

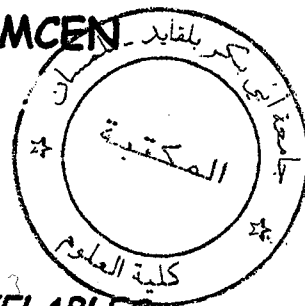
M/232.6 - 4010N
REBUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

UNIVERSITE ABOU-BAKR BELKAID de TLEMCE

FACULTE DES SCIENCES

DEPARTEMENT DE PHYSIQUE

LABORATOIRE DE MATERIAUX ET ENERGIES RENOUVELABLES



THESE DE MAGISTER

EN PHYSIQUE ENERGETIQUE ET MATERIAUX

THEME

ETUDE DU TRANSPORT D'ENERGIE SOLAIRE PAR FIBRES
OPTIQUES :
APPLICATION AUX SYSTEMES A CONCENTRATION.

Présentée par M^{elle} ZIDANI CHAFIKA

Soutenue en Novembre 2002

Devant le jury composé de :

M^r N. Chabane Sari (Professeur, Université de Tlemcen) : Président

M^r B. Benyoucef (Professeur, Université de Tlemcen) : Directeur de Thèse

M^r F. Benyarou (Chargé de cours, Université de Tlemcen) : Co-directeur de Thèse

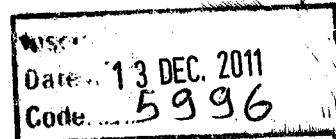
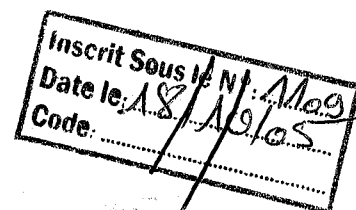
M^r M. Lemerini (Maître de conférences, Université de Tlemcen) : Examineur

M^r M. Chikh-Bled (Maître de conférences, Université de Tlemcen) : Examineur

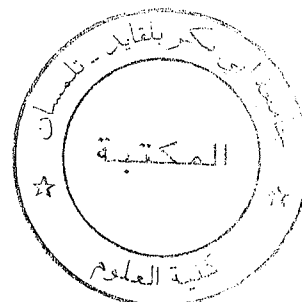
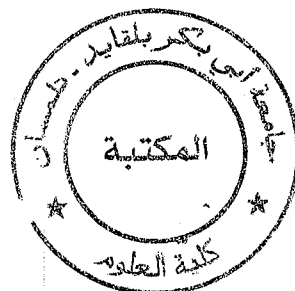


Liste des symboles

16



- l : Longueur (m)
 d : Diamètre
 s : section
 n_1 : Indice du Cœur
 n_2 : Indice de Gaine
 θ_0 : Ouverture angulaire
 i_1 : Angle d'incidence interne limite correspondant à la « réflexion totale »
 μ : Coefficient de réflexion interne.
 $\tau(\lambda)$: Coefficient d'atténuation du cœur à la longueur d'onde λ .
 τ : Coefficient d'atténuation moyen sur l'ensemble du spectre solaire.
 θ : Angle d'incidence sur la face d'entrée.
 $\tau'(\theta)$: Coefficient d'atténuation moyen en ligne pour un angle d'incidence θ .
 D_{ts} : Distance terre-soleil.
 R_{s0} : Rayon du disque solaire
 ε_0 : Rayon angulaire du disque solaire.
 R_s : Rayon d'une couronne.
 ε : Rayon angulaire d'une couronne.
 B : Brillance d'une couronne.
 B_0 : Brillance au centre.
 $\bar{B}$: Brillance moyenne sur l'ensemble du disque solaire.
 D_h : Constante solaire ; densité incidente à AMO.
 D_i : Densité incidente au sol.
 P_0 : Puissance incidente sur un élément quelconque du système.
 ΔP : Perte de puissance associée à chaque élément.
 P_c : Puissance captée par le concentrateur.
 P_e : Puissance sur la face d'entrée du conducteur optique.
 P_s : Puissance disponible sur la face de sortie.
 D_s : Densité à la surface du soleil.
 D_h : Constante solaire.
 D_i : Densité incidente au sol. ✕
 D_r : Densité sur le récepteur.
 $C(M)$: Concentration locale au voisinage du point M.
 C_{max} : concentration maximale théorique.
 C_{opt} : Concentration optimale théorique pour une ouverture.
 C : Concentration moyenne.
 C_t : Concentration moyenne sans perte de flux (totalité de la « tache image »).
 C_r : Concentration moyenne sur le récepteur.
 S_c : Surface de capteur normale au rayonnement.
 f : Distance focale.
 R_c : Rayon d'ouverture.
 θ_0 : Ouverture angulaire.
 $\gamma = \frac{d}{2f\varepsilon_0}$
 η : Fraction de la puissance captée, acceptée par la fibre.
 η_0 : Valeur de η pour réaliser C_{opt} .



SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE

CHAPITRE I

Description des fibres optiques

1- Introduction.....	1
2- Définitions.....	1
2.1- Principe de cheminement de la lumière.....	3
3- Quelques aspects des fibres optiques.....	5
3.1- Spécificités des fibres optiques.....	5
3.2- Domaines d'applications.....	7
3.3- Caractéristiques générales des fibres optiques.....	12
4- Quelques spécificités des fibres optiques monomodes.....	29
5- Conclusion.....	31

CHAPITRE II

Technologie et applications des fibres optiques

1- Introduction.....	32
2- Principe de fabrication.....	32
2.1- Fabrication des préformes.....	33
2.2- Influence des matériaux en fabrication.....	40
3- Les câbles à fibres optiques.....	41
3.1- Introduction.....	41
3.2- Propriétés mécaniques et vieillissement des fibres optiques.....	43
3.3- Protection des fibres optiques avant câblage.....	44
3.4- Matériaux utilisés dans les câbles.....	44
3.5- Structure des câbles optiques.....	46
3.6- Performances des câbles.....	46
3.7- Paramètres du câble optique.....	47
3.8- Pose des câbles à fibres optiques.....	48

3.9- Constitution d'un câble à fibre optique.....	49
3.10- Raccordement des fibres optiques.....	49
4- Conclusion.....	62

CHAPITRE III

Généralités sur le rayonnement solaire et sa concentration

1- Introduction.....	63
2- Le rayonnement solaire.....	63
2.1- Le rayonnement solaire à la limite de l'atmosphère.....	63
2.2- Atténuation du rayonnement solaire par l'atmosphère.....	63
2.3- Description générale du soleil.....	64
2.4- Description spectrale du rayonnement.....	65
2.5- Brillance radiale.....	66
2.6- Rayonnement solaire au sol.....	68
2.7- Mesure du rayonnement solaire.....	
2.8- Mesure de l'insolation.....	
2.9- Energies reçues par un capteur plan.....	
2.10- Estimation des énergies.....	
2.11- Estimation des énergies reçues au fil du soleil.....	
3- Concentration du rayonnement.....	69
4- Le suiveur Altazimutal.....	73
5- Les moyens de mesure.....	74
6- Conclusion.....	74

CHAPITRE IV

La fibre optique solaire et le miroir parabolique

1- Introduction.....	75
2- Les conducteurs de lumière.....	75
2.1- Contraintes et limites.....	75
2.2- La fibre Q.S.F 1000.....	78
3- Le concentrateur.....	79
3.1- Influence de l'ouverture.....	81

4- L'interface fibre-concentrateur.....	82
4.1- Analyse de la tache image du soleil.....	83
4.2- Puissance en sortie de la fibre.....	84
5- Conclusion.....	88
5- Etude d'un bon Monogibre	86

CHAPITRE V

Modélisation et simulation

1- Introduction.....	89
2- Energie reçue par un capteur plan.....	89
2.1- Energie instantanée.....	89
2.2- Energie journalière.....	90
2.3- Energie annuelle.....	91
2.4- Estimation des énergies reçues par un capteur.....	91
3- Energie reçue par un capteur au fil du soleil.....	95
3.1- Estimation de l'énergie instantanée.....	95
3.2- Estimation de l'énergie journalière.....	96
3.3- Estimation de l'énergie annuelle.....	97
4- Application aux systèmes à concentrations.....	98
4.1- Energie incidente sur le concentrateur.....	98
4.2- L'énergie concentrée à l'entrée de la fibre optique solaire.....	99
4.3- Energie de sortie de la fibre optique.....	102
5- Conclusion.....	106

CONCLUSION GENERALE	107
---------------------------	-----

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE

Introduction générale

INTRODUCTION GENERALE

L'idée de transporter l'énergie solaire concentrée par les conducteurs de lumière à commencé en 1975 par Robieux [1]. ~~Quelques temps~~ plus tard, Kato et Nakurama [2] ont fait une étude théorique de l'utilisation des fibres optiques en Silice pour la transmission du rayonnement solaire, avec une atténuation de 25 dB/Km sur le spectre solaire c-à-d 6 % de pertes après un parcours de 10 m.

En 1984 J.M.Cariou [3] et ses collaborateurs ont proposé l'utilisation d'un miroir parabolique de 7 cm de diamètre, cette transmission à donnée 2W avec un rendement de 70 %. Bien que ces travaux ont montré beaucoup d'avantages. L'inconvénient été la forte atténuation, c'est la cause principale de la faible énergie produite.

Actuellement, les matériaux de production offrent une faible atténuation, ces fibres optiques modernes améliorent le rendement du système c-à-d augmenter l'énergie produite.[4]

La découverte de la fibre optique et de ses applications est l'un des développements des plus récents et les plus intéressants en optique. Si on définit un fil électrique comme une section métallique conductrice d'électrons, on peut définir la fibre optique comme un fil de verre ou autre substance transparente capable de conduire des photons, c'est à dire de la lumière. Les ondes optiques peuvent se propager à l'intérieur de fibres transparentes par réflexion interne totale. Le diamètre de ces fibres peut aller de quelques microns pour la fibre monomode à quelques centaines de microns pour la fibre multimode. À cause de leur haute fréquence, donc une très grande vitesse, les ondes optiques du spectre visible et du proche infrarouge peuvent véhiculer beaucoup plus d'information que le courant électrique se propageant dans des câbles métalliques.

Le Canada est l'un des chefs de file en fibre optique; le centre de recherche en communication s'y intéresse beaucoup. Au niveau commercial, Bell-Northern Research et Canada Wire and Cable sont les sociétés canadiennes les plus en vue. Le premier circuit interurbain numérique pour la câblodistribution utilisant les fibres optiques est installé à London Ontario. Les autres systèmes canadiens sont au quartier général de la Défense National à Ottawa et au centre-ville de Montréal de Toronto et de Vancouver. Des systèmes très perfectionnés ont récemment été installés entre Calgary et Cheadle en Alberta ainsi qu'entre Élie et St-Eustache au Manitoba.

Ce présent travail a pour objectif de réaliser des fours solaires alimentés par fibres optiques.

L'utilisation de l'énergie solaire à des fins industrielles nécessite des températures élevées et donc la concentration du rayonnement.

Les fours solaires, qui permettent d'atteindre quelques milliers de degrés, ont été réalisés, en particulier en France. Ils présentent, en effet, un certain nombre d'inconvénients qui les rendent peu commodes et difficilement adaptables à une utilisation industrielle :

- Les fortes concentrations sont obtenues avec des réflecteurs à symétrie axiale, miroirs sphériques ou mieux paraboliques.

- Le faisceau réfléchi forme un cône de lumière, l'ouverture du dispositif récepteur doit être suffisante pour accepter ce cône ; Les pertes thermiques sont alors importantes.

- Enfin, le récepteur doit suivre la course du soleil en même temps que le concentrateur, si ce dernier est mobile (système Thek) [5]. D'autre part si l'on veut que cet ensemble soit fixe, il faut une réflexion supplémentaire sur un ensemble de miroirs plans jouant le rôle d'héliostats (systèmes à double réflexion utilisés dans les ensembles de fortes puissances).

Toutes ces raisons font qu'il est difficile d'utiliser directement, à des fins industrielles, l'énergie solaire dans la zone de forte concentration. On est amené à transférer une fois concentrée jusqu'au dispositif d'utilisation alors désolidarisé du concentrateur [6].

Le transport de l'énergie solaire concentrée par des conducteurs de lumière laisse présager de l'intérêt de cette méthode et des utilisations potentielles qui en résultent.

A partir de là, nous avons adopté le plan suivant :

Après une brève introduction,

- Le premier chapitre donne une description générale des fibres optiques.
- Le deuxième chapitre a pour objet la présentation de la technologie de fabrication des fibres optiques, ainsi que la réalisation des câbles.
- Quant au troisième chapitre, il regroupe des généralités sur les notions sur la notion du rayonnement solaire et sa concentration.
- Dans le chapitre quatre nous présentons les résultats expérimentaux de J.M.Cariou, qui a déterminé la puissance de sortie d'une fibre optique solaire.
- Le sixième chapitre consiste à établir un programme de simulation se basant sur la modélisation et le dimensionnement de la fibre optique et du concentrateur.

Chapitre I

Description des fibres optiques

1- Introduction

L'utilisation des signaux électriques principalement dans la transmission de l'information a donné naissance à une science bien connue : l'électronique de transmission. Maintenant la transmission d'impulsion lumineuse dans la fibre optique a donné naissance à une nouvelle science, la photonique. De l'avis de plusieurs spécialistes, l'emploi de ces fibres de verre constitue la découverte la plus importante depuis l'invention des transistors.

Grâce à ce nouveau conducteur qu'est la fibre optique, tout un matériel électronique et même optoélectronique a été développé pour émettre, coder, traiter et décoder des signaux lumineux. L'innovation fondamentale de cette nouvelle technologie réside dans le fait que la lumière remplace l'électricité. [7]

Pour déterminer dans quelle mesure un conducteur de lumière est susceptible de transporter l'énergie solaire concentrée, il faut rappeler comment il est constitué et quelles sont les contraintes physiques qui résultent de son principe.

2- Définitions

Les fibres optiques sont des tubes capillaires de faible diamètre composées de deux types de matériaux naturels ou synthétiques. Ils transmettent la lumière le long d'un trajet rectiligne ou incurvé suivant le principe de réflexion totale interne. Ils possèdent un cœur central et en général une seule couche de revêtement externe appelée gaine.

Les fibres optiques sont des brins de verre de la finesse d'un cheveu qui transmettent par modulation des signaux lumineux et les impulsions électriques émises par un laser, mieux que les câbles en cuivre (sous un volume mille fois moindre, une seule fibre transmet 30 fois plus d'information). Fabriquées à partir de silice (abondant et peu cher) avec peu de consommation d'énergie : larges bandes passantes, faibles atténuations du signal, absence d'interférence magnétique elles sont de plus en plus employées en télécommunication visiophones, TV câblée, télédétection transmission de données à fort débit en ambiance magnétique. [7]

Cependant l'un des avantages de la fibre optique est son utilisation en faisceau; il y aurait donc contacts multiples des fibres les unes avec les autres. Afin d'éviter le passage de lumière d'une fibre à l'autre, elles doivent être isolées les unes des autres par une gaine.

Une fibre optique est une baguette très fine d'un matériau transparent étiré dont l'aspect filiforme lui confère de la souplesse. [8]

Une fibre optique est un guide d'onde optique à symétrie circulaire tel que schématisé sur la figure (I-1). Ce guide est constitué de deux ou plusieurs couches de matériaux diélectriques transparents (verre ou plastique) d'indices de réfraction différents assurant le confinement de la lumière au voisinage du centre. [9]

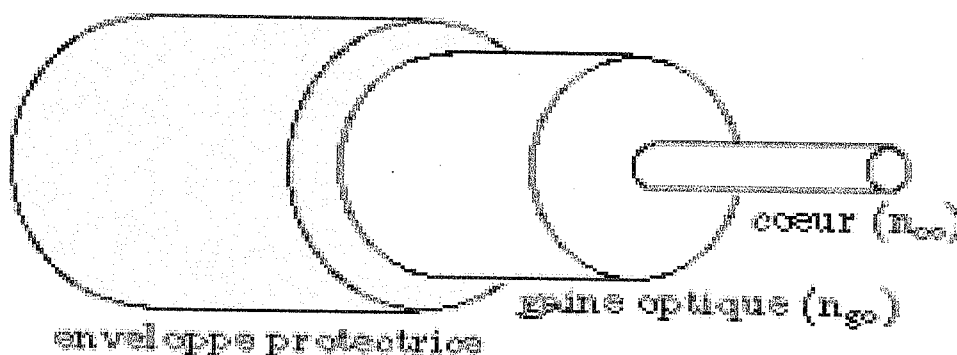


Figure I-1 : Fibre optique. [9]

D'une manière générale elle est composée d'un milieu diélectrique que l'on nomme cœur recouvert d'un second milieu la gaine optique, d'indice de réfraction n_2 , inférieure à celui du cœur n_1 [8]. La fibre optique est un guide de lumière, régi par la loi de Snell-Descarte, constituée d'un cœur dans lequel se propage l'onde lumineuse en se réfléchissant sur la gaine optique d'indice de réfraction plus faible [9]. La lumière qui se propage à l'intérieur d'une fibre optique obéit au principe de la réflexion totale interne. Chaque fibre optique est constituée d'un cœur, enveloppé par une gaine. Un faisceau à fibres optiques est utilisé pour transmettre de la lumière soit indépendamment soit couplé à un appareil d'analyse.

Il existe essentiellement deux types de fibres optiques [10]

1) Les fibres à saut d'indice :

- Dans les fibres à saut d'indice, l'indice varie brutalement d'une valeur n_1 au centre du cœur (de rayon a) à une valeur plus faible n_2 à la périphérie interne de la gaine (de rayon b).
- Dans les fibres ayant de cœur a non négligeable devant b , la lumière se propage par fois en créant des réflexions parasites qui perturbent la transmission du message et peuvent provoquer sa dispersion. Pour éviter ces problèmes, on utilise les fibres monomodes qui sont difficiles à raccorder entre elles en raison de la finesse du cœur. Les fibres multimodes, dont le cœur est plus gros, sont faciles à raccorder mais elles provoquent une déformation du message. Il est nécessaire de placer des récepteurs en longues distances. C'est pourquoi on a les fibres à gradient d'indice.

2) Les fibres à gradient d'indice :

- Dans les fibres à gradient d'indice, l'indice diminue d'une façon continue de la valeur sur l'axe optique n_1 à la valeur n_2 lorsqu'on s'éloigne de l'axe.

2.1 Principe de cheminement de la lumière

La plus grande partie de l'énergie véhiculée par une fibre est confinée dans le cœur, cependant une fraction non négligeable est également transportée dans la gaine ; le matériau constituant celle-ci doit donc présenter des propriétés de pureté comparables à celles du cœur. Habituellement, la gaine optique et le cœur sont réalisés en silice (SiO_2), ce dernier étant le plus dopé, avec, par exemple, du dioxyde de germanium (GeO_2), afin de créer une différence entre les deux indices de réfraction. La partie optique de la fibre est entourée d'une gaine de silice de moindre pureté, mais qui, par contre, présente d'excellentes qualités mécaniques destinées à lui conférer une résistance aux contraintes qu'elle subit. Le diamètre externe d'une fibre en silice peut varier entre quelques dizaines et plusieurs centaines de micromètres. La gaine de silice est elle-même le plus souvent enrobée de couches de matériaux plastiques (polymères, polyuréthane, polyimide...) de quelques dizaines de microns d'épaisseur est l'isolent de l'environnement et plus spécifiquement des agents corrosifs ou de la température. C'est en raison de la différence entre les indices n_1 et n_2 et des lois de la propagation, qu'un faisceau lumineux entré par une extrémité de la fibre, subit des réflexions totales à chaque dioptré (interface cœur-gaine) puis sort par l'autre extrémité. [1] [2]

Lorsqu'un faisceau lumineux heurte obliquement la surface qui sépare deux milieux plus ou moins transparents, il se divise en deux : une partie est réfléchié tandis que l'autre est réfractée, c'est à dire transmise dans le second milieu en changeant de direction. L'indice de réfraction est une grandeur caractéristique des propriétés optiques d'un matériau [3]. Il est obtenu en divisant la vitesse de la lumière dans le vide ($C_v=299\,792\text{ Km/s}$) par la vitesse de cette même onde dans le matériau. Plus l'indice est grand, et plus la lumière est lente. Ainsi, dans l'air, la vitesse de la lumière est à peu près égale à C_v ; dans l'eau, elle est égale à 75% de C_v ; dans le verre, elle est égale à environ 55% ou 60% de C_v selon le type de verre. [4]

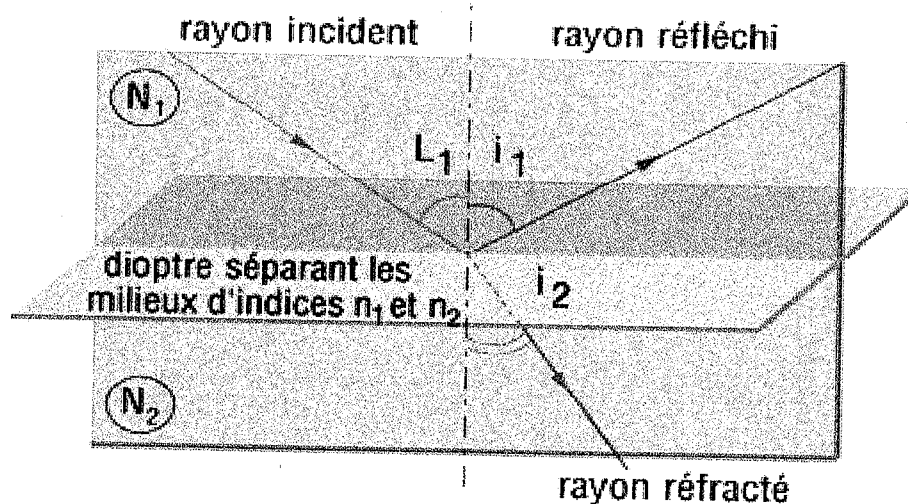


Figure I-2 : Principe de réflexion et réfraction d'un faisceau lumineux [4]

C'est ce principe qui est utilisé pour guider la lumière dans la fibre. La fibre optique comprend ainsi deux milieux : le cœur, dans lequel l'énergie lumineuse se trouve confinée, grâce à un second milieu, la gaine, dont l'indice de réfraction est plus faible. Les recherches menées dans les années 1970 ont conclu que la silice était un bon support pour des longueurs d'onde prises dans le proche infrarouge (850 nm - 1300 nm - 1500 nm).

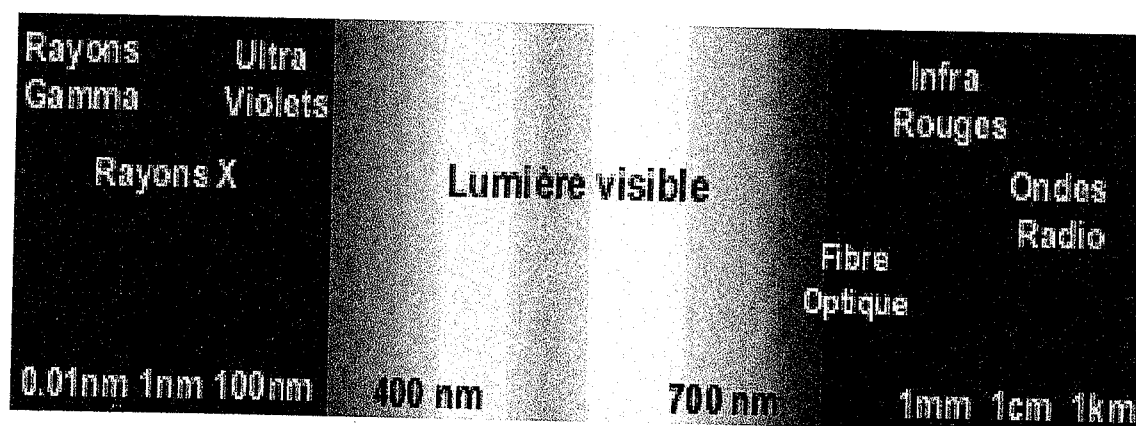


Figure I-3 : La bande spectrale entre 0,01 nm et 1 km [4]

3- Quelques aspects des fibres optiques

Nous allons effectuer un bref rappel des spécificités des fibres optiques, leurs domaines d'application, leurs caractéristiques ; les différents types de fibres, avant de terminer par quelques notions concernant l'ouverture numérique, le profil d'indice, l'atténuation et la dispersion dans une fibre optique.

3-1 Spécificités des Fibres Optiques

La réunion des deux caractéristiques : souplesse et conduction de la lumière sont à l'origine de nombreux développements et applications.

Les fibres optiques de type télécommunications réalisées couramment sont en verre (silice SiO_2 , borosilicate...) ; Cependant des fibres synthétiques (plastiques) existent également, bien que les applications potentielles, donc le marché qui s'y rapporte, soient actuellement limitées aux transmissions très courtes distances (~100 mètres) et à quelques applications marginales. Ceci devrait évoluer dans les années à venir, en effet un certain nombre d'idées en sont l'exemple comme celle d'instrumenter les automobiles avec un réseau de capteurs à fibres optiques ou bien encore les projets récents de domotique prenant en compte les fibres aussi bien au niveau capteur, sans oublier les sondes de mesures à usages uniques (faible coût) pour le domaine médical. Elles auront pour conséquence la pénétration à terme de cette technologie dans un des plus importants marchés grand public.

Les fibres optiques existent aussi dans la nature en tant que CFO (en prenant pour capteur son sens premier par opposition à sa vocation métrologique) : Les poils de l'ours polaire, en plus de l'isolation qu'ils assurent à l'animal, possèdent la propriété de capter l'énergie solaire et de la guider jusqu'à son épiderme, lui assurant aussi un chauffage additionnel [8]. La fibre est largement utilisée dans le domaine des transmissions des signaux optiques il est aujourd'hui banal de rappeler l'explosion de l'utilisation de ce support pour les transmissions d'informations, depuis le réseau local jusqu'aux liaisons internationales. Cet essor rapide étant justifié par l'enjeu économique de ces applications. Cet engouement pour la fibre optique dans le domaine de transmission tient à plusieurs raisons, citons en premier quelques caractéristiques physiques fondamentales : [45]

- Faible atténuation : Le signal optique peut se transporter sur une grande distance. L'atténuation de la silice dopée constituant les fibres est très faible dans certaines fenêtres spectrales (0,8 μm , 1,3 μm et 1,55 μm) et atteint presque la limite théorique pour cette dernière longueur d'onde (~0,2 dB/Km), ceci permet la réalisation de très

long trajets entre répéteurs ou abonnés (plusieurs centaines de kilomètres). Avec une fibre de bonne qualité, on utilise des répéteurs ou des amplificateurs de signaux à tous les 25 kilomètres seulement, tandis qu'un fil de cuivre nécessite un répéteur à tous les deux kilomètres.

- **Large bande passante :** Celle-ci est définie par le nombre d'impulsions que peut acheminer une fibre à chaque seconde. Ces impulsions se présentent sous forme de bits d'information et un hertz (fréquence) égale 1 bit d'information. La capacité de transmission de la fibre optique peut être 10000 fois celle du fil du cuivre. La grande bande passante du support (~100 GHz.Km pour les fibres unimodales) permet la multiplicité des canaux par multiplexage, et enfin quelques raisons d'ordres techniques :
- **L'isolation galvanique** des matériaux constituant la fibre a pour effet de ne pas nécessiter de blindage électromagnétique et d'autre part d'éliminer tout risque de court-circuit lors d'un endommagement du câble, ce qui améliore la sécurité.
- **Les différentes fonctions** (modulation, multiplexage), nécessaires au fonctionnement d'un système de télécommunications sont maintenant transportables dans le domaine optique grâce (entre autres) aux fibres, tant pour un signal analogique que numérique. Dans cette application, les fibres sont jugées insensibles aux facteurs d'environnement dans la mesure où l'on s'intéresse à la puissance du signal lumineux reçu par le détecteur en sortie de la fibre.
- **Réduction des poids et volume :** Le diamètre d'une fibre optique est de l'ordre de millimètre et son poids de quelques grammes au kilomètre. Un gros avion commercial contient environ 5 tonnes de filage de cuivre qui peuvent être remplacé par seulement quelques centaines de grammes de fibres optiques. La charge utile de l'avion peut être ainsi réduite. Les fibres optiques sont si peu encombrantes et si grande est leur capacité qu'on les utilise à l'intérieur des sous-sols engorgés des grandes villes, dans les édifices publics et bientôt dans les transports en commun.
- **Transmission inviolable :** Comme la fibre est parcourue par de la lumière et non des signaux électriques, elle n'induit aucun champ magnétique ni signaux électriques, aucune radiation n'est émise par la fibre. Ce fait assure le secret des communications. C'est un avantage très apprécié des policiers et des militaires.
- **Qualité mécanique :** Un câble de fibres optiques peut supporter des efforts en traction et en flexion aussi bien que les câbles conventionnels. La petitesse et la légèreté des

fibres optiques permettent, soit de réaliser des gains de place et d'infrastructure, soit d'augmenter le nombre de canaux par rapport à un câble traditionnel de même section.

Une des caractéristiques intéressantes des fibres est, leur insensibilité aux interférences électromagnétiques. Ceci constitue un avantage puisque grâce à cela la fibre permet de procéder à la transmission d'informations recueillies par des sondes ou des capteurs dans un environnement hostile. Bien entendu, les fibres optiques peuvent également être des capteurs. Dans cette deuxième application la lumière est considérée en tant qu'onde ; ce sont des paramètres tels que la phase ou des modifications de l'Etat de polarisation qui sont mesurés. Ces paramètres sont sensibles à l'environnement : champ électromagnétique, température, contraintes, pression acoustique... Aujourd'hui la technologie de ces capteurs est une discipline à part entière fondée sur une attitude scientifique diamétralement opposée à celle qui prévaut en télécommunications optiques [15].

3-2 Domaines d'applications [11]

Les fibres optiques ont trouvé et trouveront des débouchés dans un grand nombre de secteurs (industries, militaire, médecine, grand public, etc...). Malgré la relative jeunesse de ce domaine, il n'est guère possible d'être exhaustif dans l'énoncé des applications. Cependant, dès à présent, un certain nombre de domaines ont vu ou verront une utilisation croissante et conséquente de cette technologie dans les prochaines années.

- **L'industrie électrique :**

L'isolation en haute ou très haute tension et l'insensibilité aux perturbations électromagnétiques entre les zones de mesures et d'instrumentation rendent les capteurs à fibres optiques particulièrement attractifs pour cette industrie. Les besoins sont nombreux, aussi bien pour le diagnostic de la maintenance qu'en exploitation. Citons la détermination de l'échauffement des composants de la puissance (thyristors, transistors), la mesure de température sur les boîtes à eau et les barres conductrices au stator des alternateurs, la surveillance des transformateurs (température, gaz...), celle des lignes aériennes des câbles souterrains de transport d'énergie, l'instrumentation des bâtiments réacteurs en présence de rayonnement γ , la surveillance des tuyauteries en matériaux composites, etc....

- **L'industrie gazière :**

La sécurité dans les ambiances explosives ou à haut risque est un des soucis majeurs de cette industrie. Les capteurs à fibres optiques, par leur isolation galvanique, peuvent résoudre les problèmes liés à l'utilisation des capteurs classiques. En France, un réseau d'acquisition et de

transmission adaptée aux besoins du contrôle- commande et de surveillance d'installations industrielles à été développé et commercialisé par OPTOFRA. Un réseau de ce type est utilisé à pécorade sur les sites SNEA (ELF-AQUITAINE) depuis 1987 pour l'acquisition de 40 signaux. Tout ou rien dans le cadre de la surveillance d'un puits de pétrole. En Grande-Bretagne, un système de surveillance à fibres optiques d'éventuelles fuites de gaz dans les réservoirs cryogéniques (10000 tonnes stockées à -160°C) a été installé par British Gas. Le système d'analyse met en œuvre une technique de réflectométrie optique et permet en cas de fuite de mesurer la température jusqu'à -55°C avec une résolution spatiale de 10 m (classiquement, cela nécessiterait plus de 400 couples thermoélectriques). Les avantages de cette réalisation sont : le temps de réponse, la sécurité intrinsèque et la réduction du coût. Plus globalement, le secteur énergétique qui regroupe non seulement les industries électriques et gazières pré-citées mais également les industries charbonnière, nucléaire et pétrochimique, joue un rôle important par ses demande de développements spécifiques et de produits et il semble que la décennie 90 doit être celle d'une grande diffusion de ces techniques en son sein.

- Le contrôle de processus :

Les besoins de ce type d'application en capteurs de surveillance, peuvent être maintenant satisfaits par les capteurs à fibres (pyromètres et capteurs à fibres optiques par exemple) qui, grâce à leurs propriétés intrinsèques, permettent des mesures permanentes dans des espaces confinés et perturbés. Citons comme exemple le chauffage micro-ondes, utilisé dans l'industrie de plastiques, des matériaux composites, du papier, etc ; dans tous ces domaines, la nature non métallique des fibres est prépondérante sur leurs autres caractéristiques.

- L'aéronautique :

Du fait de l'utilisation croissante de l'informatique et des matériaux composites dans les avions modernes, des problèmes de parasitages électromagnétiques se posent de façon cruciale, ce qui pousse les avionneurs à recourir dès à présent aux fibres optiques comme support physique de communication, et à terme en tant que capteurs. Dans l'hexagone, un capteur opto-alimenté de contrôle angulaire pour palonnier d'hélicoptère Dauphin a été réalisé par Spectec pour le compte de l'aérospatiale. Des essais au sol et en vol ont été effectués par ce système (norme Air 7306 pour les essais de vibration et Air 7305 pour les transitoires, démarrages etc..). L'examen des enregistrements effectuées pendant 12 vols (15 heures cumulées) a validé le procédé par comparaison à la chaîne électrique de référence. En France également, l'Université de Bordeaux I, en collaboration avec la Société Européenne de Propulsion (SEP) a développé un réseau de capteurs intelligents opto-alimentés de pression et

de température. Les applications envisagées par SEP sont dans un premier temps dans le domaine militaire, pour les avions et les hélicoptères qui seront d'ici à 1995 les premiers à être significativement équipés de CFO et RCFO. L'aviation civile suivra sans doute ensuite, vers l'an 2000, avec par exemple le successeur de l'Airbus A340.

- Le domaine médical :

La capacité des capteurs à fibres optiques à fonctionner dans les environnements perturbés électromagnétiquement a déjà établi leur suprématie sur les capteurs traditionnels dans certaines méthodes thérapeutiques médicales, comme l'hyperthermie ou la diathermie micro-ondes. Ces deux méthodes, dévolues respectivement au traitement de certaines affections chroniques (pathologies musculaires et articulaires, processus inflammatoires du petit bassin, etc...) et à celui des tumeurs malignes, sont fondées sur l'échauffement contrôlé des tissus biologiques par source micro-ondes. Dans les deux cas, un capteur de température situé dans, ou autour de, la zone est requis pour contrôler et asservir la puissance des micro-ondes (mesures en continu et à haute résolution). Les capteurs traditionnels sont proscrits car ils nécessitent des fils électriques. Ce qui modifie le champ micro-ondes, avec pour conséquences une distribution hétérogène dans les tissus (points chauds) et des fausses mesures, du fait de l'absorption des micro-ondes et de l'échauffement des capteurs.

- La domotique :

En France, dans le milieu des années 80, le groupe prospective « capteurs à fibres optiques » a publié un rapport envisageant la définition d'un projet fédérateur sur l'utilisation de cette technologie dans un immeuble d'habitation. Le programme d'action porte sur la sécurité des personnes et des biens. Une des fonctions retenues autour du thème de la sécurité est la détection d'incendie (chaleur, flamme, fumées), cette fonction devant couvrir le bâtiment avec rassemblement des signaux sur un tableau de centralisation des alarmes.

- Transport de l'énergie lumineuse : [7]

-Transmission et transport de lumière d'un espace limité vers un espace non limité :
Par exemple les lampes décoratives constituées de fibres optiques diffusant de la lumière d'une ampoule située à l'extrémité inférieure des fibres.

- Transmission et transport de lumière d'un espace non limité vers un espace limité :
Utilisés seuls, ils peuvent permettre d'éclairer un objet, un appareil, etc..., alors qu'il n'est pas possible de placer la source lumineuse sur le lieu de l'emploi pour des raisons d'exécuté ou de sécurité. Pour examiner de petits objets d'habitude inaccessibles.

- Transmettre de la lumière invisible d'un espace non limité vers un autre espace non limité : Dans les télécommunications on code les ondes acoustiques de la parole sous forme d'impulsions lumineuses et on les envoie dans des fibres optiques.

- Multiplier une source unique : On peut en ramifiant un faisceau à l'une de ses extrémités, éclairer à l'aide d'une seule source plusieurs appareils, comme pour un tableau de bord.

- Concentrer ou transformer une source lumineuse : Avec un système optique approprié, le flux lumineux d'une source de grande surface pourra être condensée sur l'entrée d'un conducteur permettant ainsi de disposer à la sortie d'une source intense en un lieu éloigné de la source d'origine. De tels conducteurs permettent de capter des signaux lumineux à distance et aussi de transformer la forme du signal capté : c'est ainsi qu'un signal provenant d'une fente lumineuse pourra être recueilli à l'autre extrémité du conducteur sous forme circulaire et inversement; d'autres anamorphes sont naturellement possibles.

- Codage et décodage d'image : Il suffit de prendre un conducteur d'images dont les deux extrémités se correspondent point par point, d'en mêler les fibres dans la partie médiane du faisceau, de les bloquer et de faire une section dans cette zone. Les deux nouvelles surfaces se correspondront point par point mais sans aucune correspondance avec les extrémités d'origine du conducteur, l'un étant le codeur, l'autre le décodeur. Si l'on forme à l'entrée côté ordonné du codeur une image, elle sera à la sortie totalement désordonnée. Pour la rendre en clair, il faudra la décrypter grâce au décodeur convenablement orienté.

Il existe d'autres nombreuses applications les plus connues concernant : [14]

- les télécommunications, pour la réalisation des réseaux à haut débit des opérateurs en technologie WDM, SDH, ATM.

- l'audiovisuel, pour la réalisation des réseaux câblés de télévision en association avec le câble coaxial utilisé pour le raccordement de l'abonné,

- la médecine, où la fibre optique est notamment utilisée :

* en chirurgie associée à un faisceau laser qui permet de : pulvériser un calcul rénal, découper une tumeur, réparer une rétine...

* en endoscopie, pour éclairer l'intérieur du corps et transmettre les images jusqu'au médecin.



Figure I-4 : Application des fibres optiques en médecine [14]

- l'éclairage (muséographique, architectural, espaces d'agrément publics ou domestiques),
- le balisage, le surlignage de bâtiments, le silhouettage,
- la décoration/illumination de piscines, bassins, fontaines,
- la signalétique d'orientation et d'information (panneau de signalisation et enseignes),

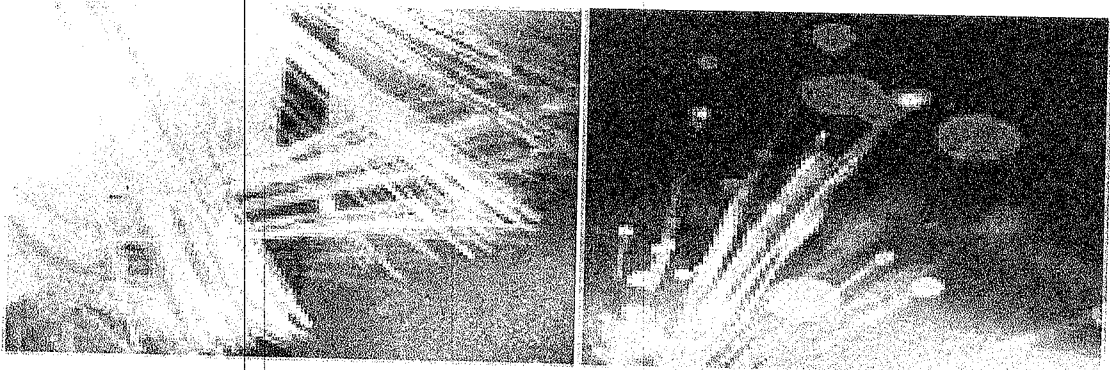


Figure I-5 : Décoration et signalisation par fibres optiques [14]

- la signalisation routière (ronds points, séparation de voies de circulation).

D'autres applications sont développées pour la réalisation de différents capteurs, comme par exemple le gyroscope à fibres optiques qui utilise une propriété physique de la lumière : les rayons lumineux qui parcourent les trois bobines de fibres de ce nouveau gyroscope se déphasent quand le véhicule (fusée, avion, bateau, voiture) change de direction. Le système calcule ainsi sa position avec une précision de 0,1 degré à l'heure. Ne contenant pas de pièces mécaniques et ne nécessitant qu'une faible énergie électrique, il est l'appareil idéal pour constituer le cœur des systèmes de navigation des fusées et des satellites.

3-3 Caractéristiques générales des fibres optiques

Ces dernières années, de nombreux types de fibres dédiés à des applications capteur particulières, ont été développés : cependant les fibres pour les télécommunications restent largement utilisées pour les raisons de coût et de disponibilité.

3-3-1 Composantes de base des fibres optiques [10]

1) Filaments conducteurs :

- Lorsqu'un faisceau linéaire de lumière entre dans une fibre optique incurvée, il pénètre sous un angle qui peut varier de 15° à 130° jusqu'à ce qu'il heurte l'interface entre l'âme de la fibre et son revêtement. Le faisceau n'est pas réorienté et il se propage à l'intérieur de l'âme avec un angle faible par rapport à l'axe optique. La propagation du faisceau suit la courbure de l'âme de la fibre optique. Durant la propagation de la lumière dans la fibre optique, il y a une diminution de l'énergie due aux pertes d'absorption au niveau des points critiques. La lumière infrarouge est moins soumise à l'absorption que la lumière visible ou ultraviolet

2) Structure des fibres optiques :

- Il existe deux types de structures de fibres optiques ; avec et sans revêtement. La première est employée pour l'éclairage dans les applications de visualisation et de détection. Dans les deux types, le matériau transparent le plus dense constitue l'âme. Un rayon lumineux réfléchi à l'interface revêtement/âme pénètre dans le revêtement, sur une distance équivalente à une demi-longueur d'onde de la lumière transmise par la fibre. Par suite, l'épaisseur du revêtement ne peut pas être inférieure à une demi-longueur d'onde. Le revêtement offre une certaine protection à l'âme, ainsi qu'à la lumière réfléchi.

3) Matériaux pour fibres optiques :

- Pour la fabrication des fibres optiques, on utilise deux sortes de matériaux, naturels et synthétiques. Les matériaux synthétiques sont obtenus par polymérisation de matériaux naturels. Les matières premières naturelles sont souvent à base de silice (SiO_2). Les fibres synthétiques sont obtenues à partir des matériaux polymères.

4) Propriétés des fibres optiques : [11]

Les propriétés des fibres optiques se répartissent en propriétés : optiques, thermiques, électriques, mécaniques, et acoustiques.

- Optiques : Un certain nombre délimité de longueurs lumineuses peuvent transmettre la lumière et sous un certain angle.

- Thermiques : utilisation entre -40 et $+80^\circ\text{C}$.

- Electriques : ne conduisent pas l'électricité.
- Acoustiques : Le transport des ondes lumineuses entraîne une perte acoustique de quelques dB par Km due à la réflexion du rayon lumineux.
- Mécanique : faible diamètre, fragile et flexible.

3-3-2 Les différents types de fibres

Les fibres optiques comportent deux grandes familles : les fibres multimodes et les fibres monomodes dans lesquelles des sous catégories sont répertoriées. Le choix d'un type de fibre particulier va dépendre des avantages et des inconvénients de chaque type de fibres pour une application donnée [16].

Une fibre monomode à une très grande bande passante mais les raccordements sont plus difficiles que pour une fibre multimode car le rayon du cœur est très faible.

La fibre multimode à saut d'indice a un grand rayon de cœur, de sorte que sa manipulation est relativement facile, mais sa bande passante est faible ($B \sim 10$ MHz/km) contrairement à la fibre à gradient d'indice 100 fois plus grande et tout aussi maniable [7]. Les fibres multimodes ont la propriété de laisser se propager plusieurs modes électromagnétiques tandis que les fibres unimodales n'en acceptent qu'un seul.

D.Marcusse (1981) a montré que le mode de propagation est unique si la variable de la fonction de Bessel j_0 solution de l'équation de propagation est inférieure à 2,405 (premier zéro de la fonction). Au-delà, le nombre de modes est approximativement égale à $V^2/2$ où le paramètre V , appelé fréquence normalisée, est défini dans une fibre de rayon de cœur a , comme suit : [8]

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_c^2 - n_g^2} \quad (I.1)$$

La fibre aura un comportement unimodal si $V < V_c = 2,405$; Ce qui conduit à définir un diamètre de cœur maximal :

$$a_{\max} = \frac{\lambda}{2\pi} \frac{2,405}{\sqrt{n_c^2 - n_g^2}} \quad (I.2)$$

Numériquement, pour une différence relative d'indices de 0,5 % et une longueur d'onde de 633 nm, on trouve une valeur maximale du diamètre du cœur de 8 μm ; à cette longueur d'onde on le fixe typiquement aux alentours de 6 μm . Les cœurs des fibres monomodes sont donc extrêmement petits. Notons à titre de comparaison que les fibres multimodes ont des

diamètres de cœurs valant typiquement $100\mu\text{m}$, soit des surfaces de cœur 100 fois supérieures, ce qui facilite grandement leur connectique [A].

Les fibres de télécommunications sont actuellement produites suivant quatre standard : Diamètre cœur/gaine (μm) : 50/125 ; 62,5/125 ; 100/140 ; 200/250, le premier et le troisième étant les plus utilisés [A]. Chacune des deux catégories de fibres mentionnées se scindent elles-mêmes en d'autres classes : des fibres à saut d'indice, à gradient d'indice, à conservation de polarité.

a) Fibres à saut d'indice :

Dans les fibres à saut d'indice, l'indice de réfraction varie brutalement d'une valeur n_1 , au centre (Cœur de rayon a) à une valeur plus faible n_2 , à la périphérie (Gaine de rayon b) (voir figure I-6) :

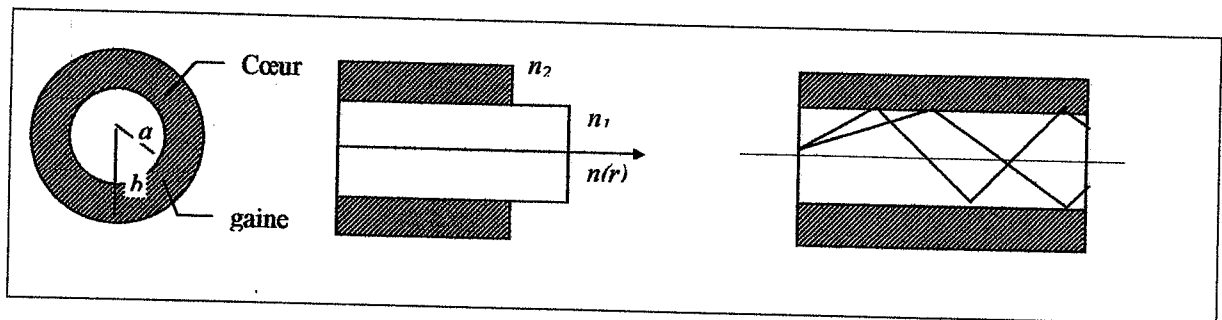


Figure I-6 : Fibre multimodale à saut d'indice

Si a est négligeable devant b , la lumière peut se propager selon plusieurs modes. La durée de propagation entre deux plans de front dépend du mode, ce qui provoque l'élargissement de tout signal propagé. Ce phénomène est appelé *dispersion modale*. Afin d'éviter cet inconvénient, nous réduisons a de façon à ne faire propager qu'un seul mode (quelques μm) (voir figure I-7) :

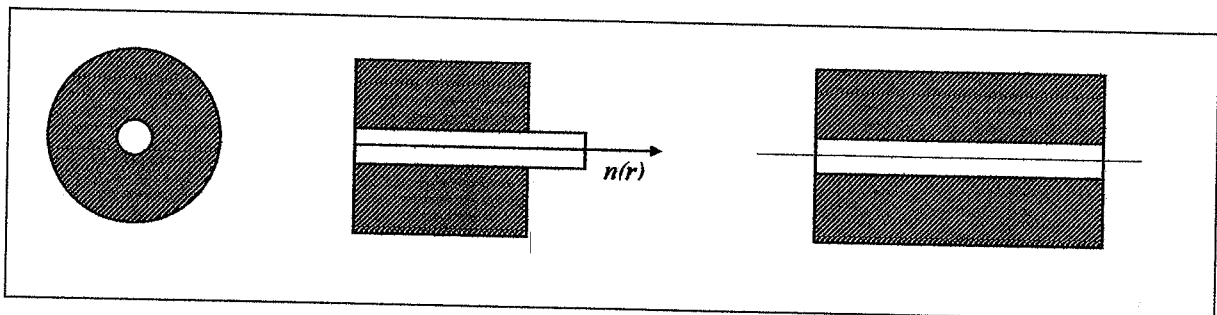


Figure I-7 : Fibre monomodale à saut d'indice

Le profil d'indice le plus simple est celui d'une fibre à saut d'indice, mais il existe des formes plus élaborées tel que le profil W. Le diamètre du cœur des fibres à saut d'indice multimodale est compris entre 50 et $200\mu\text{m}$.

b) *Fibres à gradient d'indice :*

Dans les fibres à gradient d'indice, l'indice diminue de façon continue suivant une trajectoire parabolique le long de la distance radiale r . (voir figure I-8) :

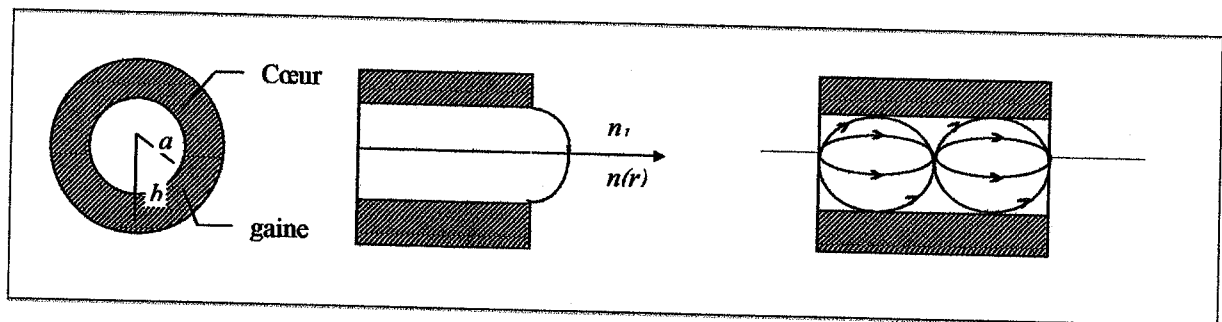


Figure I-8 : Fibre multimodale à gradient d'indice

c) *Fibres à conservation de polarité :*

Dans certaines applications, tel que les capteurs (température, pression, gyromètre, etc.), il est nécessaire de conserver la polarisation de la lumière dans la fibre. Ceci peut être réalisé en créant une contrainte sur la fibre.

