



HAL
open science

Dimension climatique de l'architecture. Application du coût global

Jean-Pierre Cordier, Jean Soum, Alain Chatelet

► **To cite this version:**

Jean-Pierre Cordier, Jean Soum, Alain Chatelet. Dimension climatique de l'architecture. Application du coût global. [Rapport de recherche] 494/88, Ministère de l'équipement, du logement, de l'aménagement du territoire et des transports / Bureau de la recherche architecturale (BRA); Ministère de la recherche et de la technologie; Ecole nationale supérieure d'architecture de Toulouse / Laboratoire d'architecture bioclimatique (LAB). 1987. hal-01902646

HAL Id: hal-01902646

<https://hal.science/hal-01902646>

Submitted on 23 Oct 2018

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

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

594

Ministère de l'Équipement, du Logement, de l'Aménagement du Territoire
et des Transports
Sous-Direction de l'Enseignement de l'Architecture et de la Recherche
Bureau de la Recherche Architecturale

ECOLE D'ARCHITECTURE DE TOULOUSE

83, rue Aristide Maillol - 31100 - TOULOUSE - TELEPHONE : 61-40-47-28

DIMENSION CLIMATIQUE DE L'ARCHITECTURE

APPLICATION DU COUT GLOBAL

RAPPORT DE RECHERCHE 1987

CONTRAT SRA 87 01262 00 223 75 01

Jean-Pierre CORDIER
Jean SOUM
Alain CHATELET

LABORATOIRE D'ARCHITECTURE BIOCLIMATIQUE

ECOLE D'ARCHITECTURE DE TOULOUSE

INTRODUCTION

1 - LES PARAMETRES DU COUT GLOBAL

1.1 - Objet de l'étude

DIMENSION CLIMATIQUE DE L'ARCHITECTURE APPLICATION DU COUT GLOBAL

1.3 - Les facteurs du coût global

Rapport de recherche 1987

1.5 - Détails par variable

1.6 - Conclusion

Contrat SRA n° 87 01262 00 223 75 01

2 - ETUDE EXPERIMENTALE DE FORMES NOUVELLES

2.1 - Problématique

2.2 - Les formes

2.3 - Conclusion

"Le présent document constitue le rapport final d'une recherche remise au Bureau de la Recherche Architecturale en exécution du programme général de recherche mené par le Ministère de l'Équipement, du Logement, de l'Aménagement du Territoire et des Transports avec le Ministère de la Recherche et de la Technologie. Les jugements et opinions émis par les responsables de la recherche n'engagent que leurs auteurs".

RÉFÉRENCES

LABORATOIRE D'ARCHITECTURE BIOCLIMATIQUE

SOMMAIRE

- INTRODUCTION

1 - LES PARAMETRES DU COUT GLOBAL

1.1 - Objet de l'étude	1
1.2 - Methode	2
1.3 - Les facteurs du coût global	3
1.4 - Résultats généraux des calculs	4
1.5 - Detail par variable	5
1.6 - Conclusion	14

2 - ETUDE ECONOMIQUE DE FORMES NOUVELLES

2.1 - Problématique	15
2.2 - Les zones	16
2.3 - Consommations	19
2.4 - Influence des paramètres du zone	20
2.5 - Aspect constructif	23
2.6 - Approche du coût global	24
2.7 - Conclusion	25

- REFERENCES

26

INTRODUCTION

A la suite des études théoriques concernant l'optimisation économique de la forme architecturale nous avons déterminé parmi d'autres trois types d'application que nous désirons mettre en oeuvre au laboratoire.

Il s'agit de :

- l'étude paramétrique des phénomènes pris en compte actuellement dans la détermination du coût global

- l'étude de l'intérêt économique de formes nouvelles de construction dont les spécifications font par ailleurs l'objet de recherches au laboratoire

- l'étude de l'intégration d'autres paramètres, en l'occurrence ceux liés aux consommations dues aux besoins d'éclairage dans le secteur tertiaire.

Les premières approches concernant le troisième point montrent qu'il est nécessaire d'entamer une réflexion plus approfondie notamment sur les conditions de réalisation avant de pouvoir déterminer les paramètres et leurs valeurs à prendre en compte et les résultats actuels sont insuffisamment significatifs pour être exposés ici.

Nous aborderons donc dans cette étude et successivement les deux premiers points exposés plus haut.

I - LES PARAMETRES DU COUT GLOBAL

L'éventualité d'obtenir des valeurs de paramètres fort éloignées de la "réalité" nécessite de repérer les erreurs d'appréciation qui en résulteraient par rapport à des valeurs réelles qui seraient plus extrêmes.

1.1 - OBJET DE L'ÉTUDE

Nos travaux précédents (1) avaient montré qu'il est important de s'inquiéter de l'interférence des objectifs économiques avec les autres paramètres du projet, c'est-à-dire du coût global, dès le début de la conception architecturale d'un bâtiment.

Un ensemble de formules avaient donc été adaptées et proposées, pour permettre d'évaluer conjointement les coûts immédiats et à long terme pré-déterminés par l'option morphologique de l'avant-projet. Puis un logiciel a été élaboré à partir de ces formules.

Pour ce premier essai, nous avons voulu intégrer le plus grand nombre possible de phénomènes ayant une influence calculable sur les économies de construction et de chauffage, domaines les plus sensibles aux choix architecturaux ; en particulier tous les aspects économiques liés à l'étalement des paiements dans le temps ont été intégrés.

Le recours au calcul du coût global est en effet trop inhabituel en architecture pour qu'on sache écarter a-priori les paramètres qui ont des répercussions négligeables sur le coût global. Mais le résultat pratique est un programme exigeant un temps de saisie trop long pour être commode au stade de l'esquisse, ce qui compromettrait la généralisation de son utilisation par les professionnels.

Compte-tenu du degré de précision suffisant à éclairer les choix, certains phénomènes pris actuellement en compte peuvent peut-être être négligés, et les valeurs de certains paramètres indépendants du concepteur peuvent certainement être proposées par défaut en utilisation rapide.

Mais avant de s'autoriser de telles simplifications, il est indispensable d'explorer la sensibilité du coût global d'un bâtiment à chacun des paramètres dont il dépend : c'est l'objet du présent chapitre.

1.2 - MÉTHODE

L'éventualité d'adopter des valeurs de paramètre forfaitairement "moyennes" nécessite de repérer les erreurs d'optimisation qui en résulterait par rapport à des valeurs réelles qui seraient plus extrêmes.

Ces erreurs peuvent être de deux ordres :

- un déséquilibre de la valeur relative de l'un des composants du coût global par rapport aux autres, ce qui risque de perturber la hiérarchie permettant le choix globalement le plus économique,
- une modification de l'ensemble des valeurs des composants, même d'une façon homogène qui éviterait l'erreur précédente, car elle risquerait de fausser l'appréciation "en connaissance de coût" des particularités non-économiques d'un parti architectural.

