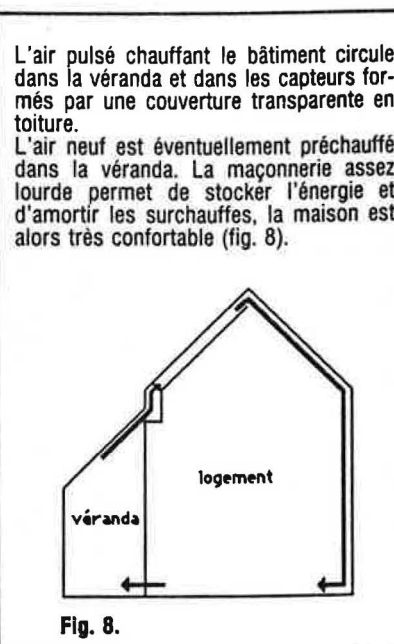


Fig. 8.

Un groupe scolaire avec atrium dont la conception bioclimatique a été assurée par l'architecte Jean Bouillot, a été étudié avec six zones thermiques : classes primaires, maternelles, salles de repos et d'exercice, atrium, locaux techniques. L'étude a porté sur la répartition de l'inertie thermique, la conception de l'atrium et des volets réfléchissants. Selon ces calculs, les apports solaires compensent près de 30 % des déperditions (renouvellement d'air important dans les classes), cf. figure 9.

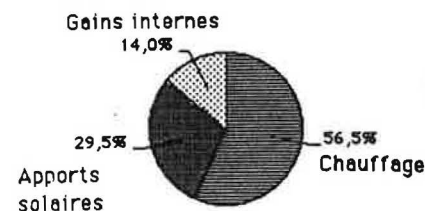


Fig. 9. Répartition des apports thermiques.

Dans un bâtiment du comité international de la Croix-Rouge à Genève (concepteur Elio Marcacci), la climatisation a pu être évitée dans les bureaux en tirant parti de la fraîcheur du sous-sol, servant au stockage des médicaments, et grâce à des stores placés sur la toiture. Pour ce même bâtiment, une méthode de corrélation prédisait une température de 32 °C dans les bureaux, ce qui imposait le recours à un système de climatisation.

Dans un autre bâtiment (la cité des Sciences et de l'Industrie), l'utilisation d'un logiciel très complet sur les équipements a permis une étude approfondie des systèmes, mais l'enveloppe a été négligée. Une étude axée sur l'enveloppe aurait montré l'importance des gains par les vitrages, et les besoins de climatisation (supérieurs aux besoins de chauffage) auraient sans doute pu être réduits grâce à des occultations appropriées.

Des méthodes trop simplistes, ou axées sur les équipements, renforcent donc la tendance actuelle où les conséquences thermiques des choix architecturaux sont négligées. Il en découle un gaspillage, même avec des équipements gérés au mieux. Il faudrait au contraire favoriser au niveau de la conception architecturale un meilleur équilibre entre l'esthétique et le fonctionnel, et les logiciels ont également un rôle à jouer dans ce domaine.

## Energie et environnement, de nouvelles missions pour le BET

Dans l'équipe de conception d'un bâtiment (architecte, maître d'ouvrage, entreprises), le rôle du BET est souvent réduit : calculs réglementaires, dimensionnement d'équipements de chauffage ou de climatisation. Il serait intéressant pour la profession d'élargir ses missions, et la prise de conscience actuelle des problèmes environnementaux peut constituer un tremplin pour proposer des services adaptés aux nouveaux besoins.

L'objectif de la conception bioclimatique est de réduire les nuisances en réduisant à la base les besoins énergétiques

du bâtiment. Cette stratégie de prévention s'avère à l'usage la moins coûteuse : une mauvaise conception thermique induit un surdimensionnement des équipements et une surconsommation d'énergie, ce qui a un coût financier et environnemental. Or les prestations ne sont pas forcément proportionnelles à la taille de la chaudière préconisée. Il est possible de proposer un travail thermique de qualité, et d'en faire apparaître les avantages auprès des maîtres d'ouvrage : diminution des coûts de fonctionnement du bâtiment, meilleur confort, meilleure protection de l'environnement.

Par définition, la prévention doit être menée à temps, dans notre cas dès l'esquisse architecturale. Un rôle de conseiller environnemental dans l'équipe de conception renforcerait la position du BET afin d'intervenir sur le projet en liaison avec l'architecte. La sensibilisation du maître d'ouvrage est également très importante.

### En conclusion...

A Héraclite, qui prétendait que le soleil n'est pas plus gros que le pied humain, Anaxagore répondait : « Il est plus grand que le Péloponnèse ». Aujourd'hui, on lit dans les bilans énergétiques que les énergies nouvelles et renouvelables (ENR) ne représentent que 4,5 % de la consommation du secteur résidentiel et tertiaire (78 Mtep). Or le bois fournit à lui seul 8 Mtep par an dans ce secteur, et l'hydraulique fournit 20 % de notre électricité, dont ici 8 Mtep. Selon une étude de la CCE [12], les gains solaires passifs dans les bâtiments s'élèveraient à 14 Mtep par an. Au total, la contribution des ENR représente alors 30 Mtep, soit près de 40 % du total. Il serait donc temps de découvrir la vraie dimension du solaire architectural. ■