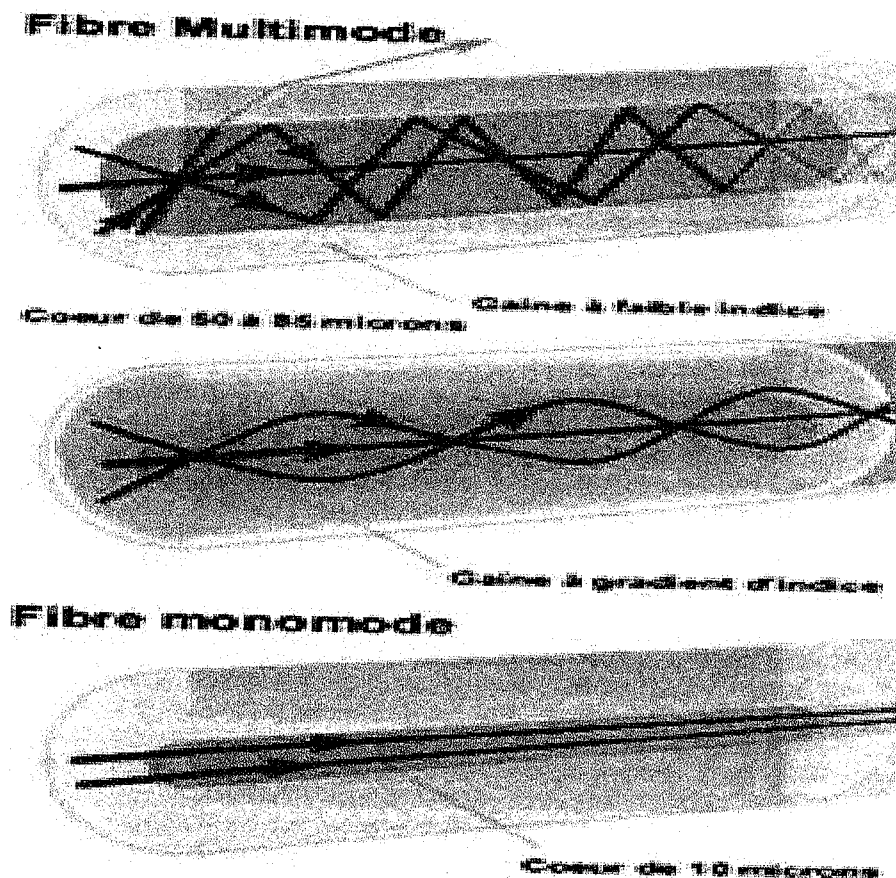


Figure I-9 : Différents types de fibres optiques [14]

- Les fibres multimodes ont un diamètre de cœur important (de 50 à 85 microns). Un rayon lumineux pénétrant dans le cœur de la fibre, à l'une de ses extrémités, se propage longitudinalement jusqu'à l'autre extrémité grâce aux réflexions totales qu'il subit à l'interface entre le cœur et de la gaine. Parmi les fibres multimodes, on distingue les fibres à faible indice ou saut d'indice (débit limité à 50 Mb/s) et les fibres à gradient d'indice (débit limité à 1 Gb/s). [16]
- À gradient d'indice : Le diamètre du cœur est de 50 micromètres, revêtement 120 micromètres. Le cœur est constitué de couches de verre successives ayant un indice de réfraction proche. On approche ainsi d'une égalisation des temps de propagation, ce qui veut dire que l'on a réduit la dispersion nodale. Leur faible atténuation acoustique 3dB.km et leur bande passante comprise entre 400 et 3000 Mhz par km permettent leur utilisation dans la télédistribution et les liaisons informatiques à haut débit.
- À saut d'indice : La dimension du cœur et du revêtement est de l'ordre du millimètre. Elle est constituée d'un cœur et d'une gaine optique en verre d'indices de réfraction différents. Elle est surtout utilisée pour des liaisons industrielles et militaires. Bande passante de quelques dizaines de MHz par km.

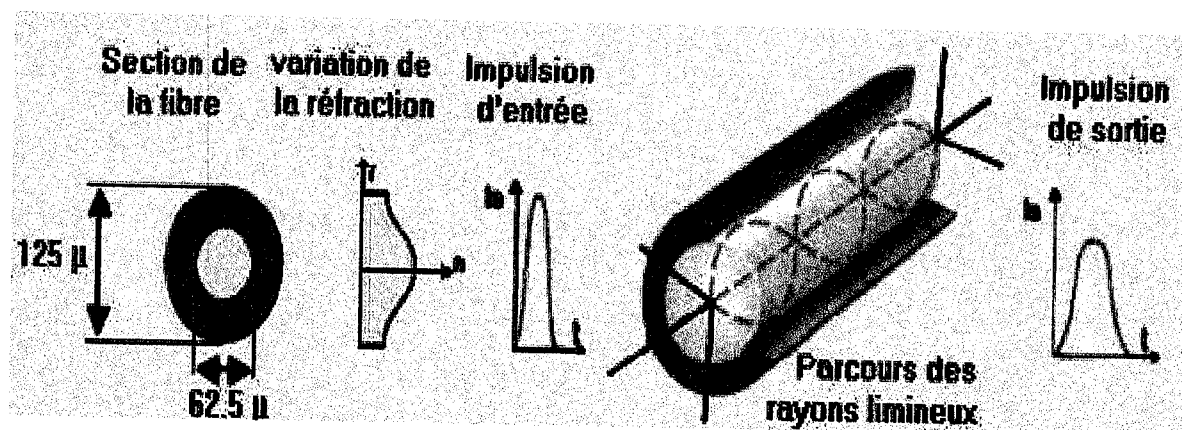


Figure I-10 : Les fibres multimodes [17]

- Les fibres monomodes ont un diamètre du cœur (10 microns), faible par rapport au diamètre de la gaine (125 microns) et proche de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde de la lumière injectée. Elles ont une bande passante (taux de transmission de l'information) élevée (supérieure à 10 GHz par km), La bande passante transmise est presque infinie. Cette fibre est essentiellement utilisée pour les sites à distance. Son cœur est si fin que le chemin de propagation des différents modes est pratiquement direct. L'onde se propage alors sans réflexion et il n'y a pas de dispersion nodale. Le petit diamètre du cœur des fibres monomodes nécessite une grande puissance d'émission qui est délivrée par des diodes-laser, qui sont relativement onéreuses.

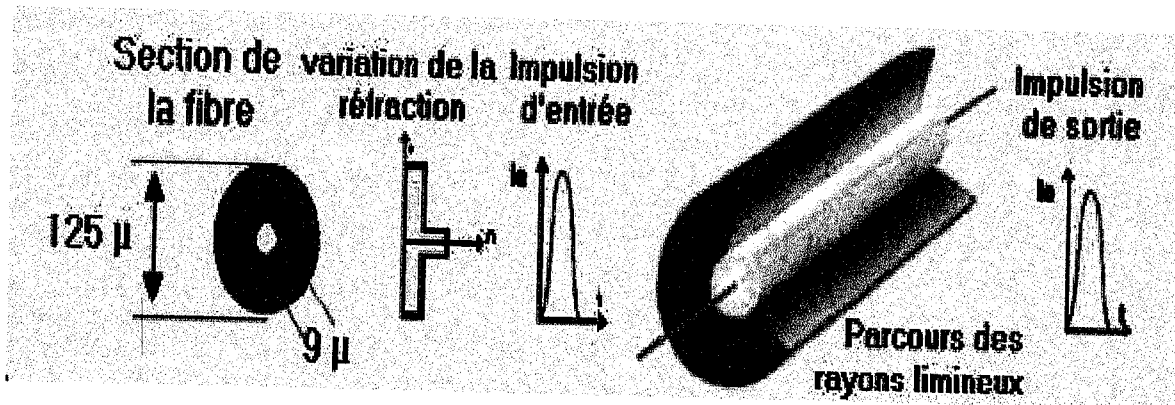


Figure I-11 : Les fibres monomodes [17]

3-3-3 L'ouverture numérique (Numerical Aperture) O.N : [18]

Que la fibre soit monomode ou multimode, un rayon lumineux est d'autant mieux guidé qu'il parvient sous une incidence presque normale à la face d'entrée de la fibre. Il existe un angle limite qui détermine le cône d'entrée au-delà duquel le rayon n'est plus accepté et guidé par la fibre. Cet angle définit l'ouverture numérique (O.N) de la fibre.

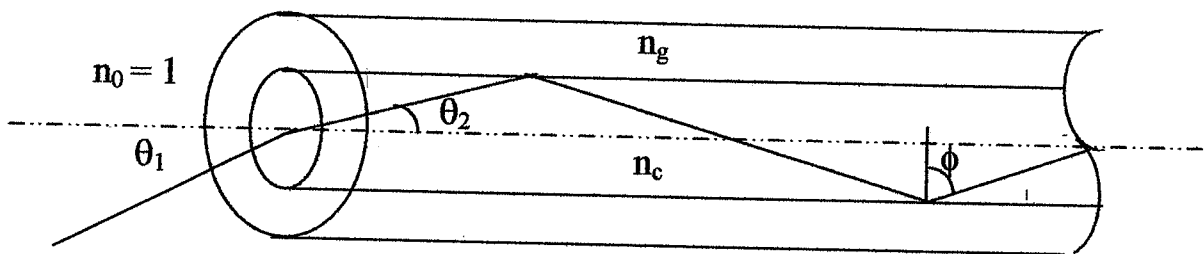


Figure I-12 : L'ouverture numérique : Angle limite d'incidence d'un rayon propagatif.

Pour les fibres à saut d'indice, on le calcule grâce à la loi de Descartes :

$$n_0 \sin \theta_1 = n_c \sin \theta_2 = n_c \cos \phi = n_c \sqrt{1 - \sin^2 \phi} \quad (I.3)$$

ϕ devant être supérieur à l'angle limite défini par : $\sin \phi_{\text{lim}} = \frac{n_g}{n_c}$

	ϕ_c (μm)	ϕ_g (μm)	O.N.	Δn	α (dB/km)	β (GHz.km)
Multimode Saut d'indice	100	140	0,3	2.10^{-2}	5 à 10 (à 850 nm)	0,02
Multimode Gradient d'indice	50	125	0,2	10^{-2}	2,5(à850nm) 0,6(à1300nm)	1
Multimode Gradient d'indice	62,5	125	0,3	2.10^{-2}	1 (à 1300nm)	0,4
Monomode	9	125	0,1	$2,5.10^{-2}$	0,5(à1300nm) 0,25(à1550nm)	100*

*Limitée par la dispersion chromatique

Tableau I-1 : Facteurs variables entre les différents types de fibres optiques

On obtient ainsi l'ouverture numérique :

$$O.N. = n_c \sin \theta_1 = n_1 \left[1 - \left(\frac{n_g}{n_c} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} = \sqrt{n_c^2 - n_g^2} = \sqrt{2 \Pi \Delta n} \quad (I.4)$$

Avec $n = (n_c + n_g) / 2$ l'indice moyen. Et $\Delta n = n_c - n_g$ l'écart d'indice.

En pratique, on ne trouve pas exactement ce résultat car il faudrait tenir compte des irrégularités possibles de la face d'entrée, des phénomènes de diffraction, etc. La fréquence normalisée V définie précédemment vaut donc $(2 \Pi a / \lambda)$. Elle est proportionnelle à l'ouverture numérique. Cette dernière dépend uniquement de l'écart d'indice, c'est-à-dire de la technologie utilisée lors de la fabrication (dopants,...). L'écart d'indice vaut typiquement quelques millièmes, aussi bien pour les fibres multimodes que monomodes. Pour ces dernières le cœur est très petit ($\sim 6 \mu\text{m}$), l'ouverture numérique l'est donc également (l'angle au sommet du cône vaut quelques degrés).

A l'intérieur du cœur de la fibre, les rayons se propagent sous différents angles et seuls les rayons ayant un angle d'incidence θ_i supérieur à θ_{IL} sont totalement réfléchis. La relation qui

existe entre θ_r sur l'interface cœur - gaine et l'angle d'incidence sous lequel les rayons pénètrent dans le cœur. L'angle θ_A est l'angle maximal par rapport à l'axe, pour lequel tous les rayons sont réfléchis. D'après la loi de la réflexion :

$$\sin(\theta_{1L}) = \frac{n_2}{n_1} \quad (I.5)$$

A l'entrée de la fibre, la loi de DESCARTE s'écrit :

$$n_0 \sin(\theta_A) = n_1 \sin\left(\frac{\pi}{2} \theta_{1L}\right) \quad (I.6)$$

avec n_0 indice du milieu extérieur, donc :

$$n_0 \sin(\theta_A) = n_1 \sqrt{1 - \sin^2(\theta_{1L})} = n_1 \sqrt{1 - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2} \quad (I.7)$$

D'où on a :

$$n_0 \sin(\theta_A) = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (II.8)$$

On appelle par *ouverture numérique* (O.N) l'expression suivante :

$$O.N = n_0 \sin(\theta_A) = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (I.9)$$

3-3-4 Le profil d'indice [8]

L'indice de réfraction du milieu caractérise la propagation de la lumière dans le guide d'onde. En réalité, c'est l'allure de l'indice de cœur n_1 par rapport à celui de la gaine n_2 qui joue un rôle important. On distingue deux familles de profil, celle à saut d'indice et celle à gradient d'indice.

Le profil d'indice est de la forme :

$$[n(r)]^2 = \begin{cases} n_1^2 \left(1 - 2\Delta \left(\frac{r}{a}\right)^l\right) & \text{si } r \leq a \\ n_1^2 (1 - 2\Delta) & \text{si } r \geq a \end{cases} \quad (I.10)$$

l : paramètre définissant le profil d'indice (Par exemple si $l = 2$ alors le profil est parabolique).

$\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$ Représente la diminution relative de l'indice.

En pratique les variations de l'indice ne dépassent pas 1%. Ceci permet d'assurer une grande bande passante et une faible atténuation [8].

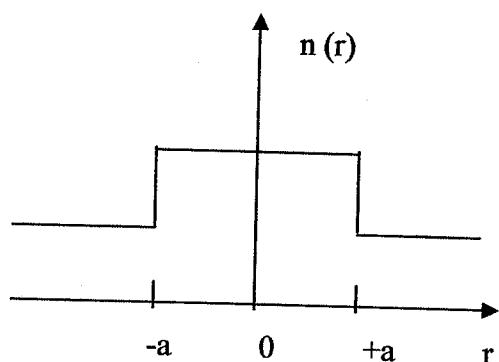


Figure I-13 : Profil d'indice en saut d'indice.

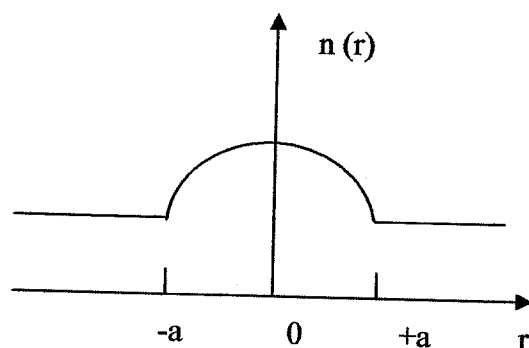


Figure I-14 : Profil d'indice en gradient d'indice.

Dans une fibre optique à gradient d'indice, la lumière a une trajectoire qui s'incurve de plus en plus au fur et à mesure qu'elle se rapproche de la gaine. Et comme profil d'indice particulier, on a celui d'une fibre monomode.

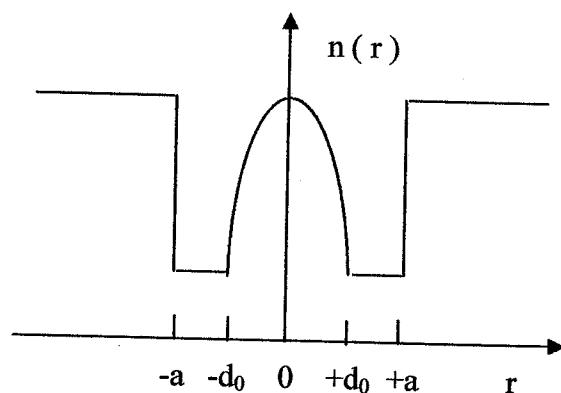


Figure I-15 : Profil d'indice d'une fibre monomode.

L'avantage d'une fibre optique monomode par rapport à une multimode est un meilleur guidage du mode principal et une diminution des pertes dues à l'absence de couplage de modes entre eux. Il faut une distance d'environ 400 mètres pour que la répartition des modes dans la fibre optique se stabilise.

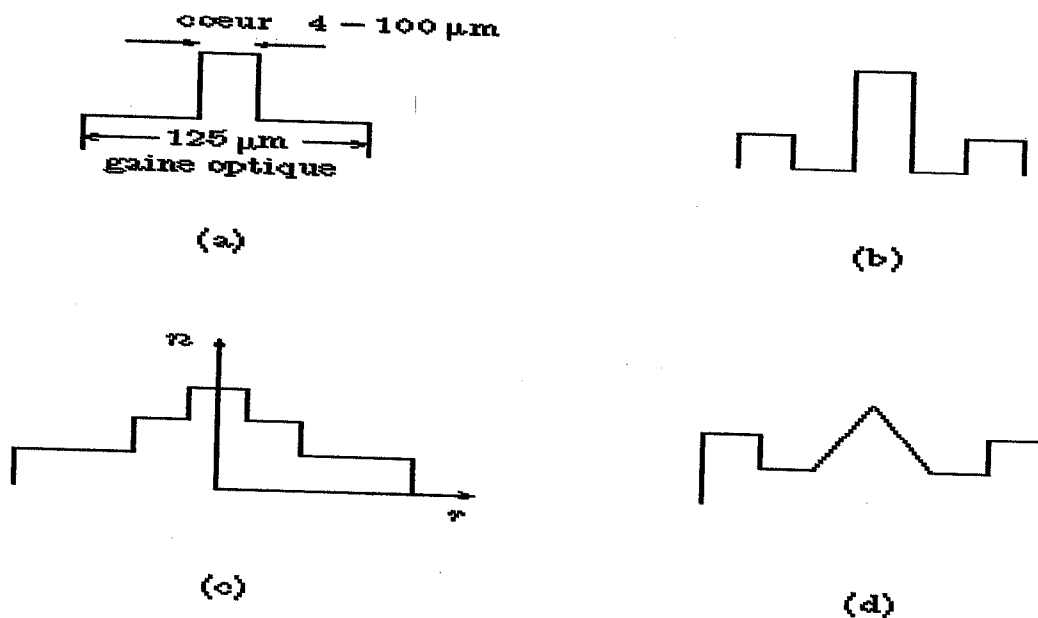


Figure I-16 : Profils d'indice : (a) Fibre à saut d'indice; (b) fibre W ou à gaine semi-enterrée; (c) fibre à gaine interne surélevée; (d) fibre à cœur triangulaire et gaine semi-enterrée.

3-3-5 L'atténuation [8]

Il existe dans une fibre optique de nombreuses causes conduisant à l'affaiblissement d'un signal lors de sa propagation. On doit distinguer les causes fondamentales inhérentes à la matière des matériaux entrant dans la composition du guide et les causes secondaires produites par les imperfections de la technologie de fabrication qui sont par nature réductibles ; les progrès réalisés ces quinze dernières années en sont la preuve (C.Meunier, 1988). Analysons en détail les différentes causes d'atténuation irréductibles :

-La diffusion de Rayleigh est produite par les non-uniformités à l'échelle microscopique de la densité de la matière et donc de l'indice de réfraction des verres constituant la fibre. La loi bien connue qui régit cet effet est en inverse de la quatrième puissance de la longueur d'onde de la lumière. Dans les fibres récentes, cet effet représente dans fenêtres de transmission, environ 90% de l'atténuation totale ;

-L'absorption ultraviolette due aux transitions électroniques de la matière est quasiment négligeable dans le domaine du visible, c'est en fait la queue de la bande d'absorption située avant $0,2 \mu\text{m}$ qui y subsiste. Cet effet est principalement produit par le dopant GeO_2 (dont la bande de transition électronique est centrée à 185 nm), il est proportionnel au pourcentage molaire de ce dernier ;

-L'absorption infrarouge est due aux modes de vibration du réseau et plus précisément aux harmoniques de ces modes dont la queue des bandes s'étale jusqu'à $1,6 \mu\text{m}$ dans le cas de la silice pure.

La silice des fibres optiques étant dopée, certains atomes comme le bore ou le phosphore créent de nouveaux modes de vibration dont les harmoniques contribuent à la création d'une atténuation supplémentaire jusque vers $1,5 \mu\text{m}$.

La figure (I.15) illustre les influences de ces trois composantes de l'atténuation fondamentales des fibres optiques en silice contenant 8% molaire de GeO_2 . Notons que cette illustration est tout-à-fait typique et représente bien l'allure caractéristique de l'atténuation des fibres optiques en silice.

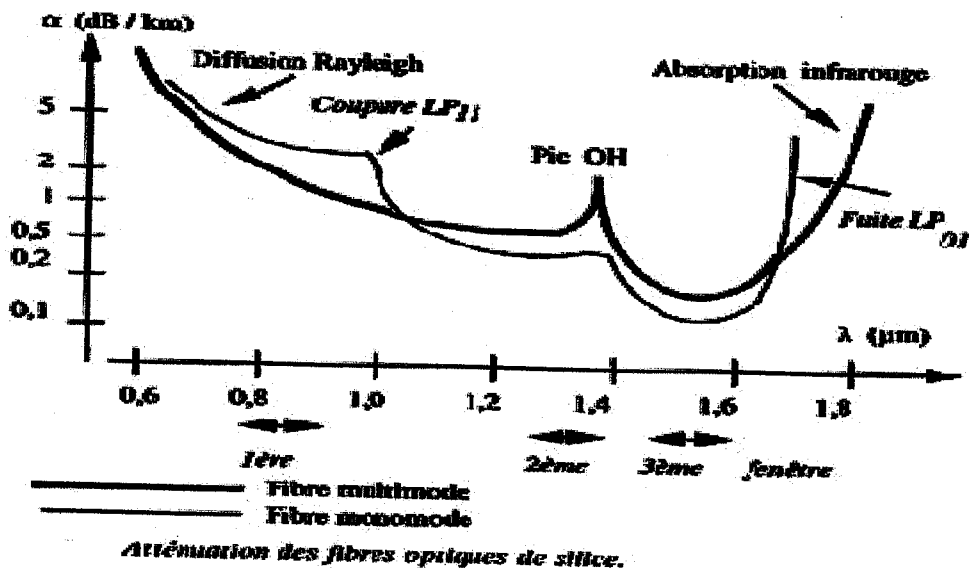


Figure I-17 : L'atténuation des fibres optiques de Silice [Ad]

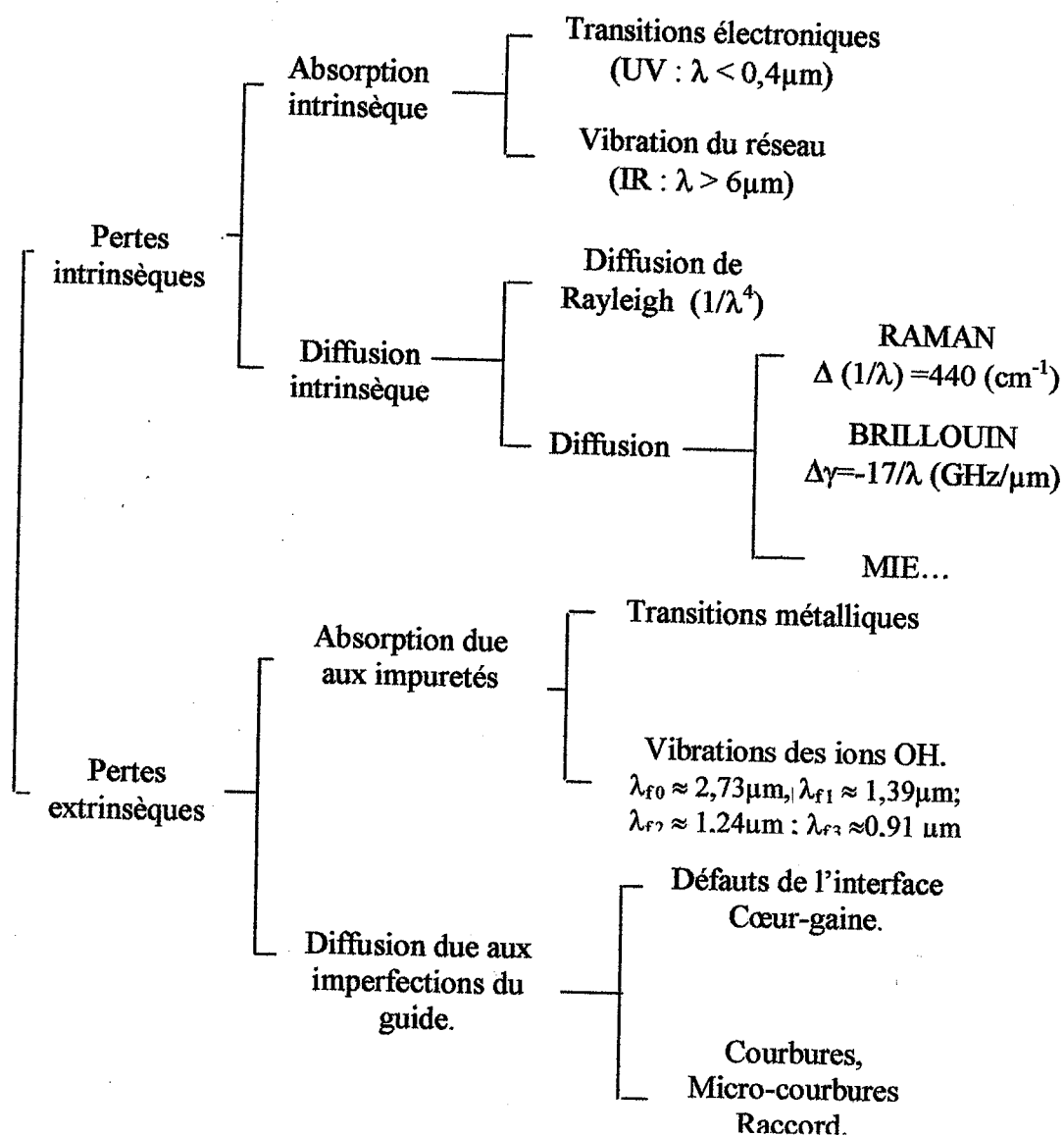
Abordons maintenant les mécanismes à l'origine de l'atténuation réductible des fibres optiques. Ceux-ci ont deux provenances bien distinctes : L'absorption produite par les impuretés chimiques difficiles à éliminer, ainsi que celles créées par les micro-courbures dues à des imperfections microscopiques de la géométrie du guide (défaut de la symétrie, fluctuation du rayon du cœur ou de l'interface cœur-gaine...) produits lors du processus de fabrication. L'absorption engendrée par les impuretés est de deux ordres :

- la présence d'ions métalliques de transitions dont l'influence devient prépondérante en terme d'atténuation, même pour des concentrations de l'ordre de 10^{-6} . cette source d'atténuation est maintenant bien maîtrisée grâce aux procédés de fabrication modernes (synthèses chimiques en phase vapeur) qui contiennent les ions métalliques dans des concentrations n'excédant pas quelques 10^{-9} , [8]

- la présence d'ions hydroxyles (OH^-) constitue à l'heure actuelle la principale source d'atténuation réductible (et par conséquent, d'efforts de la part des fabricants pour les éliminer). Ce type d'ion est à l'origine, de part leur vibration fondamentale à $2,73 \mu\text{m}$, des

pics à 1,25 μm et 1,39 μm (harmoniques + battement avec les vibrations du réseau de la silice).

Dans la pratique, toutes ces atténuations se combinent et produisent des pertes sur l'énergie transportée par l'onde guidée. Il est donc important de quantifier cet effet de façon simple afin de pouvoir qualifier et comparer les différentes fibres optiques. Initialement les fibres optiques avaient pour seule vocation les télécommunications. Les sources utilisées possédant une largeur spectrale relativement faible, l'atténuation globale des fibres optiques pouvait être considérée comme constante sur la bande spectrale utilisée [8].



C'est pourquoi, on qualifie communément « l'atténuation d'une fibre » grâce à un nombre définissant la perte par unité d'une fonction de la longueur d'onde ; il va de soi que l'indication ainsi fournie n'est valable que pour une longueur d'onde particulière.

On définit généralement le paramètre α (dB/Km) comme étant l'atténuation en puissance est donc 2α . La loi de Beer-Lambert reliant la puissance incidente $P(0)$ à la puissance de sortie $p(L)$ après un parcours guidé de longueur L s'écrit :

$$P(L) = P(0) \exp(-2\alpha L) \quad (I.11)$$

L'atténuation est définie comme dix fois le logarithme décimal du rapport des puissances :

$$a = 10 \log_{10} (P(L) / P(0)) \quad (I.12)$$

Ainsi, on remplaçant $P(L)$ par son expression, nous obtenons :

$$a = 10 \log_{10} (\exp(2\alpha L)) = 10(2\alpha L) \log_{10}(e) \Rightarrow a/L = 4,34(2\alpha) = \alpha_T \quad (I.13)$$

Cette équation relie 2α et α_T l'atténuation en puissance dont l'unité est le dB/km. Celle-ci est bien entendue la somme des différents termes de diffusion :

$$\alpha_T = \alpha_{\text{diffusion}} + \alpha_{\text{absorption}} = \alpha_{\text{courbures}} \quad (I.14)$$

Trois méthodes sont généralement utilisées pour mesurer cette atténuation : [13]

- La méthode dite de « cutback », la plus précise mais destructive (une fois la puissance mesurée en sortie, la fibre est coupée proche de l'entrée sans modifier les conditions d'injection, puis la mesure est réitérée) ;
- La méthode de substitution non destructive mais moins précise (on compare l'atténuation d'un échantillon de fibre de référence à la fibre à tester : les conditions d'injections peuvent être légèrement différentes) ;
- La réflectométrie non destructive, utilisée en laboratoire ou sur le terrain : l'énergie rétrodiffusée en fonction du temps fournit le profil de l'atténuation.

Notons que dans les fibres multimodes, l'atténuation varie légèrement d'un mode à un autre, aussi pour réaliser des mesures correctes, on doit équilibrer la distribution modale grâce à une fibre amorce en amont de la fibre à tester. Pour les applications telles que les télécommunications nécessitent des dizaines voire des centaines de kilomètres de fibres, il est primordial que l'atténuation soit la plus faible possible [14].

3-3-6 La dispersion [8]

Celle-ci produit, l'élargissement des impulsions lumineuses véhiculées par les fibres optiques, elle est composée de façon quadratique de la dispersion intermodale D_{mod} et la dispersion chromatique D_{chro} celle dernière étant due aux effets anbinés du matériau, du guide et du profil d'indice.

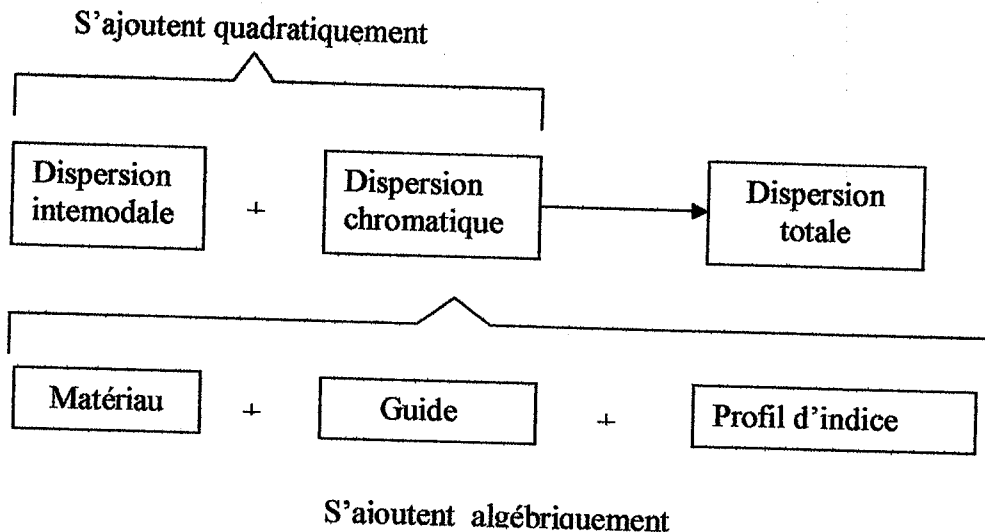


Figure I-18 : Les différentes contributions de la dispersion.

- a) La dispersion intermodale : (uniquement dans les fibres multimodales !)

Cette dispersion est due aux écarts entre les temps de propagation de groupe entre les différents rayons compris dans l'ouverture numérique : ces rayons effectuent des chemins optiques de longueurs différentes et contribuent à l'élargissement des impulsions. Pour la fibre multimodale où un grand nombre de modes se propage, les vitesses de groupe des modes sont différentes, alors l'impulsion propagée dans cette fibre s'élargit, comme le montre la figure suivante :

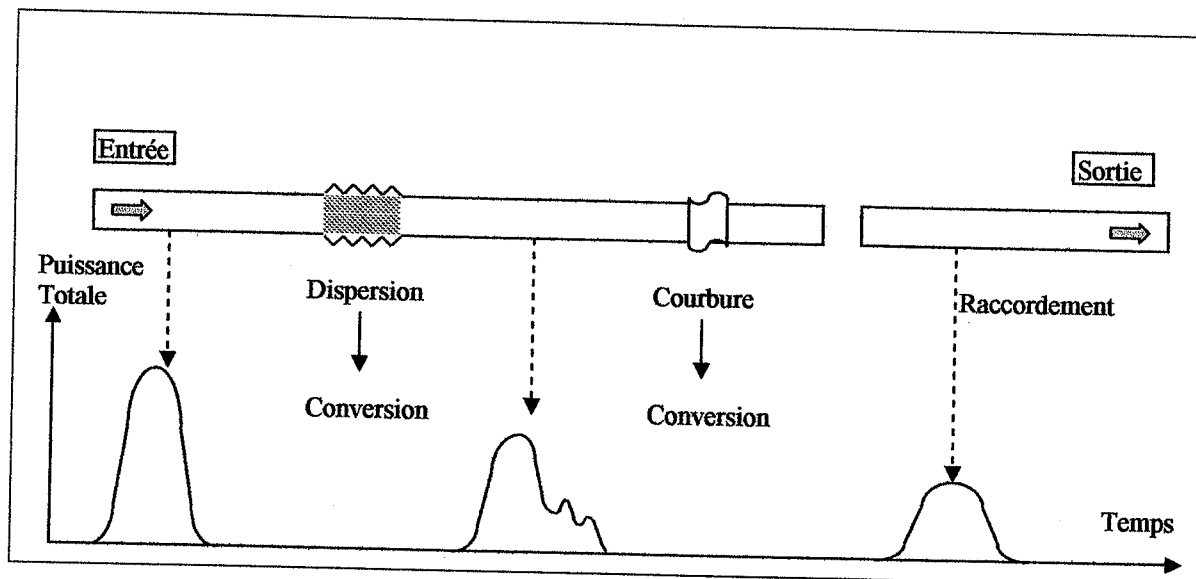


Figure I-19 : Dispersion due aux modes

b) La dispersion chromatique : (ou intramodale)

Cette dispersion est produite par les variations du temps de propagation de groupe en fonction de la longueur d'onde. Sa valeur est d'autant plus grande que la largeur spectrale de l'émetteur est importante (cas d'une DEL par exemple). Trois causes contribuent à cet effet, la dispersion matériau est la plus importante.

- La dispersion matériau, usuellement donnée en ps/(nm.km) est produite par la dépendance spectrale des indices de réfraction de la fibre associés aux différentes vitesses de propagation.

$$D_{\text{mat}} = \frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n}{d\lambda^2} \left[\text{ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1} \right] \quad (\text{I.15})$$

La dispersion est donc la dérivée seconde de l'indice de réfraction par rapport à la longueur d'onde ; elle représente la courbure de la fonction $n(\lambda)$. Une valeur typique pour cette dispersion est $80 \text{ ps} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ à 850 nm .

Par chance, la dispersion intrinsèque de la silice s'annule pour $\lambda = 1273 \text{ nm}$, longueur d'onde à laquelle le niveau d'atténuation est faible. C'est ce facteur qui a initialement orienté le choix de la seconde fenêtre des transmissions optiques vers $1,3 \mu\text{m}$.

- La dispersion du guide, plus faible que la précédente est produite par la dépendance spectrale des caractéristiques modales de la fibre. Dans les fibres multimodes cet effet est pratiquement éliminé par la présence de nombreux modes mais dans les fibres unimodales il peut être expliqué par le fait qu'une partie de l'énergie de l'onde se propage dans la gaine. Ainsi l'indice de réfraction effectif est une valeur intermédiaire entre celui du cœur et la gaine. Aux grandes longueurs d'ondes la taille du mode est augmentée, produisant une variation de cet indice effectif (même si les indices restent constants).

Ainsi :

$$n_{\text{eff}} = n_g + b(\lambda) (n_c - n_g) \quad (\text{I.16})$$

n_{eff} , n_g , et n_c les indices effectifs de la gaine et du cœur.

$$D_{\text{guide}} = \frac{\lambda}{c} (n_c - n_g) \frac{d^2 b}{d\lambda^2} \left[\text{ps} / \text{km} \cdot \text{nm} \right] \quad (\text{I.17})$$

- La dispersion du profil, est due à la dépendance spectrale des indices du cœur et de la gaine. Dans les fibres multimodes à gradient de hautes performances, ce paramètre est fondamental. Dans les fibres unimodales cette dispersion est généralement incluse dans la dispersion du guide.

La dispersion chromatique totale dans une fibre unimodales est la somme algébrique des termes précédents (dispersions matériau et guide). Il se trouve que ces deux termes sont de signes opposés pour les longueur d'onde au-delà de $1,3 \mu\text{m}$; il est alors possible en choisissant convenablement les paramètres opto-géométriques du guide de compenser la dispersion du matériau en augmentant volontairement celle liée au guide. La dispersion chromatique globale peut ainsi être pratiquement annulée pour toute longueur d'onde déterminée supérieure à $1,3 \mu\text{m}$. C'est ce qui est réalisé lorsque l'on désire faire coïncider ce point de dispersion nulle avec la longueur d'onde d'atténuation minimale des fibres ($1,55\mu\text{m}$). Il est également possible de minimiser la dispersion chromatique sur une plage spectrale permettant ainsi le multiplexage en longueur d'onde de plusieurs canaux de transmissions.

3-3-7 Les pertes par transmission

Les pertes par transmission des modes sont dues aux impuretés contenues dans la fibre optique, à l'absorption moléculaire, aux irrégularités de l'interface gaine – cœur, et les micro courbures structurelles de la fibre. Ces pertes dépendent du chemin suivi ou des réflexions, par exemple les modes supérieurs parcourent un chemin plus long et beaucoup de réflexions que les modes inférieures, donc ils ont plus de pertes.

Les pertes de transmission de la fibre ou entre la fibre et les systèmes sont dues à cinq causes essentiellement : [9]

a) *Pertes dues à l'absorption et à la diffusion :*

Les pertes par absorption sont causées par la présence de matériaux de transitions tel que le Fer (Fe), le Cuivre (Cu) (verre multicomposants) et à la présence d'eau. Pour que l'absorption acceptable, il faut empêcher toutes concentration supérieure à 10^{-9} et une concentration de radicaux OH supérieure à 10^{-6} . La diffusion provient essentiellement des fluctuations thermodynamiques de la densité (indice de réfraction). Ces fluctuations sont à une échelle plus petite par rapport à la longueur d'onde de fonctionnement. La diffusion de Rayleigh résultante est inversement proportionnelle à la quatrième puissance de la longueur d'onde (λ^4), de façon à ce que l'atténuation décroît rapidement aux grandes longueurs d'ondes.

b) *Pertes dues aux courbures et à la diffusion à l'interface cœur - gaine :*

La diffusion à l'interface peut être réduite en augmentant à la fois le rayon du cœur et le gradient d'indice dans celui ci pour réduire la quantité de lumière se répandant dans la

gaine. L'atténuation provoquée par une courbure dépend de la dimension du cœur et du rayon de la courbure. Le couplage de mode est proportionnel à la sixième puissance du rayon du cœur, de façon que la perte croisse rapidement avec la dimension du cœur. En plus la bande passante est inhérente au couplage de mode.

c) *Pertes dues aux raccordements :*

En couplant deux fibres, des pertes peuvent être provoquées lors de la transmission. Ces pertes sont dues aux mésalignements angulaires ou axiaux. Les rayons lumineux issus de la sortie de la fibre FI ne sont pas tous acceptés par la deuxième fibre FII. Les rayons transmis de FI à FII se propagent dans la seconde fibre sous différents angles, ceci engendre une conversion de modes de propagation. Les fibres avec de grands rayons sont plus avantageuses de point de vue raccordement. Pour les fibres monomodes possédant un faible rayon du cœur, toute irrégularité cœur / gaine provoque une perte de raccordement parce que les centres des cœurs des deux fibres ne coïncident pas, même si les surfaces extérieures sont alignées.

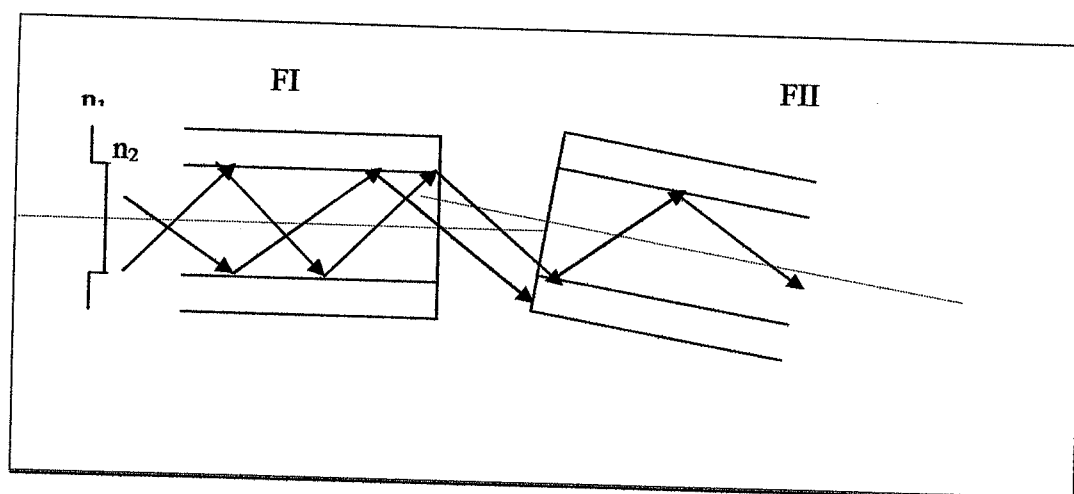


Figure I-20.a : Raccordement de fibres à saut d'indices

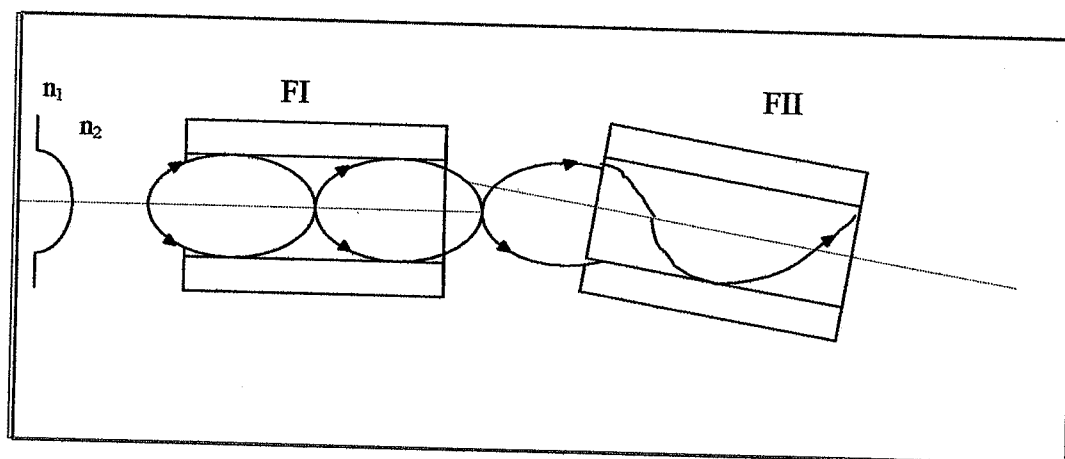


Figure I-20.b : Raccordement de fibres à gradient d'indices

d) *Pertes dues aux ouvertures numériques :*

Les pertes relatives à l'ouverture numérique (ON) peuvent être négligées lorsque l'ouverture numérique de la partie réceptrice (fibre ou récepteur) est supérieure à celle de la source (fibre ou récepteur) :

$$Pertes_{(ON)} = 20 \log \left(\frac{ON \text{ de la source}}{ON \text{ du récepteur}} \right) \quad (dB) \quad (I.18)$$

e) *Pertes de Fresnel :*

Ces pertes sont dues essentiellement au passage d'un milieu d'indice donné à un autre d'indice différent. Une partie du rayonnement est réfléchi et une autre est transmise ; cette dernière est définie par la transmittance T . Ces pertes ont pour valeur :

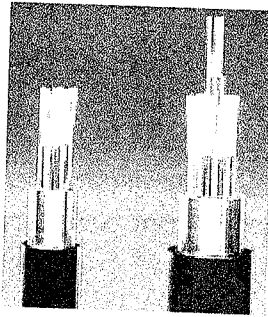
$$Pertes \text{ de Fresnel} = 10 \log \left(\frac{1}{T} \right) = 10 \log \left(\frac{2 + n_x + n_x}{4} \right) \quad (dB) \quad (I.19)$$

Si deux fibres sont séparées en regard par une lame d'air ($n_x=1$) et ($n_y=1.49$) (cœur de la fibre), les pertes de Fresnel sont de 0.17dB mais comme il y a passage fibre /air et air /fibre, alors la perte totale est de 0.34 dB. Pour diminuer ces pertes nous utilisons un produit de couplage à l'interface fibre / diode électroluminescente ou fibre /source d'infra rouge, l'indice de réfraction de ces sources est de 3.6 où une colle EPOXY peut réduire les pertes de 1dB environ. Si les dimensions de la diode sont inférieures à celles de la fibre, il est recommandable de l'équiper d'une lentille. Dans le cas contraire, il faut déplacer la lentille sur la fibre optique.

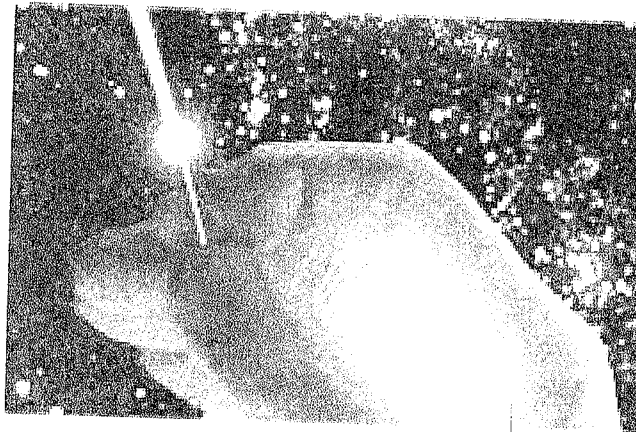
4- Quelques spécificités des fibres monomodes [14]

Les caractéristiques essentielles d'une fibre optique monomode pour la transmission d'un signal sont :

- L'affaiblissement (dB) par unité de longueur (Km), qui est fonction de la longueur d'onde, soit 0,36 dB/Km à 1300 nm et 0,2 dB/Km à 1550 nm
- La dispersion chromatique, qui conduit à un élargissement d'une impulsion lumineuse du fait de la variation des vitesses de propagation, ce qui est pénalisant dans le cas d'une modulation directe (1 ou 0) du signal optique,
- La dispersion des modes de polarisation (PMD), qui se caractérise par un étalement spectral en ligne,
- La longueur d'onde de coupure.



L'UIT-T a dans un premier temps normalisé la fibre monomode G-652 (fibre à dispersion non décalée) qui compte plus de 80 millions de Km de fibres installées dans le monde, puis la fibre monomode G-653 (fibre à dispersion décalée, notamment utilisée dans les câbles sous-marins).



Lucent Technologies, après avoir déjà conçu une fibre G-655 "TrueWave" garantissant l'homogénéité des performances de ce type de fibre dans la bande 1528-1565 nm, a réalisé une fibre optique "All Wave" capable de fonctionner sur une large étendue du spectre de lumière, à savoir : 1300 nm - 1400 nm - 1550 nm (fenêtre pour le WDM) - 1620 nm, en utilisant un nouveau procédé breveté de purification permettant d'éliminer les molécules d'eau résiduelles dans le cœur de la fibre, molécules d'eau qui rendaient inutilisables les fibres dans certaines zones du spectre optique. [14]

Le tableau suivant compare les distances maximales autorisées par les fibres G 652 et G 655 du fait de la dispersion induite pour différentes valeurs du débit de transmission :

Débit Type de fibre	2,5 Gb/s	10 Gb/s	40 Gb/s
Fibre standard (G 652)	1000 Km	60 Km	3 Km
True Wave (G 655)	6000 Km	400 km	25 Km

Tableau I-2 : Le débit de quelques fibres monomodes

Alcatel a établi en laboratoire un nouveau record du monde en transportant une capacité de 5 Tbit/s (125 canaux DWDM à 40 Gbit/s) sur une distance de 1 500 kilomètres de sa fibre optique TeraLight(TM) Ultra. Cette démonstration a été réalisée en utilisant des amplificateurs hybrides Erbium/Raman à deux étages, des systèmes DWDM 40 Gbit/s, la technologie FEC (Forward Error Correction ou code correcteur d'erreur) et la fibre optique TeraLight(TM) Ultra spécifiquement optimisée pour la transmission haut débit sur de très longues distances. La performance ainsi réalisée permet de transporter simultanément, sur une seule fibre optique, 80 millions d'appels téléphoniques ou plus de 500 000 connexions Internet ADSL. [14]

Des liaisons sans répéteur peuvent comporter jusqu'à 48 paires de fibres, l'ensemble acheminant plus de 15 Tb/s sur une distance de 200 Km. A l'opposé, il existe des fibres optiques en plastique, à bas coût et à faibles performances, utilisées en milieu local perturbé, par exemple, pour réaliser les circuits de commande-contrôle dans un avion ou dans un métro.

5- CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons fait une description des fibres optiques : Leurs aspects, leurs spécificités, leurs domaines d'applications ainsi que toutes leurs caractéristiques générales.

Chapitre II

Technologie et applications des fibres optiques

1- Introduction

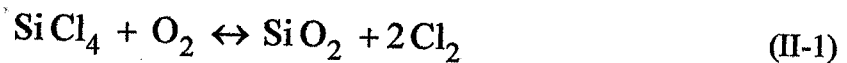
Dans le but de réaliser des câbles à fibres optiques exploitables, on doit préciser avec soin les procédés de fabrication des fibres optiques ainsi que tous les effets qui diminuent leurs performances.

2- Principe de fabrication des fibres optiques

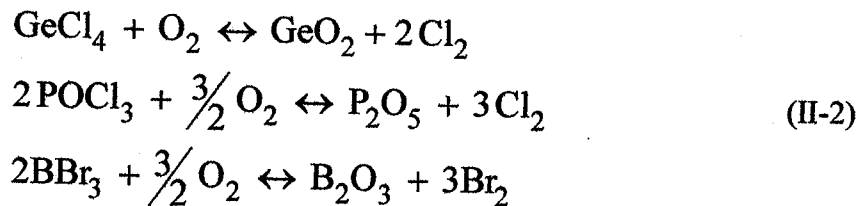
Les performances des fibres optiques dépendent en grande partie des procédés de fabrication et des matériaux utilisés, avec deux buts recherchés :

- L'élaboration de verres très purs,
- Le contrôle précis du profil d'indice dans les fibres optiques à gradient d'indice.