Les paramètres nécessités par notre formulation sont nombreux et n'ont pas tous des variations aisément modélisables. Il paraît donc difficile d'envisager une étude analytique rigoureuse de la sensibilité économique à chacun d'entre eux.

Nous avons plus simplement utilisé directement notre logiciel pour évaluer et comparer l'influence propre de chaque paramètre sur le coût global.

Après avoir dressé la liste des facteurs influents (page suivante), nous avons attribué à chacun des paramètres, ou à chaque groupe logique, une valeur moyenne et deux extrêmes vraisemblables. A partir de la conjonction "de base" où toutes les valeurs sont moyennes, nous avons calculé et comparé tous les coûts globaux obtenus en ne faisant varier successivement qu'une valeur après l'autre.

Pour rendre les comparaisons plus parlantes tous les prix ont été exprimés en Franc par m² utile, qui est l'unité pratique d'évaluation d'une opération de construction. Pour la conjonction de base les résultats sont directement exprimés sous cette forme, et pour les valeurs extrêmes ils sont ramenés à des plus ou moins-values par rapport à la base.

1.3 - LES FACTEURS DU COUT GLOBAL

Nous classerons les facteurs intervenant sur le calcul du coût global (construction + chauffage) en trois familles :

1 programme de l'opération

Données découlant du contexte et de la demande du maître de l'ouvrage :

- Prix des éléments de construction disponibles sur place
- Type et prix des énergies disponibles sur place.
- Dérive moyenne prévue pour les prix de ces énergies.
- Inflation moyenne prévue à long terme.
- Perspective d'actualisation du maître de l'ouvrage.
- Emprunt constructif éventuel.
- Durée critique d'utilisation.
- Exigence de confort de l'activité à abriter.
- Climat local.
- Honoraires divers.
- Importance de l'opération.

2 parti architectural

Traduction chiffrée (surtout quantitative) d'une option répondant aux grandes lignes du programme :

- Subdivision éventuelle en bâtiments distincts.
- Choix du nombre de niveaux.
- Compacité du plan.
- Surfaces et expositions solaires des vitrages.
- Accolement d'espaces non chauffés plus ou moins vitrés.
- Liaisons horizontales et verticales rendues nécessaires.

3 choix techniques

Données (surtout qualitatives) concernant la constitution des éléments constructifs et les équipements, ajustant le choix architectural au coûts attendus :

- Performance énergétique des différents types de parois.
- Inertie thermique interne.
- Type d'installation de chauffage.
- Ajustage des prix à ces choix.

Par rapport à l'action de l'architecte, la première famille constitue donc en amont l'énoncé intengible de son problème,

la deuxième représente ce dont il est seul responsable,

la dernière peut être traitée plus tard et éventuellement par un autre technicien ; dans notre étude paramétrique, ces données resteront constantes puisque leurs valeurs sont déjà optimisées couramment dans la pratique.

1.4 - RESULTATS GENERAUX DES CALCULS

CONJONCTION DE BASE (valeurs sous la variable correspondante, entre parenthèses): résultats indiqués en Fttc / m2 utile

VARIABLES : résultats en plus ou moins-values par rapport à la base

DÉPENSES CONSTRUCTIVES =

- + coût des éléments variant selon parti architectural
- + coût des éléments constants, indépendants du parti
- + honoraires correspondant à ces deux coûts
- + emprunt portant sur ces coûts et les honoraires

CHARGES DE CHAUFFAGE, actualisées sur la durée de l'emprunt =

- + pertes par parois, air, rendement - gains solaires

COÛT GLOBAL = dépenses constructives + charges de chauffage

:VARIABLES :		VALEURS :	dépenses:	charges :	COÛT :	ECARTS entre:
: essayées :	: adoptées :	CONSTRUC:	CHAUFFAGE:	GLOBAL :	C.G.extrêmes:	:
:.....:						
: CONJONCTION DE BASE :	4 179	:	247	:	4 426	: classement :
:.....:						
: PRIX :	+ 10 % :	+ 418	:	0	:	+ 418 :
: CONSTRUCT :						836 3 ème:
: (0 %) :	- 10 % :	- 418	:	0	:	- 418 :
:.....:						
: CHOIX DE :	électr.:	0	:	+ 297	:	+ 297 :
: L'ENERGIE :						413 4 ème:
: (gaz) :	bois :	0	:	- 116	:	- 116 :
:.....:						
: DERIVE PRIX :	+ 4 % :	0	:	+ 96	:	+ 96 :
: ENERGIE :						131 9 ème:
: (0 %) :	- 2 % :	0	:	- 35	:	- 35 :
:.....:						
:	2 % :	+ 288	:	+ 0	:	+ 288 :
: INFLATION :						997 1 er :
: (4 %) :	12 % :	- 708	:	+ 0	:	- 708 :
:.....:						
:	6 % :	+ 434	:	+ 63	:	+ 497 :
: ACTUALISAT.:						860 2 ème:
: (9 %) :	12 % :	- 318	:	- 45	:	- 363 :
:.....:						
: part :	90 % :	+ 143	:	0	:	+ 143 :
: EMPRUNTEE :						322 5 ème:
: (50 %) :	0 % :	- 179	:	0	:	- 179 :
:.....:						
:	hôpital :	0	:	+ 106	:	+ 106 :
: UTILISATION.:						305 6 ème:
: (logement): bureaux :		0	:	- 199	:	- 199 :
:.....:						
: ZONE :	H1 :	+ 0	:	+ 79	:	+ 79 :
: CLIMATIQUE.:						167 8 ème:
: (H2) :	H3 :	+ 0	:	- 88	:	- 88 :
:.....:						
:	R compact:	+ 189	:	+ 9	:	+ 198 :
: MORPHOLOGIE.:						278 7 ème:
: (R+1 comp):R+1 solair :		+ 269	:	+ 9	:	+ 278 :
:.....:						

1.5 - DETAILS PAR VARIABLE

15.1 - Caractéristiques des éléments de construction

VALEURS ADOPTÉES :

base :

- éléments dont la quantité VARIE SELON LE PARTI ARCHITECTURAL :

	prix unitaire	coeff K
	Fht/m ²	W/°C.m ²
murs (prix vide pour plein)	350	0,48
toit	500	0,25
double-vitrage + volets	1330	2,60
fondations périmétriques (/m)	333	1,05
plancher sur terre-plain	130	s.o.
plancher intermédiaire	260	s.o.
ponts thermiques obligés (/m)	s.o.	0,25

(caractéristiques courantes dans le cas du logement, structures et finitions comprises, avec gros-oeuvre classique)