### Bibliographie

- [1] Comfie, Manuel des Utilisateurs.
- [2] C. Carter, *A validation of the modal expansion method of modelling heat conduction in passive solar buildings*, Solar Energy 23, n° 6, 1979.
- [3] P. Bacot, *Analyse modale des systèmes thermiques*, thèse de doctorat, 1984.
- [4] J.J. Salgon et A. Neveu, *Application of modal analysis to modelisation of thermal bridges in buildings*, Energy and buildings, october 1987.
- [5] I. Blanc Sommereux et G. Lefebvre, *Simulation de bâtiments multizones par couplage de modèles modaux réduits*, CVC n° 5, mai 1989.
- [6] J.A. Clarke, *Energy simulation in building design*, Adam Hilger Ltd, Bristol and Boston, 1985.
- [7] B. Peuportier, *Validation of Comfie*, Université de Stuttgart, 1989.
- [8] B. Polster, *Design of transparently insulated solar buildings*, Diplomarbeit, 1991.
- [9] D. Blay, *Comportement et performance thermique d'un habitat bioclimatique à serre accolée*, Bâtiment-Energie n° 45, 1986.
- [10] H. Lund, *Short Reference Years and Test Reference Years for EEC countries*, EEC Contract ESF-029-DK, 1985.
- [11] J. Schmid, A. Goetzberger, *New components for façades its environmentally controlled thermal properties*, European Conference on Architecture, Munich, 1987.
- [12] *The ECD Partnership*, rapport CCE (DG XII), n° EUR 13094, 1990.



PYC ÉDITION

**PYC ÉDITION : Catalogue Energies renouvelables**  
**Ouvrages en vente chez l'éditeur : 5, av. de Verdun, 94208 Ivry/Seine cedex.**

#### L'EAU CHAUDE SANITAIRE SOLAIRE

Conception et calculs thermiques  
Guide pratique de l'A.I.C.V.F.

Elaboration d'une méthode simple et pratique pour dimensionner et réaliser des installations de production d'eau chaude par énergie solaire et connaître avec une précision suffisante l'énergie récupérable.

Ce guide concerne l'habitat en général, collectif et individuel, mais comporte une partie de caractère général pouvant aider le lecteur spécialiste dans l'approche des autres domaines de la thermique solaire.

Destiné aux thermiciens possédant de bonnes connaissances en thermique classique.

1985. 21 x 29,7, 48 p. Prix en librairie : 86 F T.T.C. Prix franco : 102 F T.T.C.

#### ET L'ÉNERGIE SOLAIRE, ALORS ?

La montée en puissance des réalisations américaines par Alain Liébard

Avec plus de 200 documents photographiques noirs et blancs et couleurs, schémas, tableaux, « Et l'énergie solaire, alors ? » est un ouvrage unique très largement documenté. A travers la présentation des grandes réalisations solaires et éoliennes multi-mégawatts américaines, l'auteur explique dans un langage clair et concis la place que doivent occuper les Energies dans la France d'aujourd'hui, et les risques qui existent d'être éliminées des importants marchés des énergies renouvelables à l'exportation, qui se développent d'ici la fin du millénaire.

1985. 21 x 27, 112 p. Prix en librairie : 150 F T.T.C. Prix franco : 160 F T.T.C.

#### SERRES SOLAIRES DE PRODUCTION

par l'ARES  
(Applications de Recherches sur l'Energie et la Société)

Il existe des techniques permettant d'économiser l'énergie dans les serres de production. Cet ouvrage l'explique d'une façon très concrète (choix des matériaux, assemblages, dimensionnement) et donne des conseils précieux pour mieux capter et stocker l'énergie solaire.

1981. 14,5 x 21, 200 p. Prix en librairie : 70 F T.T.C. Prix franco : 86 F T.T.C.

#### SUIVI DES INSTALLATIONS DE CHAUFFAGE SOLAIRE

Commission des Communautés Européennes

La partie principale de l'ouvrage est d'ordre technique et s'adresse surtout à ceux qui sont concernés par la conception et l'installation de systèmes de suivi des performances, mis en place par des experts et ingénieurs qualifiés dans le cadre de recherche et développement, ou à des fins de démonstration.

Cet ouvrage offre une somme d'informations importantes, décisive pour mener à bonne fin le projet de suivi et intéresse également les fabricants et installateurs d'équipement, ainsi que les organismes responsables du contrôle des économies d'énergie et du comportement thermique des bâtiments.

1987. 16 x 24, 354 p. Prix en librairie : 360 F T.T.C. Prix franco : 376 F T.T.C.

#### SUIVI DES PERFORMANCES D'INSTALLATIONS DE CHAUFFAGE SOLAIRE DANS L'HABITAT

Commission des Communautés Européennes

1. Formulaires. 2. Les projets et la compilation des formulaires. 3. Les chauffe-eau solaires. 4. Le chauffage solaire des locaux. 5. Manuel de suivi de performances. 6. Recommandations. Annexes : Techniques d'optimisation des coûts sur les installations solaires. Taille optimum d'échantillon pour des expériences en conditions réelles des maisons de chauffage solaire. Procédures d'optimisation des systèmes.

1986. 16 x 24, 128 p. Prix en librairie : 114 F T.T.C. Prix franco : 130 F T.T.C.

#### ÉNERGIE PHOTOVOLTAÏQUE EN EUROPE

Commission des Communautés Européennes

« Cette étude a pour objet de fournir, pour les prochaines années, une évaluation indépendante du potentiel photovoltaïque considéré comme source d'énergie pour l'Europe et d'exportations pour l'industrie européenne, et également comme un moyen de participer à l'aide aux pays en voie de développement. Il s'agit de la première estimation du photovoltaïque européen réellement complète. (Bulletin analytique pétrolier).

1986. 16 x 24, 244 p. Prix e

franco : 292 F T.T.C.