Les verres à forte teneur en silice utilisés pour la production de fibres optiques ont une viscosité qui rend difficile l'utilisation des méthodes verrières traditionnelles pour obtenir un très faible taux d'impuretés. On réalise alors la production de particules de verres SiO_2 par les réactions chimiques dont la base est: [18]



Il est possible de faire varier l'indice du matériau en mélangeant des dopants aux produits de base de la réaction chimique. Toute la difficulté réside dans le contrôle de l'indice lors de la fabrication pour obtenir un indice optimal, dont les réactions chimiques sont:



La première étape pour obtenir une fibre optique est la fabrication d'un barreau de verre appelé préforme qui est constitué d'un cœur et d'une gaine optique. Le diamètre des préformes peut varier de 1 à une dizaine de centimètres, suivant la technique utilisée; Leur longueur habituelle est d'un mètre. Cette préforme est ensuite étirée pour donner une fibre: C'est le fibrage [2].

La fabrication de la préforme permet de fixer certains paramètres:

- Les caractéristiques optoélectroniques de la fibre,
- l'uniformité du rapport cœur / gaine,
- la circularité de la fibre optique.

Par contre, l'uniformité du diamètre extérieur et la résistance mécanique de la fibre optique sont réalisées par l'opération de fibrage.

2-1 Fabrication des préformes

2-1-1 Matériau des fibres

Les fibres sont constituées d'une gaine optique de $B_2O_3 - P_2O_5 - SiO_2$ et d'un cœur de $GeO_2 - P_2O_5 - SiO_2$. Les dopants Germanium et le Phosphore sont utilisés pour augmenter l'indice de réfraction. Une diminution d'indice est obtenue par le bore et le fluor [18].

2-1-2 Méthode de MCVD

Les préformes sont fabriquées en deux étapes successives qui doivent obligatoirement être réalisées sans démontage et sans interruption pour éviter les chocs thermiques qui se traduisent par les discontinuités d'indice [18].

a) Dépôt

Un tube de Silice monté sur un tour de verrier est chauffé à haute température (1400° à 1600°) au moyen d'un chalumeau oxyhydrique qui se déplace parallèlement au tube et sur toute sa longueur disponible. A une extrémité du tube, on injecte un mélange gazeux constitué d'oxygène et d'halogénure. Ce mélange, au niveau de la zone chaude, réagit pour donner un mélange d'Oxydes finement divisés qui se dépose sur la paroi interne sous forme pulvérulente et légèrement en aval; ce dépôt est ensuite vitrifié au passage du chalumeau.

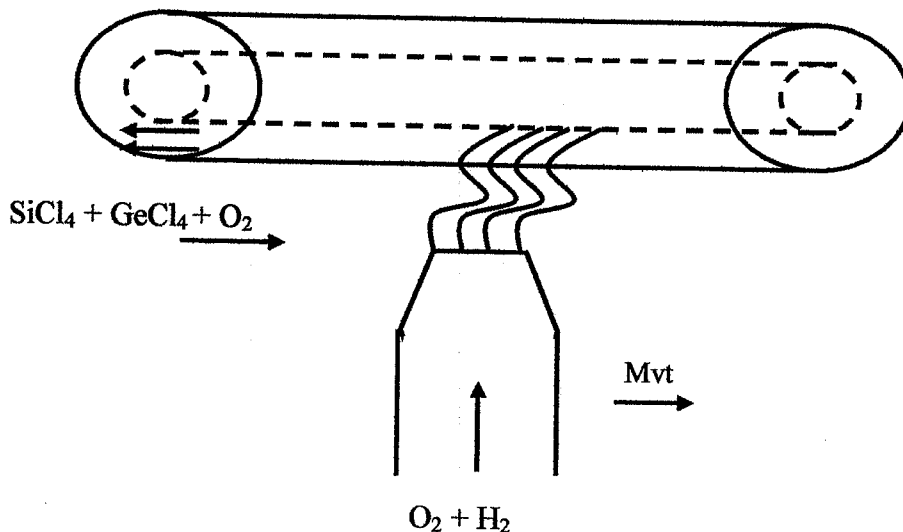


Figure II-1 : Dépôt par MCVD.

Les relations chimiques dépendent de la température et nécessitent un contrôle strict de celle-ci; mais une fois cette dernière fixée, il existe une limite d'épaisseur à la couche de départ de l'ordre de 10 à $20\mu m$. Il est alors nécessaire de déposer une multitude de couches en effectuant

un grand nombre de va et vient du chalumeau. On obtient ainsi des fibres à gradient d'indice multicouches.

b) Le collapsage

Une fois le dépôt terminé, l'injection du gaz est coupée et la température de chauffage est augmentée jusqu'à une valeur de 2000°C. A cette température, la silice se ramollit suffisamment pour que les forces, dues à la température superficielle, produisent un retreint homogène du tube. Le retreint est total après 3 à 5 passes de chalumeau, ce qui fournit une baguette de verre ou préforme prête au fibrage.

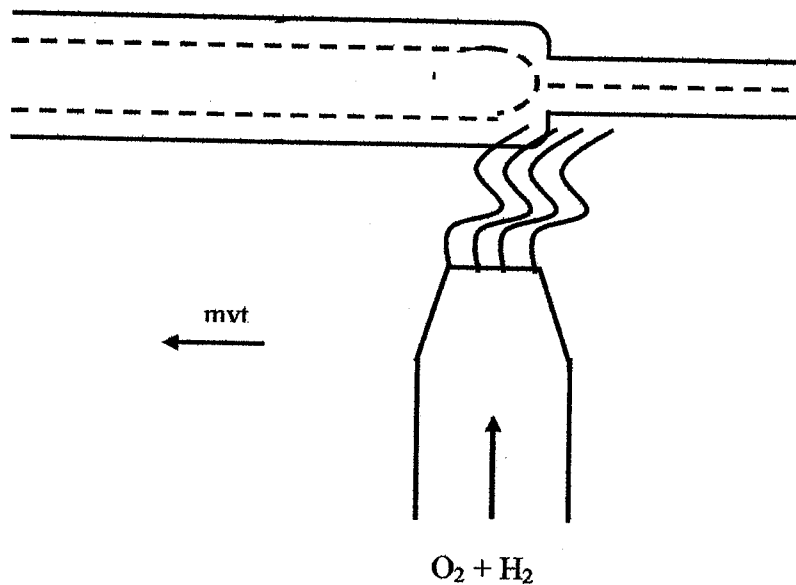


Figure II-2: Le principe du collapsage.

2-1-3 Méthode PMCVD

La méthode PMCVD (Plasma Modified Chemical Vapor Deposit) est identique au procédé MCVD mais on rajoute dans le tube de verre un plasma isotherme basse pression à l'intérieur de la cavité, excité par une bobine radiofréquence; la réaction est alors stimulée par la présence du plasma [18].

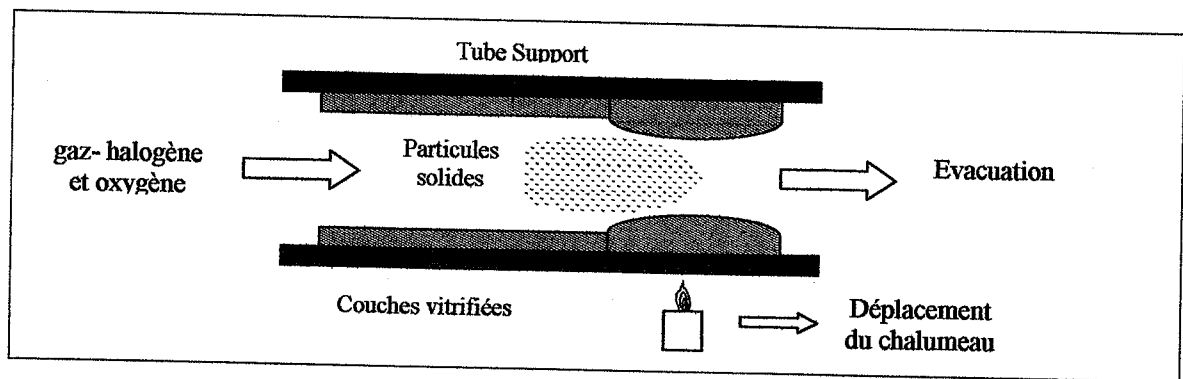


Figure II-3: Dépôt par PMCVD.

2-1-4 Méthode PCVD

La méthode de PCVD (Plasma Chemical Vapor Deposit) est identique au procédé PMCVD dans lequel on a remplacé la bobine radio fréquence d'excitation du plasma par un four à micro-ondes [48].

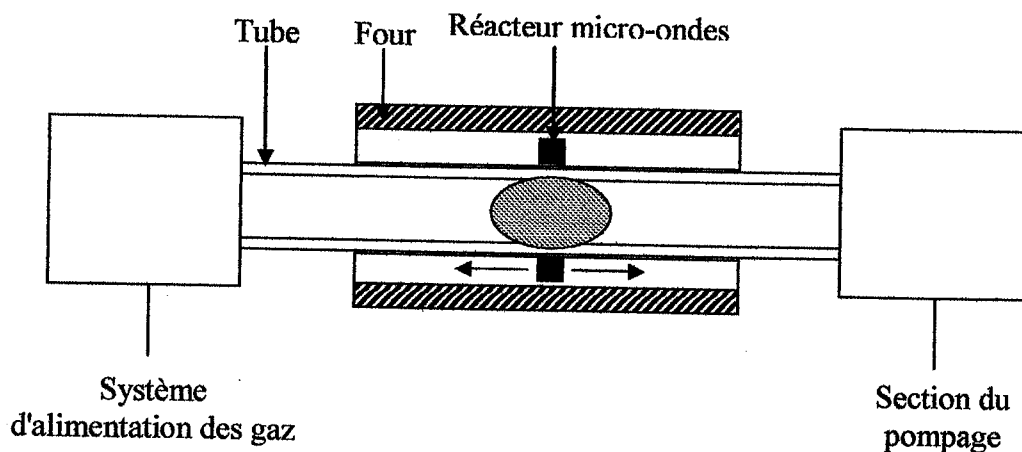


Figure II-4 : Dépôt par PCVD.

2-1-5 Méthode OVPD

Le procédé OVPD (Outside Vapor Phase Deposit) consiste à déposer la Silice dopée sur un mandrin d'alumine; le gradient d'indice est obtenu en modifiant la constitution du mélange gazeux. Après avoir vitrifié le dépôt, on enlève le mandrin central et on retreint le tube pour obtenir la préforme.

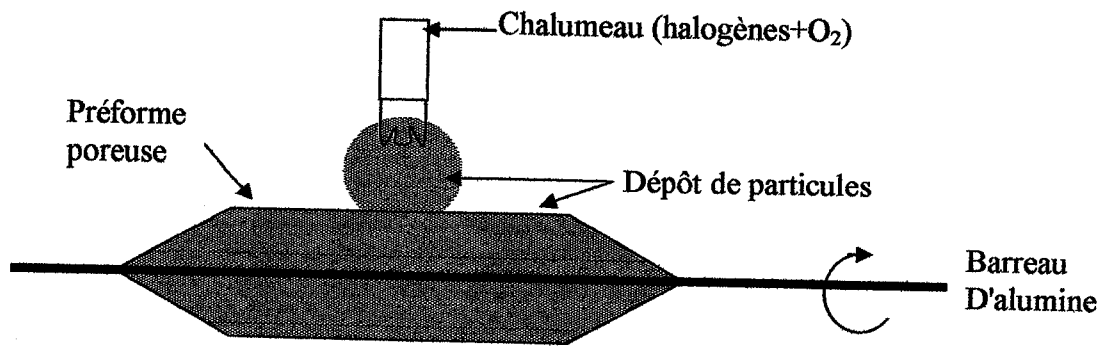


Figure II-5 : Dépôt par OVPD.

Zidani chafika

Etude du Transport

D-energie solaire par Fibres

11/531-6-40/92

أعيد يوم

رقم القارئ

سلف يوم

et la croissance axiale de la préforme;
s concentrations. Le barreau est alors
réforme vitreuse homogène [21].

ge support

Four de
consolidation

Préforme poreuse

une préforme par
D

2-1-7 Procédé ALPD

Le procédé ALPD (Axial Latéral Plasma Deposition) a été mis au point par Saint Gobain et s'effectue en deux étapes: [21]

-Fabrication d'une préforme de cœur dans sur torche à plasma qui peut être à gradient ou à saut d'indice.

-Dépôt de la gaine autour de la préforme du cœur.

Il n'y a alors aucune opération de retreint nécessaire.

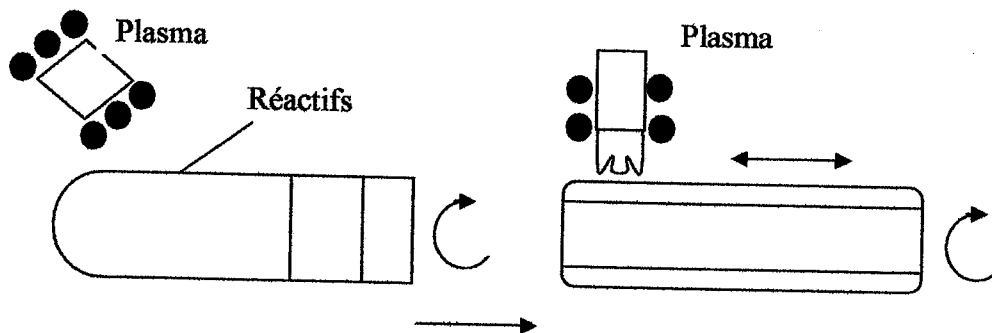


Figure II-7-a : Fabrication d'une préforme de cœur par ALPD.

Figure II-7-b : Fabrication de la gaine sur la préforme du cœur

2-1-8 Comparaison des méthodes

La méthode MCVD permet la réalisation de tous les profils ; la technique VAD permet d'éviter le trou central et les techniques ALPD, OVPD et VAD permettent d'obtenir des préformes sans utilisation de tube de Silice de départ [18].

Procédé	MCVD	VAD	ALPD
Vitesse de dépôt (g / mm)	0,4 → 2,3	0,4 → 4,5	3 → 10
Quantité de fibre Par préforme (km)	8 → 40	13 → 40	100 → 250

Tableau II-1 : Comparaison des méthodes

Ces procédés permettent d'obtenir, en fabrication industrielle :

- Une bonne reproductibilité générale.
- Une atténuation très faible : < 3 dB/Km à 820 nm>
< 1 dB/Km à 1300 nm>
- Des bandes passantes élevées : jusqu'à 800 MHz à 820 nm
jusqu'à 15 GHz à 1300 nm
- Des résistances mécaniques élevées : jusqu'à 4 Gpa

2-1-9 Le matériel

Les systèmes permettant d'obtenir ces préformes sont constitués par trois éléments essentiels :

- Un tour de verre,
- Un système de distribution de gaz,
- Un système de contrôle.

a) Le tour verrier

C'est un tour classique horizontal constitué d'un chariot mobile se déplaçant horizontalement et équipé d'un capteur de température (pyromètre optique). Le point critique est la stabilité de la vitesse de translation qui assure une bonne homogénéisation du dépôt.

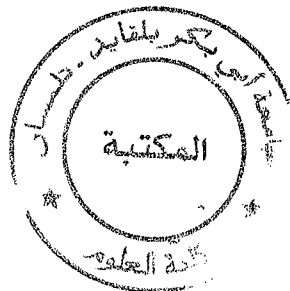
b) Le système de distribution des gaz

Il est constitué de vannes électriques et de débitmètres de façon à fournir et à contrôler tous les gaz utilisés. Le point critique est la régulation du débit des gaz.

c) Le système de contrôle

C'est généralement un système informatique qui gère et contrôle les différents paramètres importants

- La vitesse de translation du chalumeau,
- La température externe du tube en Silice,
- Le débit d'Oxygène,
- Les débits des différents halogénures,
- L'ouverture ou la fermeture des vannes,
- Les alarmes.



2-1-10 Le fibrage

La fibre optique est obtenue par étirement de la préforme à haute température. Cette opération qui doit conserver des qualités de la préforme est immédiatement suivie de l'opération d'induction qui entoure la fibre optique d'une gaine protectrice [24].

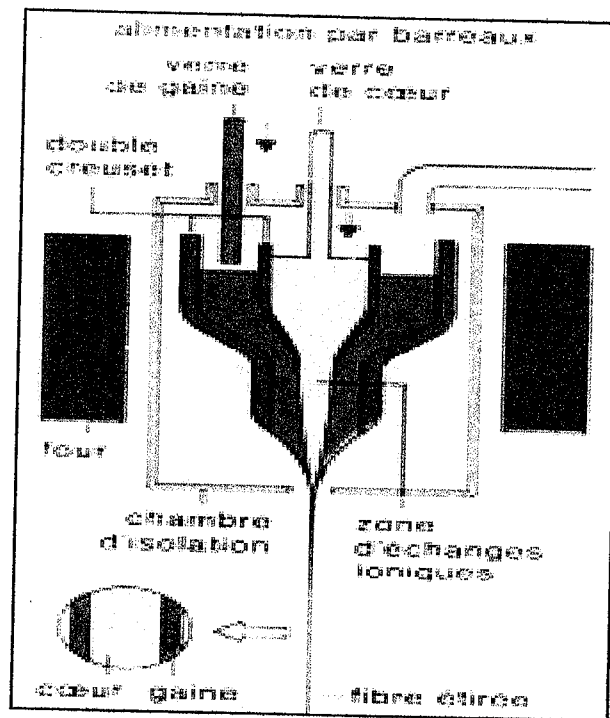


Figure II-8 : L'étirage des préformes [14]

L'étirage de la fibre optique est uniquement contrôlé par la vitesse du cabestan de tirage. La mesure permanente du diamètre de la fibre optique permet d'éviter des fluctuations lentes d'épaisseur dus aux inévitables fluctuations de températures en asservissant la vitesse du cabestan au diamètre de la fibre optique. La précision sur le diamètre de la fibre optique est alors typiquement de plus $\pm 0,1 \mu\text{m}$. Les produits utilisés dans l'inducteur sont essentiellement des silicones ou des résines époxyacrilates qui polymérisent à leur passage dans le four ; le rôle de cette couche est d'assurer une protection de la fibre optique et d'augmenter sa tenue mécanique.

Les principaux paramètres contrôlés dans un système de fibrage sont :

- La stabilité des supports,
- La régularité des vitesses de fibrage,
- La stabilité des températures,
- La régularité du diamètre de la fibre optique.

Le cœur est entouré d'une Silice de moindre qualité qui forme la gaine optique. On réalise un écart d'indice entre le cœur et la gaine en incorporant des dopants, tels que :

- Le Germanium et le Phosphore qui accroissent l'indice dans le cœur,
- Le Bore et le Fluor qui le font décroître dans la gaine.

Une préforme de verre d'une longueur de 1 m et d'un diamètre de 10 cm permet d'obtenir par étirement une fibre monomode d'une longueur d'environ 150 Km [14]. 14

2-2 Influence des matériaux en fabrication

2-2-1 Absorption due aux dopants

L'atténuation dans une fibre optique à base de silice dépend principalement :

- De la diffusion intrinsèque de Rayleigh,
- De l'absorption intrinsèque dans le matériau.

La diffusion de Rayleigh est due à des fluctuations de densité et varie en λ^{-4} , alors que l'absorption dans le matériau est due à :

- L'absorption ultraviolette intrinsèque,
- L'absorption infrarouge intrinsèque,
- L'absorption des impuretés telles que les métaux de transitions (que l'on utilise pour le dopage) est surtout les radicaux OH.

2-2-2 Influence des défauts structuraux

La présence de défauts structuraux est observée lors d'un nettoyage insuffisant du tube de silice (méthode CVD), le retour de suite, en l'absence de flammage et suivant la nature des dopants. La principale cause est la nature de l'interface matrice de préforme en silice / dépôt. A cette interface il se forme des bulles ou des défauts de surfaces qui augmentent la diffusion de Rayleigh et donc l'atténuation.

2-3 Contrôle de processus de fabrication

Des études ont montré que les paramètres optoélectroniques de la préforme, le dosage des halogénures utilisés et le profil d'indice sont particulièrement contrôlés.

2-3-1 Dosage des halogénures

Le dosage du Germanium, du Phosphore et du Silicium se fait par la méthode classique de la microsonde de Castaing, alors que le dosage du Bore et du Fluor se fait par contrôle ESCA (Electrons Spectroscopie For Chemical Analysis). Cette méthode consiste à soumettre l'échantillon attesté à une irradiation de photons (Rayons X mous par exemple) d'énergie connue et à faire une analyse à haute résolution des électrons issus de l'échantillon. L'analyse des spectres d'électrons ainsi obtenue en fonction de l'énergie montre des pics d'absorption d'énergie caractéristiques de tel ou tel corps ; de plus, l'intensité du pic est proportionnelle à la concentration en atomes de l'élément d'où proviennent ces électrons, ce qui donne l'aspect quantitatif [24].

2-3-2 Profil d'indice

D'une façon générale, le profil d'indice réel présente toujours un creux central dû à l'évaporation des dopants pendant l'opération de treint. Ce creux influe sur la propagation

de certains modes. Parmi les méthodes de mesure utilisées, deux sont basées sur la déviation des rayons lumineux par une préforme éclairée transversalement et présentent l'avantage d'être non destructive, et applicables quel que soit le procédé de fabrication, à l'exception de la méthode de focalisation qui nécessite un creux d'indice au centre pour faciliter les réglages. Dans tous les cas la préforme est plongée dans un liquide d'indice, elle est assimilée à une lentille cylindrique dont l'indice de réfraction varie dans la zone de cœur.

La méthode directe consiste à envoyer un rayon sur la préforme et analyser sa déviation à la sortie ϕ , celle-ci étant directement proportionnelle à la hauteur d'incidence et à l'indice.

La méthode par focalisation consiste à mesurer la distribution d'énergie dans le plan d'observation qui, dépend de la hauteur d'incidence du faisceau et de l'indice.

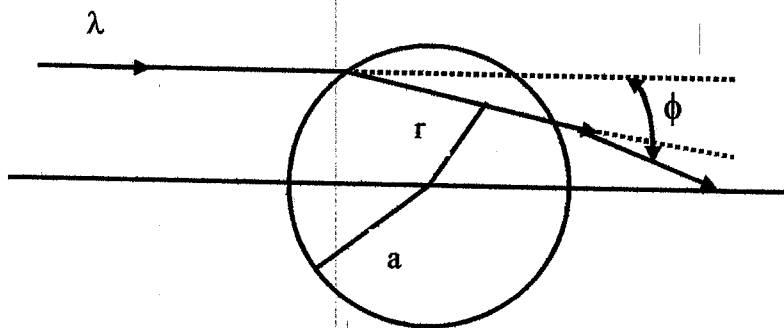


Figure II-9 : Déviation d'un faisceau par le cœur [A8].

3- Les câbles à fibres optiques

3-1 Introduction

Les fibres optiques sont ensuite placées dans des câbles qui en assurent le conditionnement (plus ou moins de fibres enrobées dans des tubes ou des rubans), la protection mécanique et chimique. La taille et le poids réduit des câbles à fibres optiques permettent des poses d'un seul tenant pouvant dépasser 4800 m contre seulement 300 m avec un câble coaxial en cuivre. Pour tenir compte des contraintes de déroulage sur les voies ferrées, les tourets de câbles optiques de Telcité sont limités à 2100 m [A4].

Les principales structures de câble à fibres optiques sont :

- Le câble à structure libre tubée (n fibres dans m tubes de protection libres en hélice autour d'un porteur central). La capacité type est de 2 à 432 fibres,
- Le câble à tube central (n fibres libres dans 1 tube central, la rigidité étant assurée par des mini-porteurs placés dans la gaine),

- Le câble ruban à tube central (n fibres les unes à côté des autres dans m rubans dans 1 tube central). La capacité type est de 12 fibres par 18 rubans, soit 216 fibres. L'avantage de ce type de câble est de pouvoir souder simultanément la totalité des fibres d'un même ruban.
- Le câble ruban à tubes libres (n fibres les unes à côté des autres dans m rubans dans p tubes libres en hélice autour d'un porteur central).

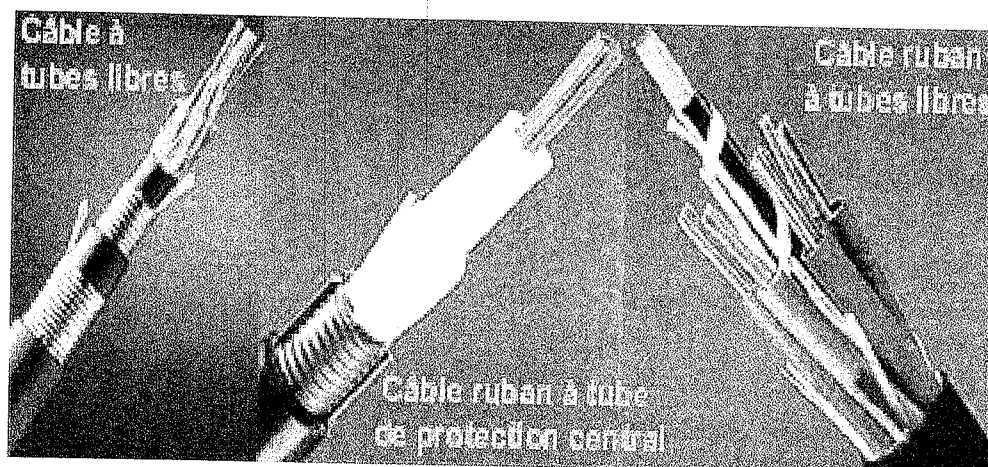


Figure II-10 : Différents types de câbles à fibres optiques [14]

- Le câble à jonc rainuré (n fibres dans m rubans dans p joncs). La capacité type est de $(8 \text{ à } 12) \times 10 \times 5 = 400 \text{ à } 600$ fibres.
- Le câble ruban à jonc rainuré,

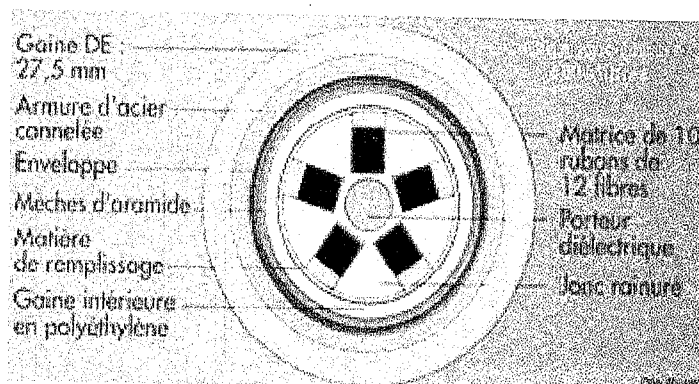


Figure II-11 : Câble à jonc rainuré à 600 fibres [14]

La réalisation des câbles doit tenir compte des contraintes physiques et chimiques ainsi que des conditions de sécurité de l'environnement où ils sont déployés. Ainsi, on trouve une grande variété de câbles spécifiques :

- Des câbles ignifuges, sans halogène (cas des câbles RATP et ceux de Telcité),

- Des câbles sans métal résistant aux rongeurs,
- Des câbles résistant aux termites,
- Des câbles pour l'industrie pétrochimique,
- Des câbles pour environnement hostile (vapeur, humidité, hydrogène, hydrocarbure),
- Des câbles sous-marins transocéaniques, (France Télécom a mis en service commercial, en août 1999, le câble optique "SEA-ME-WE 3" de 40 000 Km, le plus long au monde),
- Des câbles pour les égouts,
- Des câbles pour applications aériennes sur lignes à haute tension,

L'immunité de la fibre optique aux perturbations électromagnétiques et ses caractéristiques de transmission du signal en font le support idéal des transmissions haut débit, que ce soit pour les liaisons inter-bâtiments ou pour le raccordement des postes de travail ("fiber to the desk") [14].

Deux aspects doivent être considérés dans la conception des câbles à fibres optiques ; d'une part, les qualités mécaniques médiocres de la fibre, liées à son faible diamètre (quelques centaines de micron) et à sa grande longueur (de 1 à 3 km en un trançon) ; d'autre part, sa grande sensibilité aux contraintes engendrées par des rayons de courbures due à l'existence des microfractures qui se traduisent par des pertes de transmission pouvant atteindre plusieurs dB/km. On constate que ces pertes deviennent très sensibles pour des rayons de courbures inférieurs à 60 mm. L'application de contraintes sur la fibre optique induit des suppléments d'affaiblissements notables uniquement si ces contraintes produisent des déformations de l'axe de la fibre. La déformation est vue par l'onde lumineuse comme une variation d'indice longitudinal, provoquant soit du couplage de mode dans le cas de courbures ayant des périodes de l'ordre de grandeur du chemin optique, soit d'une évacuation des modes de rang élevé pour les courbures de rayons continus.

3-2 Propriétés mécaniques et vieillissement des fibres optiques

La fiabilité d'une liaison fibre optique dépend de sa tenue mécanique et de son vieillissement [15].

3-2-1 Résistances mécaniques

La résistance théorique d'un fil de silice de 125 μm de diamètre est de 25 daN mais les valeurs de résistances couramment obtenues (2 à 5 daN) s'expliquent par la présence de fissures superficielles agissant comme concentrateur de contraintes. Les techniques actuelles permettent d'obtenir des répartitions de défauts assez homogènes et tendent à limiter les défauts extrinsèques.

3-2-2 La fatigue

La fatigue statique du verre, causée par l'humidité ambiante, résulte de la croissance des fissures superficielles quand une charge est appliquée. Cette croissance dépend également de la température et elle s'accélère rapidement quand la température augmente.

3-3 Protection des fibres optiques avant câblage

La fibre optique est, dès l'opération de fibrage, entourée d'une couche protectrice généralement en silice ou en résine-époxy. Cette pré-gaine (« primary-coating ») d'une épaisseur de quelques microns permet de protéger la fibre optique des attaques extérieures (humidité, abrasion) et de minimiser le rôle des microfractures. On choisit le revêtement pour qu'il y ait un coefficient de dilatation thermique similaire à celui de la fibre optique afin de limiter les contraintes mécaniques dues aux dilatations différentielles. Cette première protection est généralement constituée de deux gaines serrées obtenues par extrusion autour de la fibre optique lors du fibrage ; le premier gainage est en silice sur lequel on extrude un hytrel [2].

F.O	GAINE (μm)	SILICONE (μm)	HYTREL (μm)
50 / 125	125	260	550
100 / 140	140	260	550
200 / 280	280	450	650

Tableau II-2 : protection primaire des différentes fibres

3-4 Matériaux utilisés dans les câbles

Dans le choix des matériaux, deux aspects sont à considérer, d'une part, assurer des qualités mécaniques satisfaisantes et exploitables industriellement et d'autre part, des propriétés d'étanchéité pour éviter la dégradation de la fibre optique et permettre son utilisation comme isolant électrique.

3-4-1 Renforcement mécanique des câbles

Les fibres optiques ne pouvant supporter de fortes contraintes d'allongement sans risque de rupture, on utilise des matériaux qui permettent de les renforcer, c'est-à-dire des matériaux à fort coefficient d'Young qui présentent d'inconvénient d'avoir une raideur importante. Les principaux matériaux utilisés sont l'acier, la fibre de verre, les fibres synthétiques, les fibres de Carbone et les fibres de Bore.

L'Acier est le matériau le plus utilisé, il présente un fort module d'Young (20000 daN/mm^2) ; il est très résistant et plus coûteux ; par contre, il est conducteur électrique et alourdit les câbles.

On utilise également des fibres synthétiques et organiques sous forme de tresse, toron ou mèche dont la plus employée est le Kevlar ; ces fibres sont, en plus, de bons isolants électriques.

Comme paramètre de comparaison, on définit la résistance à la rupture spécifique (R_{SP}) par sa relation :

$$R_{SP} = \frac{\text{Résistance à la rupture}}{\text{Masse volumique}}$$

Le tableau (II-3) permet de comparer les différents matériaux utilisés :

	Masse volumique	Résistance rupture 10^2 N/mm^2	Module d'Young 10^2 N/mm^2	Allongement rupture %	R_{SP}
Fil d'Acier	7,38	30	2000	2	3,38
Kevlar 29	1,44	27	620	4	18,7
Kevlar 49	1,45	27	1300	2	18,6
Fibre de carbone	1,95	20	4000	0,5	10,2
Fibre de verre	2,54	17	700	2,4	6,69

Tableau II-3 : Caractéristiques mécaniques des porteurs.

On constate que le Kevlar et l'Acier ont une résistance à la rupture équivalente mais un facteur 6 de différence pour le poids donne l'avantage au Kevlar [$R_{sp}(ke) = 5. R_{sp}(Acier)$]. Ce dernier présente l'inconvénient d'avoir de très mauvaises caractéristiques en compression, ce qui limite son utilisation [13].

3-4-2 Matériaux utilisés pour l'étanchéité

Un des facteurs de vieillissement de la fibre optique est l'humidité qui agrandit les fissures superficielles. C'est pourquoi on introduit dans les câbles une barrière d'étanchéité, la barrière la plus utilisée étant la barrière métallique.

Une des protections les plus utilisées est le ruban Alup constitué d'une bande d'Aluminium de quelques dixièmes de millimètres d'épaisseur contrecouchée d'un ou deux rubans de

polyéthylène. Ce ruban est appliqué par recouvrement en long pendant l'opération d'extrudage de la gaine extérieure en plastique. La chaleur et la pression du plastique extrudé sont suffisantes pour assurer la soudure des deux bords du ruban, ce qui assure l'étanchéité. Les efforts de tirage sont alors supportés par les enveloppes du câble et non plus par la fibre optique .

3-5 Structure des câbles optiques

Sur le principe de fabrication, il convient de discerner deux familles de câbles : celles à structures serrées et celles à structures lâches.

Dans les structures serrées, la fibre est noyée dans une matière plastique dont le comportement a une influence sur le milieu de transmission. Cette technologie est très développée pour les fibres plastiques où l'atténuation, hors câble, se comporte en centaines de dB / km [21].

Dans les structures libres, on distingue trois familles de câbles :

- Les câbles cylindriques rainurés.
- Les câbles classiques.
- Les câbles rubans.

3-6 Performances des câbles

3-6-1 Coefficient de remplissage des câbles

Exprimé en nombre de fibres par mm^2 , ce coefficient permet de connaître le dimensionnement des conduites du réseau et du matériel nécessaire pour la pose. A titre d'exemple, un câble classique de diamètre extérieur 18 mm contenant 12 fibres a un coefficient de remplissage de 0,07, alors qu'un câble en structure ruban serré de section 12 mm et comprenant 144 fibres a un coefficient de remplissage de 1,12.

3-6-2 Pertes ajoutées au câble

Un bon câble optique se caractérise par l'absence de pertes ajoutées au câblage. L'analyse précédente montre que seuls les câbles à structure libre sont capables de conserver l'atténuation moyenne des fibres optiques.

3-6-3 Comportement mécanique

Le comportement mécanique des câbles dépend de la nature de leur renfort et de leur mode d'application. Mais pour chaque câble et type de contrainte, il faut déterminer la zone de contraintes à effet réversible, la zone de contraintes à effet nul, la zone de contraintes à

effet réversible, la zone de contraintes à effet irréversible et, éventuellement, la zone de rupture.

Les principales contraintes mécaniques appliquées au câble, notamment, au moment de la pose, sont la traction, l'écrasement, le choc, la flexion alternée, la courbure, la torsion et les vibrations [18].

3-6-4 Comportement thermique

Le comportement thermique des câbles optiques dépend du procédé de câblage et du choix des matériaux. Le câblage thermique, appliqué à ces câbles, permet de révéler les contraintes néfastes, l'existence d'effets de relaxation ou de vieillissement.

3-7 Paramètres du câble optique

Les paramètres du câble se décomposent en paramètres de câble et en paramètres de fibre.

3-7-1 Paramètres du câble

- Structure : rainuré, serré,
- Diamètre extérieur,
- Longueur standard,
- Poids en kg / km,
- Gamme de température d'utilisation,
- Résistance à la traction,
- Résistance à l'écrasement,
- Rayon de courbure minimale,
- Concentricité,
- Tenue au feu,
- Utilisation : *vidéo ou numérique *intérieur, extérieur, enterré, aérien...,
- Nombre de fibres.

3-7-2 Paramètres de fibres

- Type : gradient d'indice, saut d'indice, monomode...,
- Diamètre de cœur,
- Diamètre de gaine,
- Erreur de concentricité,
- Non circularité du cœur,
- Ouverture numérique,

- Atténuation pour différentes longueurs d'ondes,
- Diamètre de revêtement primaire,
- Nature de revêtement primaire,
- Résistance à la traction,
- Longueur standard,
- Diamètre de revêtement secondaire,
- Nature de revêtement secondaire.

On trouve généralement un schéma de coupe du câble qui permet de connaître l'emplacement des différents constituants.

3-8 Pose des câbles à fibres optiques

La pose d'un câble à fibres optiques peut se faire par une équipe d'électriciens. Seulement la connectivité aux extrémités de ces câbles doit être montée et contrôlée par des spécialistes. Il y a deux cas à considérer, soit la pose de câbles enterrés, soit la pose à l'air libre.

3-8-1 Câbles enterrés

Les câbles souterrains doivent être protégés contre les avaries que pourraient leur occasionner le tassement des terres, le contact des corps durs ou le choc des outils mécaniques. Deux procédés sont utilisés : soit l'enterrement complet du câble en respectant les conditions de pose classiques de ce type de procédé (profondeur de pose, dispositif avertisseur...) mais qui ne nécessite pas de protection particulière ; soit la pose en fourreau auquel cas le diamètre intérieur du fourreau doit être largement supérieur au diamètre du câble.

Diamètre du câble : 1,5 pour un seul câble et 2,5 pour trois câbles.

3-8-2 Câbles à l'air libre

Seuls les câbles comportant une gaine adaptée peuvent être posés à l'air libre ou à l'intérieur ; les autres câbles doivent être protégés par les conduits appropriés. Chaque type de pose présente ses caractéristiques ; on trouve notamment :

- Pose le long des parois,
- Pose sur les chemins de câbles ou tablettes,
- Pose de caniveau.
- Dans le cas d'une pose aérienne sur un filin.

3-9 Constitution d'un câble à fibre optique

Un câble à fibre optique consiste en une âme, une gaine optique, un revêtement, une armature en fibres et une gaine extérieure [17].

Âme: le support physique qui transporte les signaux optiques d'une source lumineuse vers un équipement récepteur. Tous les câbles à fibre optique sont dimensionnés selon le diamètre de leur âme. Les diamètres suivants se rencontrent fréquemment: 50, 62,5 et 100 micromètres.

Gaine optique: une fine couche qui entoure l'âme en fibre et sert de barrière contenant les ondes lumineuses et provoquant la réfraction. Elle permet aux données de circuler sur toute la longueur du segment en fibre.

Revêtement: une couche de plastique qui entoure l'âme et la gaine optique pour renforcer l'âme de fibre. Elle aide à absorber le choc et offre une protection supplémentaire contre des courbures excessives.

Armature en fibres : permet de protéger l'âme contre les forces d'écrasement et des tensions excessives durant l'installation.

Gaine extérieure : la couche extérieure de tout câble. La plupart des câbles à fibres optiques possèdent une gaine orange, certains types ont aussi des gaines noires ou jaunes.

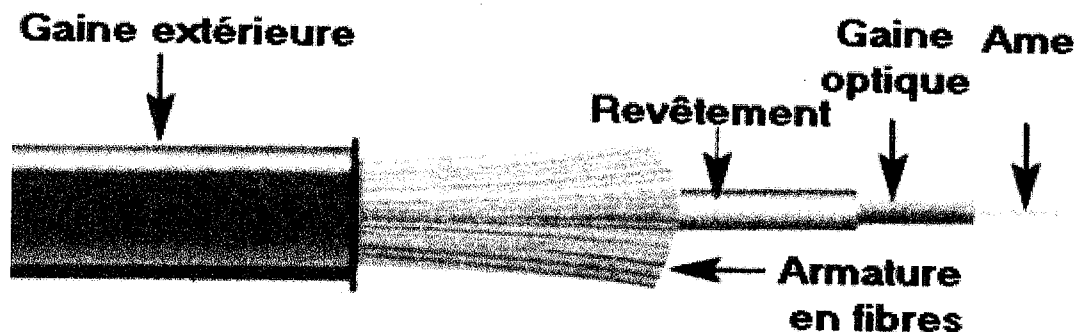


Figure II-12 : Câble à fibres optiques [17]

3-10 Raccordements des fibres optiques

3-10-1 Introduction

D'une façon générale, les fibres optiques en sortie de fabrication, ont des longueurs de 1,5 km à 2 km qui sont, très souvent, insuffisantes pour leur installation en site. On est donc amené à relier deux fibres optiques en minimisant les pertes au niveau de ce raccordement pour conserver une bonne dynamique de liaison.

On distingue deux familles de raccordements, ceux dits passifs qui sont indémontables (soudures, épissures) et ceux dits actifs qui sont, eux, démontables (connecteurs, épissures démontables).

Pour les pertes au niveau du raccordement, il faut discerner celles qui sont liées à la nature de la fibre (paramètres intrinsèques) et celles liées au raccordements proprement dit (paramètres extrinsèques).

3-10-2 Paramètres intrinsèques générant des pertes

Les tolérances de fabrication entraînent des variations sur les paramètres de la fibre qui induisent des pertes aux raccordements. Dans ce cadre-là, les paramètres concernés sont : [18]

- Le diamètre du cœur,
- L'ouverture numérique,
- Le profil d'indice.

Par convention, on appelle émettrice la fibre par laquelle arrive le rayonnement et réceptrice celle qui reçoit le rayonnement.

a) Pertes liées aux diamètres des cœurs

Considérons deux fibres, l'une émettrice, de diamètre de cœur a_e , les pertes à l'interfaces sont proportionnelles aux surfaces communes. Si $a_r > a_e$, il n'y a évidemment pas de pertes. Dans le cas contraire :

$$P_d = 10 \log \frac{\pi a_r^2 / 4}{\pi a_e^2 / 4} \quad (\text{II-6})$$

$$P_d = 20 \log \frac{a_r}{a_e} \quad a_e > a_r \quad (\text{II-7})$$

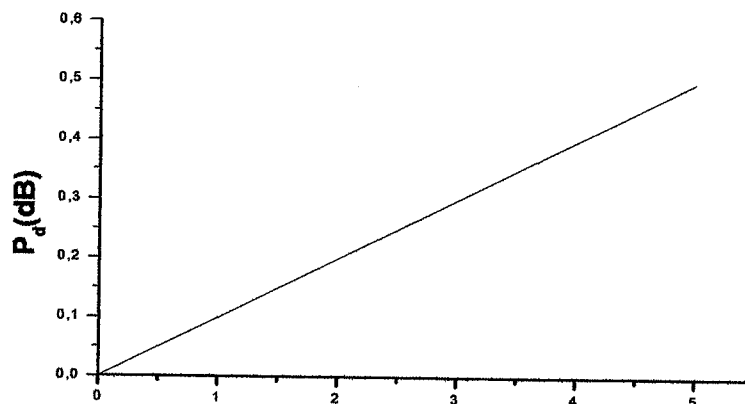


Figure II-13 : Pertes liées au défaut de diamètre

Les tolérances de fabrication donnent des précisions sur les diamètres inférieurs à 5% ce qui induit des pertes inférieures à 0,42 dB.

b) pertes liées à l'ouverture numérique

Soit ON_e l'ouverture numérique de l'émettrice et ON_r celle de la réceptrice, là encore, le seul cas induisant des pertes aux raccordements est celui où $ON_e > ON_r$. L'écart d'ouverture numérique est proportionnel à la surface du cœur :

$$P_{ON} = 20 \log \frac{ON_r}{ON_e} \quad ON_e > ON_r \quad (II-8)$$

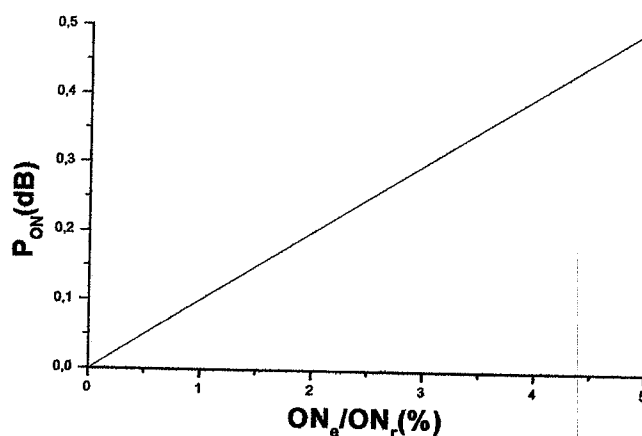


Figure II-14 : Pertes liées aux écarts d'ouverture numérique.

L'allure et l'amplitude des pertes sont similaires à celles des pertes dues aux écarts de diamètres.

c) Pertes liées à l'écart d'indice

Les pertes dues aux différences d'indice peuvent être ignorées quand le coefficient d'indice est plus grand du côté récepteur que du côté émetteur, autrement :

$$P_a = 10 \log \frac{1 + \frac{2}{a_r}}{1 + \frac{2}{a_e}} \quad a_e > a_r \quad (II-9)$$

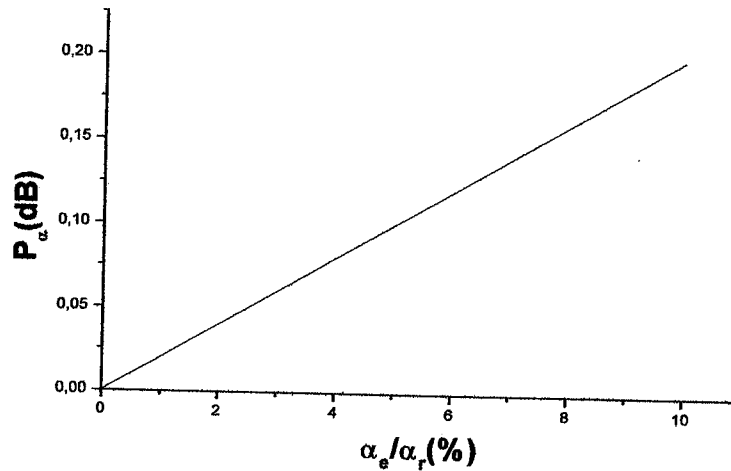


Figure II-15 : Pertes liées aux écarts de profil d'indice.

Dans les fibres à saut d'indice, le paramètre d'indice est de l'ordre de 100 et ces pertes peuvent être négligées.

3-10-3 Paramètres extrinsèques

Les paramètres extrinsèques définissent les facteurs de pertes liées au raccordement: [18]

- Les pertes de fresnel,
- L'écart radial,
- L'écart axial,
- L'écart angulaire,
- L'écart de non parallélisme des faces,
- L'écart de courbures des faces,
- L'écart de rugosité.

a) Les pertes de Fresnel

Le passage d'un milieu d'indice n_1 à un milieu d'indice n_2 se traduit toujours par une perte de flux liée à la réflexion d'une partie du flux sur la face d'interface.

D'après la loi de Fresnel :

$$P_t = 1 - \left[\frac{n_1 - n_0}{n_1 + n_0} \right]^2 \quad (\text{II-10})$$

Où P_t est le flux transmis. Soit :

$$P_t = \frac{4}{2 + \frac{n_0}{n_1} + \frac{n_1}{n_0}} \quad (\text{II-11})$$

Les pertes de fresnel s'écrivent :

$$P_F = 10 \log (P_t)$$

$$P_F = 10 \log \left[\frac{4}{2 + \frac{n_0}{n_1} + \frac{n_1}{n_0}} \right] \quad (\text{II-12})$$

Pour une valeur typique de $n_1 = 1,5$ pour la silice et $n_0 = 1$ pour l'air, les pertes de fresnel valent 0,177 dB. Pour minimiser ces pertes, on utilise un liquide d'indice tel que $n_0 \approx 1,5$; elles deviennent alors négligeables.

b) L'écart radial

Quand les cœurs de l'émettrice et de la réceptrice sont écartés de δ , par rapport à leur diamètre identique D , des pertes apparaissent liées au désalignement de l'axe qui sont proportionnelles aux écart de surface.

On peut montrer que le rapport des surfaces communes aux deux fibres est :

$$R = \frac{2}{\Pi} \left[\cos^{-1} \left(\frac{\delta}{D} \right) - \frac{\delta}{D} \left(1 - \left(\frac{\delta}{D} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (\text{II-13})$$

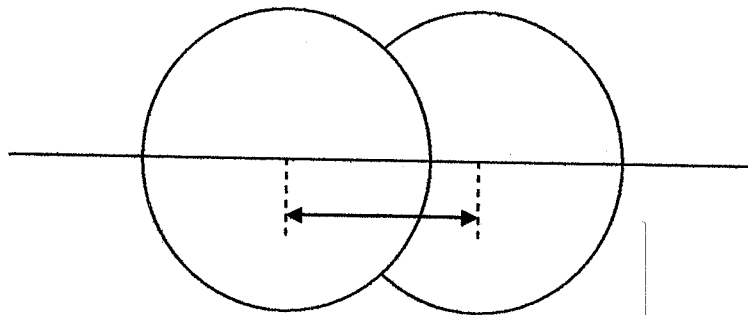


Figure II-16 : Principe de l'écart radial.

$$P_{ra} = 10 \log(R)$$

$$P_{ra} = 10 \log \left[\frac{2}{\Pi} \left[\cos^{-1} \left(\frac{\delta}{D} \right) - \frac{\delta}{D} \left(1 - \left(\frac{\delta}{D} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \right] \right] \quad (\text{II-14})$$

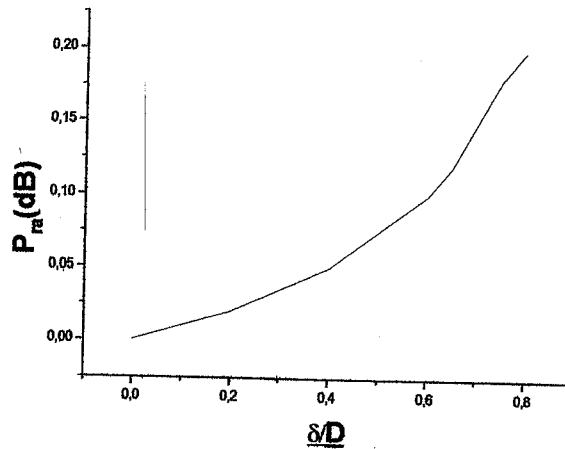


Figure II-17 : Pertes dues à l'écart radial.

On constate que ces pertes varient très rapidement et doivent être minimisées dans les connecteurs. Si on veut obtenir des pertes inférieures à 0,5 dB, il faut des alignements doit être meilleur que 5 μm entre les deux cœurs pour une fibre 50 / 125 μm .

c) L'écart axial

On observe également des pertes dues à un éloignement axial des cœurs. Pour cette analyse, nous considérons en première approche que l'éclairement est uniforme au niveau du plan de réception et que le rapport de la puissance injectée dans la fibre sur la puissance incidente est égal au rapport de la surface sur la surface d'éclairement.