- éléments dont la quantité est à peu près INDÉPENDANTE DU PARTI ARCHITECTURAL (le reste du second-oeuvre) : estimés comme complément forfaitaire aux éléments variants selon parti architectural, pour obtenir avec la configuration de base un prix complet de 4000 F F/m² utile, taxes et honoraires à 10 % compris

extrêmes :

variations de + 10 % et de - 10 % de tous ces prix, correspondant à des conditions moins favorables (par exemple difficultés d'accès), puis plus (technique plus économique)

RÉSULTATS :

	base	+10%	-10%	écart
éléments selon parti archi, honoraires	1593	+159	-159	318
éléments indépendants, honoraires	2407	+241	-241	482
emprunt pour tous éléments et honoraires	179	+18	-18	36
total dépenses constructives	4179	+418	-418	836
pertes parois, air, rendement	301			0
gains solaires en déduction	58			0
total charges de chauffage cumulées	247			0
COÛT GLOBAL :	4426	+418	-418	836

COMMENTAIRES :

De telles variations des prix constructifs sont assez fréquentes dans la pratique, alors qu'elles constituent le troisième plus important facteur de variation du coût global. Cela est dû au fait qu'elle intéresse aussi les éléments constructifs indépendants, et tout cela se répercute sur l'emprunt. De plus elles ne changent pas les consommations, ce qui en augmente les possibilités d'erreur d'optimisation.

Le concepteur a donc intérêt à s'enquérir dès le début de chaque projet des prix les plus adaptés aux lieux et aux ressources techniques, sous peine d'aboutir à une optimisation contestable.

15.2 - Type et prix des énergies disponibles sur place

VALEURS ADOPTÉES :

Moyenne des fourchettes de prix fournies par l'AFME en 1987 avec un rendement moyen des appareils, compte-tenu des primes fixes d'abonnement :

base :	gaz,	0,40 Fttc le kWh utile
extrêmes :	électricité directe,	0,80 Fttc le kWh utile
	bois,	0,20 Fttc le kWh utile

RÉSULTATS :

	base	elec	bois	écart
éléments selon parti archi, honoraires	1593			0
éléments indépendants, honoraires	2407			0
emprunt pour tous éléments et honoraires	179			0
total dépenses constructives	4179			0
pertes parois, air, rendement	301	+361	-140	585
gains solaires en déduction	58	+64	-24	88
total charges de chauffage cumulées	247	+297	-116	413

COUT GLOBAL : 4426 +297 -116 413

COMMENTAIRES :

Les variations du coût global résultant du type d'énergie sont les quatrièmes par ordre d'importance. Elles ne concernent que la consommation (les différences de prix des installations sont négligées).

La connaissance préalable du type d'énergie est donc indispensable au regard des critères énoncés.

15.3 - Dérive moyenne prévue pour le prix de l'énergie

VALEURS ADOPTÉES :

base :	dérive nulle par rapport à l'inflation (ordre de grandeur actuel)
extrêmes :	enchérissement, de 4 %
	baisse des prix, de 2 %

RÉSULTATS :

	base	+4%	-2%	écart
éléments dépendant archi, honoraires	1593			0
éléments indépendants, honoraires	2407			0
emprunt pour tous éléments et honoraires	179			0
total dépenses constructives	4179			0
pertes parois, air, rendement	301	+117	-42	159
gains solaires en déduction	58	+21	-7	28
total charges de chauffage cumulées	247	+96	-35	131

COUT GLOBAL : 4426 +96 -35 131

COMMENTAIRES :

La dérive du prix de l'énergie provoque l'écart global le moins important de tous les paramètres envisagés, quoiqu'il ne porte que sur l'un des types de dépenses.

Compte-tenu d'autre part du caractère imprévisible de ses variations, il paraît donc envisageable de s'en tenir à une dérive forfaitaire égale à celle du moment.

15.4 - Inflation moyenne prévue à long terme.

VALEURS ADOPTÉES :

base :	- 4 % (ordre de grandeur actuel)
extrêmes :	- 2 % (minimum récent)
	- 12 % (proche d'un maximum récent)

RÉSULTATS :	base	2%	12%	écart
éléments selon parti archi, honoraires	1593			0
éléments indépendants, honoraires	2407			0
emprunt pour tous éléments et honoraires	179	+288	-709	997
total dépenses constructives	4179	+288	-709	997
pertes parois, air, rendement	301			0
gains solaires en déduction	58			0
total charges de chauffage cumulées	247			0
COUT GLOBAL :	4426	+288	-709	997

COMMENTAIRES :

L'inflation ne joue que sur le coût réel de l'emprunt, et de manière considérable : c'est le premier des facteurs d'écart.

Les remboursements étant considérés dans notre étude à chiffre constant, en période fortement inflationniste (12%) ils perdent de leur valeur matérielle à chacune des échéances, à plus forte raison quand on les actualise à la date de conception. Ainsi c'est paradoxalement à l'emprunteur que l'emprunt rapporte (709 - 179 F/m²) quand l'inflation monte ; mais si l'emprunt est contracté lorsque l'inflation est déjà forte, les taux d'emprunt offerts sont évidemment plus élevés que notre base, pour rapporter normalement au prêteur.

L'inflation ne joue pas sur les charges de chauffage puisque la dérive du prix de l'énergie et le taux d'actualisation qui en modèlent la valeur actuelle sont à Franc constant.

Pour le cas majoritaire où un emprunt est envisagé par le maître de l'ouvrage, l'inflation moyenne "réellement prévisible" au moment de la conception devrait donc être prise en compte, mais malheureusement ses fluctuations sur la longue durée de l'emprunt seront nombreuses et imprévisibles.

On peut donc au choix :

- parier que sa moyenne s'établira autour de sa valeur actuelle et dans ce cas l'écart de coût global deviendra négligeable,

- comparer par prudence les conséquences de scénarios plus ou moins inflationnistes

15.5 - Perspective d'actualisation du maître de l'ouvrage.

VALEURS ADOPTÉES :

base : 9 % par rapport à l'inflation (valeur préconisée par le VII^e Plan)

extrêmes : 6 %
12 %

RÉSULTATS :	base	6%	12%	écart
éléments selon parti archi, honoraires	1593			0
éléments indépendants, honoraires	2407			0
emprunt pour tous éléments et honoraires	179	+434	-318	752
total dépenses constructives	4179	+434	-318	752
pertes parois, air, rendement	301	+77	-55	132
gains solaires en déduction	58	+14	-10	24
total charges de chauffage cumulées	247	+63	-45	108
COÛT GLOBAL :	4426	+497	-363	860

COMMENTAIRES :

En dépréciant plus ou moins la valeur actuelle de tous les paiements futurs, l'actualisation fait varier à la fois le cumul des charges de chauffage et les dépenses constructives en cas d'emprunt à rembourser (au point d'en faire une source d'économie de 318 - 179 F/m² en cas de taux élevé).

Dans le cas le plus fréquent où il ya un emprunt, cette répartition de l'effet sur tous les postes explique l'importance numérique de l'écart de variation du coût global, qui se place second ; mais elle en minimise aussi légèrement l'erreur sur le travail d'optimisation économique en cas de taux inadapté.

Dans la pratique un taux est fixé par l'Administration pour ses propres ouvrages, et il peut servir de base dans la plupart des autres cas. Ce n'est que pour un maître d'ouvrage privé dont la perspective d'avenir financier est singulière que la question doit se poser :

- si elle est plus limitée (proximité de la retraite par exemple) les paiements futurs seront plus durement ressentis, et les économies d'énergie valorisées si l'emprunt est (dont le taux consenti par le banquier serait d'ailleurs aussi défavorable) est limité

- si au contraire l'avenir économique d'un individu ou d'une société est plus prometteur que la moyenne, il y a intérêt à remettre toutes les dépenses au lendemain

Si la détermination rigoureuse du taux d'actualisation est une opération difficile à exiger d'un client particulier, il est au moins indispensable de choisir avant toute optimisation un taux vraisemblable, en se situant par exemple par rapport à celui de l'Administration.

15.6 - Emprunt constructif

VALEURS ADOPTÉES :

- base : - 50 % des dépenses constructives et honoraires
empruntés, à un taux de 15 %, pendant 20 ans
extrêmes : - 90 % empruntés, dans les mêmes conditions
- pas d'emprunt

RÉSULTATS :	base	90%	0%	écart
éléments selon parti archi, honoraires	1593			0
éléments indépendants, honoraires	2407			0
emprunt pour tous éléments et honoraires	179	143	-179	322
total dépenses constructives	4179	143	-179	322
pertes parois, air, rendement	301			0
gains solaires en déduction	58			0
total charges de chauffage cumulées	247			0
COUT GLOBAL :	4426	143	-179	322

COMMENTAIRES :

La seule variable essayée est la part d'apport initial, alors que le taux et la durée de l'emprunt peuvent également être variables. Dans une première approche les variations de l'apport nous paraissent en effet suffisantes pour figurer l'incidence globale de l'emprunt par rapport aux autres frais.

Sous cette réserve, l'influence directe des conditions de l'emprunt n'a qu'une importance moyenne parmi les autres facteurs d'écart ; il faut toutefois rappeler l'influence des taux d'inflation et d'actualisation sur la valeur actuelle de ses remboursements, qui peuvent démultiplier dans un sens ou dans l'autre son poids sur le coût global. D'autre part l'emprunt ne pèse que sur l'un des deux types de dépense, et il peut donc déséquilibrer l'optimisation s'il n'est pas pris en compte.

En fait l'obligation de recourir à l'emprunt est généralement connue du maître de l'ouvrage dès le début de l'étude, ainsi que ses conditions vraisemblables.

15.7 - Durée critique d'utilisation

VALEUR ADOPTÉE : constante, comme celle de l'emprunt (20 ans)

COMMENTAIRES :

La durée de vie réelle d'un bâtiment est généralement grande et difficile à prévoir. Par contre la durée critique est limitée à la période où le bâtiment cause le plus de contrainte financière, c'est à dire en général celle de la construction, prolongée de la période où les remboursements d'emprunt s'ajoutent aux consommations : elle est connue au moment de la conception.

Cette durée critique peut être bien plus courte que celle qui est fixée ici, par exemple à cause d'une utilisation ou d'un équipement très spécifiques. Dans ce cas il est évident que les consommations deviennent relativement moins importantes pour l'optimisation.

15.8 - Exigence de confort de l'activité à abriter

VALEURS ADOPTÉES :

type d'utilisation	BASE : EXTRÊMES :		
	logement	hôpital	bu-reau
température mini confort (°C)	19	22	19
heures d'occupation par jour	24	24	10
jours d'occupation par semaine	7	7	5

RÉSULTATS :

	base	hôm.	bur.	écart
éléments selon parti archi, honoraires	1593			0
éléments indépendants, honoraires	2407			0
emprunt pour tous éléments et honoraires	179			0
total dépenses constructives	4179			0
pertes parois, air, rendement	301	+106	-215	321
gains solaires en déduction	58	0	-16	16
total charges de chauffage cumulées	247	+106	-199	305

COÛT GLOBAL :

4426 +106 -199 305

COMMENTAIRES :

Le mode d'utilisation d'un bâtiment ne provoque qu'un écart de coût global moyen, en déterminant la sollicitation du chauffage ; mais il joue considérablement sur ce seul facteur de dépense (à caractéristiques de parois constantes), et déséquilibrerait donc profondément les conditions de l'optimisation s'il n'était pas bien pris en compte ; il faut noter d'ailleurs que deux équilibres peuvent en être perturbés, constructif/chauffage, et au sein de ce dernier poste pertes thermiques/gains solaires.

Les réponses architecturales les plus économiques peuvent ainsi être fort différentes pour :

- du logement, d'occupation constante, exigeant une température considérée comme moyenne
- un bâtiment comme l'hôpital, dont l'occupation est également constante, mais où une température supérieure de 3°C à la moyenne provoque 30 % de pertes supplémentaires, avec les mêmes gains solaires
- un lieu de travail courant, qui est en fait vide -donc pratiquement sans chauffage ni déperditions- les deux tiers du temps (nuits + week-end), mais dont les gains solaires sont proportionnellement moins réduits puisque ils ne sont inutilisés que le week-end.

Le mode d'utilisation du bâtiment étant une des données fondamentales de son programme, il n'y a pas de difficultés à en tenir compte dans la mesure où les paramètres correspondant à chaque cas type sont connus ou proposés.

15.9 - Climat local

VALEURS ADOPTÉES :

- base : - zone climatique française officielle H2
 extrêmes : - zone H1
 - zone H3

RÉSULTATS :	base	H1	H2	écart
éléments selon parti archi, honoraires	1593			0
éléments indépendants, honoraires	2407			0
emprunt pour tous éléments et honoraires	179			0
total dépenses constructives	4179			0
pertes parois, air, rendement	301	+79	-84	163
gains solaires en déduction	58	0	+4	4
total charges de chauffage cumulées	247	+79	-88	167
COUT GLOBAL :	4426	+79	-88	167

COMMENTAIRES :

Les écarts de coût global dus au climat sont parmi les plus faibles de la série étudiée ici ; mais ils ne portent que sur la composante chauffage, dont ils représentent un tiers en plus puis en moins, et risquent là-encore d'en déséquilibrer l'optimisation architecturale construction/chauffage et même pertes/apports au sein du chauffage :

- en zone H1 qui est plus froide mais considérée comme aussi ensoleillée, seules les pertes sont aggravées
- en zone H3 (méditerranéenne) les pertes sont réduites et les apports accrus

Il est d'autant plus indispensable de tenir compte du climat qu'à travers la double dualité construction/chauffage et pertes/apports il a des interférences avec le mode d'utilisation et avec le parti architectural.