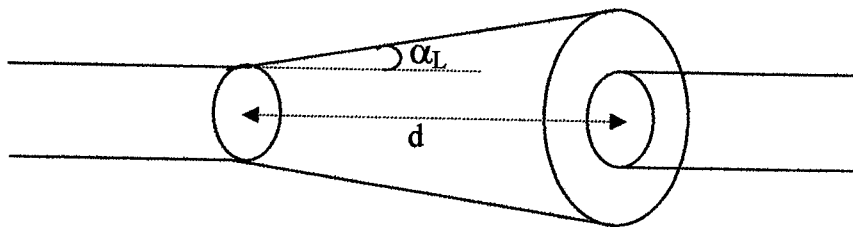


Figure II-18 : Principe d'un écart axial.

Soit D le diamètre de cœur des fibres, α_L l'angle d'ouverture et d la distance entre les deux fibres.

$$P_{ax} = 10 \log \left[\frac{\frac{\pi D^2}{4}}{\pi \left(\frac{D}{2} + d \operatorname{tg}(\alpha_L) \right)^2} \right] \quad (\text{II-15})$$

$$P_{ax} = 20 \log \left[1 + 2 \frac{d}{D} \operatorname{tg}(\alpha_L) \right]$$

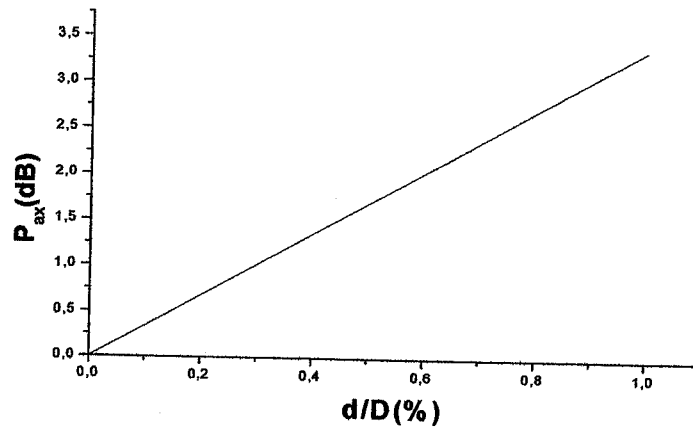


Figure II-19 : Pertes liées à l'écart axial

Les pertes sont très sensibles puisque pour un rapport de 0,5 on 1,8 dB de pertes.

d) L'écart angulaire

Le dernier défaut d'alignement est l'écart angulaire entre les deux extrémités de la fibre.

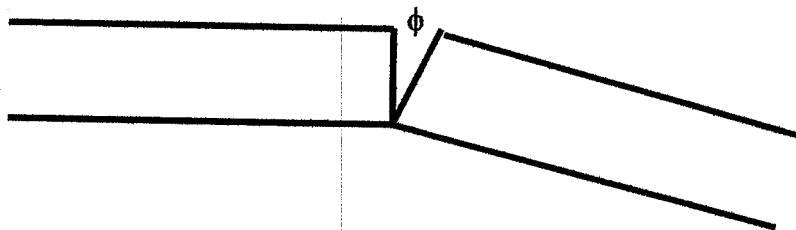


Figure II-20 : Principe d'un écart angulaire

Dans ce cas, on peut montrer que la perte associée est :

$$P_{ang} = 10 \log \left[\cos(\phi) \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{\Pi} p(1-p^2)^{1/2} - \frac{1}{\Pi} \sin^{-1}(p) \right) \right] \\ \left[q \left(\frac{1}{\Pi} r(1-r^2)^{1/2} + \frac{1}{\Pi} \sin^{-1}(r) + \frac{1}{2} \right) \right]$$

avec :

$$p = \frac{\cos(\alpha_L)(1 - \cos(\phi))}{\sin(\alpha_L)\sin(\phi)}$$

$$q = \frac{\cos^3(\alpha_L)}{(\cos^2(\alpha_L) - \sin^2(\phi))^{3/2}}$$

$$r = \frac{(\cos^2(\alpha_L)(1 - \cos(\phi)) - \sin^2(\phi))}{\sin(\alpha_L)\cos(\alpha_L)\sin(\phi)}$$

$$\sin(\alpha_L) = \text{ON}$$

Dans les montages, un défaut de quelques degrés est assez courant, mais provoque des pertes inférieures à 0,5 dB, ce qui est moins sensible que les autres défauts d'alignement.

e) L'écart de non planéité

Les écarts de non planéité sont de deux types, soit de rugosité, soit de convexité.

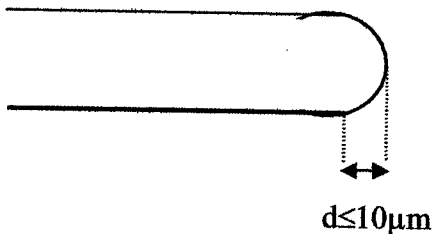


Figure II-21a : principe d'un défaut de convexité

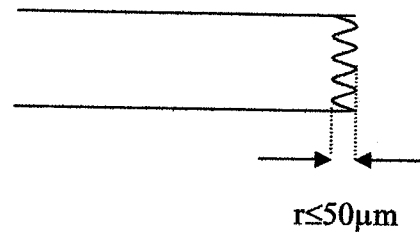


Figure II-21-b : Principe d'un défaut de rugosité

Ces deux défauts peuvent être partiellement corrigés par un polissage de l'extrémité de la fibre.

3-10-4 Préparation des extrémités de fibre

On vient de voir que trois types de pertes étaient liés à l'état de surface de l'extrémité de la fibre ; [15]

- L'orthogonalité de la face par rapport à l'axe de la fibre,
- La convexité,
- La rugosité.

Le critère de qualité est l'obtention d'une surface aussi plane que possible, orthogonale à l'axe de la fibre et de polie optique. Deux méthodes permettent de s'approcher de l'état idéal :

- Le clivage,
- Le polissage.

a) Le clivage :

L'avantage de cette technique est sa rapidité, son faible coût et l'absence de résidus sur la face sectionnée après le clivage, l'andicap étant la difficulté d'obtenir une « bonne » fracture [15].

Lors de clivage de fibre, on peut généralement distinguer trois zones sur la face obtenue :

- Le miroir (mirror),
- L'intermédiaire (mist),
- Le peigne (hoehle).

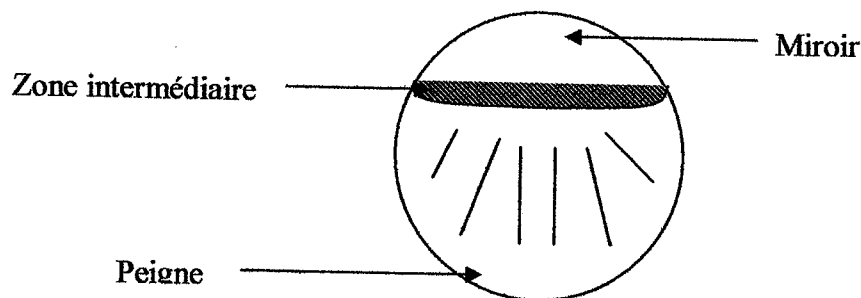


Figure II-22 : Schéma d'une face clivée.

La difficulté de la méthode consiste à obtenir une face clivée ne présentant que l'aspect du miroir. La première étape consiste à effectuer une amorce de rupture avec une pointe diamant qui ne doit, en aucun cas, atteindre le cœur.

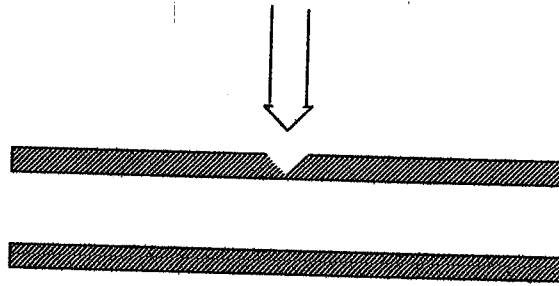


Figure II-23 : Amorce de rupture.

La deuxième étape consiste à courber la fibre pour ouvrir la fracture, en exerçant une légère force à chacune des extrémités.

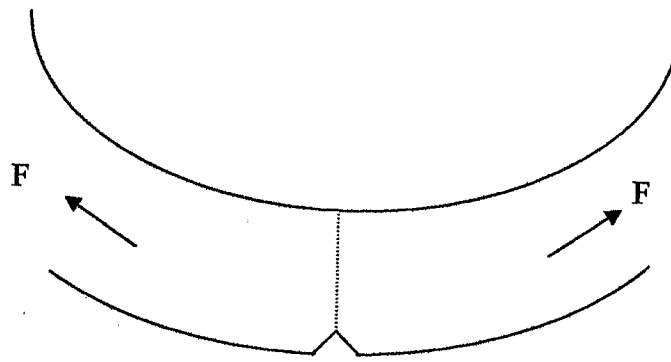


Figure II-24 : Obtention du clivage.

Lors de cette opération, l'amorce de fracture se propage et assure un clivage propre de la fibre. Si l'opération n'est pas parfaitement réussie, les principaux défauts sont l'écaillage de l'extrémité, l'orthogonalité et la convexité.

b) Le polissage :

Cette opération s'effectue quand la fibre est montée avec le connecteur [17].

Celui-ci est alors vissé sur un mandrin de polissage, calibré, que l'on fait tourner d'un mouvement aléatoire sur des disques abrasifs. Le mandrin sert également de calibre, de façon à ce que la longueur de la fibre dans le connecteur soit optimisée pour le raccordement.

L'opération de polissage utilise généralement trois grains différents, le fini étant assuré avec le plus fin, qui a un diamètre de 0,3 micron de grain et permet d'obtenir l'aspect miroir.

L'avantage de cette méthode est d'obtenir une bonne orthogonalité de la face et de faibles défauts de convexité et de rugosité ; mais son inconvénient majeur est le nombre d'étapes et la

durée de chacune. Cette technique n'est guère utilisée que pour les connecteurs. plusieurs travaux ont été élaborés sur l'utilisation de cette technique, nous pouvons citer celui de DAWEI, LIANG qui a fait un polissage hexagonal de 19 fibres pour transporter l'énergie solaire concentrée [22].

3-10-5 Principe d'un raccordement

Lors que l'opération de raccordement, un certain nombre d'opérations sont à effectuer : [13]

- Préparer les fibres aux raccordements,
- Effectuer le raccordement,
- Protéger le raccordement.

Dans le cas de connecteurs, les opérations sont :

- Préparation de la fibre,
- Montage des connecteurs,
- Polissage des deux extrémités,
- Raccordements.

Par préparation de la fibre, on entend le dénudage du câble et de la prégain de la fibre jusqu'à obtention de la fibre uniquement constituée du cœur et de la gaine.

Une fois le raccordement effectué, il est nécessaire de donner aux raccords les protections adéquates par rapport à l'installation générale, afin de ne laisser aucun point faible sur les liaisons.

a) Raccordement par soudure

La soudure est le principe de raccordement qui donne le moins de pertes, puisqu'elles sont typiquement inférieurs à 0,1 dB. Dans un premier temps, les deux extrémités des fibres optiques clivées sont alignées sous microscope, puis la soudure est effectuée par l'intermédiaire d'un arc électrique.

Les inconvénients de la méthode sont l'encombrement du matériel nécessaire qui empêche son utilisation sur certains sites (chemin de câble...), les difficultés d'obtenir de « bonne », soudure et le caractère non démontable de la soudure.

3.10.6 Les épissures

Démontables ou fixes, les techniques d'épissures consistent à venir mettre en contact deux fibres clivées baignant dans un liquide d'indice.

Les épissures monofibres sont généralement constituées d'un guide de fibres en Vé que l'on remplit d'un liquide d'indice et dans lequel on fait glisser les fibres jusqu'à ce qu'elles soient en contact. Les fibres ont été au préalable dénudées et clivées.

Suivant les cas, une plaquette ou un dispositif quelconque est mis en place pour protéger l'épissure puis le câble est reconstitué, toujours dans le souci de ne laisser aucun point faible sur la liaison. Certains gels utilisés sont polymérisables, ce qui fait perdre le caractère

démontable de liaison.

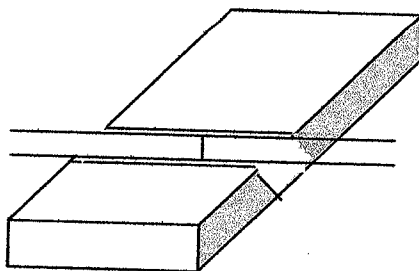


Figure II-25 : Epissure monofibre.

Dans ce genre de techniques, les pertes sont inférieures à 0,3 dB ; c'est la technique la plus couramment utilisée pour les liaisons à moyenne distance (une dizaine de kilomètres).

3-10-7 Les connecteurs

Bien que parfois utilisés dans la liaison même, les connecteurs sont surtout utilisés à l'interface émetteur-fibre ou fibre-récepteur [21].

On distingue en général deux parties indépendantes : la première est le cœur du connecteur dans lequel a lieu le positionnement précis de la fibre à raccorder, la deuxième est l'enveloppe qui comprend le moyen de rétention du câble et le système de verrouillage du connecteur [15].

Il existe plusieurs types de connecteurs permettant de raccorder une fibre à la fois. Les plus couramment utilisés sont les connecteurs à baïonnette ST ou ST2, les plus utilisés, reconnaissables à leur corps muni d'une rampe, à profil hélicoïdal, de verrouillage à encoches. L'atténuation nominale de ces connecteurs est de 0.5dB, les connecteurs à encliquetage munis d'un système de verrouillage par une simple pression, du type "push-pull", dont le type SC [20]. Les connecteurs ST et SC sont validés par les normes EIA/TIA et ISO 11801.

Bien que les normes recommandent l'emploi du connecteur SC pour les nouvelles installations, celui-ci ne rencontre pas un grand succès auprès des installateurs et des fabricants de produits réseau. Le comité EIA/TIA TR-4 1.8.1 travaille sur la validation d'un nouveau connecteur F0 destiné à remplacer les connecteurs ST et SC.

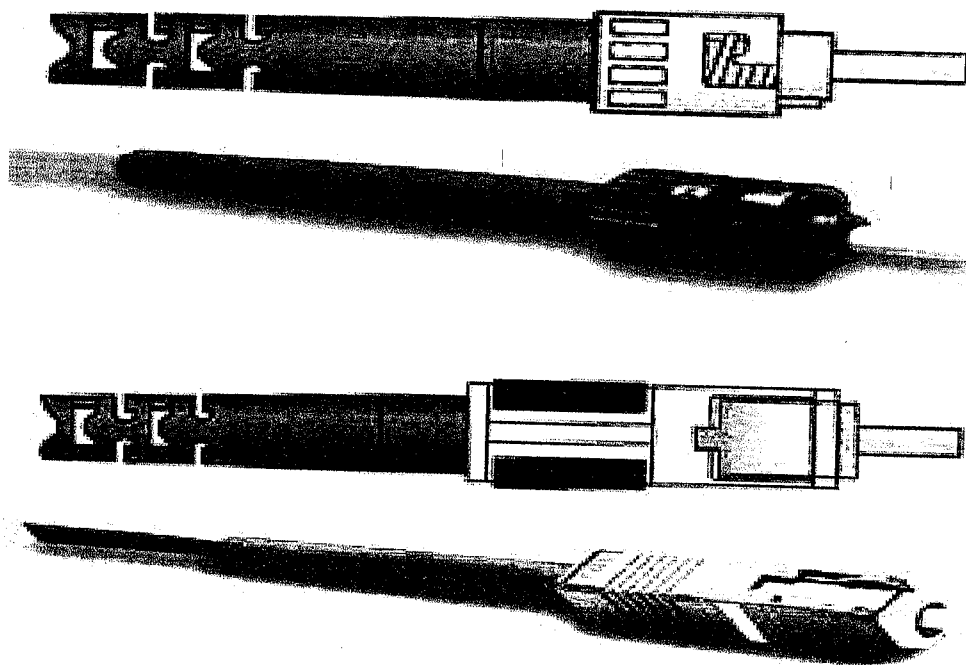


Figure II-26 : Schéma de connecteurs [17].

Le câble est dénudé sur deux zones, l'une jusqu'à la gaine (20 à 30 mm), la deuxième avec la pré-gaine (10 mm). La fibre est enduite de colle et introduite dans le connecteur qui présente un cône de guidage où la fibre dénudée s'engage mais qui bloque la fibre optique pré-gainée. Le câble arrive en butée et est serti au connecteur avant d'être maintenu par une gaine thermorétractable. Après s'être assuré que la colle déborde du connecteur à la sortie de la fibre, on chauffe l'adhésif pour assurer sa polymérisation. La fibre est fracturée au niveau de la goutte de colle puis polie jusqu'à l'obtention d'une surface miroir.

Les pertes sont généralement inférieures au dB, mais peuvent être diminuées par l'utilisation d'un liquide d'indice ; les principaux handicaps sont le temps de montage de connecteur (une heure), l'importance des pertes de l'indémontabilité du connecteurs ; les avantages sont la robustesse de la liaison, la facilité de repolissage et de démontage de la liaison.

On trouve des connecteurs de tous types et pour toutes applications (isolants, inoxydables, étanches...), mais pour les liaisons courantes, le standard Amphénol 1906 est très développé.

3-10-8 Définition d'un raccord

La définition d'un raccord s'effectue en fonction de la fibre, du câble et du type de liaison.

- Fibre -monomode ou multimode, -cœur / gaine.
- Câble -diamètre extérieur.
- Liaison -fixe ou démontable,

- criticité des pertes,
- facilité des pertes,
- facilité de montage sur site,
- milieu (isolant, marin...).

D'une façon pratique, on a tendance à utiliser des raccordements standard et facilement montables, mais, dans le cas des câbles multivoies, on est amené à utiliser des techniques particulières.

4- CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons développé tous les procédés de fabrication des fibres optiques. Pour la réalisation des câbles à fibres optiques performants on a étudié tous les facteurs techniques qui assurent le bon fonctionnement.

Chapitre III

Généralités sur le rayonnement solaire et sa concentration

1- Introduction

La croissance de la demande énergétique dans le monde a largement stimulé la recherche de nouvelles sources d'énergie. Avec les progrès scientifiques techniques de ces dernières années, l'énergie solaire paraît comme une alternative intéressante aux énergies d'origine fissiles ou fossiles. De ce fait, elle fait la préoccupation de nombreux chercheurs.

La puissance solaire reçue par m^2 de la terre est non négligeable $W = 1367 \text{ W/m}^2$. L'énergie reçue par toute la surface de la terre en une seconde est $W_t = 175.10^9 \text{ MW}$. C'est une énergie inépuisable, non polluante, gratuite et dispersée sur toute la surface de la terre [2]. [23]

2- Le rayonnement solaire

2-1 Le rayonnement solaire a la limite de l'atmosphère :

On appelle constante solaire, l'énergie reçue du soleil par unité de surface placée perpendiculairement aux rayons lumineux dans l'espace au voisinage de la terre, à la distance d'une unité astronomique ($1 \text{ U.A.} = 1.495 \cdot 10^8 \text{ km}$) du soleil.

Les mesures les plus récentes donnent une valeur de $I_0 = 1367 \text{ W/m}^2$, qui varie environ de $\pm 3\%$ au cours de l'année, en raison des variations de la distance terre - soleil. La relation suivante donne la valeur corrigée de la constante solaire en fonction du jour N de l'année comptée à partir du 1^{er} janvier : [24]

$$I = 1367 \left(1 + 0.034 \cos \left[\frac{360}{365} (N - 2) \right] \right) \quad (\text{III.1})$$

2-2 Atténuation du rayonnement solaire par l'atmosphère :

Le rayonnement extraterrestre arrivant à la surface de l'atmosphère croise sur son passage des phénomènes d'absorption et de diffusion qui contribuent à son affaiblissement, on distingue :

- L'absorption par les gaz de l'atmosphère et la vapeur d'eau.
- La diffusion moléculaire par les gaz de l'atmosphère, par la vapeur d'eau et par les aérosols (fines particules en suspension dans l'air).

La masse d'air, le facteur de trouble et l'épaisseur d'eau condensable sont des facteurs représentatifs de ces phénomènes.

L'absorption et la diffusion se produisent simultanément en augmentant la complexité de l'extinction ; elles sont fonction de la longueur d'onde et de l'épaisseur atmosphérique traversée par les rayons solaires. [25]

2-3 Description générale du soleil

Le soleil peut être assimilé à une sphère de rayon $R_{\odot}$ égal à cent fois celui de la terre ($R_{\odot} \approx 7.10^5$ Km). Il est distant de celle-ci d'environ $D = 150.10^6$ km. Il irradie dans l'espace une puissance énorme dont la terre ne reçoit qu'une infime partie. D'une manière générale, la puissance émise par le soleil correspond à la combustion de 8.10^{15} tonnes de pétrole par seconde, c'est à dire qu'il brûle en 9 jours l'équivalent en pétrole de la masse de la terre... [26]

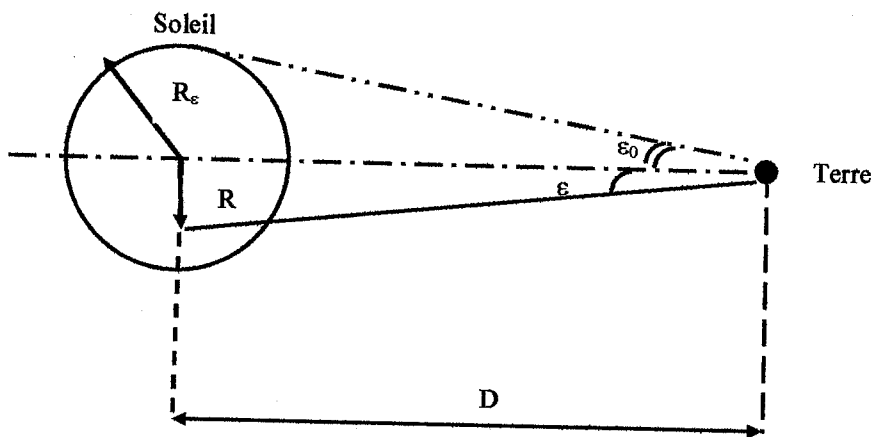


Figure III-1 : Diamètre apparent du soleil.

Son noyau central, inaccessible à l'observation directe et siège de réactions thermonucléaires. Il est une sphère de rayon d'environ le quart du rayon total. Il est entouré d'une paroi radiative et d'une zone d'échange par convection dont la température de l'extérieur est de l'ordre de 6000 K. On trouve ensuite une enveloppe de faible épaisseur relative ($\approx 10^4$ Km) : la photosphère qui est entourée de la chromosphère est la partie radiative, de sorte que l'on peut la comparer à la braise d'un foyer et la chromosphère à la flamme ; donc la photosphère permet le transfert d'une partie de l'énergie produite au centre vers la périphérie. Enfin, la couronne solaire entourant la chromosphère est constituée d'un plasma dont la température peut atteindre localement plusieurs millions de degrés. Toutefois, l'énergie émise n'appartient pas à notre domaine spectral expérimental, sa faible densité la rend transparente au rayonnement de la photosphère [26]

Dans la suite, nous assimilons le rayon de la photosphère $R_{\odot}$ à celui du soleil.

La distribution spectrale du rayonnement arrivant au niveau de la terre et la brillance apparente du soleil sont caractérisées hors atmosphère. En dehors de l'atmosphère, les résultats sont dits à « masse d'air zéro » :

- AM0 ; Si on élimine les perturbations dues à l'atmosphère (absorption du gaz, état météorologique, pollution...);
- AM1 ; Au niveau de la mer, et dans les conditions de température et de pression, les résultats sont normalisés à « masse d'air ».

2-4 Distribution spectrale du rayonnement

Hors atmosphère, une surface disposée perpendiculairement aux rayons du soleil reçoit une densité de puissance uniforme $D_h = 1367 \text{ W.m}^{-2}$ aux équinoxes. Cette valeur standard est appelée « constante solaire ». Dans notre travail, nous utilisons plusieurs grandeurs caractérisant le soleil et le rayonnement solaire. Il nous paraît donc indispensable de préciser, avec soin, celles dont nous avons besoin. Compte tenu du fait que la brillance du soleil est uniforme, c'est une approximation adaptée pour de nombreuses applications, mais elle s'avère être un outil indispensable pour notre étude. L'énergie disponible sur terre, inclut l'énergie thermique directe, l'énergie hydroélectrique ainsi que l'énergie générée par les hydrocarbures qui sont une conséquence de la photosynthèse [26]

Le rayonnement solaire est la lumière provenant du soleil sous forme d'onde électromagnétique dont 98 % du spectre est compris entre les longueurs d'onde 0.25 et 4 μm . Le rayonnement solaire contient de la lumière visible (LV : 0.4 μm $\rightarrow$ 0.8 μm) et de la lumière invisible [(UV : 0.25 μm $\rightarrow$ 0.4 μm) et (IR : 0.8 μm $\rightarrow$ 4 μm)]

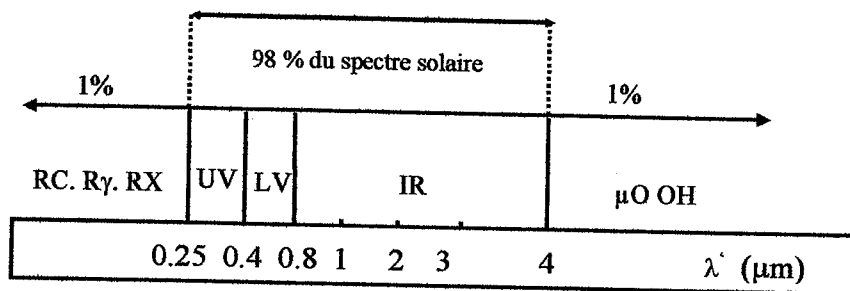


Figure III-2 : Spectre des ondes électromagnétiques

Le soleil rayonne comme un corps noir qui a un diamètre de $1,39 \cdot 10^6 \text{ km}$ et à une température de 5800 K dans l'intervalle de spectre compris entre les longueurs d'onde 0.25 et 4 μm [28]

La répartition de l'énergie du corps noir et du soleil à la température de 5800 K est donnée par le tableau suivant :

Hors atmosphère	% Puissance solaire	% Puissance du corps noir
UV: $0.25 \mu\text{m} < \lambda' < 0.4 \mu\text{m}$	7	9,9
LV: $0.4 \mu\text{m} < \lambda' < 0.8 \mu\text{m}$	47,5	46,6
IR : $0.8 \mu\text{m} < \lambda' < 4 \mu\text{m}$	45,5	43,5

Tableau III-1 Répartition de l'énergie du corps noir et du soleil à 5800 K

L'énergie rayonnée par le soleil n'est pas uniformément répartie pour toutes les longueurs d'ondes, elle passe par un maximum pour une longueur d'onde λ'_m donnée par la loi de WIEN [26]

$$\lambda'_m T_s = 2898 \mu\text{m K} \quad (\text{III.2})$$

à $T = 5800 \text{ K}$, $\lambda'_m \approx 0.5 \mu\text{m}$.

2-5 Brillance radiale

La brillance radiale apparente du disque solaire n'est pas uniforme. Elle dépend essentiellement de la distance apparente du centre R_e . Notre étude porte sur la variation de cette brillance en fonction de R_e , ou en fonction de l'angle ε correspondant (figure III-3).

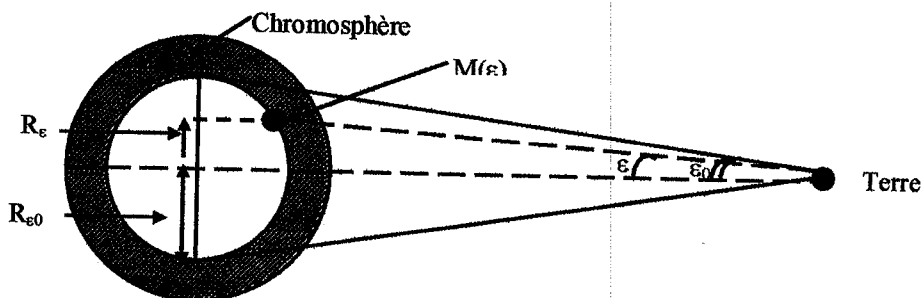


Figure III-3 : Variation de la brillance du soleil.

Chaque point d'une surface perpendiculaire au rayonnement solaire reçoit un cône de lumière qui s'appuie sur le disque solaire apparent dont le rayon solaire est $\epsilon_0 = 4,654 \cdot 10^{-3}$ rad, soit 16 minutes d'arc. Ce rayonnement émis par la photosphère de façon uniforme est atténué dans la traversée de la chromosphère, c'est-à-dire que la quantité d'énergie reçue du centre du soleil est plus importante que celle qui vient du bord. Abbot et ses collaborateurs ont donné sous forme numérique pour les différentes longueurs d'onde la valeur de la brillance relative B/B_0 (rapport de la brillance en un point, caractérisé par ϵ , à la brillance au centre B_0) en fonction du rayon angulaire ϵ . [5]

Pour faciliter le calcul de la répartition énergétique, par exemple au foyer de certains concentrateurs, José a proposé une expression analytique donnée sous la forme :

$$\left[\frac{B}{B_0} \right]_j = \left\{ a + b \left[1 - (\epsilon/\epsilon_0)^2 \right] \right\}^{1/2} \quad (\text{III.3})$$

Où a et b représentent des coefficients dépendant que de la longueur d'onde.

Pour $\epsilon=0$, on a $B = B_0$, a = 0,39 et b = 0,61 sont les valeurs moyennes qui sont compatibles avec les résultats expérimentaux mesurés sur l'ensemble du spectre.

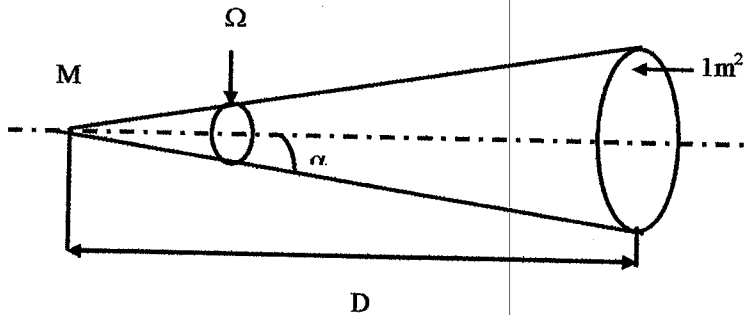


Figure III-4 : Angle solide.

La brillance du soleil étant une fonction du rayon angulaire $\epsilon = R_\epsilon / D$, à l'état AMO la puissance P reçue sur une surface circulaire de 1 mètre carré vue d'un point M(ϵ) sous l'angle solide Ω s'écrit :

$$P = 1 \cdot D_\Omega = \int_0^{R_\Omega} B(\epsilon) \Omega 4\pi R_\epsilon dR_\epsilon \quad (\text{III.4})$$

Ω est indépendant du point M considéré et peut s'écrire :

$$\Omega = 2\Pi(1 - \cos \alpha) \approx \Pi \alpha^2 = D^{-2} \quad (\text{III.5})$$

Donc :

$$D_h = \Omega D^2 4\Pi \int_0^{\theta_0} B(\varepsilon) \cdot \varepsilon \cdot d\varepsilon \quad (\text{III.6})$$

$$D_h = 2 \Pi \varepsilon_0^2 \bar{B} \quad (\text{III.7})$$

La valeur numérique de $\bar{B}$ déduite de cette expression est $10^7 \text{ w. st}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$, il faut l'attribuer dans l'hypothèse simplificatrice où l'on considère que la brillance est uniforme.

On peut prendre comme unité de brillance cette valeur moyenne. Quelque soit les expressions analytiques de $B(\varepsilon)$, leurs valeurs moyennes doivent toujours égales à $\bar{B}$.

2-6 Rayonnement solaire au sol

Au niveau du sol l'ensoleillement global reçu par une surface plane d'inclinaison quelconque est constituée de trois composantes principales. [24]

- Le rayonnement direct.
- Le rayonnement diffus.
- Le rayonnement réfléchi du sol.

2-6-1 Le rayonnement direct S

C'est l'éclairement énergétique provenant directement du disque solaire (ciel clair) et reçu par une surface réceptrice normale aux rayons solaires. Ce rayonnement peut être mesuré par un Pyrhéliomètre.

2-6-2 Le rayonnement diffus D

C'est l'éclairement énergétique provenant de toute la voûte céleste et n'a pas d'orientation privilégié. Ce rayonnement est dû à l'absorption et à la diffusion d'une partie du rayonnement solaire par l'atmosphère et à sa réflexion par les nuages. Il peut être mesuré par un Pyranomètre avec écran masquant le soleil.

Pour une inclinaison quelconque, il faut tenir compte de la proportion du ciel qui est vue par le plan considéré.

2-6-3 Le rayonnement réfléchi REF (Albédo du sol)

C'est le rayonnement réfléchi par la surface terrestre sous forme diffuse. Il dépend directement de la nature du sol (neige, prairie, terre,...). Le rayonnement réfléchi par le sol (albédo) n'est pris en compte qu'en dehors du cas particulier du plan horizontal. L'albédo du sol peut prendre des valeurs comprises entre 0 et 1.

Les valeurs d'albédo pour les différents matériaux sont résumées dans le tableau suivant :

Matériau	Albédo
Neige (neuve)	0.82
Neige (molle)	0.65
Sable (Fin)	0.37
Sable (de rivière)	0.43
Sable (Jaune)	0.35
Bois	0.22
Aluminium	0.85
Fer galvanisé	0.35

Tableau III-2 : Albédo de quelques matériaux

2-6-4 Le rayonnement global G

C'est l'éclairement énergétique d'une surface par la superposition des trois composantes direct, diffus et réfléchi.

Le rayonnement global peut être mesuré par un pyranomètre.

* Pour une surface horizontale, le global est donné par l'expression suivante :

$$G_h = S_h + D_h \quad (III.8)$$

* Pour une surface inclinée, il faut tenir compte de l'angle d'inclinaison et de la valeur de l'albédo du sol :

$$G_i = S_i + D_i + REF \quad (III.9)$$

3- Concentration du rayonnement

L'utilisation directe du rayonnement solaire est intéressante pour les usages domestiques puisqu'elle conduit à des températures égales à une centaine de degrés Celsius. Pour disposer localement des températures plus élevées, il faut que la densité de puissance soit plus grande. Il est donc indispensable de concentrer le rayonnement, c'est à dire de faire parvenir sur un élément de surface ds une densité de puissance D_s supérieure à D_i (densité de

puissance incidente sur une surface perpendiculaire aux rayons) qui arrive naturellement. Nous définissons alors la concentration par la relation suivante [218]

$$C = \frac{D_s}{D_i} \quad (\text{III.10})$$

3-1 Valeur limite de la concentration

La concentration se fait sans apport de travail extérieur, d'après la thermodynamique la température T_r atteinte sur la surface réceptrice ne peut pas être supérieure à celle de la surface du soleil. Il existe donc une valeur maximale $C_{\max}$ de la concentration, pour laquelle $T_r = T_s$. La concentration du rayonnement se fait nécessairement par voie optique. Les règles d'invariance photométriques montrent qu'on ne peut réaliser qu'une concentration optimale C_{opt} telle que : $C_{\text{opt}} < C_{\max}$ (l'égalité correspond aux processus réversibles de la thermodynamique, l'inégalité traduit l'irréversibilité).

Dans ce qui suit, on montre comment obtenir les valeurs de la concentration maximale $C_{\max}$ par la thermodynamique et de la concentration optimale C_{opt} par les lois de l'optique.

3-2 Concentration maximale théorique

L'égalité des températures de la source (le soleil) et du récepteur est obtenue lorsque les hypothèses suivantes sont simultanément réalisées :

- La source et le récepteur sont assimilés à des corps noirs.
- La source, le concentrateur (quelconque) et le récepteur constituent un système isolé sur lequel les échanges d'énergie s'opèrent uniquement par rayonnement.

Hors atmosphère, une surface disposée perpendiculairement aux rayons solaires reçoit une densité de puissance uniforme $D_h = 1367 \text{ W.m}^{-2}$. Cette valeur standard est appelée « constante solaire » [218]

En éliminant les perturbations dues à l'atmosphère (absorption du gaz, état météorologique, pollution...), on aura $D_i = D_h$; Tous les éléments de ce système, à l'exception du récepteur et de la source, sont parfaitement transparents ou réfléchissants ; donc il n'y a pas de perte de puissance.

Dans ces conditions, l'équilibre thermique dans une surface s du récepteur à la température T_r est atteint quand la puissance perdue P_p du rayonnement qu'elle émet est égale à la puissance P_c du rayonnement qu'elle reçoit, qui représente la puissance captée par le concentrateur provenant directement du soleil.

La loi de Stéphan, s'écrit :

$$P_p = \sigma T_r^4 s \quad (\text{III.11})$$

La puissance émise par le soleil P_{sol} est :

$$P_{sol} = \sigma T_s^4 S_{sol} \quad (\text{III.12})$$

Telle que $S_{sol} = 4\pi R_{so}^2$ est la surface du soleil.

Cette puissance est émise dans l'angle solide de 4π .

Le concentrateur de surface S_c reçoit une fraction de cette puissance égale à $\Omega / 4\pi$, avec :

$$\Omega = S_c / D^2 \quad (\text{III.13})$$

Donc la puissance reçue est :

$$P_c = \sigma T_s^4 S_c R_{\varepsilon_0}^2 / D^2 \quad (\text{I.14})$$

En remarquant que $R_{\varepsilon_0}^2 / D^2 = \varepsilon_0^2$ et en écrivant les densités de puissance sur le récepteur D_s et sur le concentrateur D_c , il vient que :

$$C = \frac{T_r^4}{T_s^4} \frac{1}{\varepsilon_0^2} \quad (\text{I.15})$$

Quand $T_r = T_s$, la concentration est maximale :

$$C_{\max} = \frac{1}{\varepsilon_0^2} \quad (\text{I.16})$$

En remplaçant ε_0 par sa valeur numérique, on trouve :

$$C_{\max} = 46160 \quad (\text{I.17})$$

La densité de puissance maximale sur le récepteur, s'écrit $D_s = C_{\max} \cdot D_h$, sa valeur est 63,3 MW.m⁻² ; elle représente aussi la densité de puissance sur la surface du soleil.

Le calcul de la concentration maximale que nous venons de développer, suppose un « soleil uniforme » correspondant, comme nous venons de le voir à une température moyenne de 5780 k. Nous savons que cette hypothèse est fautive. Dans sa partie centrale, le soleil est plus brillant qu'en moyenne, la température thermodynamique associée est donc plus élevée. Il est



donc possible d'accroître la densité de puissance sur le récepteur à la condition de perdre volontairement du rayonnement provenant du « bord du soleil » [28]

3-3 Concentration optimale

L'étendue optique du faisceau doit être conservée à la traversée du concentrateur. « Le soleil est une source de brillance uniforme » posée par hypothèse, il est vu sous l'angle $2\varepsilon_0$ depuis tous les points de la face d'entrée S_c du concentrateur. Le rayonnement intercepté par ce dernier passera dans une surface s en faisant avec sa normale un angle θ inférieur à une valeur limite θ_0 (cas de la face d'entrée d'un conducteur optique). L'étendue optique du faisceau de la face d'entrée du concentrateur est donnée par la relation suivante : [5]

$$S_c 2\pi(1 - \cos \varepsilon_0) \approx \pi S_c \varepsilon_0^2 \quad (\text{I.18})$$

Dans le cas réel où on cherche à optimiser la concentration, posons les hypothèses suivantes :

- La surface s est très petite devant la surface S_c ;
- Le système possède un axe de révolution perpendiculaire à S_c et s passant par leur centre.

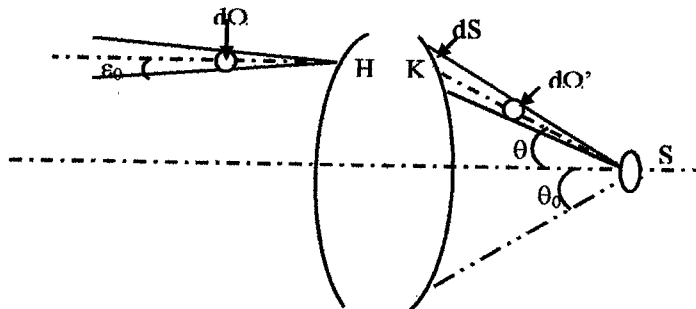


Figure III-5 : Principe de concentration

Dans ces conditions, tous les points de s reçoivent un faisceau de lumière conique.

L'étendue de faisceau élémentaire délimitée entre les angles θ et $\theta + d\theta$ s'écrit :

$$d\xi = s \cos \theta 2\pi \sin \theta d\theta \quad (\text{III.19})$$

L'étendue optique du faisceau intercepté par s s'obtiendra en intégrant l'équation (I.19) entre les valeurs 0 et θ_0 . En appliquant la relation qui traduit le principe de conservation de l'étendue optique du faisceau :

$$nSd\Omega = n'S'd\Omega' \quad (III.20)$$

On obtient : $S_c \cdot \varepsilon_0^2 = s \sin^2 \theta_0$, si $n=n'=1$, correspondant au cas étudié.

En choisissant le cas idéal (absence d'absorption), la puissance est conservée et le facteur de concentration se réduit au rapport des surfaces s et S_c : c'est le facteur de concentration optimal correspondant à l'angle θ_0 :

$$C_{opt} = \frac{\sin^2 \theta_0}{\varepsilon_0^2} = C_{max} \cdot \sin^2 \theta_0 \quad (III.21)$$

Pour une ouverture $\theta_0 = \pi/2$, La concentration optimale prend la valeur C_{max} .

Nous serons amenés à utiliser des systèmes concentrateurs dont l'ouverture est limitée à celle du conducteur optique. Cependant, nous montrerons qu'il est possible de retrouver dans un four solaire idéal, à symétrie sphérique, la densité de puissance uniforme correspondante à la concentration maximale.

4- Le suiveur Altazimutal

L'analyse des conséquences d'une erreur de pointage permet de choisir les caractéristiques principales du suiveur qui est nécessaire.

Le suiveur « ALTAZIMUTAL » est conçu par le Laboratoire d'Automatique et d'Analyse des Systèmes (L.A.A.S). Une architecture rigide supporte un panneau qui doit rester perpendiculaire au rayonnement. Elle est entraînée par deux moteurs assurant, l'un la poursuite en site, l'autre en azimut. La commande électronique de ces moteurs reçoit le signal d'un senseur constitué de quatre cellules photovoltaïques équilibrées.

L'ombre d'une pige cylindrique de 20 mm de diamètre et 300 mm de longueur n'a pas la même étendue sur chaque cellule, cette pige est désaxée du soleil. Chaque fois que la différence entre les signaux délivrés par deux cellules croisées est suffisante, le moteur correspondant entraîne un déplacement de l'ordre de 10^{-3} radians dans ces conditions. L'erreur de pointage est toujours inférieure à ε_0 . L'orthogonalité du panneau par rapport au rayonnement solaire est vérifiée par le biais d'une mire [5].

5- Les moyens de mesure

La puissance incidente est mesurée à l'aide d'un actinomètre KIPP et ZONEN fixé sur le panneau du suiveur altazimutal. La différence de potentiel délivrée par l'élément sensible peut être simultanément enregistrée en fonction du temps et lue sur un voltmètre numérique modifié permettant d'afficher directement le flux incident en $W.m^{-2}$.

La mesure de la puissance disponible de sortie de la fibre est réalisée par un radiomètre pyroélectrique RK 5000 de Laser Precision Corporation. Cet appareil permet de mesurer dans la gamme de puissances comprises entre 10^{-2} et 10 W, et donne sur une large bande spectrale, une réponse indépendante de la longueur d'onde. Ce sont ces caractéristiques qui justifient le choix de cet appareil [5].

6- Conclusion

Ce chapitre nous a permis de déterminer les notions du rayonnement solaire ainsi que sa concentration. Afin de concentrer le rayonnement nous pouvons déterminer la puissance d'entrée sur une fibre optique solaire.

Chapitre IV

La fibre optique solaire et le miroir parabolique

1- Introduction

L'utilisation croissante de l'énergie solaire concentrée a nécessité le développement de nouvelles techniques pour atteindre des températures de quelques milliers de degrés et qui peuvent résoudre quelques problèmes d'industrie, parmi ces techniques, notons les fours solaires. Leur utilisation en industrie a été limitée par quelques inconvénients tels que l'utilisation des réflecteurs à symétrie axiale, adaptation de l'ouverture du dispositif, récepteur au cône fermé par la réflexion de la lumière, déplacement du concentrateur et du récepteur suivant le soleil, alors que l'utilisation des fibres optiques a remédié ces insuffisances de façon remarquable [29]

Dans notre étude, nous déterminons dans quelles mesures un conducteur de lumière est susceptible de transporter de l'énergie solaire concentrée et le type de concentrateur à symétrie axiale utilisée.

2- Les conducteurs de lumière

2-1 Contraintes et limites

2-1-1 Pertes de Fresnel

Quelque soit le conducteur de lumière utilisé, il faut à chaque extrémité, tenir compte des pertes de puissance liées au passage de l'onde électromagnétique entre deux milieux diélectriques (l'air et le cœur du conducteur). Si les faces d'entrée et de sortie de ce conducteur sont des plans optiques, à partir de la théorie de Fresnel on peut évaluer ces pertes à 4 % sur chacune des faces.

2-1-2 Coefficient d'atténuation

Les conducteurs de lumière ont été développés depuis quelques années sous forme de fibres optiques pour les besoins de télécommunications, ils ont alors le diamètre extrêmement faible (quelques dixièmes de mm) et souvent les indices n_1 et n_2 sont très voisins. Comme les distances à parcourir sont importantes (supérieures au km), il est indispensable que le milieu constituant le cœur soit le plus transparent possible. Il s'agit généralement de verres très purs et actuellement de meilleurs résultats ont été obtenus avec des Silices de synthèses. On a l'habitude de relier la transmittance des fibres à une atténuation caractéristique τ (exprimée en dB/km) qui est donnée par l'expression suivante :

$$P(\lambda) / P_0(\lambda) = 10^{-0.1\tau(\lambda)l} \quad (IV.1)$$

Avec :

P_0 : La puissance incidente.

L'atténuation τ dépend de la longueur d'onde. La présence d'impuretés provoque l'apparition de bandes d'absorption ; la diffusion Rayleigh fait augmenter l'atténuation vers les courtes longueurs d'ondes correspondantes. En atteignant des valeurs de τ inférieures à 1dB/km, l'atténuation sera minimisée [5].

Pour transporter le rayonnement solaire avec de tels conducteurs, il est indispensable de considérer la valeur moyenne $\bar{\tau}$ de τ sur l'ensemble du spectre solaire. $\bar{\tau}$ est définie par la relation suivante :

$$\int_0^{\infty} \frac{dP_0}{d\lambda} 10^{-0.1\tau(\lambda)l} d\lambda = 10^{-0.1\bar{\tau}l} \int_0^{\infty} \frac{dP_0}{d\lambda} d\lambda \quad (\text{IV.2})$$

Avec :

P_0 : La puissance sur la face d'entrée du conducteur

l : La longueur de la fibre.

Dans notre cas les distances de propagation sont faibles (de l'ordre de 10 m) et que le maximum de puissance soit transmis, pour que les valeurs de $\bar{\tau}$ tolérables dans la pratique, et dans la limite où les pertes $[P/P_0 = (P_0 - P) / P_0]$ sont supérieures à 10 % avec une longueur de 10 mètres, la valeur de $\bar{\tau}$ n'excède pas 50 dB/km [5].

2-1-3 Ouverture

L'ouverture d'un conducteur de lumière est caractérisée par un angle limite θ_0 défini par la relation suivante :

$$\sin \theta_0 = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (\text{IV.3})$$

Avec : $\sin \theta_0$ est l'ouverture numérique.

Ces définitions supposent que :

- Tous les rayons sont dans un plan méridien du conducteur.
- Pour les rayons qui peuvent se propager dans la fibre (intérieurs à un cône de demi-angle au sommet θ_0), les réflexions internes sont parfaitement totales.

- La géométrie de la fibre est parfaite.

Dans la pratique, les fibres à grande ouverture sont réalisées avec deux verres d'indices différents mais elles ont une atténuation assez élevée. Pour avoir une transparence, il faut choisir la silice de synthèse pour l'élaboration du cœur, son indice $n_1=1,4585$ (cette valeur est égale à n_d pour la raie jaune du Sodium) est relativement faible, il s'avère difficile de trouver des matériaux ayant à la fois de bonnes qualités optiques et un indice sensiblement petit. Les silicones qui ont un indice de l'ordre de 1,4 conduisent à des ouvertures voisines de 20° . Cette valeur, relativement faible, va jouer un rôle significatif dans l'utilisation envisagée.

En réalité, tous les rayons ne sont pas méridiens, une réflexion n'est jamais parfaitement totale et, quel que soit le soin apporté à la fabrication du conducteur, il existe des défauts géométriques à la surface de séparation entre le cœur et le Cladding [5].

Théoriquement, les rayons non méridiens peuvent pénétrer sous des angles supérieurs à 90° , mais ils sont très vite atténués expérimentalement et que l'ouverture réelle est égale à 90° . ??

Le coefficient de réflexion interne s'écrit : $\mu=1-x$, ($x \ll 1$). Ceci est dû du fait que les diélectriques constituant le cœur et le Cladding ne sont pas parfaits, l'indice de réfraction relatif est donc mathématiquement un nombre complexe. Cette atténuation s'explique par la notion de décalage transversal (Effet Gauss-Hanschen) qui se produit lors de la réflexion totale : l'onde associée à un pinceau lumineux élémentaire parcourt une très grande distance dans le second milieu, elle est atténuée vu que celui-ci est très légèrement absorbant. Ce phénomène négligeable pour une seule réflexion est bien évident, mais devient sensible dans une fibre optique en présence d'un grand nombre de réflexions [9].

Les défauts géométriques existant à la surface de séparation entre le Cladding et le cœur sont aléatoires, et par conséquent ils modifient les angles d'incidence internes (couplage des modes), ce phénomène se traduit par :

- Un affaiblissement important de la puissance transportée par les rayons lumineux qui attaquent la fibre au voisinage de l'angle limite.
- Une homogénéisation du faisceau lumineux au cours de sa propagation.

A partir de ces deux phénomènes, on aura :

- L'ouverture expérimentale du faisceau toujours inférieure à la valeur numérique donnée par la relation théorique.
- La face de sortie d'une fibre suffisamment longue peut être considérée comme une source de brillance uniforme.

Le coefficient d'atténuation moyen n'est plus une constante, il doit tenir compte de l'angle θ sous lequel la fibre reçoit la puissance transmise. La variation de l'atténuation est fonction de l'angle θ pour une lumière monochromatique, elle peut être estimée en supposant que tous les rayons sont méridiens et en négligeant l'effet des défauts géométriques.

2-1-4 Section

L'utilisation de conducteurs de lumière pour le transport de l'énergie solaire concentrée dans le but de désolidariser le concentrateur mobile du récepteur, nous informent que les conducteurs choisis sont souples. Vu que leur cœur est en verre, expérimentalement il sera difficile de dépasser des diamètres du cœur de l'ordre du millimètre. Nous aurons donc à faire à des fibres optiques dont la section s est toujours faible.