Les méthodes de calcul du coefficient B facilitent heureusement une prise en compte bien plus précise que celle des trois zones officielles.

15.10 - Parti architectural

VALEURS ADOPTÉES :

Les trois formes choisies ont en commun d'assembler 8 cellules de 5 x 5 m (soit 200 m² utiles) ayant entre elles une exigence d'affaiblissement phonique ; les circulations communes horizontales et verticales sont ajustées en fonction des nécessités de chaque parti choisi :

- en Base : compacité constructive et thermique maximum, au détriment de l'exposition solaire de la moitié des vitrages, construction à deux niveaux (compacité géométrique dans les trois dimensions)
- en variante P : mêmes compacité du plan et exposition moyenne, mais sur un seul niveau de plain-pied
- en variante S : exposition solaire maximum de tous les vitrages, au détriment de la compacité du plan, sur deux niveaux

	base	P	S
nombre de niveaux	R+1	R	R+1
murs extérieurs(m ²)	215	157	265
toiture (m ²)	115	230	130
vitrages Sud (m ²)	17	17	34
vitrages Nord (m ²)	17	17	0
périmètre au sol (m)	43	63	53
plancher/terre-plain (m ²)	115	230	130
plancher d'étage (m ²)	105	0	120
refends intérieurs (m ²)	150	175	175
ponts thermiques obligés (m)	73	25	93

RÉSULTATS :

	base	P	S	écart
éléments selon parti archi, honoraires	1593	+197	+257	257
éléments indépendants, honoraires	2407			0
emprunt pour tous éléments et honoraires	179	+8	+12	20
total dépenses constructives	4179	+189	+269	269
pertes parois, air, rendement	301	+9	+42	42
gains solaires en déduction	58	0	+33	33
total charges de chauffage cumulées	247	+9	+9	9
COUT GLOBAL :	4426	+198	+278	278

COMMENTAIRES :

Les écarts de coût global dus aux partis architecturaux envisagés ne sont pas très importants par rapport aux autres types de paramètres, même amplifiés par l'emprunt, ce qui suffirait à montrer l'importance à accorder à ceux-ci pour l'optimisation architecturale qui est l'objet final de notre étude. Mais il faut souligner que les écarts dus aux trois formes choisies sont minimisés car elles ont chacune un ou plusieurs avantages économiques, ce qui n'est pas le cas de toutes les formes inspirées par des considérations non-économiques. .../...

Pour les formes choisies, l'écart de loin le plus important est celui du coût constructif :

- par rapport à la Base, la forme de plain-pied (P) présente les avantages de réduire la surface de mur extérieur, de supprimer l'escalier et l'accroissement de volume correspondant, ainsi que le plancher intermédiaire qui est plus coûteux au m² que celui du rez-de-chaussée sur terre-plain ; mais ces avantages ne sont pas compensés par l'accroissement du périmètres au sol (fondations à construire et pertes thermiques liées), et par celui de la toiture ; par rapport aux exigences phoniques internes entre cellules, les refends sont accrus mais les ponts thermiques dûs au plancher intermédiaire sont supprimés

- par rapport à la Base, la forme S allongée ne se traduit que par des quantités supplémentaires (sauf la surface totale des vitrages qui reste constante) : celles des planchers par un allongement des circulations augmentant le volume général ; celle du périmètre au sol, suivi en conséquence de celle des façades ; enfin celles des parois intérieures entre cellules et des ponts thermiques en façade

Les écarts dûs aux dépenses de chauffage sont faibles, et curieusement identiques alors qu'ils résultent de quantités élémentaires très différentes :

- avec la forme P, la variation du rapport toit + pèrimètre / mur n'accroît les pertes que de 3 %, et l'ensoleillement reste inchangé

- avec la forme Solaire, les apports sont effectivement doublés mais ils ne suffisent pas à compenser l'accroissement des pertes (ce serait certainement différent en zone H3 ou en cas d'inoccupation nocturne), et encore moins au global celui du coût constructif : le surcoût en est même supérieur à la charge de chauffage de base, ce qui indique que cette variante resterait globalement plus coûteuse même si elle aboutissait à annuler le besoin de chauffage...

1.6 - CONCLUSION

II - ETUDE DE FORMES NOUVELLES

Les chiffres proposés et leurs commentaires montrent que si les conséquences d'une évaluation erronée ne sont pas les mêmes pour tous les paramètres intervenant dans le calcul du coût global, il n'y en a aucun dont l'influence puisse être négligée.

Pour beaucoup d'entre eux heureusement, les valeurs nécessaires sont faciles à connaître dès le départ, parce qu'elles sont directement issues du programme, ou que des propositions de valeurs forfaitaires peuvent être faites (conditions de l'emprunt, durée critique et intermittence d'utilisation, niveau de confort thermique, climat local, perspective d'actualisation du maître de l'ouvrage).

D'autres nécessitent de la part du concepteur une recherche technique anticipée (type d'énergie disponible et dérivé prévisible de son prix, coûts constructifs selon ressources ou difficultés locales, parti architectural bien sûr).

Le seul paramètre qui soit difficile à prédire est le taux d'inflation moyen pendant la période critique d'utilisation, nécessaire en cas d'emprunt ; mais la marge d'incertitude peut en être circonscrite.

Il est donc parfaitement envisageable de proposer aux architectes un outil informatisé d'optimisation du coût global, qui serait à la fois assez rapide d'accès pour être réellement sollicité dès les premières ébauches, puis assez précis pour permettre la mise au point technique.

Cet outil serait certainement bienvenu, les maîtres d'ouvrages institutionnels s'orientant aujourd'hui vers des exigences performancielles vis à vis des constructeurs, qui les engageraient à la fois sur les coûts constructifs et sur les bilans d'exploitation du bâtiment.

Dans cette perspective notre logiciel devrait donc être complété des autres types de dépenses qui pèsent sur l'exploitation : autres consommations, entretien, surveillance, etc... Nous ne les avons pas considérées jusqu'alors car elles sont moins élevées et dépendent dans une moindre mesure des options architecturales, mais leur intégration est théoriquement plus simple que celle du chauffage.

Au delà de cet objectif cette réalisation prépare la création d'un système expert de conception assistée par ordinateur, qui pourrait donner des conseils issus des caractéristiques du programme avant mise en forme architecturale, puis renseignerait le concepteur, entre autres choses sur le poids en coût global de toutes ses décisions, afin qu'il puisse les équilibrer avec les critères plus subjectifs du projet.

II - ETUDE DE FORMES NOUVELLES

I - PROBLEMATIQUE

Nous l'avons vu (1), le coût global d'une construction est obtenu par la somme de deux coûts d'inégale importance:

- Le coût constructif global d'une part
- Les dépenses énergétiques sur n années actualisées d'autre part.

La forme même du bâtiment joue un rôle des plus importants, car agissant sur ces deux pôles et dans le même sens (augmentation ou diminution)

La recherche d'une bonne compacité ou d'un faible coefficient de forme, diminuant le linéique des fondations et la surface d'enveloppe, va entraîner une diminution et du coût constructif et des pertes thermiques sur l'extérieur, donc des dépenses de chauffage.

La forme théorique optimum qui répond à cette préoccupation est une portion de sphère (2). Des études peuvent être menées sur des formes, polyédriques ou autres, approximant cet optimum. Elles devront être complétées par deux interrogations fondamentales :

- La surface habitable étant un paramètre essentiel de la construction et le volume habitable pouvant être très différent du volume enclos par l'enveloppe (et même présenter des hauteurs sous-plafond exagérées, donc du volume inutile), ces formes apparaissent-elles comme appropriées ou non ? Et encore, dans un domaine plus qualitatif, y aura-t-il facilité ou non, agrément ou non à vivre dans elles ?

- Comment et à quel prix ces formes théoriques peuvent-elles devenir des réalités construites, ne vont-elles pas demander des matériaux et techniques spécifiques, des éléments hors normes, bref un ensemble d'interventions susceptibles de surcoûts constructifs exagérés (que ne pourrait compenser une diminution limitée de dépenses énergétiques) ? Des réalisations de formes intéressantes limitées en nombre, produites au coup par coup et dispersées dans le temps et l'espace ne peuvent nous fournir sur ce point des valeurs statistiques fiables.

Avec la connaissance de toutes les grandeurs dimensionnelles, on peut néanmoins comparer le coût global de deux formes comme si elles étaient produites avec les mêmes matériaux et techniques. Par rapport à un modèle de référence, une diminution éventuelle du coût global nous donnera le surcoût constructif admissible pour le zome. C'est ce que nous étudierons dans le dernier paragraphe.

II - LES ZOMES

Le Laboratoire d'Architecture Bioclimatique a entrepris une étude théorique et expérimentale sur une famille de formes architecturales nouvelles appelées Zomes (3).

Ces volumes polyédriques sont composés de facettes losanges qui assemblées réalisent une enveloppe autoportante des plus rigides et pouvant couvrir, selon la complexité des modèles, de 5 à 200m² de sol sans soutien intermédiaire.

On peut ajuster les dimensions des zomes ainsi que la hauteur des murs ou la forme plus ou moins pointue, les déformer, facilement les accoler l'un à l'autre, les relier à des parties de forme classique ou même à des bâtiments existants.

Une analyse géométrique a permis l'établissement de formules de calcul permettant la connaissance de toutes les grandeurs linéiques, surfaciques, volumiques et angulaires liées à ces volumes.

Ils sont gouvernés par 3 paramètres indépendants qui s'expriment par les nombres :

- N nombre d'ordre, (ordre de symétrie de révolution du volume) nombre entier

- F nombre de forme (fixe la forme) nombre quelconque entre 0 et l'infini

- T nombre de taille, grandeur dimensionnelle (l'arête du volume par exemple)

Toutes les grandeurs géométriques sont reliées par l'intermédiaire de ces 3 nombres.

Une trentaine de bâtiments en forme de Zome engendrés ou non par ces calculs théoriques ont pu être repérés et visités dans les 3 régions du Grand Sud-Ouest - Nous les considérons comme autant de réalisations expérimentales qui permettront d'alimenter une réflexion sur l'intérêt économique-énergétique de ces volumes.

Le modèle servant de support à cette étude est un zome de paramètres :

$N = 6$; $F = 3$; $L = 2 \text{ m}$; $HM = 3,2 \text{ m}$ (hauteur des murs)

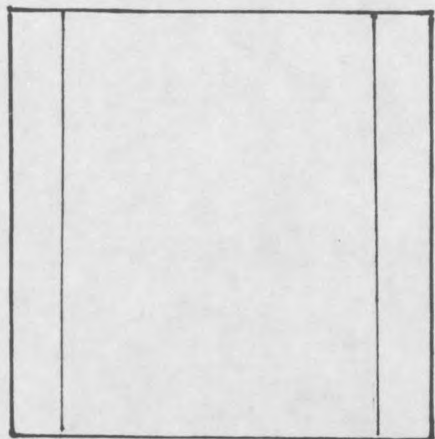
Apparemment très différentes l'une de l'autre par les matériaux employés, six au moins des réalisations repérées sont proches de ce modèle.

On le compare à un témoin de forme plus conventionnelle et déjà très compacte, une construction à toiture à deux pentes avec murs et pignons sur un plan carré. Les deux volumes offrent strictement les mêmes surfaces et volumes habitables, en rez-de-chaussée comme à l'étage (cf. croquis page suivante) :

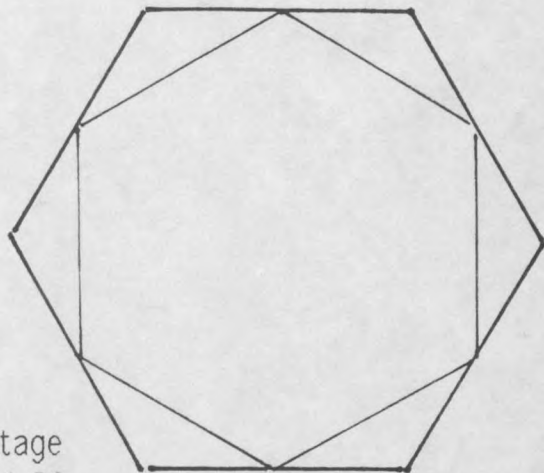
		Forme conventionnelle	Zone	Diminution (-)	Augmentation(+)
Surface habitable	m ²	RDC Etage Total	31.17 23.28 54.45	31.17 23.28 54.45	0 0 0
Volume habitable	m ³	RDC Etage Total	74.8 60.09 134.89	74.8 60.09 134.89	0 0 0
Périmètre	m	RDC	22.33	20.78	- 1.54 (-6.9%)
Surface d'enveloppe	m ²	RDC Etage vertical toiture total	53.59 40.03 38.95 78.98	49.87 27.02 42.55 69.57	- 3.72 (-6.9%) - 13.01 (-32.5%) + 3.6 (+9.2%) - 9.41 (-11.9%)
		Total vertical	93.62	76.89	-16.73 (-17.9%)
		Total enveloppe	132.37	119.44	-12.93 (- 9.8%)

Plans et coupes des deux modèles mettant en relief les espaces habitables (trait gras).