2-1-5 Puissance transportable

Notre but est de transporter le maximum de puissance dans le conducteur de section minimale. En tenant compte de cette section et de l'ouverture angulaire du conducteur, signifie qu'il faudra réaliser sur la face d'entrée de la fibre, la concentration la plus élevée possible. Le conducteur utilisé est capable de recevoir un tel flux d'énergie. Supposons que l'énergie qui n'est pas transmise est intégralement absorbée dans la fibre, seule une partie sera diffusée, ce qui met en évidence son échauffement.

Un conducteur pour lequel $\bar{\tau} = 50$ dB/km devrait dissiper le long de chaque mètre 1,2 % de la puissance transportée. Nous verrons, par la suite, que les puissances transportées sont toujours faibles (quelques watts), de sorte qu'aucun problème d'échauffement ne se posera.

Si l'on pouvait concentrer le rayonnement sur un conducteur de gros diamètre mais souple, on pourrait transporter une forte puissance. Il y aurait alors risque d'échauffement : ce paramètre devrait être étudié de façon approfondie.

On peut recevoir de constituer un conducteur souple de forte section en juxtaposant un grand nombre de fibres. Cependant, aussi compact que soit cet arrangement, il y a toujours la surface « perdue » dans la section de la face d'entrée d'un tel câble. Le rayonnement concentré arrivant dans l'espace inter conducteur est, non seulement perdu parce qu'il ne peut être canalisé, mais encore susceptible de détériorer le matériau d'enrobage de chacune des fibres.

2-2 La fibre Q.S.F 1000

L'étude générale précédente nous a permis de dégager les éléments essentiels qui nous permettent de choisir, parmi les fibres optiques commerciales, la mieux adaptée à notre problème. Après avoir rappelé les pertes de transport d'énergie électromagnétiques dans la

fibre optique, nous choisissons une fibre adaptée de façon adéquate avec notre étude. L'étude a montré que pour des raisons d'échauffement, le système associe un concentrateur à chaque fibre. Les considérations sur l'atténuation imposent pour le cœur la silice de synthèse.

Ainsi nous avons choisi la fibre de plus gros diamètre (1 mm), le constructeur en indique une ouverture $\theta_0 = 20^\circ$.

En début nous avons évoqué les pertes provenant des réflexions vitreuses sur les extrémités de la fibre. Dans le but de minimiser leurs conséquences, nous devons réaliser un poli optique de chaque face. En effet, les meilleurs dispositifs de coupe, laissent en trace d'amorce de fracture et souvent des éclats internes. Pour réaliser ce polissage, il faut mettre au point un outil, qui permet d'obtenir un poli optique convenable.

Il nous paraît d'envisager nécessairement le dépôt d'une couche anti-reflet sur les extrémités de la fibre.

L'ouverture numérique est donnée par le constructeur en fonction des indices n_1 et n_2 correspondants à la longueur d'onde de la raie jaune de sodium qui s'exprime par la relation suivante : [30]

$$\sin \theta_0 = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (IV.4)$$

Enfin, la fibre choisie est la QSF1000 composée d'un cœur de quartz et de silice de diamètre de 1mm, un angle $\theta_1 = 20^\circ$ et un coefficient d'atténuation $\tau = 3\text{dB/km}$ pour une longueur d'onde $\lambda = 0,82 \mu\text{m}$.

3- Le concentrateur

Pour déterminer les meilleures conditions de couplage entre un concentrateur et le conducteur de lumière qui lui est associé, il est nécessaire de préciser le concentrateur le plus adéquat. Pour aboutir à ce choix dans le cas général, il faut caractériser la répartition énergétique fournie dans un plan quelconque par un concentrateur éclairé par le soleil ; tout en sachant que la connaissance des notions de la topographie énergétique est insuffisante. La limite de l'ouverture angulaire de la fibre impose aussi de connaître les conditions angulaires de cet éclairage.

Avec ces restrictions, on est amené au concentrateur susceptible de fournir le flux maximal dans le disque constitué par la face d'entrée du conducteur.

La symétrie cylindrique des conducteurs de lumière limite ce choix parmi les concentrateurs ayant la symétrie de révolution [28]

Par ailleurs, les ouvertures admissibles des faisceaux de lumière après concentration sont trop importantes pour que les méthodes de l'optique de Gauss soient satisfaites. En particulier, il n'y a pas lieu de considérer des « images du soleil » au sens strict du terme.

L'optimisation de la répartition énergétique dépend de la nature du concentrateur, du plan sur lequel elle est étudiée et de la brillance du soleil. Cela, si toutes les autres conditions sont parfaites.

La fibre choisie correspondant pour un angle de 20° d'ouverture, est donc capable de conduire dans les conditions idéales, un rayonnement dont la concentration est donnée par l'expression suivante [28]

$$C_{\text{opt}} = \frac{\sin^2 \theta_0}{\varepsilon_0^2} = 5400 \quad (\text{IV.5})$$

Avec ε_0 égal à $4,654 \cdot 10^{-3}$ rd.

Le dispositif qui peut être utilisé pour concentrer le rayonnement solaire sur la face d'entrée d'une fibre optique dans les conditions satisfaisantes, et qui permet d'approcher au mieux la concentration optimale ; est le miroir parabolique. Il présente un facteur de concentration optimale (C/C_{opt}) avec une perte de 2 % lorsqu'on dépasse la concentration optimale, d'où la récupération des pertes de puissance importantes.

L'utilisation du miroir parabolique est due à un autre phénomène qui consiste à récupérer la puissance issue du bord du soleil et utiliser une source de brillance moyenne plus élevée telle que :

$$\left\{ \begin{array}{l} \gamma = \frac{d}{2f\varepsilon_0} = 0 \\ \text{et} \\ \frac{C}{C_{\text{opt}}} = \frac{B_0}{\overline{B}} \end{array} \right. \quad (\text{IV.6})$$

3.1 Influence de l'ouverture

La répartition énergétique est fonction de l'ouverture numérique (θ_0) et de l'idéalité du centrage (les meilleures conditions de couplage). A cet effet, il faut connaître la variation des grandeurs (C/C_{opt}) et ($\Delta P/P_0$) en fonction de γ et θ_l

Pour un soleil uniforme, le calcul peut être mené à son terme de manière analytique. Nous nous limitons à rappeler les relations donnant la variation des paramètres cités ci-dessous, en fonction de l'ouverture θ_0 :

- Du coefficient de concentration moyenne C_t relatif à la totalité de la « tache d'image ».
- De la puissance relative $\frac{\Delta P}{P_0}$ perdue quand on capte l'énergie intérieure à un disque de diamètre d centré au foyer.

On trouve :

$$C_t = \frac{\sin^2(2\theta_0)}{4\varepsilon_0^2} \quad (IV.7)$$

$$\frac{\Delta P}{P_0} = 1 - \gamma^2 \cos^4 \frac{\theta_0}{2} \quad (IV.8)$$

La deuxième relation n'est valable que si ($\gamma = \frac{d}{2f\varepsilon_0}$) inférieure ou égale à 1.

Le coefficient du concentrateur sur le disque s'écrit $C = \eta \frac{S}{s}$, d'où :

$$\frac{C}{C_{opt}} = \frac{4\eta}{\gamma^2 (1 + \cos \theta_l)^2} = \frac{\eta}{\gamma^2 \cos^4 \left(\frac{\theta_l}{2} \right)} \quad (IV.9)$$

Donc il est possible de récupérer la perte de puissance en fonction de θ_0 pour atteindre le facteur (C/C_{opt}) désiré. Une fois que (C/C_{opt} , θ_0 , d) sont connus, nous pouvons déterminer les caractéristiques géométriques du concentrateur parabolique tels que f (distance focale) et R_c (rayon du concentrateur). Les pertes de puissance dues aux défauts géométriques du miroir sont estimées à 5 %.

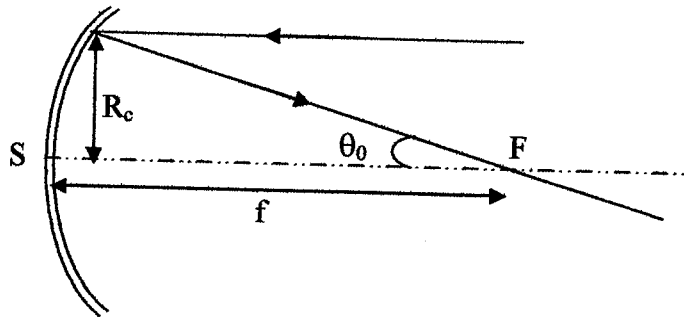


Figure IV-1 : Détermination de la distance focale f et du rayon du concentrateur R_c .

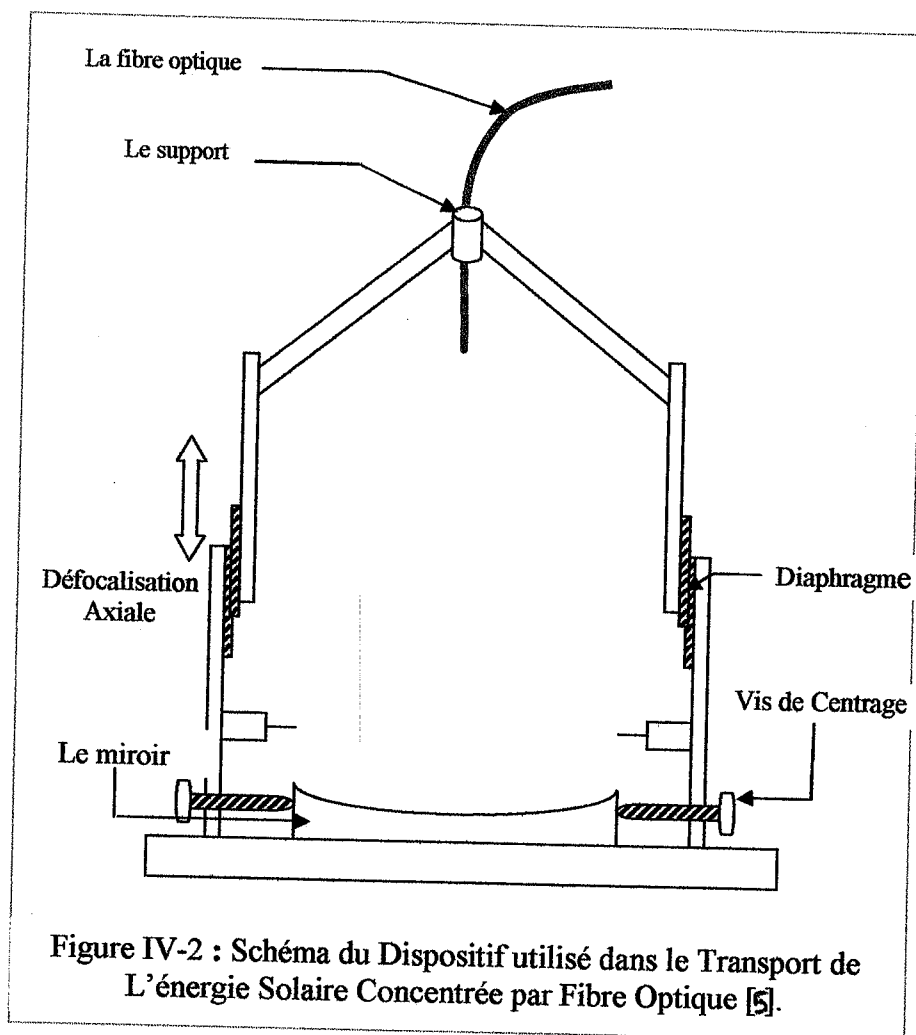
4- L'interface fibre-concentrateur

Nous allons maintenant analyser tous les facteurs expérimentaux qui peuvent aboutir aux meilleurs réglages du couplage et réduire le facteur de puissance ($C/C_{opt}=1$) si $\gamma = 1$ et $\theta_0=20^\circ$.

Les caractéristiques géométriques du miroir parabolique qu'il faut associer à la fibre Q.S.F 1000 sont : $f = 10,38$ cm, $R_c = 36,6$ mm et un diamètre de 68 mm.

Les contraintes technologiques ont conduit à choisir un miroir de 10 cm de distance focale et de 68 mm de diamètre. Il est placé dans l'ensemble mécanique schématisé dans la figure (IV-2). Ce système comporte un certain nombre de dispositifs de réglage qui facilitent la mise en évidence de façon systématique des effets suivants :

- ❖ **Défocalisation Axiale** : Elle correspond à un écart Δf suivant l'axe de la face d'entrée de la fibre et du plan focal.
- ❖ **Défocalisation Radiale** : L'axe de révolution de la fibre ne coïncide pas avec l'axe du concentrateur qui provoque un écart Δd .
- ❖ **Défaut de Pointage** : L'effet de l'écart de pointage $\Delta \epsilon$ du système par rapport à la direction moyenne du rayonnement a pour conséquence une rotation de l'image du soleil d'un angle $2\Delta \epsilon$ et une défocalisation radiale $\Delta f = 2f\Delta \epsilon$. Les pertes provoquées par ces sous dimensionnement sont de 10 %.



Le centrage du miroir par rapport à l'axe de la fibre (Défocalisation radiale) est assuré par trois vis calantes. Le déplacement de l'extrémité de la fibre par rapport au plan focal (Défocalisation Radiale) qui s'effectue à l'aide d'une bague filtrée au pas d'un millimètre, et un diaphragme étalonné, permet d'étudier les variations d'ouverture du faisceau.

4-1 Analyse de la tache image du soleil

Après avoir effectué le centrage relatif de la fibre et du miroir et avoir obtenu le maximum de la puissance à la sortie de la fibre, nous remplaçons la fibre par un miroir de renvoi afin d'analyser la répartition énergétique dans la tache image du soleil. Pour cela, nous réalisons un agrandissement (voir figure IV-3).

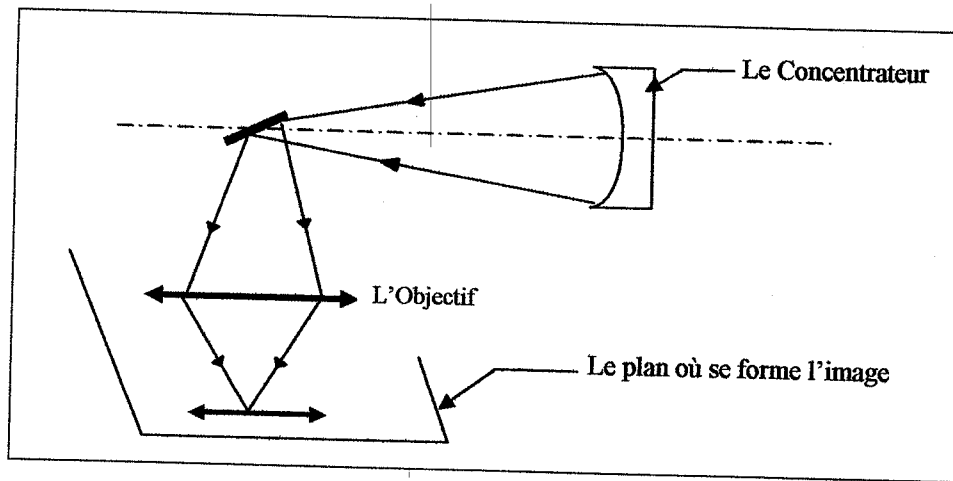


Figure IV-3 : Formation de la Tache Image [5]

Le faisceau conique ouvert à 20° est réfléchi par le concentrateur d'un angle droit par un petit miroir disposé au voisinage du plan focal. L'objectif a 50 mm de distance focale et ouvert à $f/1,4$; constitue un agrandissement de la tache focale dans un plan distant de 2 m environ qui est monté sur un ensemble de trois platines micrométriques formant un trirectangle avec lequel nous ajustons le centrage.

L'agrandissement est de 40 fois et l'angle du soleil est une tache circulaire de 4 cm de diamètre, l'écran est percé d'une fente dans laquelle on peut déplacer une fibre optique d'un diamètre de $400\ \mu\text{m}$. Le balayage se fait par un vis, au pas de 1 mm, entraînée par un moteur synchrone tournant à 60 tours /min. Le tout est placé sur une platine qui assure dans le plan de l'image une translation perpendiculaire à la direction du balayage.

La fibre optique transmet le flux lumineux vers une cellule solaire, le signal est enregistré en fonction du temps et on en déduit la variation de la puissance reçue par une surface élémentaire. Le miroir utilisé est de qualité astronomique, " l'image du soleil " fournie est parfaite.

4-2 Puissance de sortie de la fibre

Elle dépend du flux incident à l'instant de la mesure, de la réflectivité du miroir qui n'est jamais parfaite, on peut le rendre beaucoup plus réfléchissant par une évaporation sous vide d'Argent ou d'Aluminium (leurs réflectivité est de 92 % pour Ag et 73 % pour Al). Les pertes de la fibre (Réflexion vitreuse à l'entrée et à la sortie sont de 3,5 % pour chacune), l'atténuation τ du cœur est de 2.10^{-2} dB/m.

Dans l'étude expérimentale faite par J.M.Cariou où il a évalué les effets consécutifs au traitement de surface d'un miroir parabolique en utilisant la fibre optique Q.S.F.1000 d'une longueur de 5m et en essayant de déterminer le réglage permettant d'obtenir la puissance maximale (voir tableau IV-1) : [5]

Traitement \ θ°	5	8	10	12	14	16	18	20
Argent P_s en Watt	0,28	0,57	0,9	1,22	1,64	2,21	2,59	2,8
Aluminium P_s en Watt	0,21	0,46	0,71	1,00	1,31	1,71	2,03	2,25
Rapport	1,33	1,24	1,27	1,22	1,25	1,29	1,28	1,25

Rapport des Réflectivités								
Fibre								
L=5m P_s en Watt	0,28	0,57	0,9	1,22	1,64	2,21	2,59	2,8
L=15m P_s en Watt	0,27	0,54	0,84	1,13	1,50	2,00	2,30	2,42
Rapport	0,96	0,95	0,94	0,93	0,92	0,91	0,89	0,87

$$10^{-0.1\bar{\tau}(15-5)} \quad \text{est égal à } 0.955, \text{ avec } \bar{\tau} = 2.10^{-2} \text{ dB / m}$$

Fibre								
QSF1000 P_s en Watt	0,28	0,57	0,9	1,22	1,64	2,21	2,59	2,8
QSF600 P_s en Watt	0,13	0,29	0,43	0,58	0,76	0,95	1,1	1,17
Rapport	EXP	48,2	49,1	47,8	47,5	46,3	43,0	41,8
	THE	48,5	48,2	48	47,7	47,3	46,9	46,0

Tableau IV.1 : La puissance de sortie de la fibre et les différents facteurs réduisant le rendement.

Quelque soit l'angle θ du concentrateur, le rapport des puissances mesurées est compatible avec celui des coefficients de réflectivité ; le miroir idéal est à base d'Argent.

Dans le tableau si-dessus, nous remarquons l'influence de la longueur de la fibre. Les résultats obtenus montrent une perte importante de puissance vis à vis aux grandes longueurs et ouvertures de la fibre.

Si on se limite aux conditions suivantes, $\theta = 18^\circ$ et $l < 15\text{m}$, un miroir de bonne qualité permet d'obtenir un rendement toujours supérieur à 75 %. Cette valeur reste comparable devant celle de la théorie en tenant compte de toutes les atténuations suivantes : [5]

- ❖ Pertes du Miroir 8 % ($\rho_M=92\%$).
- ❖ Pertes par Réflexion sur les extrémités de la fibre 2 (3,5) % ($\rho_F=93\%$).
- ❖ Pertes en Lignes 10 % ($\rho_l=90\%$).
- ❖ Pertes Interface Fibre - Concentrateur 0 % ($\eta=1$).

La densité de puissance à l'entrée de la fibre QSF 1000 caractérisée par une longueur de 5m est égale à 3340 kw/m² alors que la concentration $C=3340$. Par contre avec la fibre QSF 600, on ne peut avoir que 50 % de la puissance captée par le miroir, mais il faut s'attendre à une augmentation de la concentration C , pour une même longueur $C=3890$, soit un gain en concentration de 17 %.

5- Etude d'un four monofibre

Nous avons maintenant un appareillage dont les caractéristiques sont connues et qui permet de disposer à l'extrémité d'un conducteur de lumière, une puissance radiative de l'ordre de 2 W. Parmi les applications qui nous pouvions envisager, nous nous sommes limités à une approche des systèmes thermiques destinés à l'obtention de très hautes températures. Il est évident qu'avec seulement une puissance de 2 W, de meilleurs résultats seront obtenus. Cependant, nous multiplions sur un même panneau des systèmes analogues à celui que nous venons de décrire en obtenant autant de fois de puissance de 2 W que de modules. L'ensemble des fibres constitue un câble pouvant apporter la puissance vers un récepteur fixe et bien isolé. En effet, contrairement à ce qui se passe avec les fours solaires traditionnels, ce récepteur peut être enfermé dans une enceinte dans laquelle des ouvertures pour le passage des extrémités des fibres seront ménagées.

Ainsi les résultats sont obtenus avec un prototype constitué d'une enceinte sphérique entourant un récepteur éclairé par une seule fibre. A partir de ce modèle de base, en augmentant le nombre de fibres jusqu'à couvrir la totalité de la paroi de l'enceinte.

Le récepteur reçoit le rayonnement d'un corps noir à la température d'équilibre de surface du soleil.

En créant le vide autour du récepteur, nous éliminons les pertes par convection. Du fait que la paroi intérieure est réfléchissante, les pertes radiatives sont minimisées.

5-1 Dispositif expérimental et résultats obtenus

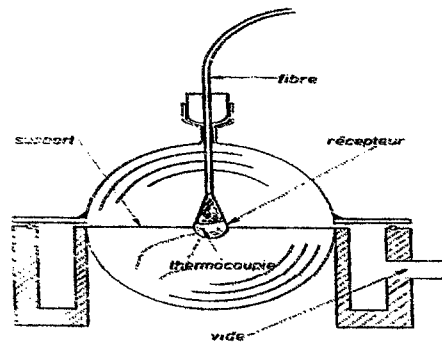


Figure IV-4 : Dispositif expérimental réalisé

Le récepteur que nous utilisons est une sphère d'aluminium de 15 mm de diamètre dont la surface a été noircie par une oxydation anodique pour la rendre plus absorbante au rayonnement solaire (au moins à une température voisine de l'ambiante). La mesure de sa température est assurée par un thermocouple Nickel-Chrome-Nickel allié, fixé sur une sphère. On enregistre, en fonction du temps, la différence de potentiel aux bornes de ce thermocouple. L'enceinte a été réalisée à partir d'un ballon de verre de 10 cm de diamètre qui a été scié suivant un grand cercle. L'un des deux hémisphères est fixé sur un cylindre métallique creux utilisé à la fois comme socle et comme pièce de liaison vers une pompe à palettes. L'autre hémisphère comporte une traversée étanche permettant le passage de la fibre optique. Enfin, le récepteur proprement dit est maintenu par une baguette de quartz de 600 μm de diamètre qui limite les échanges par conduction avec l'enceinte.

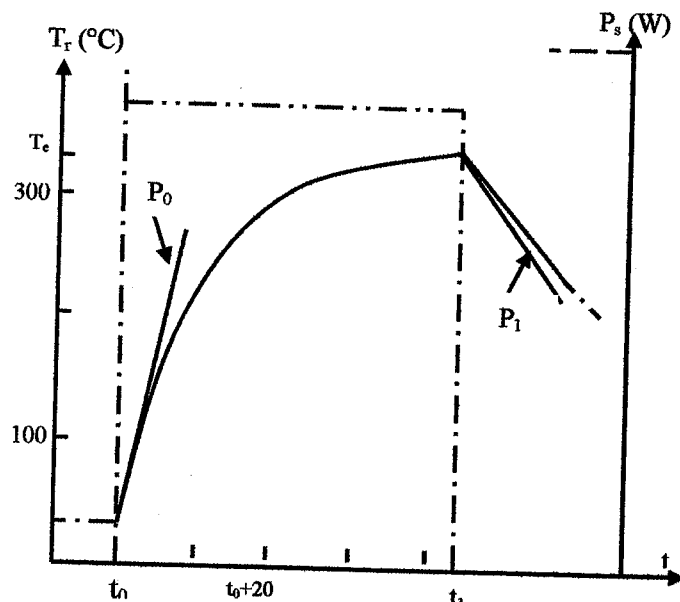


Figure IV-5 : variation de la température, la puissance en sortie de la fibre en fonction du temps

L'enregistrement a été réalisé à un moment où l'ensoleillement permettait d'avoir une puissance disponible, en sortie de la fibre égale à 1,5 w. On note tout suite que, malgré cette faible puissance la température d'équilibre de la sphère a atteint 325° C. On retiendra aussi, que les pentes aux instants où la puissance est injectée, d'une part, et où elle est supprimée, d'autre part, sont respectivement : $P_0 = 0,27 \text{ K/s}$ et $P_1 = -0,26 \text{ K/s}$.

6- Conclusion

L'énergie solaire concentrée peut être transportée avec des conducteurs de lumière, cette technique s'avère très prometteuse quant aux applications thermiques. Elle devrait permettre une utilisation de l'énergie solaire concentrée avec des rendements de puissance qui peuvent dépasser les 50 % (Températures atteintes à 1500 et 3000°C), parmi ces applications : les fours solaires.

Chapitre V

Modélisation et simulation

1- Introduction

Après avoir développé dans les chapitres précédents les notions du rayonnement solaires et de sa concentration, ainsi ce que sont les conducteurs de lumières, nous avons mis au point un programme de simulation qui nous a permis d'estimer la puissance de sortie de la fibre optique solaire.

2- Energie reçue par un capteur plan

Le rayonnement global (G) reçu par un capteur (α, γ) est composé de trois rayonnements : direct (S) et diffus (D) et le rayonnement réfléchi par le sol. Ces rayonnements varient aléatoirement en fonction de la hauteur du soleil, de l'Azimut, de l'angle d'incidence, des intempéries et de l'état de visibilité de l'atmosphère.

Le calcul de ces rayonnements s'avère très compliqué. On utilise des méthodes approchées pour l'estimation.

Pour l'Algérie la méthode de PERRIN DE BRICHAMBAUT donne de bons résultats pour l'estimation de l'énergie incidente. [2]

[3A]

2-1 L'énergie instantanée

Les puissances du rayonnement direct (E_s), diffus (E_D) et global (E_G) reçues par un capteur (α, γ) incliné de β par rapport au plan horizontal sont données par les relations suivantes : [2]

[3A]

$$\begin{cases} E_s = A \cos i e^{B \sin(h+2)} \\ E_D = \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) D_H + \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) a^* G_H \text{ avec } \begin{cases} D_H = A' (\sinh)^{0,4} \\ G_H = A'' (\sinh)^{0,4} \end{cases} \\ E_G = E_s + E_D \end{cases}$$

(V.1)

$$[E_s] = [E_D] = [E_G] = W/m^2$$

a^* étant l'albedo du sol (coefficient de réflexion du sol)

$$a^* = \begin{cases} 0,9 \text{ à } 0,8 & \text{neige} \\ 0,8 \text{ à } 0,4 & \text{sol clair} \\ 0,4 \text{ à } 0,2 & \text{verdure} \end{cases}$$

Pour l'émulsion $a^*_{\text{moy}} = 0,2$

A, B, A', A'', B'', sont des constantes qui dépendent de l'état de l'atmosphère [1]

Etat de l'atmosphère	A	B	A'	A''	B''
Ciel bleu foncé	1300	6	87	1150	1,15
Ciel bleu clair	1230	4	125	1080	1,22
Ciel bleu laiteux	1200	2,5	187	990	1,25

Tableau - V.1 - Les constantes caractérisant l'état de l'atmosphère

2-2 L'énergie journalière

L'énergie journalière reçue par un capteur (α, γ) s'obtient par l'intégration des formules de E_s, E_D, E_g sur toute la durée du jour par un ciel clair :

$$E_{js} = \int_{H_C'}^{H_L'} E_s dH \quad E_{jd} = \int_{H_C'}^{H_L'} E_D dH \quad E_{jg} = \int_{H_C'}^{H_L'} E_g dH \quad (V.2)$$

L'intégration tout au long de la journée ne fournit pas une bonne valeur car il est difficile de maîtriser correctement les intermédiaires.

❖ Pour un plan d'orientation quelconque, l'énergie reçue dépend de la durée du jour et du nombre d'heures d'ensoleillement :

$$\left\{ \begin{array}{l} E_{js} = \int_{t_c}^{t_s} E_s dt \\ E_{jd} = \int_{t_c}^{t_s} E_D dt \\ E_{jg} = \int_{t_c}^{t_s} E_g dt \end{array} \right. \quad (V.3)$$

Pour l'estimation de l'énergie journalière incidente sur un capteur d'orientation quelconque on utilise une méthode numérique qui donne de bons résultats pour le site de Tiemcen telles que :

$$E_{js} = \frac{K}{1} \Delta T \sum E_s \quad E_{jd} = \frac{K}{1} \Delta T \sum E_D \quad E_{jg} = \frac{K}{1} \Delta T \sum E_g \quad (V.4)$$

Avec :

E : L'énergie instantanée (directe, diffuse ou globale) incidente sur le capteur.

k : Le nombre d'intervalles entre le lever et le coucher du soleil sur ce capteur.

ΔT : La différence entre le temps du lever et du coucher sur le capteur.

2-3 L'énergie annuelle

L'énergie annuelle reçue par un capteur d'orientation quelconque est donnée par la somme des énergies journalières. [2] [34]

$$\left\{ \begin{array}{l} E_{as} = \sum_N^1 E_{js} \\ E_{ad} = \sum_N^1 E_{jd} \\ E_{ag} = \sum_N^1 E_{jg} \end{array} \right.$$

2-4 Estimation des énergies reçues par un capteur :

Le rayonnement reçu par un capteur (α, γ) est constitué du rayonnement solaire direct et diffus dont l'ensemble constitue le rayonnement global.

2-4-1 Estimation de l'énergie instantanée

Un programme de simulation permettant le calcul de l'énergie instantanée incidente sur différents capteurs (α, γ) pour le site de Tlemcen, par ciel moyen et pour les quatre saisons (EP - EA - SE - SH) est mis au point.

Les résultats de ce programme sont donnés par les figures suivantes :

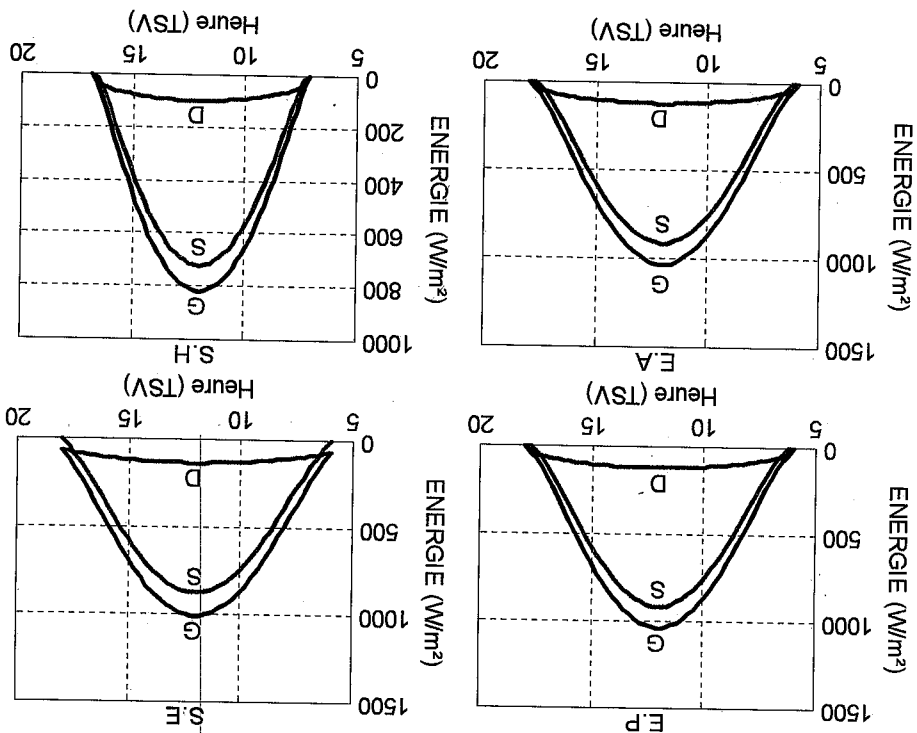


Figure - V.1 - : Estimation de l'énergie instantanée sur site de Tlemcen pour un capteur Tel

D'après ces figures on constate que le capteur (0, 90-34.56) reçoit le soleil à partir de 6h TSV pour (EP-EA) et à partir de 7h TSV environ pour SH.
L'énergie instantanée incidente sur ce capteur pour le site de Tlemcen est presque la même pour (EP-EA), elle est maximale à 12h est égale à 1000 W/m².

2-4-2 Estimation de l'énergie journalière

Pour l'estimation de l'énergie journalière reçue par un capteur d'orientation quelconque nous avons appliqué une méthode numérique donnant de bons résultats pour le site de Tlemcen.
Cette méthode est générale, elle peut être appliquée pour n'importe quel capteur placé en n'importe quel lieu de la terre et d'orientation quelconque.
La figure suivante représente la variation de l'énergie journalière durant toute l'année pour différentes inclinaisons d'un capteur (0, γ) :

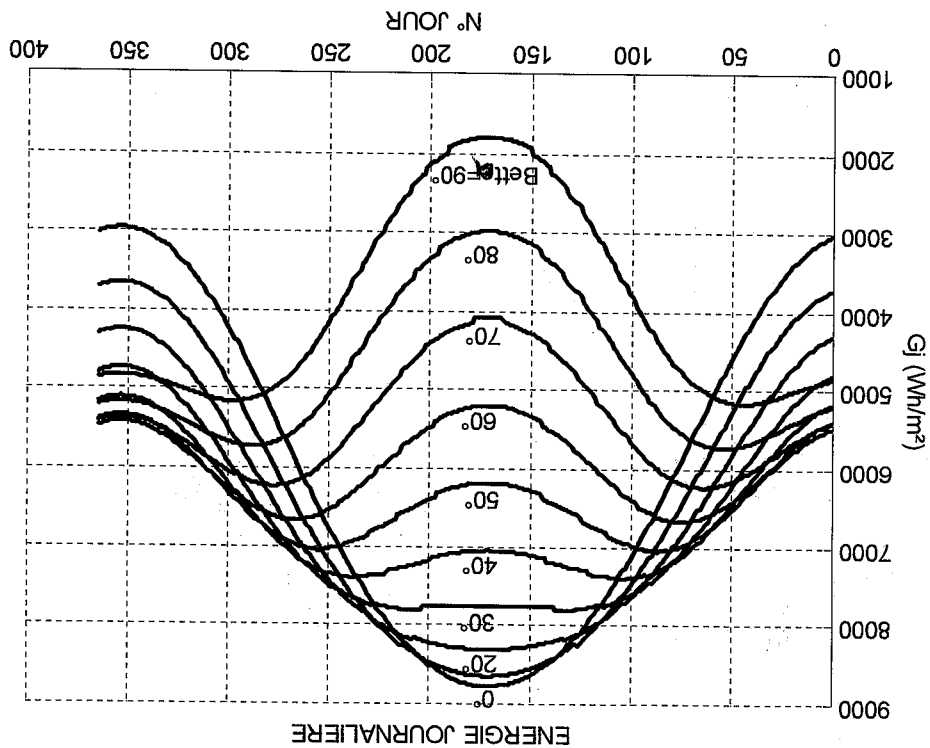


Figure - V.2 - : Estimation des énergies pour différentes orientations des capteurs au site de Tlemcen

A partir de cette courbe on constate que l'énergie journalière est maximale pour le capteur (0, 90) et minimale pour le capteur (0, 0) au Solstice été, tel que :

$$G_j(\text{max}) \approx 9000 \text{ Wh/m}^2. \text{ Et } G_j(\text{min}) \approx 2000 \text{ Wh/m}^2.$$

L'énergie journalière incidente sur le capteur TEL pour le site de Tlemcen aux

(EA-EP), SE et SH, est donnée par le tableau suivant :

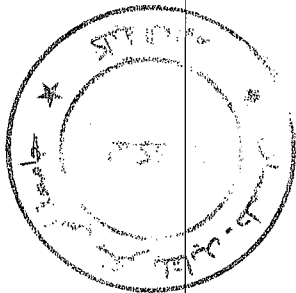
	EA-EP	SE	SH
E_{jg} (Wh/m ²)	7330.7	7567.9	4980.9
E_{js} (Wh/m ²)	6221.9	6260.2	4245.6
E_{jd} (Wh/m ²)	1108.8	1307.7	735.3

Tableau - V.2- L'énergie journalière incidente sur le capteur TFL sur le site de Tlemcen

2-4-3 Estimation de l'énergie annuelle

L'énergie annuelle reçue par un capteur d'orientation quelconque est déterminée par un programme de simulation en faisant la somme des énergies journalières pour les différents états de ciel sur le site de Tlemcen :

$$\left\{ \begin{array}{l} E_{aG} = \sum_{j=1}^N E_{jG} \\ E_{aD} = \sum_{j=1}^N E_{jD} \\ E_{aS} = \sum_{j=1}^N E_{jS} \end{array} \right.$$



(V.6)

L'orientation face au Sud sert à capter le maximum d'énergie solaire le long de l'année. La figure suivante présente la variation de l'énergie annuelle sur le site de Tlemcen. Pour un capteur (α, γ) orienté au plein sud avec différentes inclinaisons :

Ce programme de simulation permet aussi l'optimisation de α et γ pour l'obtention des valeurs maximales de E_{as} , E_{ag} et E_{ad} . Les résultats d'optimisation d'un capteur Sud obtenus pour le site de Tiemcen sont :

- ❖ Le maximum annuel de direct :
 $E_{as}(\max) = 2.0690 \cdot 10^6 \text{ Wh/m}^2$ pour $\begin{cases} \alpha = 0^\circ \\ \gamma = (90 - 30)^\circ \end{cases}$
- ❖ Le maximum annuel du diffus :
 $E_{ad}(\max) = 3.8897 \cdot 10^5 \text{ Wh/m}^2$ pour $\begin{cases} \alpha = 0^\circ \\ \gamma = (90 - 7)^\circ \end{cases}$
- ❖ Le maximum annuel du global :
 $E_{ag}(\max) = 2.4516 \cdot 10^5 \text{ Wh/m}^2$ pour $\begin{cases} \alpha = 0^\circ \\ \gamma = (90 - 30)^\circ \end{cases}$

Figure - V.3- L'énergie annuelle incidente sur un capteur quelconque sur le site de Tiemcen (ciel bleu clair).

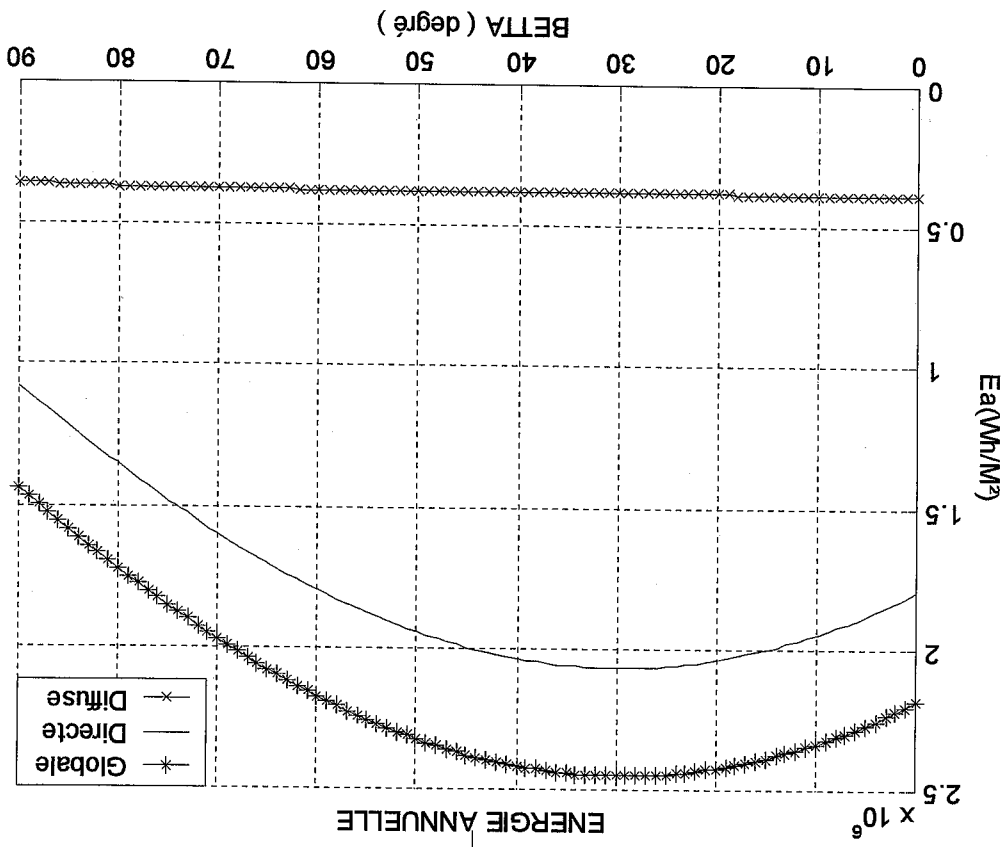
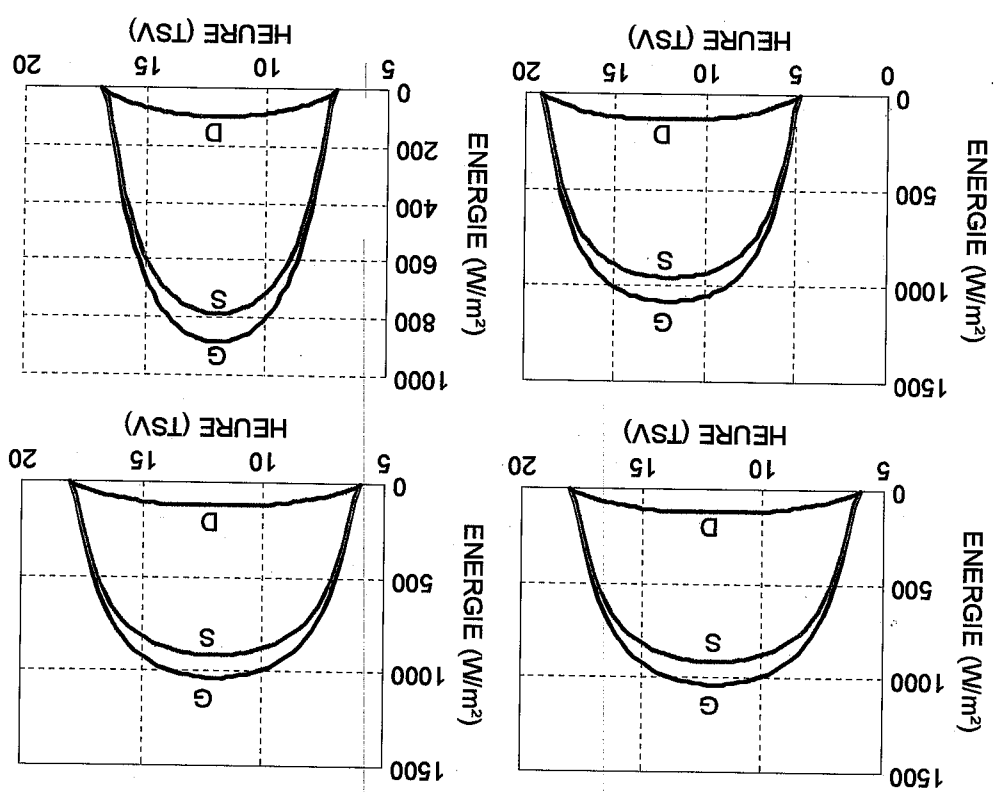


Figure-V-4 : Estimation de l'énergie instantanée pour un capteur



Par un ciel moyen ce programme permet de simuler les énergies horaires (directe, diffuse et globale) pour un capteur qui suit le soleil à Tiemcen.

3-1 Estimation de l'énergie instantanée

3- Energies reçues par un capteur au fil du soleil

On constate que pour des énergies annuelles maximales (globale et directe), l'inclinaison optimale d'un capteur sur le site de Tiemcen est obtenue pour une orientation face au sud, d'inclinaison $\beta = \phi - 5^\circ$ au lieu de $\beta = \phi$ trouvé dans la littérature solaire.

Ce programme nous permet d'estimer les énergies incidentes sur ce capteur et d'optimiser cette énergie.

Nous avons mis au point un programme de simulation qui nous a permis de tracer les rayons solaires incidents sur un capteur d'orientation quelconque et placé en n'importe quel lieu de la terre.

respectivement par :

- ❖ Energie annuelle globale : $E_{aG} = 1.73332 \cdot 10^6 \text{ Wh/m}^2$
- ❖ Energie annuelle directe : $E_{aS} = 1.3885 \cdot 10^6 \text{ Wh/m}^2$
- ❖ Energie annuelle diffuse : $E_{aD} = 0.3447 \cdot 10^6 \text{ Wh/m}^2$

Pour un capteur sud ($\alpha = 0, \gamma = 90^\circ$), les valeurs de E_{aS} , E_{aG} et E_{aD} sont données

D'après les courbes représentatives de la variation de l'énergie en fonction du temps pour les quatre saisons (SH-EP-EA-SE) à un ciel moyen et pour un capteur qui suit le soleil, on constate que l'énergie est à peu près constante durant toute la journée, contrairement pour le capteur TEL telle que l'énergie croît graduellement puis décroît pour atteindre une valeur nulle correspondante au coucher du soleil.

Pour les deux plans, la valeur maximale est au S.E à 12 heures TSV, elle vaut :

Pour un plan qui suit le soleil : $G_{MAX}=1076,6 \text{ W/m}^2$

Pour un plan TEL : $G_{MAX}=1000 \text{ W/m}^2$

Ainsi le minimum de puissance pour les deux capteurs au S.H à 12 heures TSV, les

valeurs sont les suivantes :

Pour un plan qui suit le soleil : $G_{MIN}=883,85 \text{ W/m}^2$

Pour un plan TEL : $G_{MIN}=850 \text{ W/m}^2$

3-2 Estimation de l'énergie journalière

L'estimation d'énergie journalière incidente sur un capteur qui suit le soleil pour le site de Tlemcen donne les résultats suivants:

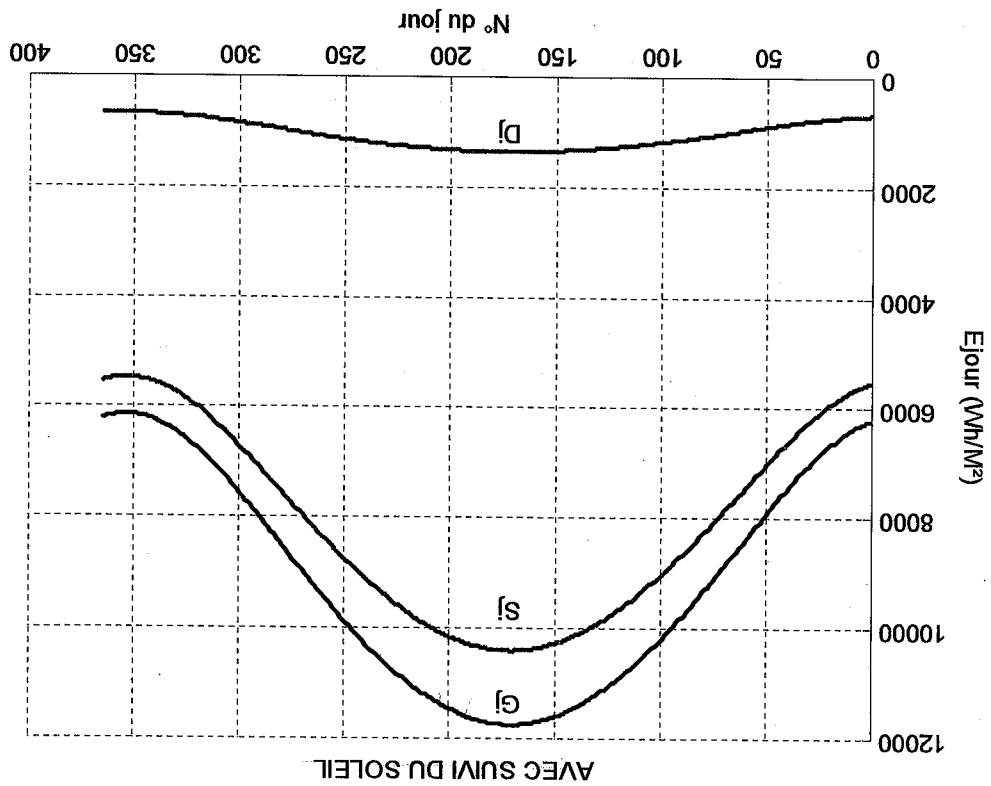


Figure -V-5- : Estimation d'énergie journalière pour le capteur qui suit le

D'après le graphe ci dessus, l'énergie journalière varie en fonction du quantième de l'année, le maximum d'énergie globale et directe correspond au SE et le minimum au SH.

Saisons	Capteur qui suit le soleil					Capteur TEL	
	E globale Wh/m ²	E direct Wh/m ²	E diffus Wh/m ²	E globale Wh/m ²	E direct Wh/m ²	E diffus Wh/m ²	
EP-EA	9335	8273	1062	7229	6138.4	1090.6	
SE	11743	10399	1344	7469.3	6159.7	1309.6	
SH	6125	5451	675	4911.7	4188.6	723.1	

Tableau - V.3- : Estimation d'énergie journalière pour les deux capteurs

L'énergie incidente sur un capteur qui suit le soleil varie à chaque instant de la journée et de l'année. Le maximum d'énergie journalière vaut: 11743Wh/m² correspond au S.E et le minimum vaut: 6125.4Wh/m² correspond au S.H. On constate que cette énergie est quasi constante sur chaque journée de l'année.

3-3 Estimation de l'énergie annuelle incidente

La connaissance de l'énergie annuelle permet un bon dimensionnement du système.

Le programme de simulation de l'énergie annuelle pour un capteur au fil du soleil donne les résultats suivants :

- ❖ L'énergie annuelle directe : $E_s = 2.956 \cdot 10^6 \text{ Wh/m}^2$
- ❖ L'énergie annuelle diffuse : $E_d = 0.377 \cdot 10^6 \text{ Wh/m}^2$
- ❖ L'énergie annuelle globale : $E_g = 3.334 \cdot 10^6 \text{ Wh/m}^2$

4- Application aux systèmes à concentrations

4-1 Energie incidente sur le concentrateur

Dans les systèmes à forte concentration, seul le rayonnement direct est concentré.

4-1-1 Estimation de l'énergie instantanée pour un concentrateur qui suit le soleil

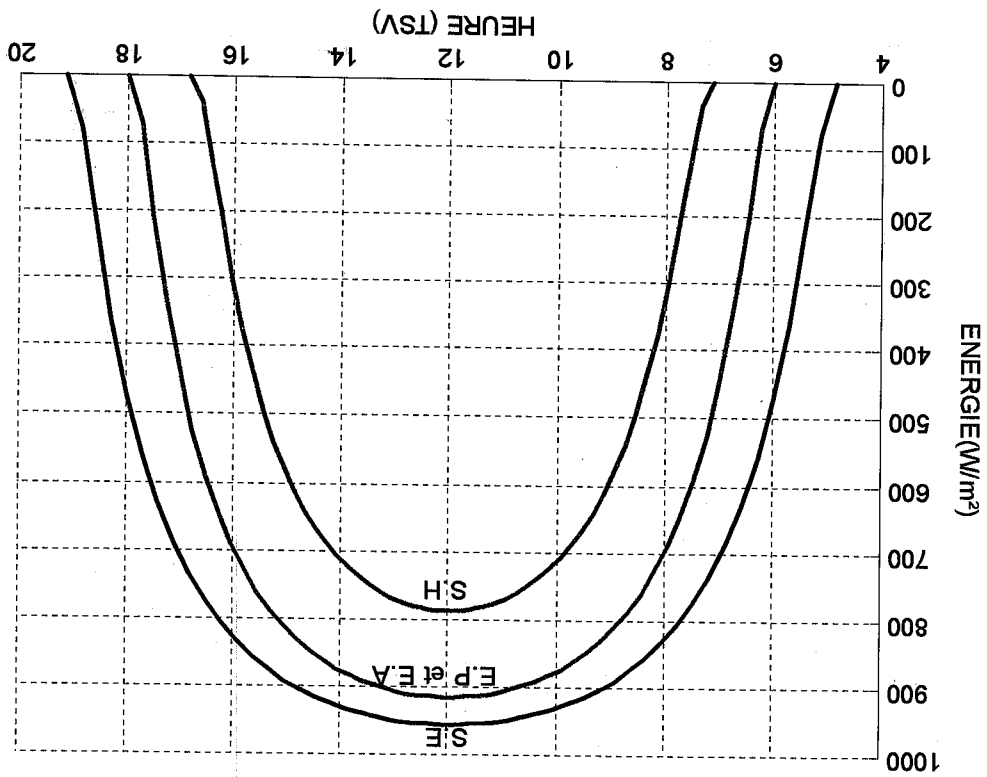


Figure - V.6 : Energie instantanée direct sur le concentrateur pour les quatre saisons (Site de Tlemcen)

La figure (V.6) nous illustre la variation de l'énergie instantanée incidente sur un concentrateur qui suit le soleil. Le maximum est à 12 TSV donné par le tableau suivant :

	Energie (W/m ²)
S.H	786.3352
E.P et E.A	914.1620
S.E	954.7591

Tableau - V.4 - Le maximum d'énergie instantanée directe incidente sur le concentrateur qui suit le soleil.

La Valeur moyenne annuelle est obtenue pour les Solstices elle varie d'environ 9 % entre les Solstices.

4-1-2 Estimation de l'énergie journalière pour un concentrateur qui suit le soleil

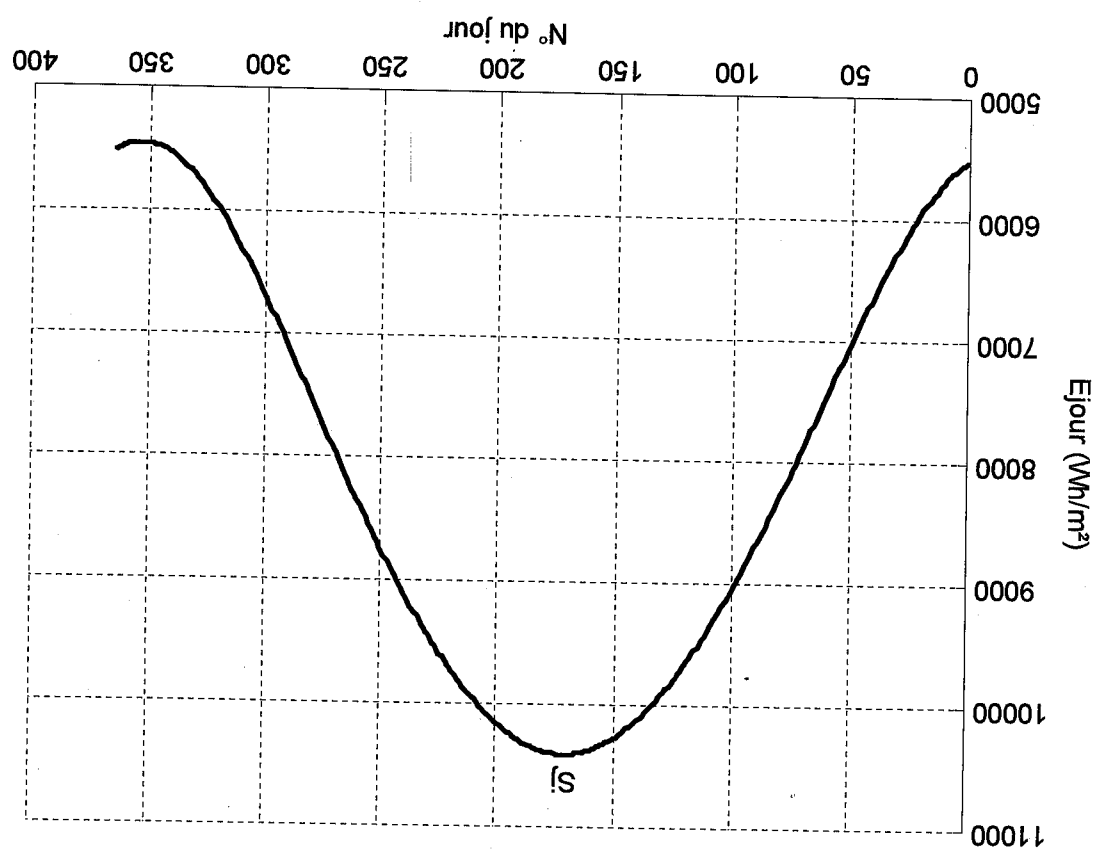


Figure - V.7- :Energie journalière directe sur un concentrateur (site de Tiemcen)

La figure (V.7) montre la variation de l'énergie journalière incidente sur le concentrateur durant toute l'année. On reçoit le maximum au solstice été ($N=171$), $S_{\text{Max}} = 10399 \text{ Wh/m}^2$

4-2 L'énergie concentrée à l'entrée de la fibre optique solaire (Q.S.F1000)

Nous étudions la variation des énergies à l'entrée de la fibre optique aux équinoxes. Nous utilisons pour notre étude :

- Un miroir parabolique qui a les caractéristiques géométriques suivantes : $f = 11 \text{ cm}$ et $R_c = 38,79 \text{ mm}$, de surface réfléchissante fabriquée en Argent.

➤ Une fibre optique Q.S.F 1000, elle a un diamètre $d = 1 \text{ mm}$, l'atténuation moyenne du cœur sur l'ensemble du spectre solaire est : $\tau = 2 \cdot 10^{-2} \text{ dB/m}$. La longueur de la fibre est $l = 5 \text{ m}$.

Le coefficient moyen C_t relatif à la tache image s'écrit :

$$(V.7) \quad C_t = \frac{P_0}{P_m} = \frac{4\epsilon_0^2}{\sin^2(2\theta_0)}$$

avec :

P_0 : Puissance reçue sur la tache du foyer du concentrateur.
 P_m : Puissance incidente sur le concentrateur.

ϵ_0 : est égal à $4,654 \cdot 10^{-3} \text{ rd}$.

θ_0 : L'ouverture du concentrateur.

$$\Delta P = \frac{P}{P_0 - P_f} = \frac{P}{P_0}$$

(V.8)

avec : P_f : Puissance à l'entrée de la fibre.

$$\Delta P = \frac{P}{P_0 - P_f} = 1 - \frac{P_f}{P_0} = 1 - \gamma^2 \cos^4 \frac{\theta_0}{2}$$

(V.9)

$$P_f = P_0 \gamma^2 \cos^4 \frac{\theta_0}{2}$$

(V.10)

$$P_f = C_t P_m \gamma^2 \cos^4 \frac{\theta_0}{2}$$

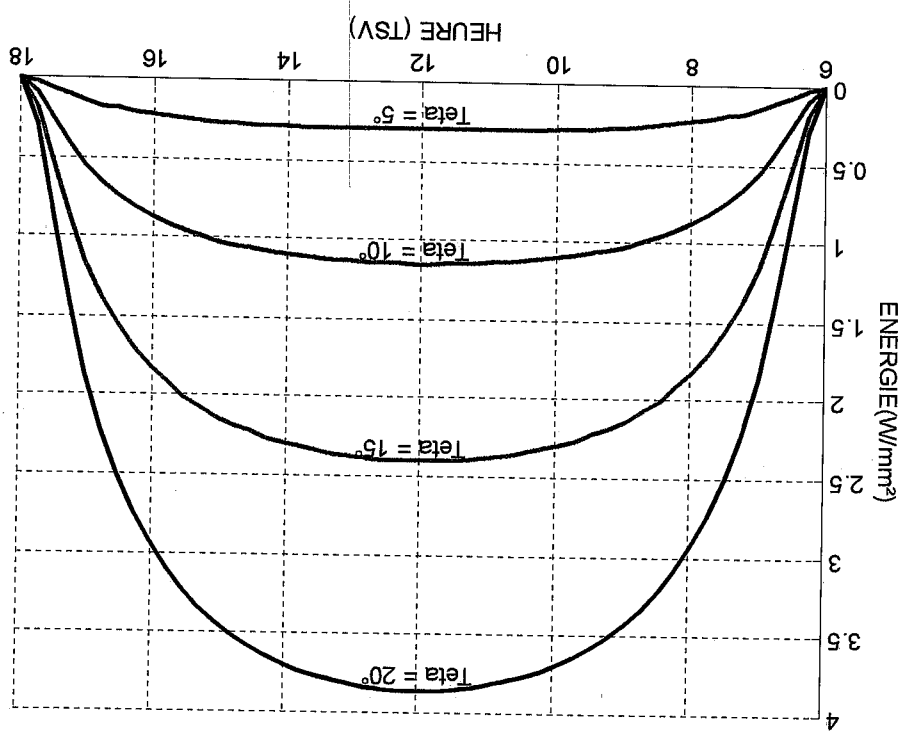
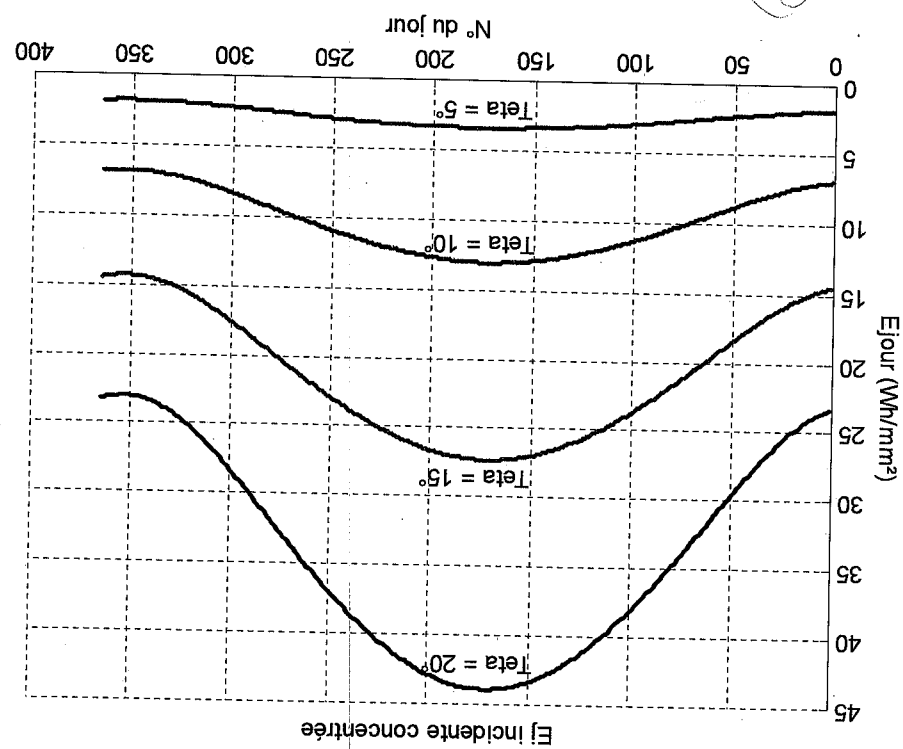
(V.11)

$$P_f = \frac{4\epsilon_0^2}{\sin^2(2\theta_0)} P_m \gamma^2 \cos^4 \frac{\theta_0}{2}$$

(V.12)

101

Figure -V.9- : Energie journalière à l'entrée de la fibre pour différentes ouvertures (site de Tiemcen)



Les figures (V.8) et (V.9) confirment l'influence de l'ouverture du concentrateur sur l'estimation d'énergie instantanée et journalière tracée pour les équinoxes.

4-3 Energie de sortie de la fibre optique

On se limitant aux conditions suivantes

➤ $\theta = 20^\circ$

➤ Un rendement de 75% est obtenu en tenant compte des atténuations suivantes :

- Pertes du Miroir : 8 % ($p_M=92\%$). Fabriqué en Argent.
- Pertes par Réflexion sur les extrémités de la fibre : 2 (3.5) % ($p_F=93\%$).
- Pertes en Lignes : 10 % ($I=90\%$).
- Pertes Interface Fibre - Concentrateur 0 % ($\eta=1$).

La puissance transportée par une fibre de longueur l est donnée par l'expression

suivante :

$$P(l) = P(0) \exp(-0,1 \tau l)$$

(V.13)

Avec :

$P(l)$: puissance de sortie de la fibre.

$P(0)$: Puissance à l'entrée de la fibre.

τ : L'atténuation moyenne du cœur sur l'ensemble du spectre solaire.

Le terme $\exp(-0,1 \tau l) = 0,99$ pour $l = 5m$ et $\tau = 2.10^{-2}$ dB/m.

103

Figure -V.11- : Energies journalières de sortie d'une fibre de longueur $l = 5m$

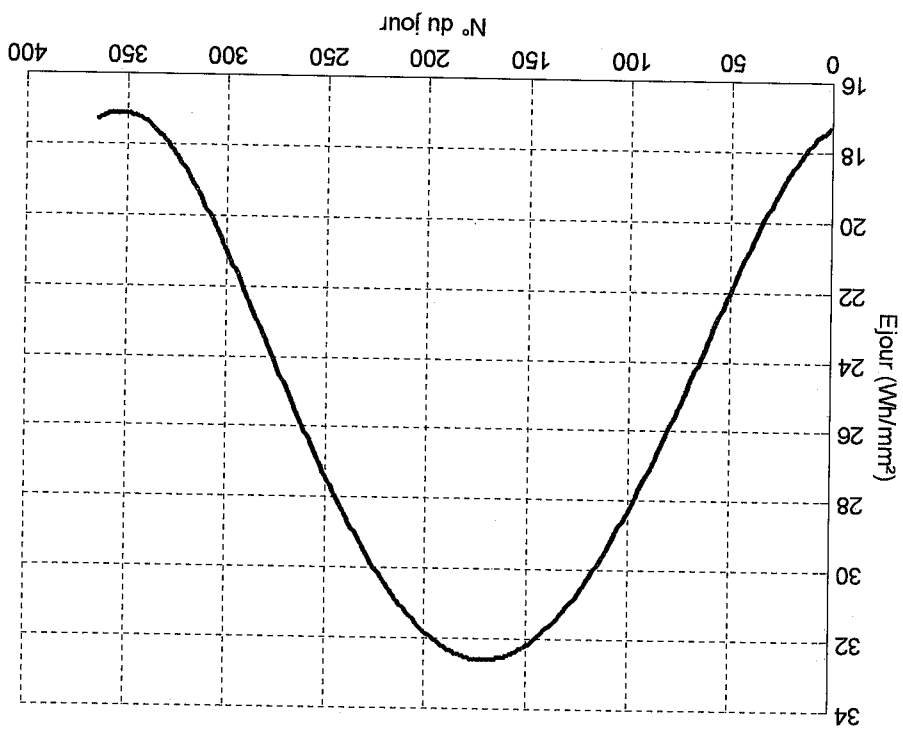
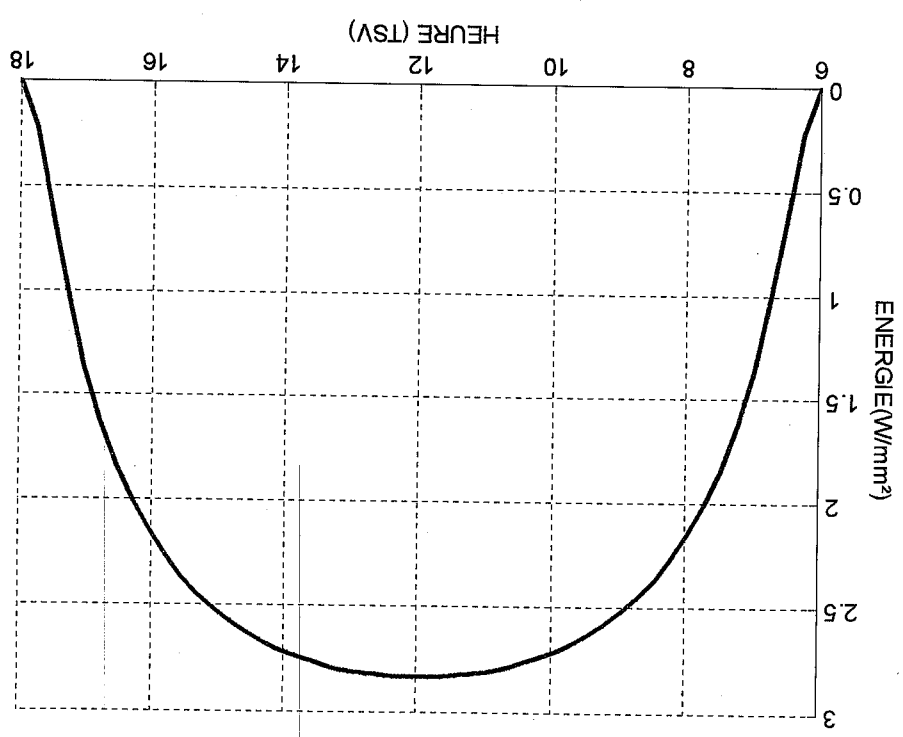


Figure -V.10- : Energies instantanées de sortie d'une fibre de longueur $l = 5m$



Ces deux figures permettent la détermination de la puissance de sortie d'une fibre solaire de 5 mètres de longueur.

L'énergie instantanée est maximale à 12 TSV elle vaut $2,86 \text{ W/mm}^2$.

L'énergie journalière est maximale aux équinoxes elle est égale à $32,59 \text{ Wh/mm}^2$.

Les figures traduisent l'influence du rendement du système et de l'atténuation de la fibre sur sa puissance de sortie.

Ps (W)	5°	10°	15°	20°
L = 5m	0,2215	0,8494	1,7808	2,8652
L = 10m	0.2193	0.8409	1.7631	2.8367

Tableau -V.5- : Puissance de sortie de la fibre aux équinoxes pour deux longueurs différentes

Pour une longueur $l = 5\text{m}$

Ps (W)	5°	10°	15°	20°
Miroir en Argent	0,2215	0,8494	1,7808	2,8652
Miroir en Aluminium	0.1669	0.6399	1.3417	2.1587

Tableau -V.6- : Puissance de sortie de la fibre aux équinoxes pour deux miroirs différents

Nous traçons la puissance de sortie de la fibre en fonction de différentes longueurs de la fibre.

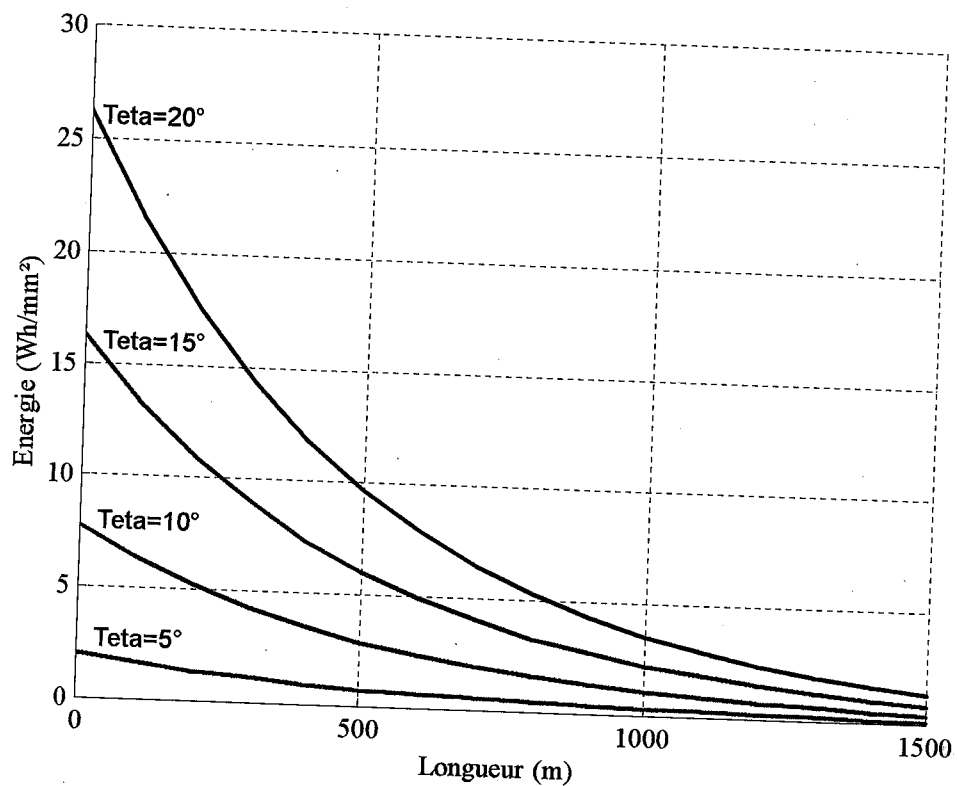


Figure-V.12- : Variation de l'énergie journalière aux Equinoxes en fonction des différentes longueurs de la fibre.

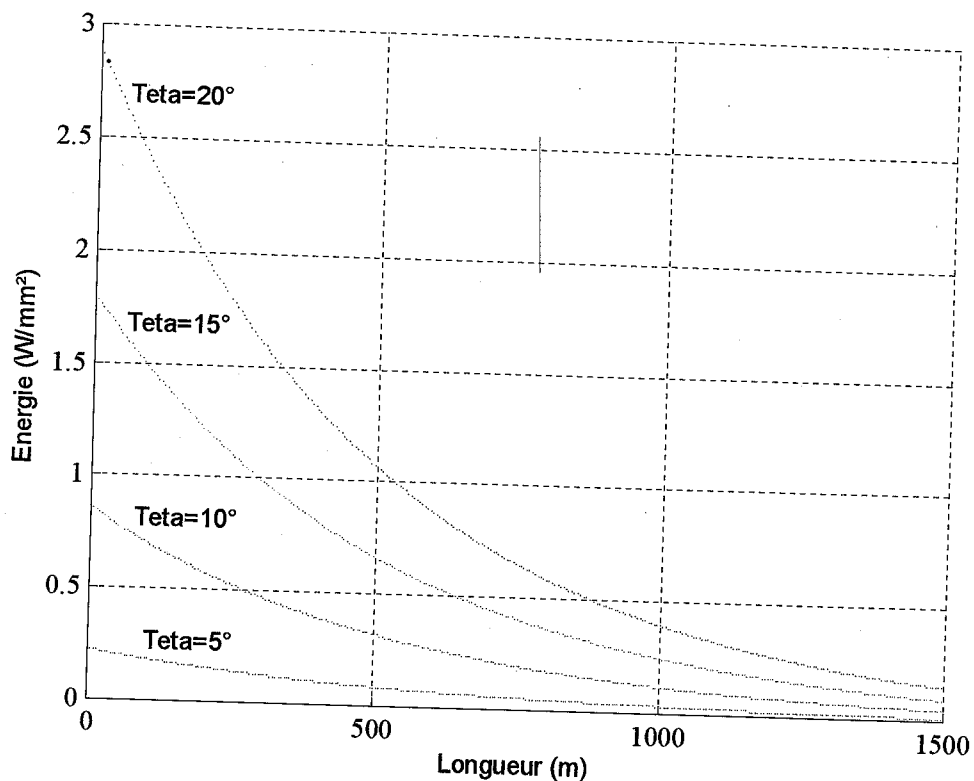


Figure -V.13- : Variation de l'énergie instantanée aux Equinoxes et à 12 TSV en fonction des différentes longueurs de la fibre.

Ces deux courbes illustrent l'influence de la longueur de la fibre. Bien que l'atténuation augmente avec la longueur de la fibre. Pour quatre ouvertures, la puissance est inversement proportionnelle à la longueur de la fibre, la puissance peut être transportée jusqu'à 1500m.

5- Conclusion

Dans ce dernier chapitre nous avons élaboré un logiciel qui permet d'estimer l'énergie incidente au fil du soleil, cette énergie se concentre sur une tache au foyer d'un miroir parabolique, L'énergie concentrée peut être transportée par une fibre optique.

Le programme de simulation réalisé détermine la puissance de sortie d'une fibre optique Q.S.F 1000. Les résultats sont comparables à celles obtenus par J.M.Cariou (résultats expérimentaux).

Ce programme est plus général, on peut estimer cette puissance durant toute l'année, en n'importe quel moment et n'importe quel lieu de la terre. Pour des fibres et des concentrateurs différents. Et tout ce travail contribue à beaucoup d'applications, la plus récente est la réalisation des fours solaires.

Conclusion générale

CONCLUSION GENERALE

L'apparition de la fibre optique en transmission et son application aux différents domaines lors de ces dernières années, n'étaient pas seulement dû à une soif de créer de nouveaux systèmes mais aux caractéristiques remarquables que représentent ces conducteurs de lumière.

De nombreux champs d'applications de ces conducteurs de lumière ont été abordés en littérature. Nous citons parmi les nombreuses applications :

- ❖ L'incapacité de dépôt de fil de cuivre le long des câbles électriques à cause de la sensibilité aux interférences électromagnétiques.
- ❖ Dépôt des fibres optiques dans les galeries des mines souterraines, des centrales nucléaires (dimensions et absence d'étincelles).
- ❖ Capteur de température dans les réacteurs des avions.
- ❖ Communications téléphoniques terrestres et sous-marines.
- ❖ Transport d'énergie solaire sous une forme radiative du concentrateur jusqu'aux fours solaires qui ont un impact important dans l'industrie solaire.

Notre étude nous a permis d'apprécier particulièrement cette dernière application. L'énergie solaire incidente et relativement faible, l'utilisation de la concentration permet d'augmenter la densité de puissance, et la fibre constitue un bon support pour transporter le maximum de puissance avec des faibles atténuations.

Après avoir défini la notion des fibres optiques, les contraintes physiques inhérentes à la conception, nous serons amenés à utiliser un bon concentrateur dont l'ouverture est limitée à celle du conducteur optique. Nous avons réalisé un système pour lequel l'énergie concentrée se transporte le long d'une fibre optique.

Pour déterminer l'énergie de sortie de cette fibre, nous avons réalisé un programme de simulation en utilisant le logiciel MATLAB. Le travail que nous avons mené dans cette thèse a été orienté vers l'estimation de l'énergie de sortie d'une fibre solaire et ce-ci pour une conception et optimisation des fours solaires.

- Pour Une ouverture $\theta = 20^\circ$, Un rendement de système égal à 75%, les même caractéristiques géométriques du concentrateur, nous présentons les résultats donnés par les tableaux suivants :

Ps (W)	Résultats de simulation	Résultats de J.M.Cariou
$l=5m$ P_s en Watt	2,8652	2,8
$l=15m$ P_s en Watt	2,8014	2,42

- Pour une longueur $l = 5\text{ m}$

Ps (W)	Résultats de simulation	Résultats de J.M.Cariou
Miroir en Argent	2,8652	2,8
Miroir en Aluminium	2.1587	2,25

Ce programme est général, On peut déterminer la puissance de sortie en n'importe quel lieu de la terre, à n'importe quel moment, et même en changeant le type de concentrateur et de la fibre solaire utilisée.

Tout au long de ce travail nous avons abordé les aspects physiques du transport de l'énergie solaire dans les conducteurs de lumière ainsi que l'application aux réalisations des fours solaires.

Bien qu'étant maintenant convaincus de l'intérêt de cette technique, nous restions parfaitement conscients qu'il faudra traiter le problème du prix de revient. Ce n'est qu'en franchissant cette étape que doivent devenir opérationnelles des utilisations industrielles du transport optique de l'énergie solaire concentrée.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] : Robieux J 1975 Patent 75-14582 (INPI), international classification F03g 7/02 ; 02 KX/G02b5/10.
- [2] : Kato.D and Nakamura T 1976 J.Appl. Phis. 40 4528.
- [3] : J.M.Cariou, L.Martin, J.Dugas, Advances in ceramics, vol.2 phisics of fiber optics, PP 557-563.
- [4] : Jaramillo OA ; Del Rio JA ; Huelsz G, « A thermal study of optical fibres transmitting concentrated solar energy », Journal of physics. D. Applied physics; ISSN 0022-3727; Coden Jpapbe 1999; Vol.32; No.9; PP.1000-1005; Bibl.15 ref.
- [5] : Jean-Michel Cariou, « Apport de conducteurs de lumière dans l'utilisation de l'énergie solaire concentrée », Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier de Toulouse, 1984.
- [6]: Yugami H; Yano M; Naito H; Flamant G « Concentration of fiber transmitted solar energy by CPC for solar thermal utilization », journal de physique. IV; ISSN 1115-4339; Fra;Da. 1999; Vol.9; pr3.545-pr3-549; Bibli.8 ref.
- [7] : Le site Web: <http://www.geocities.com>.
- [8] : CEI, « Spécification des capteurs à fibres optiques », document réf 86-C, septembre 1991.
- [9] : Le site Web: <http://www.opt-fibres.phys.polymtl.ca>.
- [10] : N.Baba Ahmed et M.Gadiri, « Les capteurs chimiques a fibres optiques et leurs applications », Mémoire de DES, Université de Tlemcen, 1996.
- [11] : P.Ferdinand, S.Dalbin, « Le domaine des capteurs à fibres optique », analyse bibliométrique et prospective, Rapport EDF-HP/22/88, 10 Septembre 1988.
- [12] : H.J.Arditty, « High dynamic range fiber gyro with all », Digital processing, volume 1367, San José, 1990.

- [13] : SONELGAZ, « FO Basics and AD-Lash Installation », Cornig Cable systems, 05.02.2001- 16.02.2001 in Munich.
- [14] : Le site Web: <http://www.telcite.fr>.
- [15] : UTE 93-800, « Guide pour la conception de capteurs à fibres optiques », cominussion 93/8/GE3 Capteurs à fibres optiques, Avril 1989.
- [16] : Le site Web: <http://www.perso.club-internet.fr>.
- [17] : Le site Web: <http://www.tage.ac.clermont.fr>.
- [18] : Serge Ungar, « fibres optiques, théorie et applications », 1998.
- [19] :Y. Suematsu, K.-I.IGA, « Transmissions sur fibres optiques » - Masson, 1983.
- [20] : Le site Web: <http://www.unige.ch>.
- [21] : Gunther Mahlke et Peter Gossing, « câbles à fibres optiques », septembre 1989.
- [22]: Dawei liang; Fraser Monteiro I; Fraser Monteiro ML « Fiber-Optic solar energy transmission and concentration. Euros N 1999 », solar energy materials and solar cells; ISSN 0927-0248 ; NLD ; 1998 ; Vol.54 ; No. 1-4; PP.323-331; Bibli. 6 ref.
- [23] : A.Benatiallah, « etude expérimentale d'une installation photovoltaïque de faible puissance », Thèse de Magister, Université Tlemcen 1994.
- [24] : M.Capderou, « Atlas solaire de l'Algérie », Tome I, II, III, 1986.
- [25] : Z.Khiat, « Analyse comparative de méthodes d'estimation de gisement solaire », thèse de Magister, Université de Tlemcen, 1989.
- [26] : F.Benyarou, « Conversion des énergies », document de cours, Université de Tlemcen, 1999/2000.
- [27] : M.Drif, « Simulation des installations photovoltaïques », Thèse de magister U.S.T.H.B 1992.
- [28] : Système à concentrations, Doc Cours. J.M. Chassériau Univ Paris
- [29] : Le site Web: <http://www.mapage.noos.fr>.
- [30] : Hetch J 1990 Understanding fibre optics (USA : Howard Sams).

[31] : C.Perrin De Brichambeaut « Le gisement solaire de l'Algérie », Tec et Doc 1982.

[32] : Rachmat R; Horibe K, « Solar heat collection characteristics of a fiber reinforced plastic drying house », transactions of the ASAE ; ISSN 0001-2351 ; Coden Taaej 1999; USA ; Vol.42 ; No.1 ; PP. 149-157; Bibl. 26 ref.

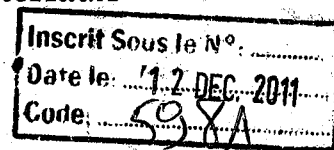
République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur
Et de la Recherche Scientifique.

UNIVERSITE ABOU BAKR BELKAÏD
FACULTE DES SCIENCES
DEPARTEMENT DE PHYSIQUE

THÈSE : Présentée à L'UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAÏD
Pour l'obtention du diplôme de
MAGISTER

Spécialité : Physique Energétique et Matériaux

TITRE :



ETUDE PAR C.A.O DE L'ISOLATION
THERMIQUE D'UNE MAISON SOLAIRE
CALCUL THERMIQUE ET ECONOMIQUE

Présentée par :

MIRAOUI Abdelghani

Soutenue le: 16-06-2003

Devant la commission d'examen composé de :

Président : M^r N. CHAABANE SARI

Professeur univ. Tlemcen

Directeur de thèse : M^r B. BENYUCEF

Professeur univ. Tlemcen

Examineurs : M^r S. KHALDI

M.C univ. Tlemcen

M^r M. LEMRINI

M.C univ. Tlemcen

M^r F. BENYAROU

Docteur univ. Tlemcen

Année universitaire 2002-2003

Inscrit Sous le N°:	3074
Date le:	11/12/05
Code:	

Remerciements

Avant de présenter ce travail, nous tenons à exprimer toute notre gratitude à Monsieur B. BENYOUCEF pour l'encadrement de nos travaux et les conseils judicieux qu'il n'a cessé de nous prodiguer.

Nos remerciements pour Monsieur N. CHAABANE SARI d'avoir accepté de présider le jury de cette thèse.

On remercie Messieurs les membres du jury :

S. KHALDI , M. LEMRINI et F. BENYAROU d'avoir accepté d'examiner notre thèse et de participer au jury.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à mes chères parents.

A mes sœurs et frères.

A tous mes amis.

A tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la contribution de ce travail.

SOMMAIRE

• Avant propos	3
• Introduction	4

Chapitre I : Nécessité d'isolation thermique de la maison solaire

I.1 systèmes solaires passifs et actifs	7
I.2 Chauffage solaire	8
I.2.a Chauffage solaire passif	8
I.2.b Chauffage solaire actif	11
I.3 Climatisation solaire	13
I.3.a Climatisation solaire passive	13
I.3.b Climatisation solaire active	14
I.4 Nécessité d'isolation thermique	16

Chapitre II : Matériaux d'isolation thermique

II.1 Conditions de base d'une bonne isolation thermique	19
II.2 Matériaux d'isolation thermique	19
a- produits naturels	20
b- produits minéraux	21
c- matières plastiques alvéolaires	23
d- matériaux réfléchissants	26
e- isolants complexes	26
f- briques creuses ou perforées	27
g- béton cellulaire autoclave	27

Chapitre III : Isolation thermique de la maison solaire

III.1 définition des parties à isoler de la maison solaire	29
III.2 Isolation des toitures	30

a- combles habités	31
b- combles non habités.....	31
c- Toitures-terrasses	34
III.3 Isolation des baies vitrées	36
III.4 Isolation des murs extérieurs	39
III.5 Isolation des planchers bas extérieurs	43
III.6 Ventilation et calfeutrement	45
III.7 Calorifugeage des tuyauteries	48
III.7 Isolation du capteur solaire et cuve de stockage	48
Chapitre IV : Optimisation de l'isolation thermique de la maison solaire	50
IV.1 Bilan thermique	52
IV.2 Calcul des épaisseurs des couches isolantes	58
IV.3 Calcul de coût d'isolation thermique	67
IV.4 Calcul de l'énergie économisée	68
IV.5 Evaluation économique du projet d'isolation thermique	72
Chapitre V : Conclusion et recommandations	77
Liste des figures, graphes et tableaux	79
Bibliographie	80

AVANT PROPOS

La combinaison habitation-environnement est l'un des principaux sujets traités dans le domaine de la construction.

Le calcul architectural des constructions en vue de l'impact des échanges thermiques entre le climat et les ambiances intérieures aux constructions, permet une économie sur le plan de la consommation des sources énergétiques et sur le plan budgétaire.

Pour notre domaine, les maisons solaires, l'énergie solaire est gratuite et l'économie sur le plan de la consommation des sources énergétiques n'a aucun sens, néanmoins on peut économiser l'énergie d'appoint sollicitée dans la plupart des cas, ou encore l'énergie auxiliaire nécessaire pour activer la circulation du fluide caloporteur, lorsqu'on utilise un système de chauffage actif.

De nombreuses études et recherches ont pris comme sujet le comportement des bâtiments en point de vue thermique en corrélation avec le climat et les conditions économiques.

Ce travail inclus dans ce contour, détermine l'aspect thermique, physique et dimensionnel des murs des constructions et des installations de chauffage et de climatisation de celles-ci.

Le calcul est basé sur les seuils des coefficients de transmission surfacique, qu'il ne faut en aucun cas les dépasser, pour optimiser l'isolation thermique de notre maison sur le plan énergétique et économique. Ces seuils sont décrits dans la réglementation thermique, pour différents parties à isoler de la maison et pour différents zones climatiques.

Introduction

L'isolation thermique des maisons est l'exécution d'une structure bien conçue des éléments de l'enveloppe extérieure (façades, fenêtres, portes, planchers...), de telle façon qu'ils aient la résistance thermique et une inertie thermique convenable aux pertes et aux apports de chaleur.

Pour cela, il faut établir des données optimales pour ces deux caractéristiques thermiques ou plus précisément pour les paramètres thermophysiques et dimensionnelles de ces surfaces.

En effet une maison bien isolée procure un surcroît de confort. En hiver la chaleur reste à l'intérieur, permettant d'atteindre tout le temps la température de confort ($\approx 18^{\circ}\text{C}$).

En été, la maison conserve une certaine fraîcheur, les radiations solaires s'introduisent beaucoup plus difficilement à l'intérieur.

Notre présent travail, visant à étudier le problème d'isolation thermique des constructions en Algérie, consiste à examiner les conditions climatiques et économiques algériennes.

Dans le chapitre I, on étudie les différents systèmes solaires, actifs et passifs, de chauffage et de climatisation, on déduit ainsi la nécessité d'isoler thermiquement notre maison.

Le chapitre deux définit les différents matériaux d'isolation thermique produits en Algérie ou importé, et cela après avoir précisé les conditions de base d'une bonne isolation thermique.

Dans le chapitre trois, nous proposons des solutions adéquates à l'isolation thermique de chaque partie de notre maison solaire .

Le chapitre quatre est consacré à l'optimisation de l'isolation thermique de la maison solaire sur le plan économique et énergétique.

Une conclusion porte sur le travail effectué avec quelques recommandations.

Chapitre I : Nécessité d'isolation thermique de la maison solaire

I.1) Systèmes solaires passifs et actifs

On distingue deux grandes catégories des systèmes solaires selon qu'ils font appel ou non à une énergie auxiliaire utilisée pour actionner les appareils qui captent et distribuent l'énergie solaire.

- Systèmes solaires passifs

Un système est dit passif lorsque les mouvements du fluide véhiculant l'énergie captée se produisent naturellement sans nécessité de l'utilisation d'une circulation forcée.

Ces mouvements sont généralement dues à des phénomènes de convection naturelle ayant pour origine les différences de température se produisant dans les différentes parties du système.

Ces systèmes encore moins utilisés à l'heure actuelle vont se généraliser rapidement étant donné les avantages qu'ils offrent sur le plan économique. Leur développement sera d'autant plus rapide que l'on disposera de méthodes de calcul et de conception fiables et d'utilisation facile.

Les systèmes passifs tout comme les systèmes actifs comprennent les parties suivantes : captation, stockage, restitution de l'énergie et contrôle.

La captation s'effectue généralement par des parois vitrées orientées au sud. Le stockage peut se faire soit par des parois à haute inertie spécialement conçues à cet effet ou par les éléments de la structure tels que les murs, sol, etc....

La restitution de l'énergie se fait directement à partir du stockage par convection naturelle, le contrôle est assuré soit manuellement par l'occultation nocturne des surfaces de captation, soit encore par effets d'ombres sur les murs capteurs pour minimiser la captation en été.

- Systèmes solaires actifs

On désigne par systèmes actifs les systèmes ou installations solaires où le transfert de l'énergie solaire captée s'effectue par une circulation fluide activée moyennant une pompe ou un ventilateur. De tels systèmes dépendent donc d'une source d'énergie supplémentaire, généralement l'électricité, pour leur fonctionnement.

I.2) Chauffage solaire

I.2.a Chauffage solaire passif

Il existe plusieurs variants de ce type de systèmes.

Nous exposerons ici ceux ayant déjà trouvé des applications qui paraissent avoir de l'avenir.

- Capteurs passifs

Utilisant tout l'effet de serre, les capteurs passifs se différencient que dans leur façon de s'intégrer dans l'habitat.

- **Mur trombe** : Introduit par Félix TROMBE, ce système passif est celui qui est actuellement le plus utilisé. Le principe de fonctionnement en est très simple, le flux solaire traversant la (ou les) vitres, est absorbé par une paroi verticale qui peut faire parti des éléments de structure du bâtiment. L'échauffement de l'air en contact avec cette paroi déclenche une circulation naturelle : l'air du bas de l'espace est admis par des ouvertures dans la partie inférieure du mur et revient à la salle par des ouvertures dans la partie haute. (figure I.1).

- **Gains directs**

Le système de chauffage par gains directs consiste à utiliser des ouvertures vitrées orientées au sud afin d'admettre le flux solaire directement dans l'espace chauffé. Le problème majeur qui se pose est la méthode d'éviter les surchauffes pendant les journées ensoleillées.

- Une combinaison des deux solutions précédentes donne de ce qu'on appelle un solarium possède une grande efficacité. (figure I.2).

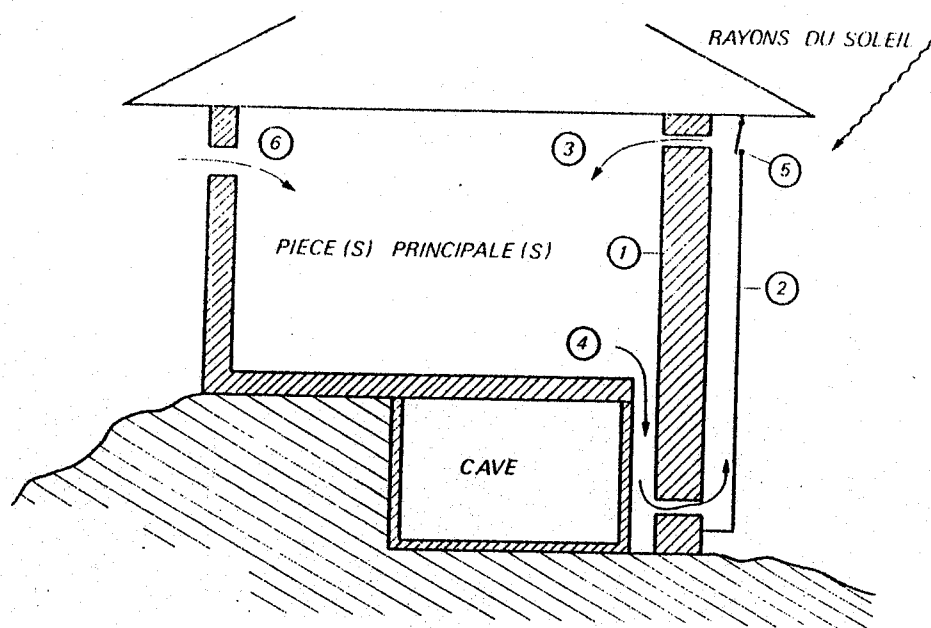


Figure I.1

- 1- Mur capteur en béton. 2- Vitrage. 3- Entrée de l'air chaud. 4- Sortie de l'air froid. 5- Volet basculant pour évacuer l'air chaud en été. 6- Prise d'air froid en été.
- Un autre système similaire au mur trombe, les murs diode thermique diffèrent par leur système de contrôle passif et par le fait que le stockage est séparé du capteur.

- Enfin les murs capteurs semi-transparents introduits par FUCHS et MC CLELLAND, permettent de combiner les deux effets de gains directs et gains différés transitant par le stockage.

Le principe est le suivant : une vitre semi-transparente est interposée entre deux vitres claires et l'espace intermédiaire rempli d'eau.

Le flux solaire incident est partiellement transmis vers l'intérieur de l'espace et partiellement absorbé par la vitre centrale. Cette énergie absorbée est stockée par chaleur sensible dans l'eau.

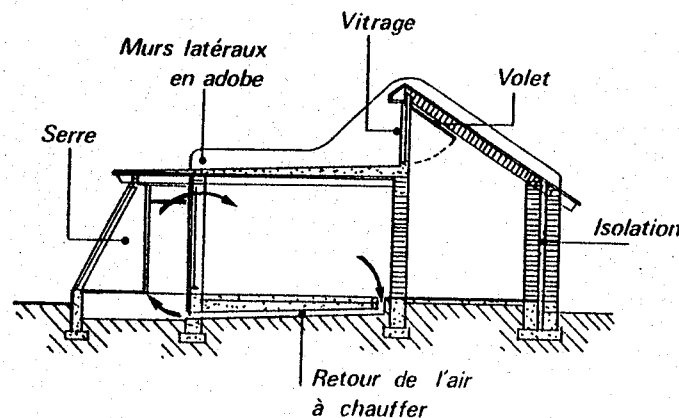


Figure I.2

- Stockage et restitution de l'énergie

On distingue trois types commodes du système passif, à savoir ;

- Stockage par chaleur sensible dans les solides

C'est le moyen le plus commun à l'heure actuelle pour stocker l'énergie dans les systèmes passifs.

- Stockage par chaleur sensible dans les liquides

Pour cela le mur étant constitué par une paroi réservoir contenant de l'eau. Le schéma thermique du mur trombe à stockage liquide est très similaire au stockage solide sauf qu'ici tout le stockage se trouve à la même température, les courants convectifs du fluide ayant tendance à uniformiser la température.

- Stockage par chaleur latente

C'est l'utilisation de la chaleur latente de changement de phase. Ainsi une plus grande densité d'énergie de stockage est possible. Seules la fusion et la solidification est utilisée. Car l'utilisation de la chaleur latente d'évaporation est incompatible avec la nécessité d'avoir une grande densité d'énergie stockée.

Ce type de stockage peut être utilisé dans les systèmes passifs ou actifs, et il trouve des applications dans le chauffage passif ou il possède les avantages suivantes :

- il permet l'utilisation des murs trombe plus minces.
- Il donne des rendements généralement supérieurs aux murs à eau ou murs solides.
- Il permet l'utilisation de grandes surfaces de captation au sud sans danger de surchauffe pendant les journées ensoleillées en hiver.

1.2.b Chauffage solaire actif

• Systèmes actifs à air

Les capteurs où le soleil chauffe de l'air ont l'avantage d'être moins lourds, moins compliqués et moins chers que les capteurs à eau.

Contrairement à ces dernières, ils ne présentent pas de problèmes de corrosion ou d'entartrage, et les fuites y sont moins gênantes.

Par contre, ils n'ont que de modestes performances par suite de la faible capacité thermique de l'air ($0,00035 \text{ Kwh.K}^{-1}.\text{m}^3$).

L'air chaud y est véhiculé par des pompes ou des ventilateurs.(figure I.3)

- Systèmes actifs à eau

La captation s'effectue souvent sur la toiture de la maison. L'énergie solaire assure le chauffage à basse température par planchers chauffants.

L'inclinaison de la toiture doit être adaptée à la captation de l'énergie solaire.

La figure (I .4) montre le principe de ce type d'installations.

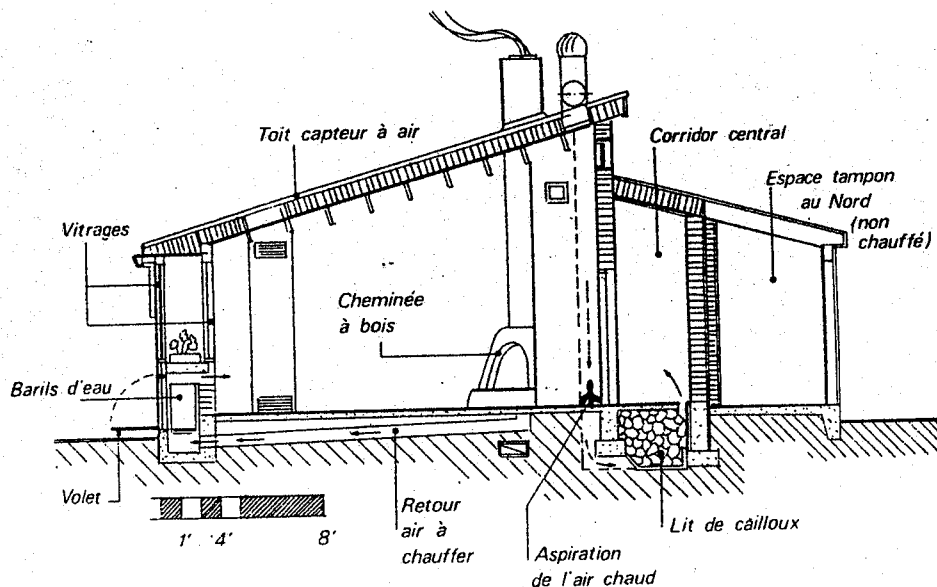


Figure I.3

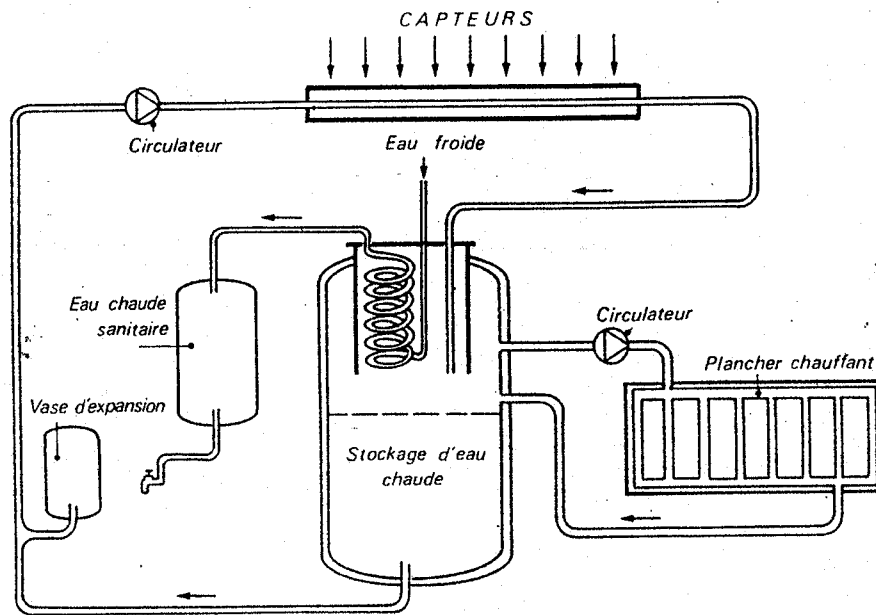


Figure I.4

- Systèmes complexes

On utilise l'eau et l'air à la fois. L'eau, qui ruisselait derrière une vitre sur un toit métallique, est stockée dans une citerne entourée de plusieurs tonnes de cailloux. Pour chauffer la maison, on pompait à travers les cailloux l'air chauffé par les déperditions de la citerne.