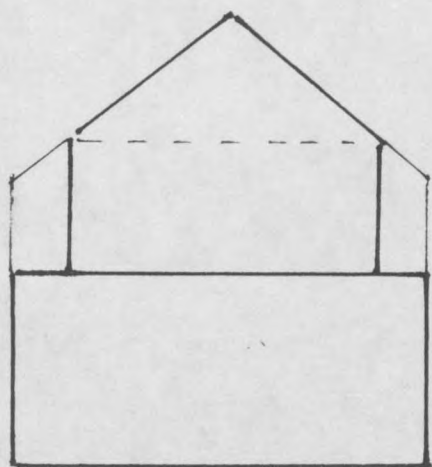
Forme conventionnelle



Forme de zone

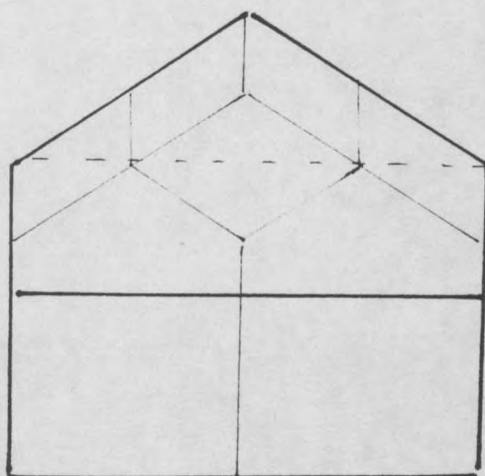
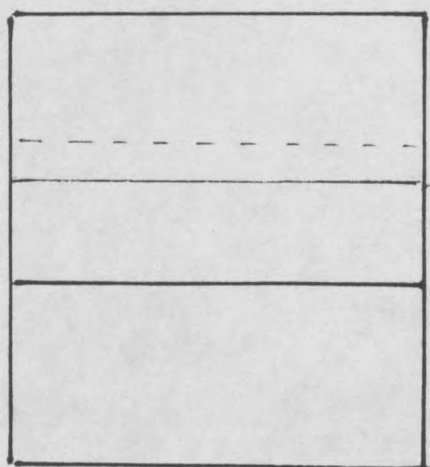
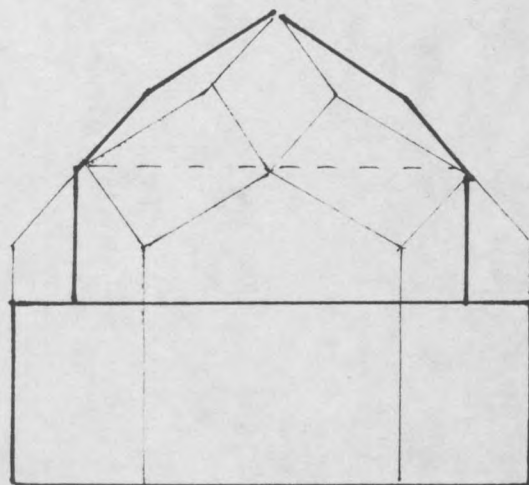


Plancher RDC et étage avec hauteur > 1,80



—
1,80

—
2,40



III - CONSOMMATIONS

Situés dans un même climat et avec des vitrages identiques en surface (9m) et orientation, ces deux modèles vont avoir des besoins énergétiques différents, essentiellement à cause d'une surface d'enveloppe différente (pertes surfaciques) et d'un périmètre différent (pertes linéiques). Bien réalisées, les autres jonctions toit-murs et raccords entre losanges donnent des pertes linéiques négligeables, alors que les pertes par renouvellement d'air, liées au volume, sont égales.

: Forme :		: Diminution (-) :	
: conventionnelle :		: Augmentation (+):	
		Zone	
: Pertes	: Murs (K = 0.45):	Murs (K = 0.45)	:
: Surfacades:	38.08	30.46	: - 7.62 (-20%) :
: W/°C	: toiture	: toiture	:
:	: (K= 0.25)	: (K = 0.25)	:
:	: 9.74	: 10.64	: + 0.9 (+9.2%) :
: Pertes	:	:	:
: linéiques	:	:	:
: (k=1.25)	: 27.47	: 25.97	: - 1.5 (6.9%) :
: Pertes	:	:	:
: vitrages	:	:	:
: (K = 3.3)	: 29.7	: 29.7	: 0 :
: Pertes par	:	:	:
: renouv. air:	:	:	:
: (0.55vol/h):	: 25.22	: 25.22	: 0 :
: Total pertes:	129.36	121.99	: - 7.37 (-5.7%) :
: Coefficient:	:	:	:
: G (W/m ³ .°C):	0.96	0.9	: - 0.06 (-6.2%) :
: B (W/m ³ .°C):	0.83	0.76	: - 0.07 (-8.4%) :
: besoins	:	:	:
: (W/°C)	: 111.96	: 102.51	: - 9.45 (-8.4%) :
:	:	:	:

Cette diminution des besoins énergétiques, due à la seule différence de forme, est assez remarquable. A titre de comparaison, on l'obtiendrait aussi en augmentant de plus de 2cm l'épaisseur d'isolant sur toute la surface des parois verticales.

IV - INFLUENCE DES PARAMETRES DU ZOME.

Le zome étant gouverné par 3 paramètres indépendants, ces derniers vont avoir une influence sur les grandeurs dimensionnelles, surface d'enveloppe et volume, donc sur les consommations énergétiques et le coût constructif.

a) Coefficient de forme :

Le rapport entre la surface d'enveloppe SE et le volume V est souvent appelé coefficient de forme :

$$CF = SE / V$$

S'il caractérise la compacité d'une construction, il n'est pas suffisant pour juger de son opportunité.

D'une part, surfaces et volumes habitables sont des grandeurs essentielles de la construction ; d'autre part la surface d'enveloppe aura une influence sur les seules pertes surfaciques qui représentent il est vrai, le poste le plus important des déperditions (environ 37% dans notre exemple).

b) Influence de l'ordre du zome :

Augmenter l'ordre N du zome conduit à augmenter le nombre de facettes. La forme de base, un polygone à N côtés, approchera mieux le cercle, alors que le volume approchera mieux la demi-sphère ; il s'en suivra une légère diminution des pertes thermiques.

Par contre, augmenter le nombre de facettes (de 18 à 32 lorsque N passe de 6 à 8) va considérablement augmenter le temps de construction donc le coût ,et n'est pas justifié pour un si petit espace.

c) Influence de la forme du zome :

L'étude théorique des zomes montre que le coefficient de forme CF passe par un minimum pour un nombre de forme particulier ($F = V$). Au regard de ce coefficient, le modèle proposé ($F = 3$) n'est donc pas optimisé.

Le tableau suivant étudie divers coefficients pour 3 formes possibles de zomes d'ordre 6 qui couvrent la même surface habitable (23.28 m²). Le calcul est limité à l'espace étage, l'espace R.D.C ne variant pas.

Nombre de forme	CF1 = SE/V calotte	CF2 = SE/V zome calotte + murs	SE / Vh	SE/Sh	hauteur moyenne
V 2	1.05	0.955	1.12	3.08	2.75
V 3	1.13	0.97	1.16	2.99	2.58
V 4=2	1.21	0.98	1.19	2.94	2.48

On remarque que les coefficients de forme SE / V augmentent lorsqu'on s'éloigne de la forme optimale, même pour SE / Vh qui se rapporte au volume habitable. Par contre le rapport surface d'enveloppe / surface habitable diminue avec la diminution de la hauteur moyenne au dessus du plancher.

Ainsi, contrairement à ce que l'on pourrait déduire d'une seule étude du coefficient de forme CF, la forme "optimale"

(F= V2) n'est pas la plus performante car elle présente pour une même surface habitable la plus grande surface d'enveloppe.

Si l'on examine plus en détail surfaces et déperditions thermiques, on obtient (avec 3.8m² de vitrage) et les valeurs adoptées précédemment pour les coefficients K) :

Forme	Surface toiture	Surface verticale	Pertes toiture	Pertes murs	Pertes surfacique	Volume habitable
V 2	47.13	24.68	11.78	9.40	21.18	64.16
V 3	42.55	27.02	10.64	10.45	21.09	60.09
2	40.05	28.41	10.01	11.07	21.08	57.65

Du point de vue des déperditions surfaciques, les formes 2 et V 3 sont pratiquement équivalentes et meilleures que la forme V 2. En tenant compte du renouvellement d'air (0.55 volumes/h), la forme F = 2 est meilleure que F = V 3. L'écart est toutefois négligeable, il se traduit par une différence de déperditions annuelles de :

$$V \times 0.55 \times 0.34 \times DH$$

$$(60.09 - 57.65) \times 0.55 \times 0.34 \times \frac{44\ 000}{1\ 000} = 20 \text{ kwh}$$

soit, en chauffage électrique une différence de coût proche de 15 F / an.

Par contre, le coût global d'une toiture étant bien supérieur à celui d'un mur (rapport de 3.5 à 1), la forme F = 2 s'avère la plus performante.

d) Influence de la taille

Le troisième paramètre fixe les dimensions du volume. Plus il augmentera, plus le coefficient de forme (SE/V) diminuera car ayant la dimension de l'inverse d'une longueur (effet de taille). Les modèles comparés (conventionnel et zome) étant des espaces de taille modeste, l'économie énergétique constatée pour le zome sera encore accentuée pour des espaces plus grands.

V - ASPECT CONSTRUCTIF :

Ces formes nouvelles peuvent se construire à l'aide des techniques de construction à ossature bois, avec préfabrication des éléments (facettes du polyèdre) et assemblage sur le lieu d'implantation.

Les matériaux travaillant en tension-compression et les efforts se répartissant sur toute l'enveloppe, ces formes convexes à symétrie de révolution sont d'une rigidité exceptionnelle et peuvent conduire à une diminution des sections des montants de structure.

Certaines phases de la construction peuvent cependant demander un temps de mise en oeuvre plus important.

a) Les fondations :

Le sol étant un polygone régulier, le tracé des fondations risque d'être un peu plus long que pour des plans orthogonaux.

b) Les murs :

Composés d'un rectangle surmonté d'un triangle, leur construction et assemblage sont tout à fait équivalents aux réalisations à ossature bois.

c) Les vitrages :

Intégrés dans les murs verticaux, les vitrages peuvent avoir des formes et dimensions normalisées.

d) La toiture :

Composée de facettes losanges de dimensions réduites, la réalisation de leur structure nécessite un volume de bois bien moindre que pour une charpente classique, et moindre ou équivalente à une charpente à fermettes.

Les losanges se répartissant en un petit nombre de séries d'éléments identiques, leur préfabrication peut-être très rapide, ainsi que leur assemblage sur le terrain.

Par suite de la géométrie particulière à ces volumes, la pose d'une couverture étanche et évacuant les eaux de pluie demandera plus de temps que pour une forme conventionnelle, à cause des nombreux arêtiers et des découpes éventuelles du matériaux (métal, tuiles plates, ardoise, shingle d'asphalte, bardeaux de bois, ...)

VI - APPROCHE DU COUT GLOBAL :

Les fiches de calcul du coût global (4) permettent de comparer rapidement l'incidence de la forme architecturale sur cette grandeur.

En ne tenant compte que de ce qui varie entre le modèle de forme conventionnelle et le modèle de zome (périmètre de fondations, surfaces de murs et de toiture), on aboutit pour le climat de Toulouse, à un coût global pour le zome inférieur de :

fondations	-	1162.28 F	
murs	-	13354.22 F	
toiture	+	9936.84 F	

total	-	4579.64 F	TTC

Ceci dans l'hypothèse où la construction du zome serait tout à fait semblable à celle de la construction conventionnelle (caractéristiques technico-économique les plus courantes pour la région au 1/10/87).

Ce résultat nous donne donc le surcoût de complexité admissible pour la construction du zome.

Calculé indépendamment, la différence de consommation énergétique sur 13 années actualisées donne pour le zome :

- 3966.82 F TTC (chauffage électrique)

Dans la comparaison de ces deux formes, l'économie d'énergie est prépondérante.

VII - CONCLUSION :

Ce résultat intègre les surcoûts de conception, de construction (fabrication des éléments, assemblage, habillage,) les frais d'emprunt ainsi que la TVA.

On peut remarquer que :

- La forme conventionnelle de comparaison est déjà un modèle très compact et performant : il serait difficile de faire mieux.

- Les habitants actuels de zones ont choisi cette forme surtout pour des raisons esthétiques et de qualité d'espace plutôt que par comparaison économique avec des modèles traditionnels. Un léger surcoût d'originalité est admissible.

Des propositions à faible coût visant à développer ces formes nouvelles et les diffuser dans le milieu de la construction doivent s'attacher à :

- d'une part, la recherche de modèles réellement intéressants du point de vue de l'habitabilité et du confort, économiquement et énergétiquement performants. Ainsi par exemple, le simple choix de la forme de paramètre $F = 2$ avec un peu plus de murs et un peu moins de toiture, conduit à une augmentation du surcoût constructif admissible de l'ordre de 4000 F , ce qui ouvre de plus larges possibilités.

- d'autre part, approfondir la réflexion portant sur les matériaux et techniques pour chaque phase des procédés constructifs, ceci afin de réduire au maximum les coûts de fabrication et mise en oeuvre.

REFERENCES

(1) J.P. CORDIER : "Dimension climatique de l'architecture. Le coût global : approche théorique" Rapport de recherche SRA 1986.

(2) J.L. IZARD : "Rôle de l'architecture en conception thermique des bâtiments. Etude de la sensibilité des paramètres architecturaux" In : Architecture, Climat, Energie. COFEDES 1986

(3) J. SOUM : "Rhombizonaèdres polaires de révolution". AFME . En cours

(4) J.P. CORDIER, O. ASSANELLI, A. CHATELET : "Implications économiques globales de la forme architecturale" . AFME , 1987