I.3 Climatisation solaire

I.3.a Climatisation solaire passive

La climatisation solaire passive est basée sur l'effet de serre inverse encore appelé réfrigération radiative.

Ce phénomène reste encore relativement peu utilisé et peu de réalisations pratiques dans l'habitat existent à ce jour. Les difficultés principalement d'ordre technologique retardent l'utilisation de cette méthode de climatisation. On se

limitons ici à exposer le principe général de la climatisation passive par effet de serre inverse.

La réfrigération radiative est basée sur le fait que l'énergie rayonnée par un ciel clair en l'absence de soleil est inférieure à celle rayonnée par un corps noir à la température ambiante. C'est ce phénomène qui est responsable du refroidissement nocturne et des gelées observées après les nuits claires même lorsque les températures ambiantes sont supérieures à 0 °C. Cependant on peut construire un radiateur basée sur ce principe.

La fenêtre ou écran est en général constituée par un film de matériau transparent dans la bande infrarouge permettant ainsi les échanges radiatifs entre le radiateur et le ciel tout en limitant les échanges par convection. La présence de cette écran offre en effet une résistance thermique supplémentaire en interposant une couche d'air entre le radiateur et l'atmosphère.

Le choix des matériaux est un élément critique pour les performances des radiateurs et c'est dans ce domaine que la recherche actuelle est très active. CATALONOTTI et AL ont développé un radiateur dont l'écran consiste en un film de polyéthylène de 10 microns d'épaisseur. Le radiateur consistait en un film de TEDLAR de 12,5 microns d'épaisseur sur laquelle on fait déposer un film d'aluminium. Les puissances rayonnées de nuit par ce radiateur est de l'ordre de 50 à 60 W/m².

Testé de jour, le radiateur perd une puissance voisine de 20 W/m² lorsqu'il est placé à l'ombre.

I.3.b Climatisation solaire active

L'énergie solaire est relativement mieux adapté au refroidissement de l'air qu'au chauffage ; en effet, la variation saisonnière du flux solaire est en phase avec la température moyenne de l'atmosphère et il en est de même pour le cycle

journalier. Les valeurs maximales du flux concordent avec les besoins de climatisation dans les régions chaudes.

Cependant, techniquement, les systèmes de climatisation solaire n'ont pas encore atteint le même degré de développement que les systèmes de chauffage. Deux cycles thermodynamiques fermés, parmi plusieurs, sont actuellement adaptés à la climatisation solaire.

- Cycle de refroidissement par compression de vapeur

C'est le cycle le plus employé dans les techniques traditionnelles. On définit le coefficient de performance COP de la machine

$$COP = \frac{\text{Energie recherchée}}{\text{coût de cette énergie}}$$

Pour notre cas, où le but est d'extraire une quantité de chaleur Q_f à la source froide, on a :

$$COP = \frac{\theta_f}{W}$$

Et lorsque le but recherché est d'apporter une quantité de chaleur Q_c à la source chaude :

$$COP = \frac{|Q_c|}{W}$$

Pour faire fonctionner une machine de ce type, il faut un apport de travail extérieur au système W . Ce travail peut être fourni par une machine thermique utilisant l'énergie solaire comme source chaude.

- Cycle de réfrigération par absorption

Dans les techniques traditionnelles de réfrigération, ce type de machine est généralement réservé aux applications où de grandes puissances sont nécessaires. Récemment des machines de petite puissance ont été développées en vue de leur utilisation des systèmes solaires.

Ce cycle ne diffère du cycle par compression de vapeur que par la façon dont on comprime la vapeur.

Dans ce cycle, on dilue la vapeur dans un autre liquide appelé absorbeur. Cette transformation est exothermique et une certaine quantité de chaleur Q_p est ainsi libérée. On comprime la solution concentrée jusqu'à l'étage haute pression, en passant par l'économiseur.

Dans le générateur, la vapeur à haute pression est libérée moyennant une certaine quantité de chaleur Q_s . La vapeur du fluide frigorigène passe ainsi dans le condenseur, le reste du cycle étant le même que dans le cas précédent.

A l'heure actuelle, deux couples de fluides sont utilisés :

- fluide frigorigène : ammoniac NH_3 , absorbeur eau H_2O
- fluide frigorigène eau H_2O , absorbeur : Bromure de lithium $LiBr$

I.4 Nécessité d'isolation thermique

Que se soit en chauffage ou en climatisation solaire passive ou active, il y a une quantité de chaleur qui se trouve à l'intérieur du local dans le cas du chauffage ou à l'extérieur de la maison dans le cas du climatisation qu'il faut l'isoler de l'autre milieu.

En effet, le mur laisse s'échapper la chaleur et cela d'autant plus facilement qu'il est de faible épaisseur ou réalisé en matériau doté d'une mauvaise résistance thermique.

D'où la nécessité de placer dans tels murs des couches en matériaux isolants de caractéristiques et de dimensions bien choisies voire optimisées. Finalement, une maison, un appartement, bien isolés procurent un surcroît de confort. En hiver la chaleur reste à l'intérieur, l'installation solaire est moins chère et le chauffage d'appoint moins sollicité absorbe une quantité inférieure de sources énergétiques.

En été, la maison conserve une certaine fraîcheur, les radiations s'introduisent beaucoup plus difficilement à l'intérieur.

II.1 Conditions de base d'une bonne isolation thermique

Pour qu'une isolation garde son efficacité à établir un confort quelle que soit la rigueur du climat extérieur, il faut que la maison à isoler soit saine Cette condition n'est réalisée que :

- Lorsque le bâtiment est exempt d'humidité provenant de l'extérieur, pour cela il faut placer des pare-vapeur dans les murs qui ne sont pas suffisamment étanche.
- Lorsque l'intérieur est correctement aéré, on met pour cela des orifices percés dans les murs en différents endroits du bâtiment.

Encore faut il que l'isolant thermique doit résister aux contraintes mécaniques et à la dilatation thermique qui peuvent être des causes de dégâts, et qu'il soit incombustible.

Ajoutons enfin que le mur doit comporté une couche d'air permettant son assèchement, et qu'il doit respirer pour évacuer l'humidité provenant des condensations intérieures.

II.2 Matériaux d'isolation thermique

Un isolant thermique a pour fonction principale de diminuer le transfert de chaleur entre deux ambiances.

Le vide est un isolant parfait. Cependant il est très coûteux. Pour avoir un vide poussé dans un intervalle bien défini du mur, il faut un appareillage sophistiqué et des techniques très puissantes.

L'air immobile est le meilleur isolant, et c'est à lui que les différents matériaux isolant existants au marché font appel.

a/ Produits naturels

- FIBRAGGLOS

Définition : matériau obtenu par compression de fibres de bois de résineux sélectionnées, soigneusement minéralisés et enrobés de ciment ou de plâtre.

Conductivité thermique : pour une masse volumique de 400 à 500 Kg/m³
 $\lambda = 0,14 \text{ W/m.}^\circ\text{C.}$

Résistance à l'humidité : Moyennement imperméable à l'humidité.

Résistance au feu : Bonne résistance à la chaleur, peut être utilisé comme matériau coupe-feu ; réaction au feu : non inflammable.

Résistance mécanique : ces produits présentent une grande rigidité et une bonne résistance à l'écrasement.

Résistance aux agents biologiques : ils sont imputrescibles et ne sont attaqués ni par les rongeurs, ni par les insectes.

Isolation acoustique : ils sont de bons absorbants de sons, de fréquences moyennes ou aiguës, suivant leur mise en œuvre. Un fibragglo rendu étanche par un enduit plâtre peut dans certains cas renforcer l'isolation acoustique aux bruits aériens d'une paroi défectueuse.

- Fibres de bois

Définition : le bois qui constitue ces panneaux est haché puis défibré ; par addition d'eau, on obtient une pâte qui sera séchée pour les panneaux dits isolants et comprimée à chaud sous presse pour les panneaux durs.

Conductivité thermique : Panneaux «durs et extra-durs », 850 à 1000 Kg/m³ ;
 $\lambda = 0,18 \text{ W/m.}^\circ\text{C.}$

Panneaux «tendres » dits «isolants », 200 à 250 Kg/m³ : $\lambda = 0,05 \text{ W/m.}^\circ\text{C.}$

Résistance à l'humidité : les panneaux de qualité sont traités contre les champignons et résistent bien à l'humidité.

Résistance au feu : moyennement inflammable à partir de 16 mm d'épaisseur.

Résistance mécanique : bonne résistance aux solvants, bases et acides faibles.

- lièges

Définition : les formes irrégulières de l'écorce du chêne-liège, après avoir été broyées en granulés, calibrées et débarrassées de leurs impuretés, sont expansées généralement à la vapeur surchauffée pour obtenir le « liège aggloméré expansé pur » .

Conductivité thermique : expansé pur pour une masse volumique de 100 à 150 Kg/m³ : $\lambda = 0,043 \text{ W/m.}^\circ\text{C}$.

Résistance à l'humidité : la perméabilité à la vapeur d'eau, l'absorption et la rétention de l'humidité sont moyennes.

Résistance au feu : bonne résistance à la chaleur et ne propage pas la flamme.

Résistance mécanique : il présente une bonne résistance à l'écrasement.

Résistance aux agents biologiques : il est attaqué par les rongeurs.

Isolation acoustique : En raison de sa constitution moléculaire et de sa légèreté, le liège a une bonne faculté d'absorber les sons, et spécialement les sons aigus.

b- PRODUITS MINERAUX

- Fibres de verre ou de roche

Définition : Obtenues à partir de minéraux fondus, filées à des diamètres très faibles et agglomérées à des résines synthétiques.

Conductivité thermique : Pour une masse volumique de 20 à 200 Kg/m³ :

$\lambda = 0,041 \text{ W/m.}^\circ\text{C}$.

Résistance à l'humidité : faible perméabilité à la vapeur d'eau, leur emploi n'est donc possible, en isolation primaire, qu'avec un « pare-vapeur » très soigné et continu.

Résistance au feu : excellente résistance à la chaleur et au feu, classé non inflammable.

Résistance aux agents biologiques : elles sont chimiquement inertes, imputrescibles, ne provoquent aucune corrosion et ne favorisent pas le développement de bactéries et de moisissures.

Isolation acoustique : elles ont également des propriétés d'absorption acoustique très intéressantes, surtout dans les fréquences aiguës et moyennes et sous forme de matelas résilient pour l'isolation aux bruits d'impact.

- Vermiculite expansée

Définition : obtenue par exfoliation de paillette de vermiculite, sous l'action de la chaleur, à 850°C environ.

Conductivité thermique : Pour une masse volumique de 70 à 100 Kg/m³ :

$$\lambda = 0,042 \text{ W/m.}^{\circ}\text{C.}$$

Résistance à l'humidité : Bonne résistance à l'humidité.

Résistance au feu : Excellente résistance au feu, classée incombustible, elle ne dégage ni fumées, ni vapeurs toxiques.

Résistance aux agents biologiques : n'est attaquée ni par les rongeurs ni par les insectes.

- PERLITE EXPANSEE

Définition : la perlite est une roche volcanique qui, après avoir été broyée et sous l'effet de la chaleur, s'expande et forme une multitude de petites cellules.

Conductivité thermique : pour une masse volumique de 40 à 100 kg/m³ :

$$\lambda = 0,058 \text{ W/m.}^{\circ}\text{C.}$$

Résistance à l'humidité : faible résistance à l'humidité.

Résistance au feu : excellente résistance au feu, elle ne dégage ni fumées, ni vapeurs toxiques.

Résistance aux agents biologiques : n'est attaquée ni par les rongeurs ni par les insectes.

- MOUSSE DE VERRE

Définition : les mousses de verre sont obtenues par expansion à chaud du verre à l'aide d'un corps gazeux.

Conductivité thermique : pour une masse volumique de 120 à 180 kg/m³ :

λ = varie de 0,050 à 0,063 W/m.°C.

Résistance à l'humidité : imperméable à l'humidité.

Résistance au feu : excellente résistance au feu, est classée incombustible.

Résistance mécanique : très bonne résistance à la compression.

Résistance aux agents biologiques : parfaite résistance aux attaques des insectes, rongeurs, et imputrescible.

Isolation acoustique : peu de possibilité d'utilisation.

c-Matières plastiques alvéolaires

- POLYSTYRENE EXPANSE

Définition : il existe trois qualité de polystyrène expansé, déterminées par le mode de fabrication.

- a- Polystyrène expansé moulé : à partir de petits granulés de polystyrène, on procède à une première expansion suivie d'un ensilage, les billes obtenues sont placées dans des moules, ensuite introduction de la vapeur qui produit une seconde expansion, et les perles se soudent alors les unes aux autres.

b- Polystyrène expansé thermo-comprimé : après une première expansion, les billes sont comprimées et agglomérées à chaud en continu, ce qui lui confère une meilleure homogénéité.

c- Polystyrène expansé extrudé : identique au précédent, seule la fabrication varie. Au lieu d'agglomérer le produit, on le mousses, ce qui permet une meilleure résistance mécanique et une qualité constante.

Conductivité thermique : il existe trois classes pour le polystyrène expansé moulé : $\lambda =$ de 0,044 à 0,039 W/m.°C.

Résistance à l'humidité : bonne imperméabilité à la vapeur et à l'humidité.

Résistance au feu : les qualités standard sont facilement inflammables, mais les mousses ignifugées peuvent obtenir un classement : non inflammable.

Résistance à la chaleur limitée à 70 °C, pour une masse volumique de 9 Kg/m³ et à 85 °C pour 25 kg/m³.

Résistance mécanique : très variable suivant les modes de fabrication.

Isolation acoustique : ce ne sont pas des matériaux efficaces sur le plan acoustique.

• MOUSSE DE POLYURETHANE

Définition : obtenue par réaction d'un polyisocyanate sur un constituant composé de polyol et d'autres corps tels des activateurs et des agents gonflants.

Conductivité thermique :

- Plaques et blocs expansés en continu, 30 à 40 Kg/m³ : $\lambda = 0,029$ W/m.°C.
- Blocs expansés en discontinu, 30 à 40 Kg/m³ : $\lambda = 0,030$ W/m.°C.
- Blocs expansés en discontinu, 40 à 50 Kg/m³ : $\lambda = 0,033$ W/m.°C.

Résistance à l'humidité : très bonne imperméabilité.

Résistance au feu : pour résister au feu elles doivent être ignifugées.

Leur résistance à la chaleur est d'environ 130 °C, les mousses habituellement utilisées sont classées : facilement inflammable.

Isolation acoustique : peu de possibilités en isolation acoustique.

A noter que ces mousses peuvent également être fabriquées sur place, ce qui permet une mise en œuvre rapide et continue. L'application se fait soit par injection, soit par projection.

- MOUSSES PHENOLIQUES

Définition : Les mousses phénoliques rigides sont obtenues par l'expansion à chaud de résine formophénolique mélangée à un agent d'expansion et additifs.

Conductivité thermique : $\lambda = 0,044 \text{ W/m.}^\circ\text{C}$.

Résistance au feu : excellente résistance au feu, classement non inflammable.

Résistance mécanique : bonne résistance à la compression, mais l'aspect de surface reste un peu friable et poussiéreux.

Résistance aux agents biologiques : elles sont insensibles aux micro-organismes et ne sont pas attaquées par les rongeurs.

Isolation acoustique : peu d'utilisations possibles en acoustique.

- MOUSSES A BASE DE POLYCHLORURE DE VINYLE (P.V.C)

Définition : obtenues à partir de polychlorure de vinyle par introduction d'un agent d'expansion, ces mousses sont constituées de cellules fermées et indépendantes.

Conductivité thermique :

Classe I : 25 à 35 Kg/m³ : $\lambda = 0,031 \text{ W/m.}^\circ\text{C}$.

Classe II : 35 à 48 Kg/m³ : $\lambda = 0,034 \text{ W/m.}^\circ\text{C}$.

Résistance à l'humidité : excellente imperméabilité à la vapeur et à l'humidité.

Résistance au feu : ces produits sont classés non inflammables.

Résistance mécanique : bonne résistance à la compression.

Résistance aux agents biologiques : ne sont attaquées ni par les rongeurs ni par les insectes.

Isolation acoustique : peu d'utilisations possibles en acoustique.

• MOUSSES UREE-FORMOL

Définition : obtenues par mélange d'une résine d'urée-formol avec une émulsion air-durcisseur gélifiant rapidement.

Conductivité thermique : ces mousses étant utilisées en injection in situ, la conductibilité thermique est trop étroitement liée à la qualité obtenue sur le chantier pour pouvoir fixer une valeur générale.

Résistance au feu : ces mousses ont un bon comportement au feu et ne propagent pas la flamme.

Résistance aux agents biologiques : les mousses urée-formol sont imputrescibles.

d- MATERIAUX REFLICHISSANTS

Basés sur le principe de la réflexion des ondes thermiques ; les matériaux les plus couramment utilisés sont des feuilles métalliques réfléchissantes.

Ces matériaux agissent surtout pour renforcer d'une manière appréciable une isolation existante et ne doivent en aucune manière être utilisés seuls. Pour garder leur pouvoir réfléchissant, il faudra éviter le ternissement de ces films.

e- ISOLANTS COMPLEXES

On désigne sous cette expression un isolant solidarisé à un seul parement ou un isolant solidarisé à deux parements.

Dans un cas comme dans l'autre, le ou les parements peuvent n'avoir qu'un but de protection au chocs et au feu ainsi que de support à une finition

intérieure ou extérieure, mais sans renforcement de l'isolation supplémentaire, sauf si l'on utilise comme parement un matériau considéré comme étant lui-même isolant, tel le fibragglo.

Ces complexes sont fabriqués industriellement, les isolants sont des mousses de synthèse, polystyrène principalement, et des fibres minérales.

f- BRIQUES CREUSES OU PERFOREES ISOLANTES

Définition : briques creuses de terre cuite avec un grand nombre de rangées d'alvéoles, à parois minces quinconcées pour allonger le trajet du flux thermique.

g- BETON CELLULAIRE AUTOCLAVE

Définition : matériau obtenu par un mélange de sable broyé, de chaux, de ciment et de poudre d'aluminium.

Un ensemble de petites bulles sont créées par le dégagement gazeux que provoque la poudre d'aluminium. La pâte obtenue est découpée au fil pour obtenir des blocs qui sont ensuite passées à l'autoclave.

Chapitre III : Isolation thermique de la maison solaire

III.1 Définition des parties à isoler de la maison solaire

Dans une maison classique, on distingue quatre types de parois extérieures à isoler soient : toitures, baies vitrées, murs périphériques, et planchers bas. Ajoutons à tout cela, pour notre maison solaire, l'isolation du capteur solaire (partie arrière et latérale), calorifugeage des tuyauteries chargées de véhiculer la chaleur, ainsi que l'isolation de la cuve de stockage.

La figure (III.1) présente une maison solaire mannequin ayant les caractéristiques suivantes :

- Toiture 1 en matériaux traditionnels (tuiles, ardoises) sur liteaux et chevrons ou en béton, avec un coefficient K_0 (avant isolation) = 5,80 et une surface $S = 125 \text{ m}^2$.
- Plafond de 1 cm en plâtre sous solives avec un coefficient $K_0 = 2,70$ (plafond + comble + toiture) et une surface $S = 100 \text{ m}^2$.
- Murs extérieurs en briques creuses de 20 cm d'épaisseur enduits 2 faces avec un coefficient $K_0 = 2,50$ et une surface $S = 100 \text{ m}^2$.
- Baies vitrées : fenêtres traditionnelles en bois à simple vitrage avec un coefficient $K_0 = 5,00$ et une surface $S = 20 \text{ m}^2$.
- Plancher bas sur cave composé de poutrelles et de corps creux (hourdis) en terre cuite ou béton avec $K_0 = 2,20$ et $S = 100 \text{ m}^2$.
- Toiture 2 forme le capteur solaire, transforme l'énergie solaire incidente en énergie thermique, surface de captation = 25 m^2 .
- Cuve de stockage emmagasine l'énergie thermique, avec un volume de stockage $V = 4 \text{ m}^3$.
- Tuyauteries véhiculant la chaleur le long de circuit de chauffage.

La maison mannequin prédéfini, est utilisée dans différents calculs et programmes réalisés dans cette thèse.

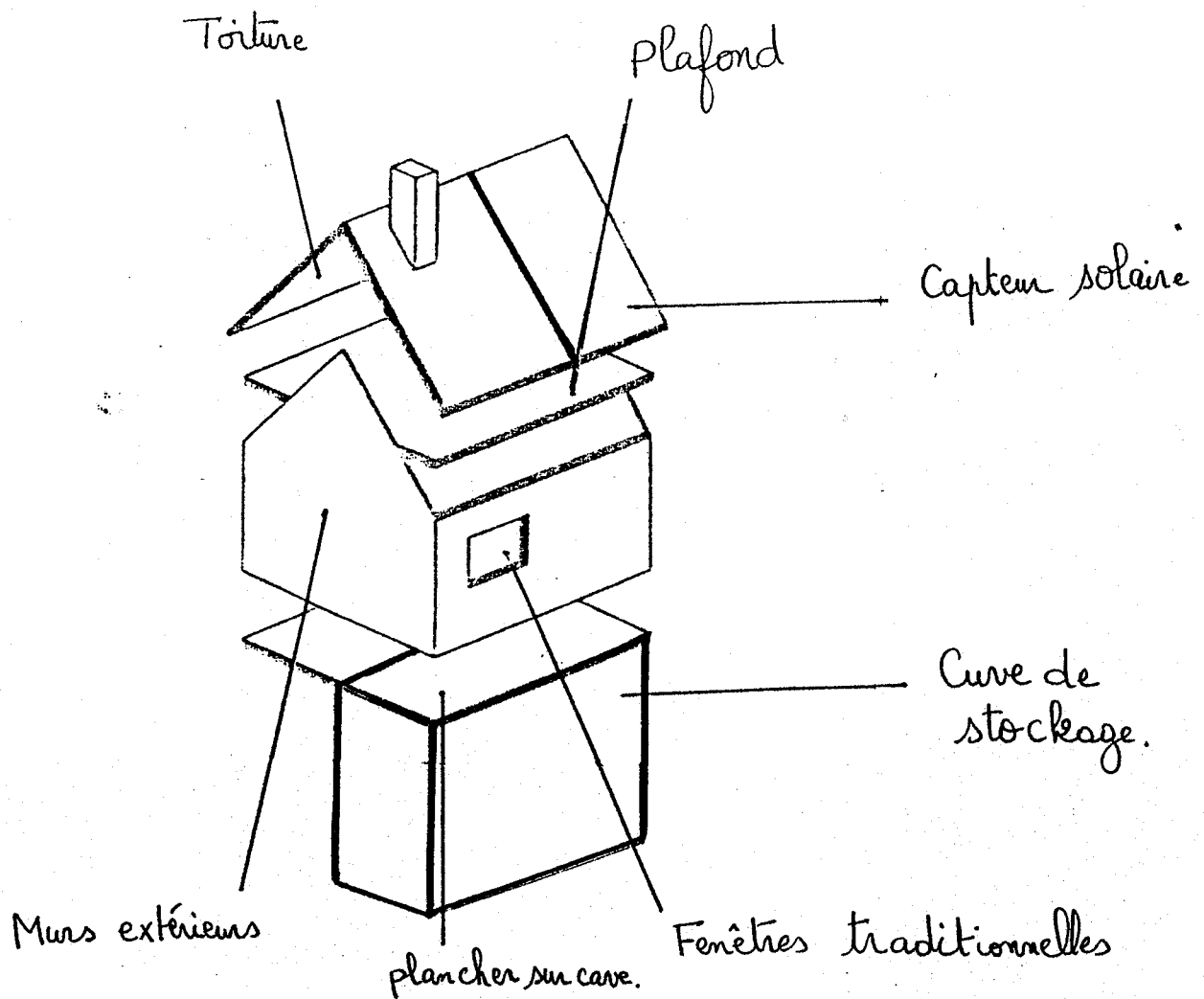


Figure III.1

III.2 Isolation des toitures

Dans les maisons individuelles, les toitures sont responsables de près de 30% des déperditions calorifiques. Ce sont, parmi les parois opaques, les plus vulnérables à la fuite des calories. Ceci est dû au fait que l'air chaud a toujours tendance à aller vers le haut, phénomène de la convection, sollicitant le plafond qui se trouve ainsi constamment soumis à un flux thermique direct. D'autre part, les toitures sont, dans les maisons individuelles, les parois extérieures dont l'isolation est techniquement la plus simple. . Tout cela fait qu'on a toujours

intérêt à commencer par l'isolation des toitures, si on veut isoler progressivement la maison.

Le principe de cette isolation sera différent selon que les combles sont destinés à être habités ou non. Un troisième cas totalement différent est la toiture-terrasse.

a- Combles habités

Plusieurs solutions pratiques ont été proposées, selon que les toitures sont traditionnelles (tuiles sur liteaux bois ou en béton). Pour ce dernier cas, utilisé souvent en Algérie, est proposé la solution suivante pour l'isolation:

Panneau rigide de laine minérale, muni d'un pare-vapeur en Kraft aluminium et fixé perpendiculairement aux chevrons à l'aide d'accessoires métalliques fournis avec. La conductivité thermique de la laine de verre

$\lambda = 0,041 \text{ W/m}^\circ\text{C}$, avec une épaisseur de la couche isolante $e = 11 \text{ cm}$, le coefficient de transmission surfacique diminue de $K_0 = 5,80 \text{ W/m}^2^\circ\text{C}$ (avant isolation) à $K = 0,35 \text{ W/m}^2^\circ\text{C}$ (après isolation).

b- combles non habités

Lorsque les combles ne sont pas destinés à être chauffés, l'isolant est alors appliqué sur la face supérieure du plafond.

A effet égal, l'épaisseur de l'isolant nécessaire est alors légèrement inférieure à celle des toitures à combles aménagés.

C'est l'ensemble plafond + air du comble + couverture, qui sert alors de bouclier contre la fuite de la chaleur. Le coefficient de transmission pour cette chaleur est pour l'ensemble $K_0 = 2,70$. Pour que l'air du comble joue effectivement son rôle, il faut que celui-ci ne soit guère ventilé, juste assez pour résorber les condensations éventuelles d'humidité. L'été, par contre, les conditions de confort thermique sont inversées : une ventilation très énergique des combles est alors extrêmement avantageuse.

Les combles non chauffés peuvent être soit totalement inaccessibles, soit accessibles occasionnellement : utilisation comme resserre par exemple.

Ce second cas nécessite naturellement une protection de l'isolant par un parquet rapporté.

Plusieurs solutions ont été proposées pour l'isolation thermique des combles perdus.

- Solution N°01

Feutre de laine minérale déroulé sur le plancher haut, par dessus les solives, perpendiculairement à celles-ci. (figure III.2).

Isolant : feutre en laine
minérale imprégnée des
résines synthétiques.

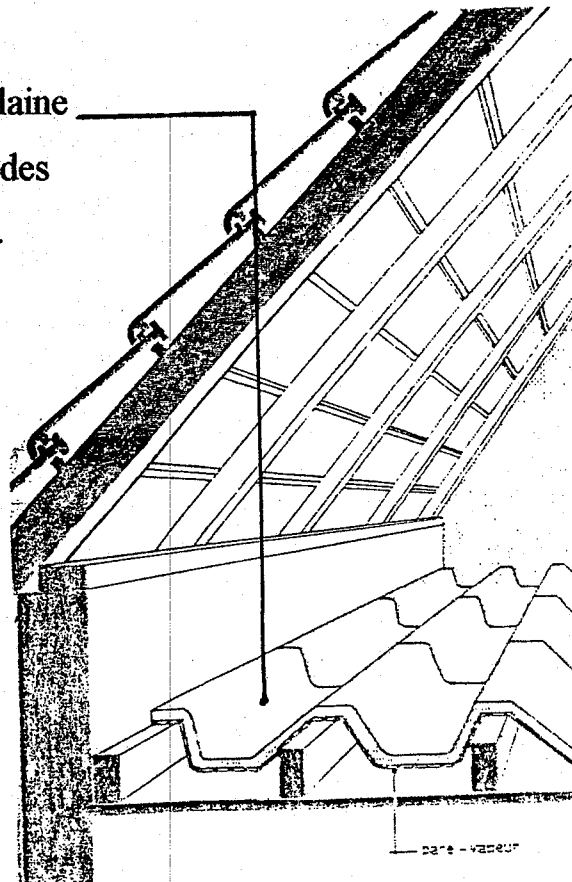


Figure III.2

Cette solution, très simple convient aux combles strictement inaccessibles. La conductivité thermique de la laine minérale $\lambda = 0,041 \text{ W.m.}^\circ\text{C}$. Avec une épaisseur $e = 80 \text{ mm}$, on peut aller de $K_0 = 2,70 \text{ W/m}^2.\text{}^\circ\text{C}$ à $K = 0,5 \text{ W/m}^2.\text{}^\circ\text{C}$.

- Solution N°02

Convient aux combles qui, quoique non chauffés, sont utilisables, comme resserre par exemple, et par suite circulables.

Une feutre de laine de verre ou laine de roche imprégnée de résines synthétiques, collé sur un pare-vapeur en papier Kraft. Au cas où une seconde couche serait nécessaire, celle-ci serait en feutre nu, c'est à dire sans pare-vapeur. (figure III.3).

Isolant : feutre en laine
minérale imprégnée de
résines synthétiques

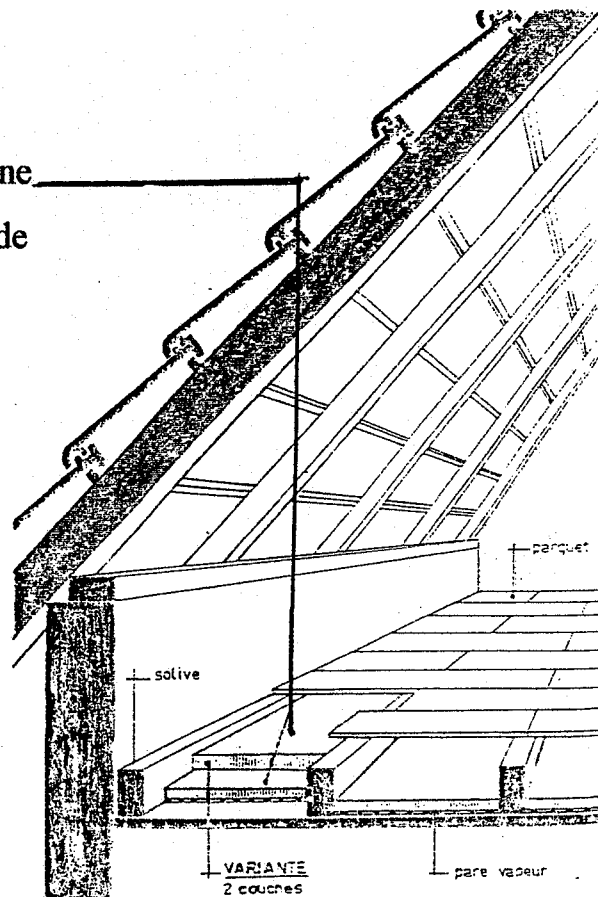


Figure III.3

- Solution N° 03

Isolant granuleux (la vermiculite ou le verre cellulaire) déversé en vrac entre les solives.

$$\lambda = 0,05 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}.$$

$$K_0 = 2,70 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$$

Une épaisseur de l'isolant $e = 90 \text{ mm}$ nous donne un $K = 0,5 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$.

- Solution N° 04

Dalle feuillurées en polystyrène expansé moulé, collées au plafond.

$$\lambda = 0,031 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$$

$$K_0 = 2,70 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$$

Une épaisseur de la couche isolante de 40 mm permet la diminution du coefficient de transmission surfacique jusqu'à $K = 0,6 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$.

c- Toitures-Terrasses

L'isolation de la toiture-terrasse, ou toiture plate, est étroitement associée à l'ouvrage d'étanchéité. C'est à dire que sa mise en œuvre constitue une opération délicate, nécessairement confiée à l'étancheur.

La toiture plate est constituée par une dalle de béton de 16 cm d'épaisseur, enduite en sous face et supportant l'ouvrage d'étanchéité. Le coefficient de transmission surfacique initial (avant isolation) est $K_0 = 4,40 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$.

- Solution N° 01

Isolation par plaques de polystyrène extrudé, posées au dessus de l'étanchéité existante. (figure III.4)

**Isolant : polystyrène
expansé extrudé**

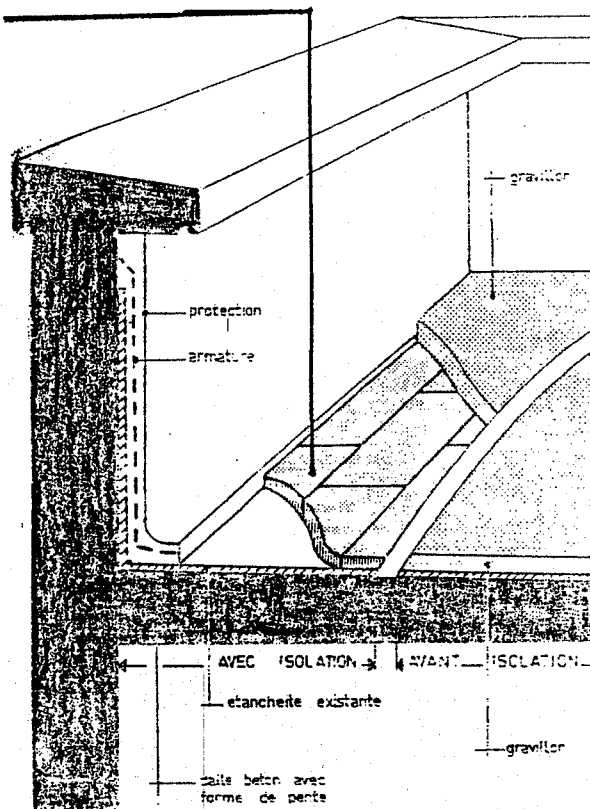


Figure III.4

Cette solution présente l'énorme avantage de permettre l'amélioration de l'isolation tout en conservant l'étanchéité existante. Un autre avantage est la protection améliorée de l'étanchéité contre des chocs thermiques, c'est-à-dire contre les dégradations physiques dues aux grands écarts de température.

L'inconvénient de cette solution est la possibilité d'infiltration de l'eau de pluie sous l'isolant, ce qui risque d'en diminuer l'efficacité.

$$\lambda = 0,031 \text{ W/m.}^{\circ}\text{C}$$

$$e = 60 \text{ mm ; } K = 0,5 \text{ W/m}^2.^{\circ}\text{C.}$$

- **Solution N° 02**

Réfection d'une étanchéité défectueuse et amélioration de l'isolation thermique par mousse de polyuréthane projetée.

C'est une solution très rapide, d'une étanchéité continue sans joint, ni soudure, apporte une bonne isolation thermique.

Par contre, le prix de revient est élevé pour de faibles surfaces et ces travaux nécessitent l'intervention d'une entreprise très spécialisée. La limite supérieure de 35 mm pour l'épaisseur constitue un autre inconvénient.

$$\lambda = 0,029 \text{ W.m.}^\circ\text{C.}$$

$$e = 35 \text{ mm ; } k = 0,6 \text{ W/m}^2.^\circ\text{C.}$$

Un autre isolant commode à cette partie de la maison est le polystyrène expansé, thermo-comprimé.

$$\lambda = 0,036 \text{ W/m.}^\circ\text{C.}$$

$$e = 60 \text{ mm ; } K = 0,5 \text{ W/m}^2.^\circ\text{C.}$$

III.3 Isolation des baies vitrées

De part leur fonction d'ouverture et de transparence, les baies vitrées constituent les parois de l'habitation les plus vulnérables aux déperditions thermiques. En effet, le coefficient de transmission thermique utile du verre est $K = 5,70 \text{ W/m}^2.^\circ\text{C}$, pratiquement indépendamment de son épaisseur. Il est légèrement inférieur pour la fenêtre considérée dans son ensemble ; ainsi, par exemple, une fenêtre traditionnelle en bois, de 32 mm d'épaisseur, munie d'un vitrage simple, aura un coefficient $K = 5,00 \text{ W/m}^2.^\circ\text{C}$, ce qui demeure très élevé. Une importante quantité de chaleur parvient donc à s'échapper à travers les vitrages.

A ce problème quantitatif, de perte et de gaspillage, s'associe un problème qualitatif d'inconfort : inconfort dû à cette sensation fort désagréable de « paroi froide » et aux condensations qui s'y produisent.

Le principe de toute amélioration du pouvoir isolant des vitrages repose sur la création d'une lame d'air immobile, enfermée entre deux feuilles de verre, aussi bien sous forme de vitrage isolant que de survitrage. Une autre amélioration peut venir s'y ajouter par l'installation, s'il n'en existe pas, d'une bonne fermeture. On entend par là une fermeture pleine réalisant entre elle et la vitre une lame d'air à peu près fermée (persiennes, volets roulants. En bois, métal ou plastique. Une telle fermeture réduit les déperditions de nuit

lorsqu'elle est fermée) et conduit à une amélioration (diminution) du coefficient K moyen jour-nuit. Celui-ci, propre aux fenêtres, est la moyenne des valeurs du coefficient K aux différentes heures de la journée, compte tenu de la possibilité de fermeture.

Une autre faiblesse inhérente à la nature des baies vitrées est leur perméabilité aux bruits extérieurs. Ceci est particulièrement gênant sur les voies à grand trafic routier, ainsi qu'aux abords des aéroports.

Une fenêtre traditionnelle en bois, à simple vitrage, produit un isolement de 22 à 27 dB selon qu'elle est plus au moins grande et plus au moins bien calfeutrée.

Un survitrage peut procurer une très sensible amélioration de l'isolation acoustique, d'autant plus sensible que le survitrage est plus lourd et mieux désolidarisé.

- Solution N° 01 (survitrage)

Survitrage directement collé sur la vitre existante avec une lame d'air déshydratée de 6 mm.

La survitre est de 4 ou 6 mm au minimum, et de 8 à 10 mm si un certain isolement acoustique est aussi recherché. La lame d'air est déshydratée par une substance appropriée dont l'intercalaire en aluminium est rempli sur place.

Le joint étanche est assuré par un cordon à base de Néoprène vulcanisé à chaud sur place. (figure III.5).

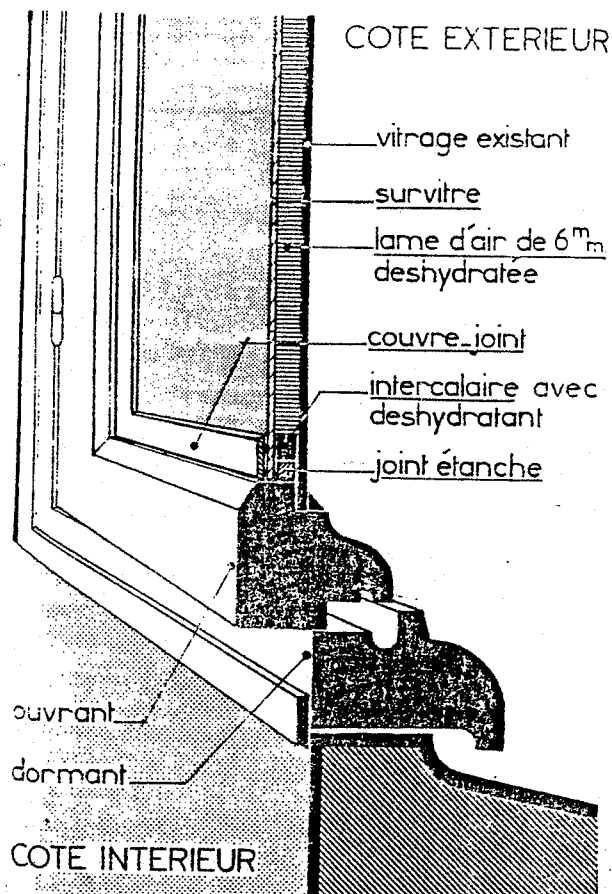


Figure III.5

L'inconvénient majeur de cette solution est sa mise en œuvre délicate, comportant un risque accru de malfaçon et par suite de mauvais fonctionnement.

On a $K_0 = 5,00 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$. (simple vitrage)

Epaisseur de la lame d'air $e = 6 \text{ mm}$

Le coefficient de transmission surfacique obtenu $K = 3,3 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$.

L'isolement de la vitre peut être amélioré en augmentant l'épaisseur de la lame d'air.

- Solution N° 02 (Double vitrage)

Deux feuilles de verre parallèles, qui enferment entre elles, d'une manière étanche, une lame d'air déshydratée de 6 à 12 mm d'épaisseur.

Le double vitrage offre une meilleure isolation thermique. De plus, le double vitrage étant entièrement constitué en usine, tous les risques de condensation interne liées à d'éventuelles malfaçons sont éliminées.

$$K_0 = 5,00 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$$

Epaisseur de la lame d'air $e = 6 \text{ mm}$

$$K = 3,3 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}.$$

• Solution N° 03

Equiper la fenêtre d'une bonne fermeture extérieure : persiennes ou volets roulants. Ces fermetures peuvent être en divers matériaux : bois, aluminium, P.V.C... Elles ont en commun le fait qu'elles créent entre elles et le vitrage une lame d'air à peu près fermée. Ceci a pour effet de réduire les déperditions de nuit et donc de diminuer le coefficient K moyen jour-nuit.

La fermeture extérieure a pour avantage l'économie d'énergie, meilleur isolement acoustique, sécurité contre le vol, pour les fenêtres en rez-de-chaussée ou facilement accessibles.

Pour une épaisseur de la lame d'air $e = 15 \text{ cm}$, on obtient la valeur de 3,7 pour le coefficient de transmission surfacique.

III.4 Isolation des murs extérieurs

Les murs extérieurs constituent le type de parois dont l'isolation pose plus de problèmes annexes.

Le principal problème est le fait que le revêtement mural préexistant se trouve automatiquement condamné, qu'il s'agisse du revêtement mural intérieur ou extérieur (selon la position de l'isolant) ; même quand celui-ci est injecté entre le mur et contre-cloison existante, le revêtement est pratiquement condamné du fait des multiples percements que nécessite l'injection.

Un autre problème à résoudre sera celui de l'arrêt de l'isolant au droit des portes et fenêtres.

L'appareillage électrique enfin (prises, interrupteurs appliques, etc....) devra être démonté et réinstallé au nu de l'isolant ; ceci, bien entendu, dans le cas d'un isolant posé coté intérieur. Il en sera de même pour l'installation de chauffage.

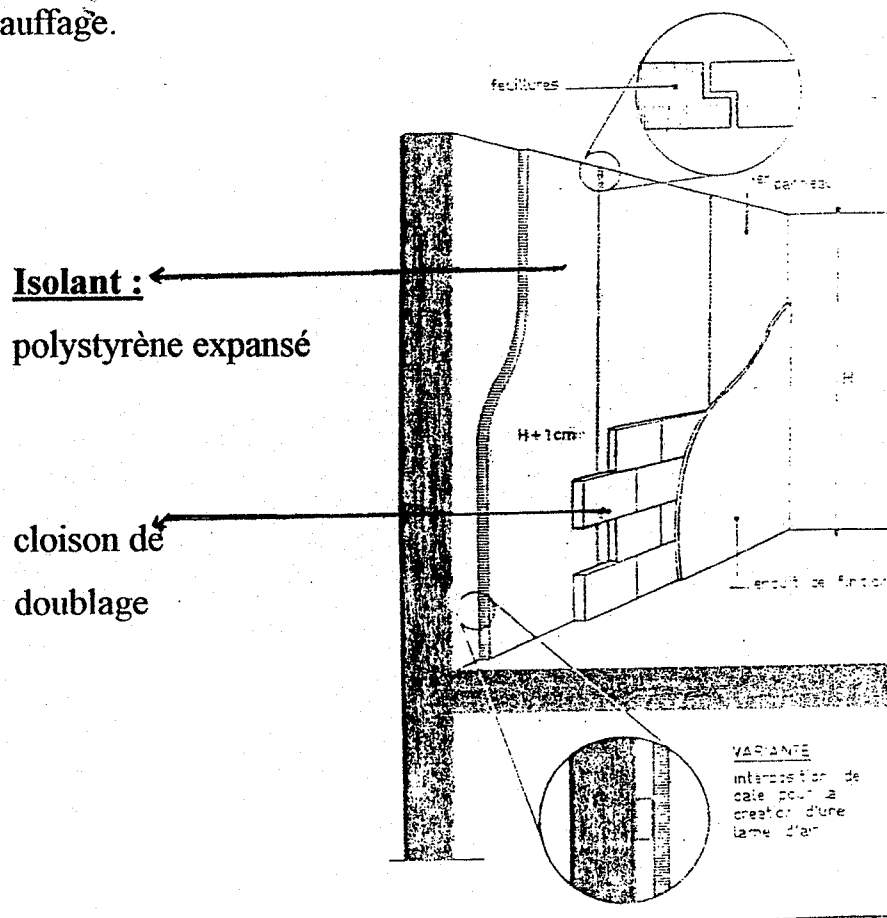


Figure III.6

Tout cela fait que l'isolation des murs extérieurs sera particulièrement intéressante quand elle accompagne une réfection du revêtement intérieure ou, selon le cas, un ravalement de la façade.

- Solution N° 01

Isolation sur l'intérieur de la paroi par panneaux rigides de polystyrène expansé thermo-comprimé, avec contre-cloison et enduit de finition.

(figure III.6).

La création d'une lame d'air séparant le mur de l'isolant est nécessaire et a pour fonction essentielle de protéger ce dernier des risques d'infiltration d'eau à travers la paroi extérieure, ce qui diminuerait ses propriétés.

Ce type d'isolation demande une remise en état complète des papiers, peintures et la reprise de l'installation de chauffage et d'électricité. Il implique une réduction du volume habitable de la pièce, surtout dans le cas de création d'une lame d'air.

Le traitement des ponts thermiques (angle, about de plancher...) est pratiquement impossible.

$$\lambda = 0,041 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}.$$

$$K_0 = 2,50 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C} \text{ (avant isolation)}$$

$$\text{Epaisseur de l'isolant } e = 40 \text{ mm}$$

$$K = 0,7 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}.$$

- Solution N° 02

Isolation sur l'intérieur de la paroi par panneaux semi-rigides de laine minérale, revêtus d'un pare-vapeur, contre cloison traditionnelle et enduit de finition.

$$\lambda = 0,041 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}.$$

$$K_0 = 2,50 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}.$$

$$e = 45 \text{ mm} ; K = 0,7 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}.$$

- Solution N° 03

Panneaux rigides de laine de verre revêtue d'un pare-vapeur et collé sur une plaque de plâtre.

Cette solution apporte à la fois l'isolation thermique du mur et une meilleure isolation phonique.

$$\lambda = 0,038 \text{ W/m.}^{\circ}\text{C.}$$

$$K_0 = 2,50 \text{ W/m}^2.{}^{\circ}\text{C.}$$

$$e = 40 \text{ mm ; } K = 0,7 \text{ W/m}^2.{}^{\circ}\text{C.}$$

- Solution N° 04

Isolation par injection de mousse isolante dans une lame d'air existante entre le mur et la contre-cloison.

L'isolant peut être la mousse de polyuréthane, ou d'urée formol, mise en œuvre par injection à la température ambiante.

Cette solution est très rapide qui ne modifie pas l'aspect intérieur ni la surface des locaux. La solution est propre et bon marché.

$$\lambda = 0,029 \text{ W/m.}^{\circ}\text{C. (mousse de polyuréthane)}$$

$$K_0 = 2,50 \text{ W/m}^2.{}^{\circ}\text{C.}$$

$$e = 40 \text{ mm ; } K = 0,7 \text{ W/m}^2.{}^{\circ}\text{C.}$$

- Solution N° 05

Isolation des murs par l'extérieur. L'isolant utilisé couramment est le polystyrène expansé.

L'intérêt de l'isolation par l'extérieur tient non seulement à la suppression des ponts thermiques, mais aussi à l'amélioration très sensible des confort d'hiver et d'été. Les murs ne sont plus soumis aux fréquents changements de température, ce qui permet d'éviter les désordres du gros œuvre dus aux chocs thermiques.

$\lambda = 0,041 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$.

$K_0 = 2,50 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$.

$e = 40 \text{ mm}$; $K = 0,7 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$.

III.5 Isolation des planchers bas extérieurs

Il s'agit là des planchers sur locaux non chauffés (cave, garage, vide sanitaire, etc.) ou sur terre-plein. Ceux-ci sont généralement considérés comme responsables de quelque 10% des déperditions calorifiques des parois d'une maison non isolée ; ce qui n'est point négligeable.

Contrairement à une idée assez répandue, une moquette, quelle que soit l'épaisseur, ne constitue aucunement une isolation thermique.

L'isolation des planchers bas est généralement une opération intéressante.

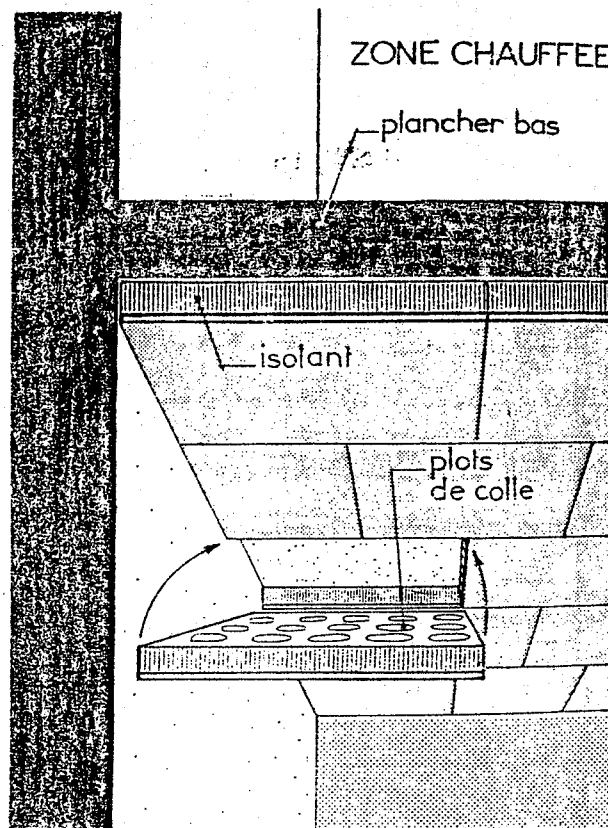


Figure III.7

- Solution N° 01

Panneau composite en polystyrène expansé avec un parement en fibragglo (fibres de bois agglomérées au ciment), fixé en sous-face de planchers bas.(figure III.7)

Cette solution est relativement facile à exécuter, elle a l'avantage de convenir à tout type de plancher, pour peu que la surface soit accessible. L'espace habité n'est pas perturbé lors de la mise en œuvre.

Par contre, la présence en sous-face de tuyauteries peut constituer un obstacle sérieux à l'application de cette solution.

$$\lambda = 0,042 \text{ W/m.}^{\circ}\text{C.}$$

$$K_0 = 2,20 \text{ W/m}^2.^{\circ}\text{C.}$$

$$\text{épaisseur de la couche isolante } e = 50 \text{ mm ; } K = 0,6 \text{ W/m}^2.^{\circ}\text{C.}$$

- Solution N° 02

Projection d'une mousse isolante (polyuréthane, urée formol), en sous-face du plancher bas.

La mise en œuvre de cette solution nécessite une certaine technicité et réalisé à l'aide d'un matériel approprié. Par contre, elle présente sur la précédente solution l'avantage d'être applicable quelle que soit l'état de la sous-face (présence de tuyauteries) et aussi un meilleur isolement phonique.

$$\lambda = 0,029 \text{ W/m.}^{\circ}\text{C (mousse de polyuréthane)}$$

$$K_0 = 2,20 \text{ W/m}^2.^{\circ}\text{C.}$$

$$e = 35 \text{ mm ; } K = 0,6 \text{ W/m}^2.^{\circ}\text{C.}$$

- Solution N° 03

Isolation par plaques de polystyrène expansé moulé, entre la dalle porteuse du plancher et la chape.

C'est une solution applicable pour les planchers bas sur terre-plein et ceux dont la sous-face est pratiquement inaccessible.

Son gros inconvénient est la modification du niveau du sol. Celui-ci est rehaussé de 6 à 10 cm, les portes sont donc à raboter.

$$\lambda = 0,039 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}.$$

$$K_0 = 2,20 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}.$$

$$e = 35 \text{ mm} ; K = 0,6 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}.$$

III.6 Ventilation et calfeutrement

L'aération des locaux d'habitation, ou renouvellement de leur air, est une nécessité hygiénique évidente ; c'est aussi une condition de confort indispensable.

On prévoit ainsi une aération permanente des logements, en assurant la circulation de l'air des pièces principales vers les pièces de service (cuisines, salles de bain, W-C...). L'extraction d'air vicié, mécanique ou naturelle, dans ces pièces de service doit pouvoir assurer un renouvellement d'air d'environ une fois le volume des pièces principales, par heure, dans des conditions climatologiques normales d'hiver, soit en moyenne 60 m^3 pour un séjour et 30 m^3 pour une chambre, par heure.

Par ailleurs, il est aussi très important de ne pas dépasser ce taux de renouvellement par souci tout à la fois de confort et d'économie d'énergie. En effet, on estime généralement que le renouvellement de l'air est responsable d'environ 30% des déperditions thermiques globales en immeuble collectif et 20 % dans les maisons individuelles.

Un contrôle précis du taux de renouvellement de l'air nécessite des calculs et des installations fort complexes, et intéresse surtout les immeubles collectifs neufs.

Un bon résultat peut néanmoins être obtenu en habitat existant, collectif ou individuel, au moyen de deux types de mesures, basées sur le principe suivant : d'une part assurer une aération simple et efficace par grilles autoréglables appropriées ; et d'autre part éliminer par un bon calfeutrement des ouvertures les entrées d'air «sauvages » et incontrôlées.

A. L'aération

S'assurer tout d'abord du bon fonctionnement du système d'extraction des pièces de service, Dont l'existence est obligatoire ; puis faire installer, s'il n'en existe pas, des grilles d'aération autoréglables, en façades des pièces principales, à raison d'une par chambre et deux pour le séjour.

Le principe de fonctionnement de ces grilles est basé sur l'existence d'une membrane qui, quand la vitesse de l'air extérieur augmente, et sous l'effet de cette vitesse, amène, en se refermant, une réduction graduelle de l'ouverture : ceci a pour effet de maintenir un débit d'air relativement constant.

B. Calfeutrement des ouvertures

Une aération satisfaisante étant ainsi réalisé, on procède au calfeutrement des fenêtres et portes donnant sur l'extérieur. Cette opération consiste, dans son principe, à rendre étanches à l'air les interstices entre ouvrant et dormant des portes et fenêtres, ainsi que l'intervalle entre le bas de porte et le sol.

1. Calfeutrement entre ouvrant et dormant

Un joint souple constitué d'un profil en néoprène ou similaire (caoutchouc synthétique) de section en forme V. L'une des ailes du joint étant fixée au dormant, l'autre, en s'appuyant à l'ouvrant fermé, obture des interstices de plusieurs millimètres.

Un autre procédé consiste en un bourrelet adhésif en mousse de polyuréthane ou autre mousse plastique microcellulaire. Collé en feuillure du dormant, il forme tampon entre celui-ci et l'ouvrant. (figure III.8).

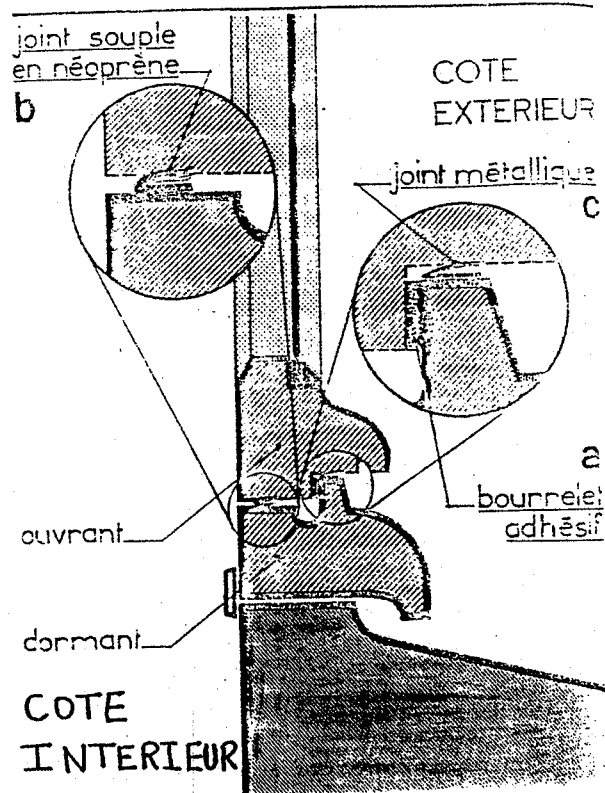


Figure III.8

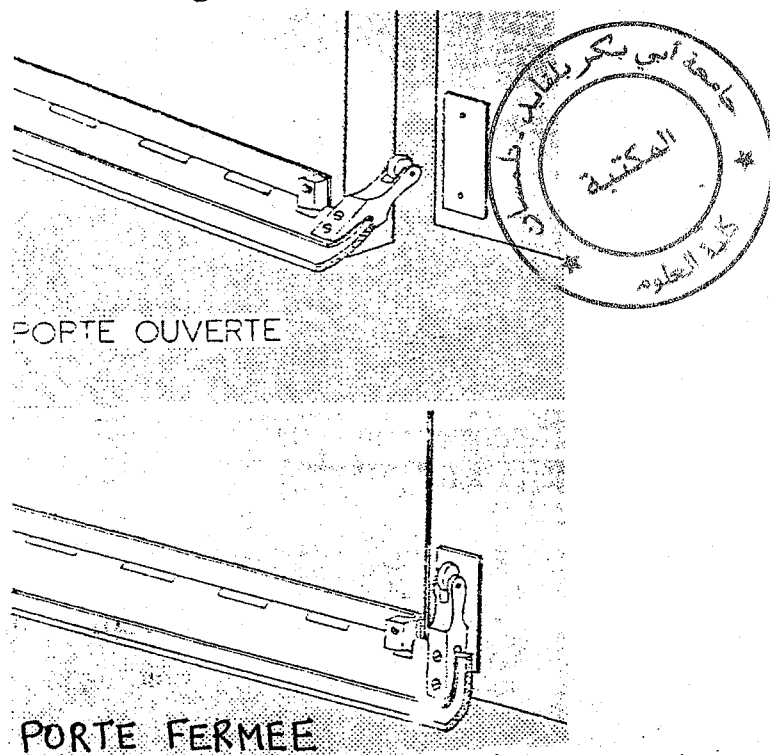


Figure III.9

2. Calfeutrement en bas de porte

Il s'effectue avec une plinthe -automatique intérieure. Ces plinthes comprennent : un support métallique fixé au bas de la porte coté intérieur ; une aile pivotante, munie d'un joint souple en néoprène et solidaire, à une extrémité, d'un doigt à roulette. A la fermeture de la porte, le doigt s'appuie contre le dormant et se met en position verticale, entraînant le joint souple qui va obturer l'interstice en s'appuyant sur le sol. (figure III.9).

III.7 Calorifugeage des tuyauteries

Il existe plusieurs solutions permettant de réduire les pertes calorifiques des tuyauteries d'eau de chauffage et d'eau chaude sanitaire traversant les combles, garages et autres locaux non chauffés.

- Bourrelet de laine de verre d'une épaisseur de 35 mm, en rouleaux ; la mise en place est longue, mais facile à réaliser ; ce matériau pourra par la suite être recouvert d'une bande plâtrée.
- Coquille nue : on assemble les deux demi-coquilles par fil de fer ou feuillard et on les recouvrant d'une bande plâtrée.
- Coquille enrobée : cette coquille gainée au moyen d'un Kraft aluminium comporte une languette qu'il suffit d'agrafer.
- Manchon souple à cellules fermées en caoutchouc synthétique vulcanisé. La mise en place se fait par incision du manchon. On place ensuite le manchon sur le tube et on colle. Ce matériau peut être peint avec une peinture spéciale. (figure III.10)

III.8 Isolation du capteur solaire et cuve de stockage

Une très bonne isolation thermique du capteur solaire (partie arrière et latérale) et cuve de stockage est obtenue par l'application de deux couches de matériaux isolants :

30 mm de laine de verre.

30 mm de la mousse de polyuréthane. (figure III.11).

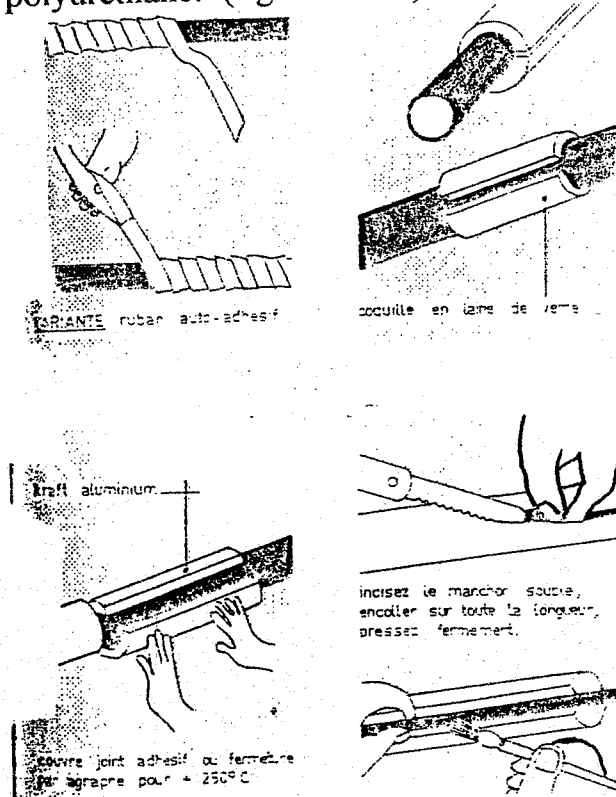


Figure III.10

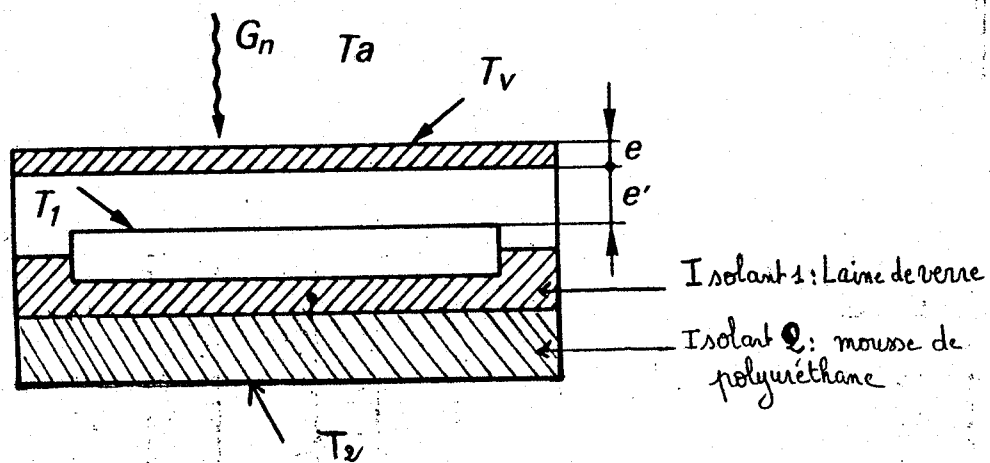


Figure III.11

Chapitre IV : Optimisation de l'isolation **thermique de la maison solaire**

Les propriétés thermiques principales en ce qui concerne le comportement thermique des constructions sont la résistance thermique et la capacité calorifique des parois.

Les caractéristiques d'exigence pour ces propriétés dépendent des conditions climatiques extérieurs selon des critères et des valeurs minimales nécessaires différentes pour les climats chauds et froids, pour faire entrer les conditions de climat intérieur à l'intérieur de la plage de confort. La résistance et la capacité exigées doivent être évaluées pour chaque période et on doit adopter les valeurs les plus grandes pour être conforme aux deux exigences.

En été, la fonction d'isolation thermique de l'enveloppe d'un bâtiment est de diminuer les actions thermiques dues à la température de l'air extérieur et au rayonnement solaire sur la structure du bâtiment.

En hiver, dans les régions froides, où le chauffage est utilisé, la construction doit garantir le confort intérieur, en effet la température satisfaisante pour le confort est de 18 à 22 °C.

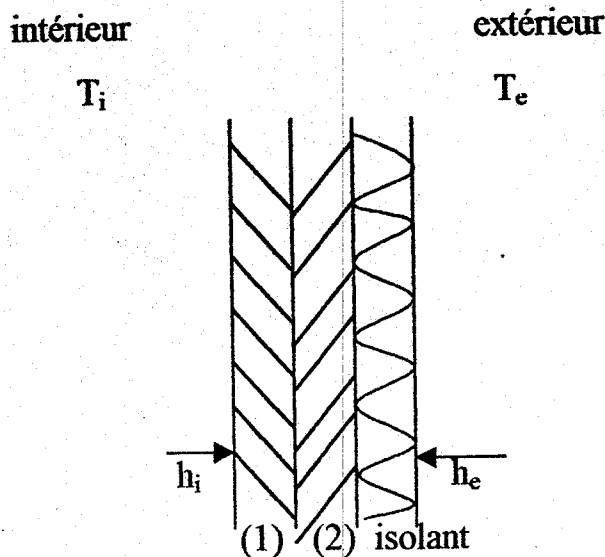
En ce qui concerne la différence de température entre l'air intérieur et la surface intérieure, GOROMOSOV a proposé la valeur maximale de 3 °C à cette valeur. Pour un minimum de confort, cette différence de température peut atteindre la valeur de 5 °C.

IV.1 Bilan thermique

La résistance de transmission globale R des parois multicouches composées de plusieurs couches en matériaux homogènes et des couches d'air non ventilées, disposées perpendiculairement par rapport à la direction du flux thermique est donné par la formule :

$$R = R_i + R_e + \frac{e_1}{\lambda_1} + \frac{e_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{e_n}{\lambda_n} + \frac{e}{\lambda} \quad (\text{IV.1})$$

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{h_e} + \frac{1}{h_i} + \frac{e_1}{\lambda_1} + \frac{e_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{e_n}{\lambda_n} + \frac{e}{\lambda} \quad (\text{IV.2})$$



R_i : résistance thermique par convection de la paroi intérieure.

h_i : coefficient d'échange superficiel du côté intérieur.

R_e : résistance thermique par convection de la paroi extérieure.

h_e : coefficient d'échange superficiel du côté extérieur.

K : coefficient de transmission thermique globale de la paroi. ($\text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$)

R : résistance de transmission globale de la paroi. ($\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C/W}$)

$e_1, e_2, e_3, \dots, e_n$: épaisseurs respectives des couches en matériaux de construction 1, 2, 3 ... n, en m.

$\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$: conductivités thermiques de ces matériaux en $W/m.^{\circ}C$.

e : épaisseur de la couche isolante.

λ : conductivité thermique du matériau isolant.

La somme $\frac{1}{h_e} + \frac{1}{h_i} + \frac{e_1}{\lambda_1} + \frac{e_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{e_n}{\lambda_n}$ définit la résistance de

transmission R_0 de la paroi, avant isolation thermique.

$$R_0 = \frac{1}{K_0} \quad \text{et} \quad R = \frac{1}{K}$$

$$\text{D'après (IV.2)} \quad \frac{1}{K} = \frac{1}{K_0} + \frac{e}{\lambda} \quad (\text{IV.3})$$

K_0 : coefficient de transmission thermique initial, avant isolation.

K : coefficient de transmission thermique à obtenir, après isolation.

R : résistance de transmission thermique de la paroi à obtenir après isolation.

$$(\text{IV.3}) \Rightarrow \frac{e}{\lambda} = \frac{1}{K} - \frac{1}{K_0}$$

$$e = \frac{\lambda}{K} - \frac{\lambda}{K_0} \quad (\text{IV.4})$$

Les valeurs minimales et souhaitables de point de vue thermique des murs en fonction de la température extérieure et le poids des parois ont différents formes pour les différents pays du monde.

Les formules de calcul pour la valeur R minimale et souhaitable proposées par B.GIVONI sont les suivantes : (pour toitures et murs)

$$R_{\min} = 20 - \frac{\theta_e + 0,01W}{24} \quad (\text{IV.5})$$

$$R_{\text{souhaitée}} = 20 + \frac{\theta_e + 0,01W}{40} \quad (\text{IV.6})$$

θ_e : température extérieure.

W : poids unitaire de la paroi.

Pour les conditions d'été, il avait donné des valeurs R minimales aux parois d'habitation, en tenant compte de la température de la surface extérieure, due à la température maximale θ_{em} et à l'ensoleillement maximale I_M journalière :

$$\text{(Pour les murs)} \quad R_{\min \text{ete}} = 0,05(\theta_{em} - 25) + 0,03 \left(\frac{AI_M}{12} \right) \quad (\text{IV.7})$$

$$\text{(Pour toitures et terrasses)} \quad R_{\min \text{ete}} = 0,05(\theta_{em} - 25) + 0,02 \left(\frac{AI_M}{12} \right) \quad (\text{IV.8})$$

A : amplitude d'oscillation de la température extérieure.

Application

Une maison mannequin située à Tlemcen (ville appartenant à la zone climatique algérienne II). Les données météorologiques nécessaires sont fournies par le service spécialisé.

θ_e : température extérieure du jour, on prend la valeur minimale dans l'année ;
obtenue en mois de janvier : $\theta_e : 10^\circ\text{C}$.

θ_{em} : température extérieure maximale, cette valeur est obtenue en mois d'août :

$$\theta_{em} : 32,72^\circ\text{C}.$$

I_m : ensoleillement maximal : $I_m = 320 \text{ W/m}^2$.

A : amplitude d'oscillation de la température extérieure, la valeur maximale de

$$A = 18^\circ\text{C}.$$

La structure des murs dans la maison mannequin est définie comme suit :

- 20 cm brique creuse ($\rho_1 = 1750 \text{ Kg/m}^3$).
- enduit (deux faces) 1 cm x 2 ($\rho_2 = 1800 \text{ Kg/m}^3$).
- Isolation thermique moyenne de 40 mm, généralement pour les murs est la laine de verre ($\rho = 300 \text{ Kg/m}^3$).

$$\text{On a : } 0,2 \text{ m} \times \rho_1 = 350 \text{ Kg}$$

$$0,02 \times \rho_2 = 36 \text{ Kg}$$

$$0,04 \times \rho = 12 \text{ Kg}$$

$$\text{La masse du mur : } m = 350 + 36 + 12$$

$$m = 398 \text{ Kg (par mètre carré de surface)}$$

Le poids unitaire de la paroi (valeur moyenne) :

$$W = \frac{398}{0,2 + 0,02 + 0,04} = \frac{398}{0,26}$$

$$W = 1531 \text{ Kg/m}^3$$

On garde cette même valeur pour les toitures et terrasses.

D'après les lois de GIVONI :

$$(IV.5) \Rightarrow R_{\min} = 20 - \frac{(10 + (0,01 \times 1531))}{24}$$

$$R_{\min} = 18,95 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C/W}$$

Pour les conditions d'été :

$$^1 \text{ Pour les murs, (IV.7) } \Rightarrow R_{\min \text{ ete}} = 0,05(32,72 - 25) + 0,03 \left(\frac{18 \times 320}{12} \right)$$

$$R_{\min \text{ été}} = 14,79 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C/W}.$$

$$\text{Pour toitures et terrasses, (IV.8) } \Rightarrow R_{\min \text{ ete}} = 0,05(32,72 - 25) + 0,02 \left(\frac{18 \times 320}{12} \right)$$

$$R_{\min \text{ été}} = 9,99 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C/W}.$$

Ces valeurs de résistance minimale, réalisant le confort thermique à l'intérieur de la maison, exigent une épaisseur bien définie de la couche isolante. Ceci est donné par la formule (IV.4).

Cependant, on trouve des valeurs moyennant élevées des ces épaisseurs, d'où un coût très élevé de l'isolation thermique.

D'autres résultats cités en [7] apparaissent plus intéressants. La réglementation thermique fixe les règles d'isolation thermique des locaux : les travaux d'amélioration de l'isolation thermique des parois des habitations devront permettre d'obtenir les coefficients K de transmission thermique suivants. (tableau IV.1)

Zones climatiques	Parois traitées	Coefficient K
A	Plancher extérieur	0,6
	Toiture-terrasse	0,7
	Toiture avec comble	0,5
	Murs extérieurs	0,7
B	Plancher extérieur	0,7
	Toiture-terrasse	0,7
	Toiture avec comble	0,5
	Murs extérieurs	0,7
C	Plancher extérieur	0,7
	Toiture-terrasse	0,8
	Toiture avec comble	0,6
	Murs extérieurs	0,8

Tableau (IV.1)

A,B et C sont les trois zones climatiques françaises.

Une approche permet d'appliquer les données de la zone climatique française C (à proximité de l'océan atlantique et de la Méditerranée), à la zone climatique algérienne II (Le littoral).

Les deux zones climatiques sont caractérisées par l'influence régulatrice de la mer (hiver plus doux).

Les valeurs de K décrits plus haut correspondent à un niveau minimal d'isolation thermique. Cependant rien n'empêche de dépasser ce seuil. Nous pouvons adopter d'emblée une grande épaisseur d'isolation, et en déduire la valeur de K correspondante.

IV.2 Calcul des épaisseurs des couches isolantes

On s'intéresse à l'isolation thermique de notre maison mannequin définie au chapitre III, située dans la zone climatique II. Le matériau isolant étant bien défini pour chaque partie à isoler de la maison. Ce choix de matériaux correspond à une solution adéquate parmi ceux notées au chapitre III.

On applique la formule (IV.4), le coefficient K_0 de transmission thermique initial (avant isolation) est défini dans notre maison mannequin, pour chaque partie de la maison. Le coefficient K de transmission thermique à obtenir après isolation est donné en tableau (IV.1), pour chaque partie de la maison, ainsi que pour chaque zone climatique.

Nous allons utiliser, comme on l'a signalé auparavant les données de la zone climatique française C.

• Toitures avec combles habités

On utilise la solution d'isolation thermique proposée en chapitre III .

Le matériau isolant est la laine minérale :

$$\lambda = 0,041 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$$

$$K_0 = 5,80 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$$

$$K = 0,35 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}.$$

En appliquant la formule (IV.4), l'épaisseur e de la couche isolante permettant d'obtenir ce niveau d'isolement :

$$e = \frac{\lambda}{K} - \frac{\lambda}{K_0}$$

$$e = \frac{0,041}{0,35} - \frac{0,041}{5,80}$$

$$e = 0,117 - 0,007$$

$$e = 11 \text{ cm.}$$

- Toitures avec combles non habités

La solution N°01 (chapitre III)

Isolant : laine minérale $\lambda = 0,041 \text{ W/m.}^\circ\text{C.}$

$$K_0 = 2,70 \text{ W/m}^2.^\circ\text{C.}$$

D'après le tableau (IV.1) : $K = 0,6$

$$e = \frac{0,041}{0,6} - \frac{0,041}{2,70}$$

$$e = 53 \text{ mm.}$$

A noter que cette valeur doit être majorée suivant les formes et dimensions présentés dans le commerce.

- Toiture-terrasse

Solution N° 01

Isolant : polystyrène extrudé $\lambda = 0,031 \text{ W/m.}^\circ\text{C.}$

$$K_0 = 4,40 \text{ W/m}^2.^\circ\text{C.}$$

$K = 0,8$ (tableau IV.1)

$$e = \frac{0,031}{0,8} - \frac{0,031}{4,40}$$

$$e = 32 \text{ mm.}$$

- Baies vitrées

Solution N° 02 (double vitrage)

$$K_0 = 5,00 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}.$$

$$K = 3,3 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}.$$

Epaisseur de la lame d'air :

$$e = 6 \text{ mm}$$

- Murs extérieurs

Solution N° 01

Isolant : polystyrène expansé thermo-comprimé $\lambda = 0,041 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}.$

$$K_0 = 2,50 \text{ (maison mannequin)}$$

$$K = 0,8 \text{ (tableau IV.1)}$$

$$e = \frac{0,041}{0,8} - \frac{0,041}{2,50}$$

$$e = 35 \text{ mm}$$

- Planchers bas

Solution N° 02

Isolant : mousse de polyuréthane) $\lambda = 0,029 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}.$

$$K_0 = 2,20$$

$$K = 0,7$$

$$e = \frac{0,041}{0,7} - \frac{0,041}{2,20}$$

$$e = 40 \text{ mm}$$

- Capteur solaire et cuve de stockage

La solution présentée en chapitre III est la plus utilisée :

Isolant N° 01 : laine de verre $e_1 = 30$ mm.

Isolant N° 02 : mousse de polyuréthane : $e_2 = 30$ mm.

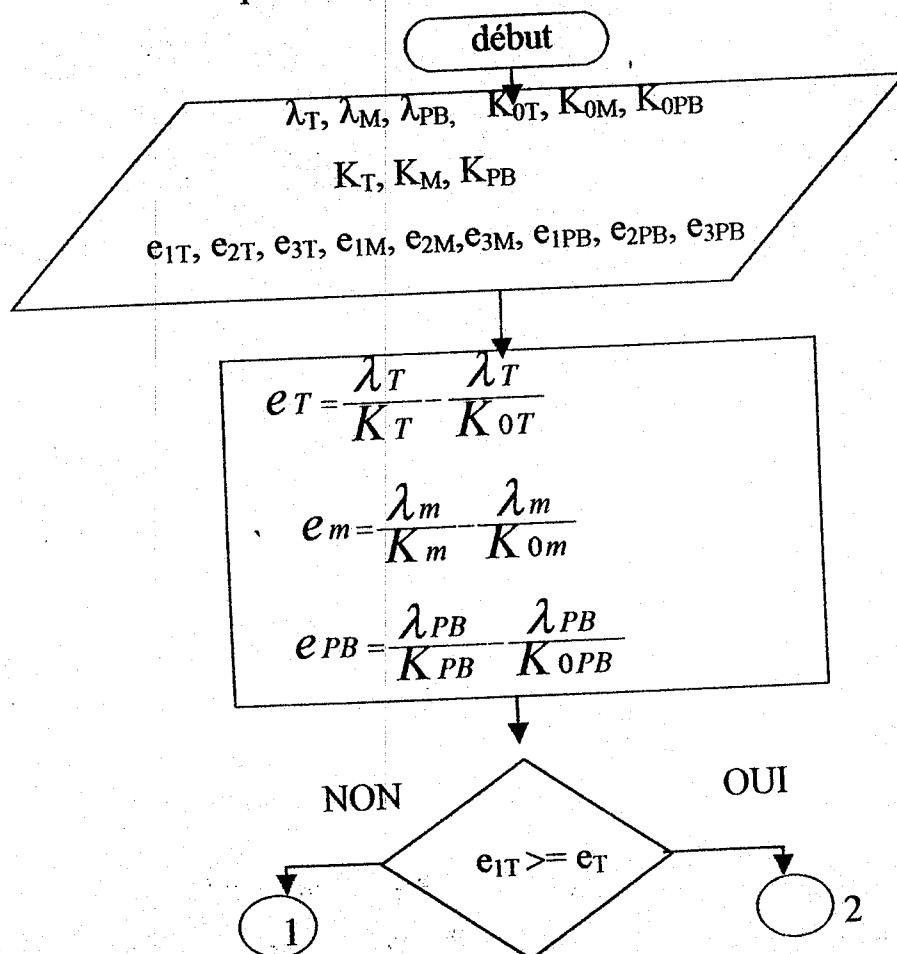
- Tuyauteries

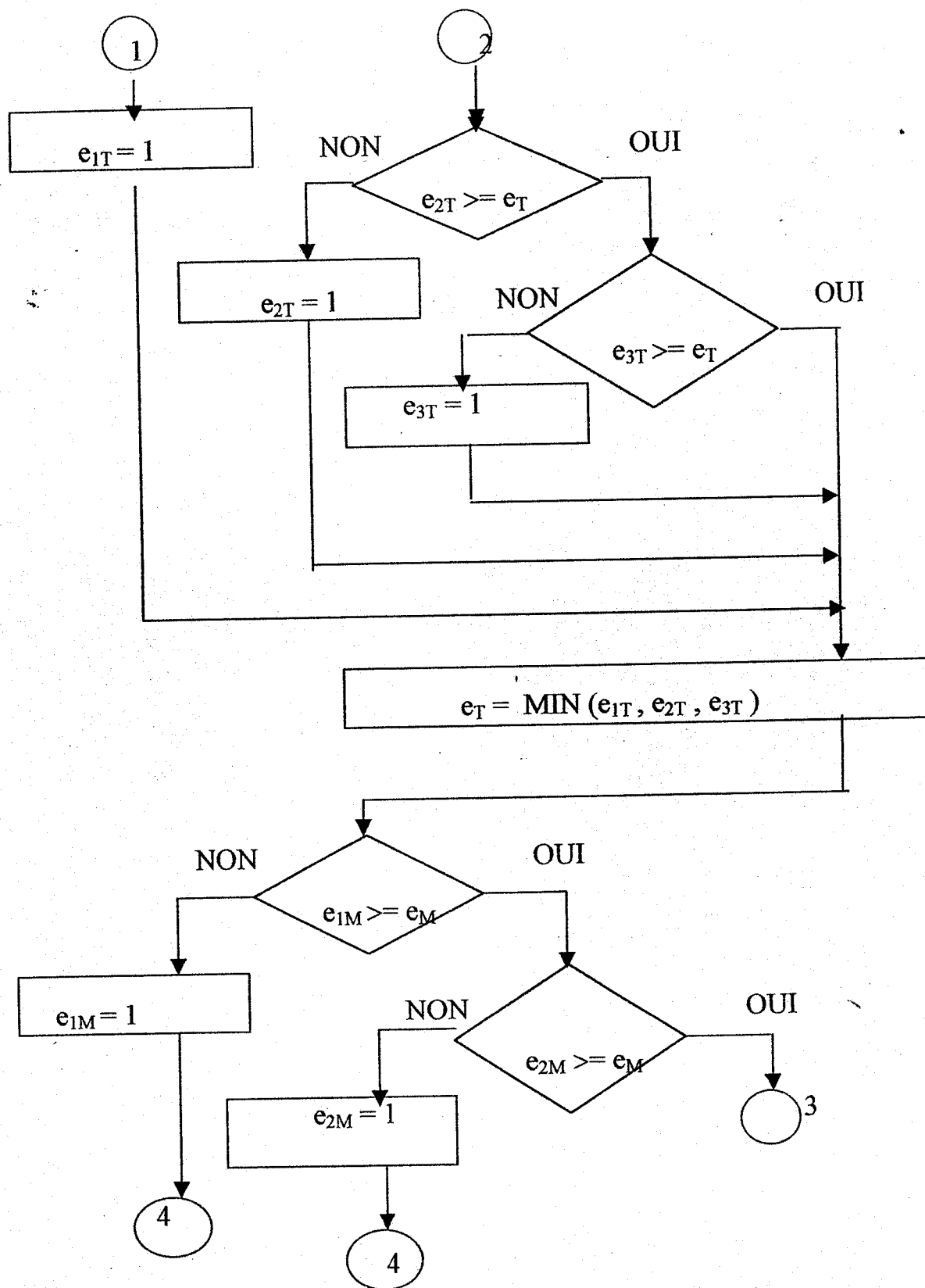
Solution N° 01

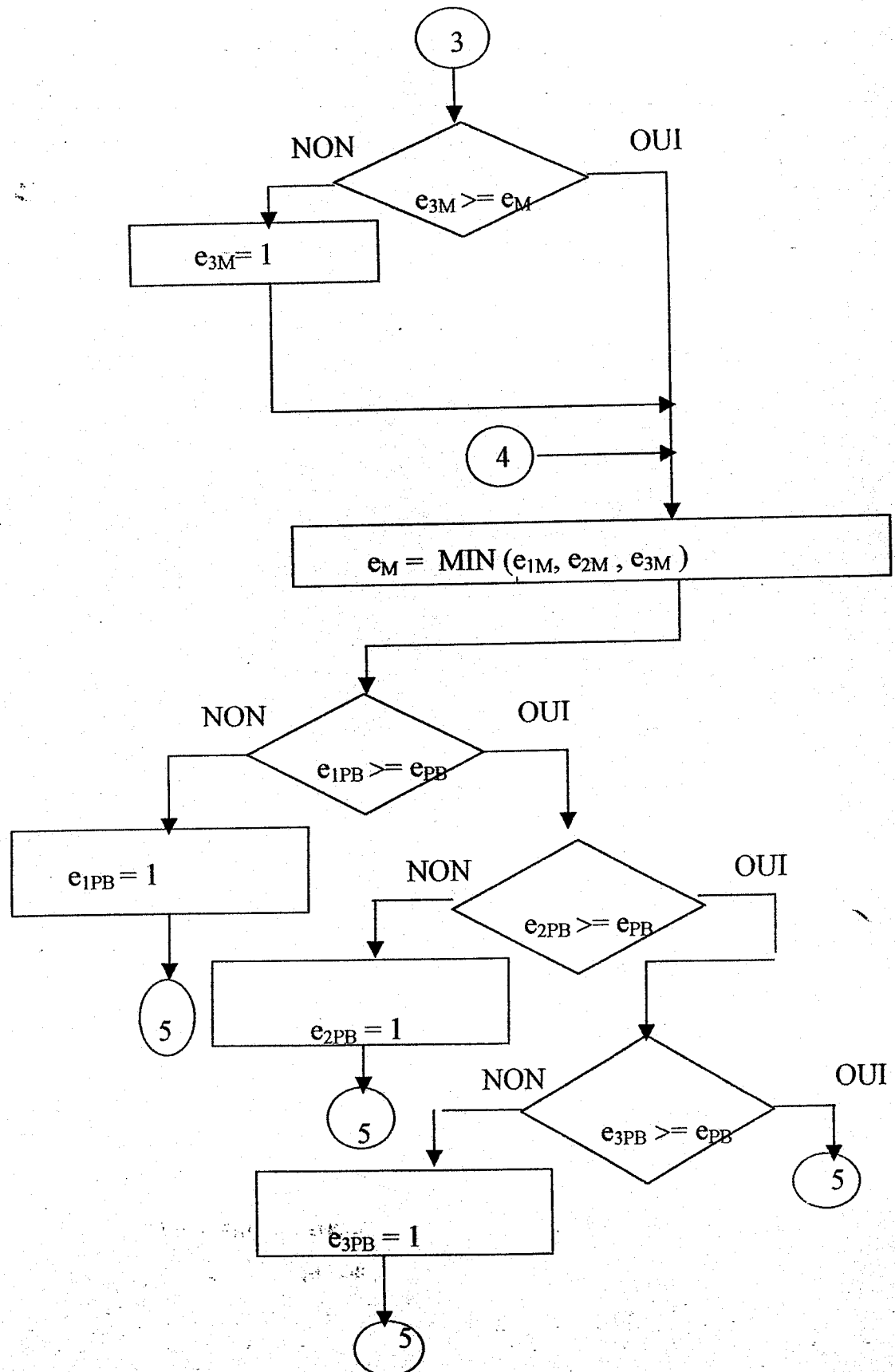
Isolant : Laine de verre

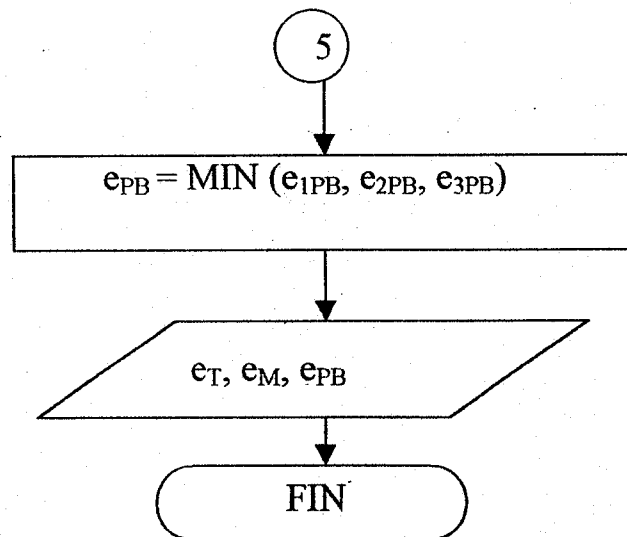
épaisseur de l'isolant $e = 35$ mm.

- Organigramme : Calcul des épaisseurs des couches isolantes des différentes parties à isoler de la maison.









e_{1i} , e_{2i} , e_{3i} sont les épaisseurs des matériaux isolants présentées dans le commerce, utilisées dans la partie i de la maison.

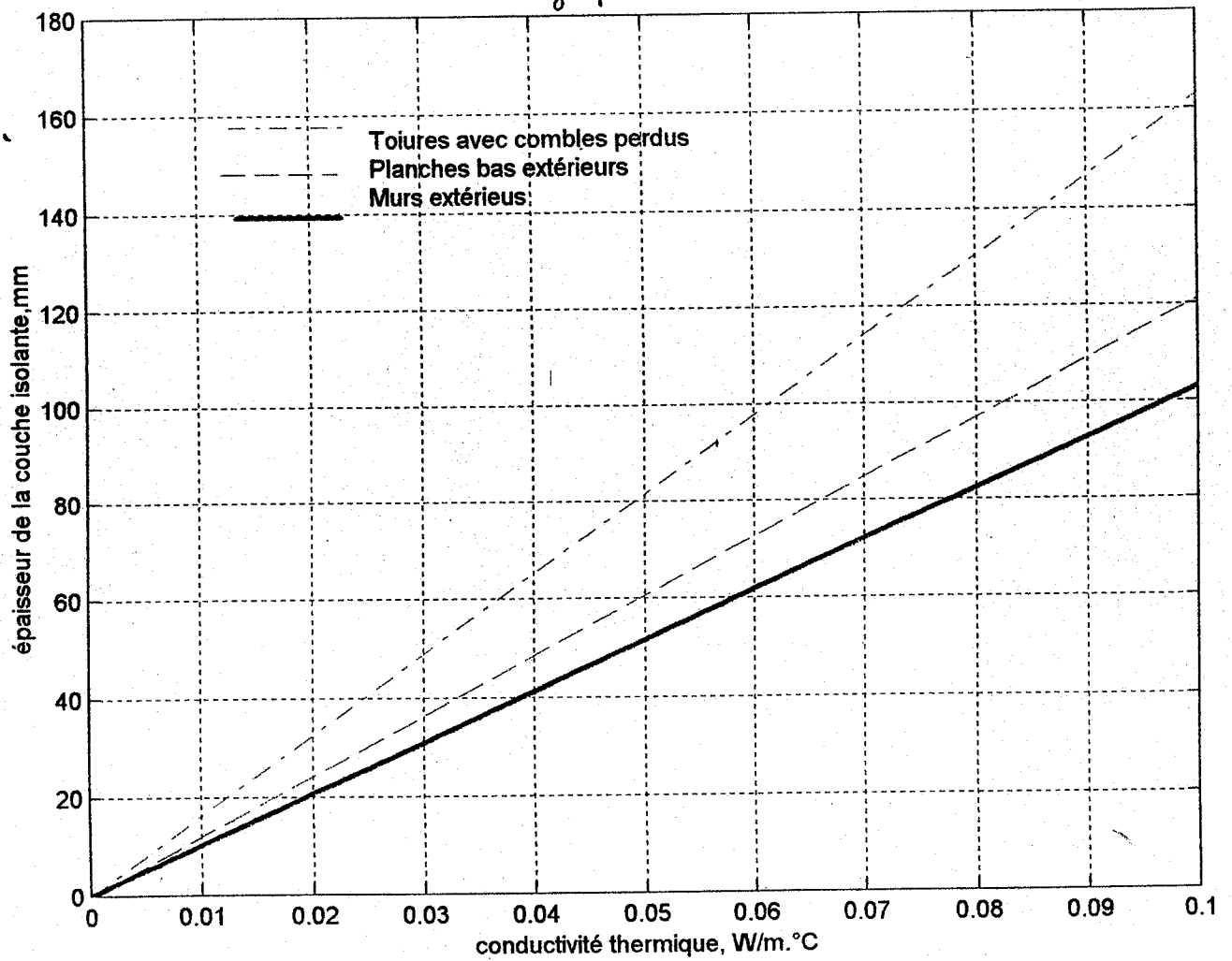
T : Toitures ; **M**: Mur , **PB**: Planchers bas extérieurs.

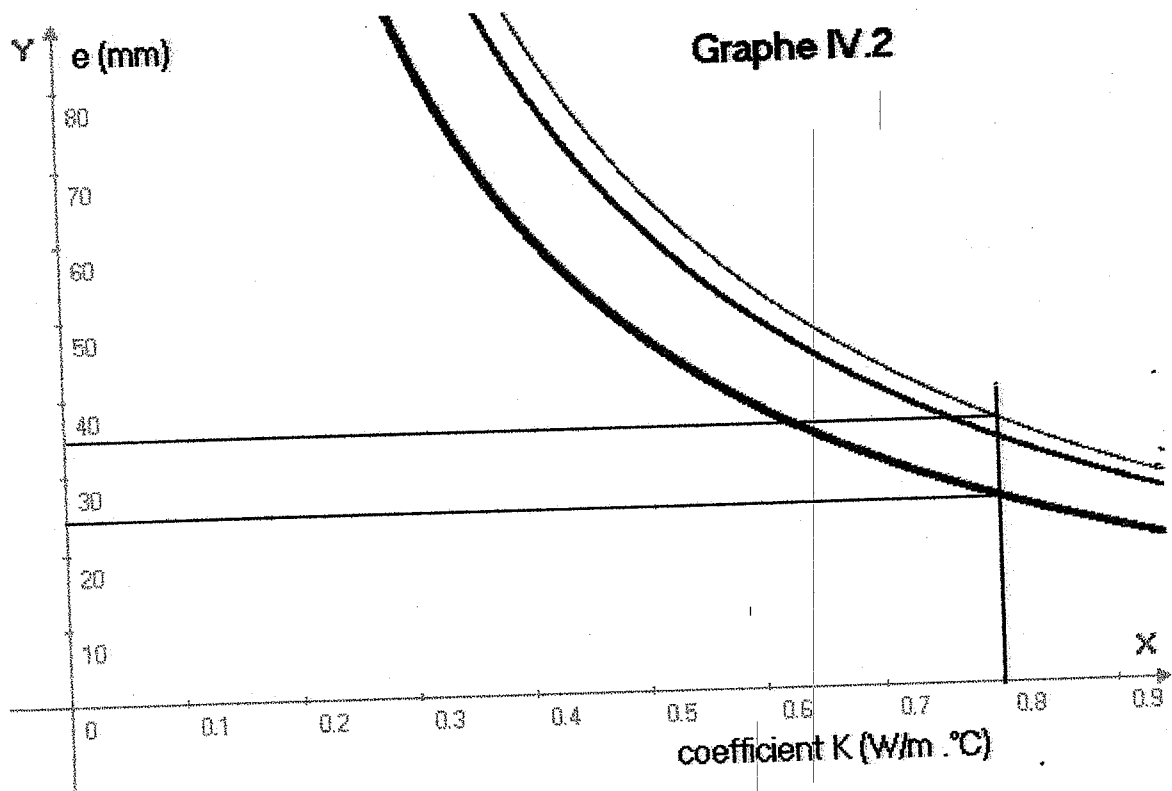
Le graphe (IV.1) donne la valeur de l'épaisseur optimale de la couche isolante, en fonction de la conductivité thermique du matériau isolant, pour chaque partie à isoler de la maison.

Les matériaux d'isolation thermique présentés en commerce ont une conductivité thermique λ comprise entre 0,03 et 0,05 W/m.°C. Ainsi on a une épaisseur de la couche isolante allant de 30 mm à 81 mm .

Le graphe (IV.2) trace la variation de l'épaisseur de la couche isolante en fonction du coefficient de transmission surfacique K espéré avoir obtenir après isolation thermique du mur extérieur de la maison mannequin ($K_0 = 2,50 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$).

graphique IV.1





- $\lambda = 0,029 \text{ W/m} \cdot ^\circ \text{C}$ (mousse de polyuréthane).
- $\lambda = 0,038 \text{ W/m} \cdot ^\circ \text{C}$ (laine de verre)
- $\lambda = 0,041 \text{ W/m} \cdot ^\circ \text{C}$ (laine minérale, polystyrène expansé thermo-comprimé ou polystyrène expansé) .

Les conductivités thermiques λ choisies correspondent aux matériaux isolants présentés dans le commerce et réservés pour l'isolation thermique des murs extérieurs.

Le coefficient de transmission surfacique K optimal, à obtenir après isolation thermique des murs extérieurs, décrit dans la réglementation thermique, égale à 0,8 pour une maison mannequin située dans la zone climatique algérienne A (le littoral).

Ainsi on a une épaisseur optimale de la couche isolante comprise entre 35 et 45 mm.

IV.3 Calcul du coût d'isolation thermique

Le prix P du matériau isolant et ses accessoires, sans pose, pour la solution considérée, est donné pour 1 m^2 de la paroi isolée.

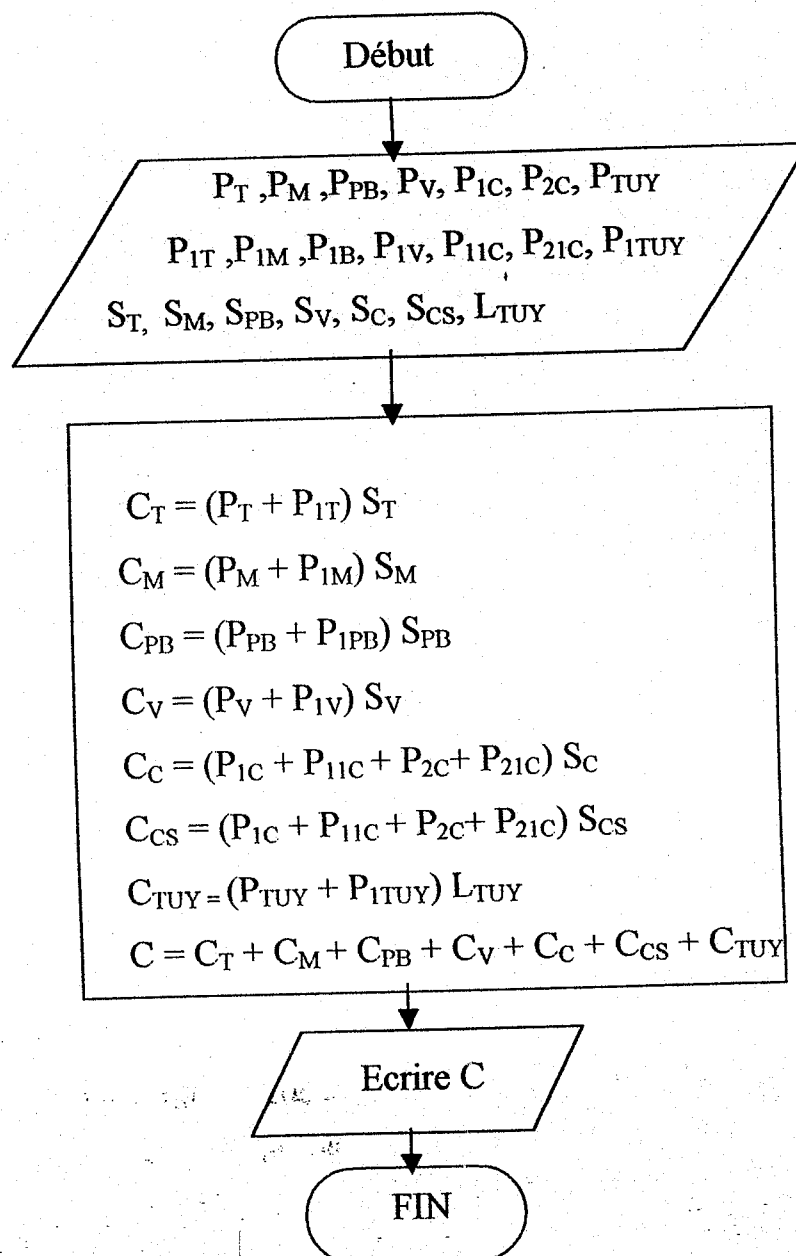
P_1 : coût d'installation par mètre carré du surface isolée.

Le coût total C de l'isolation thermique de la paroi considérée:

$$C = (P + P_1) \times S$$

S : surface de la paroi à isoler.

- **Organigramme:** Calcul du coût total de l'isolation de la maison solaire.



P_i : prix unitaire du matériau isolant (DA/m²), utilisé dans la partie i de la maison.

P_{li} : coût unitaire d'installation (DA/m²).

S_i : surface de la paroi i à isoler.

L_{TUY} : longueur des tuyauteries (m).

P_{TUY} : prix unitaire du matériau isolant, par mètre linéaire (DA/m).

P_{ITUY} : coût unitaire d'installation (DA/m).

On injecte les données de base dans les deux programmes citées plus haut, pour différents solutions proposées au chapitre III, concernant l'isolation thermique de chaque partie de la maison. On compare ainsi les coûts totaux d'isolation pour les différents solutions existantes.

A noter enfin qu'il est incorrecte de dire que la solution la moins chère est toujours la solution la plus intéressante. On l'a bien signalé au chapitre III, que chaque solution proposée présente des avantages et des inconvénients. Il y a donc lieu de choisir la solution présentant le minimum d'inconvénients, avec un coût non élevé.

IV.4 Calcul de l'énergie économisée.

Le chauffage solaire d'une habitation est généralement complété par un chauffage d'appoint (électrique ou à fuel). Cependant lorsqu'on isole thermiquement notre maison, une quantité importante d'énergie d'appoint est économisée.

Dans le chauffage solaire actif, on peut encore économiser l'énergie auxiliaire utilisée pour activer la circulation du fluide caloporteur.

L'énergie dissipée en une saison de chauffe à travers une paroi de surface S:

$$E_D = 0,024 \times K \times S \times D_j \text{ (KWh)}$$

D_j : nombre de degrés-jours de chauffage. C'est pour une localité donnée et une saison de chauffe moyenne, la somme, jour par jour, de l'écart entre une température intérieure conventionnelle (18°C) et la température extérieure moyenne de la journée.

L'énergie économisée suite à l'isolation pratiquée:

$$E = \frac{0,024}{R} (K_0 - K_1) \times S \times D_j \quad (\text{IV.9})$$

K_0 , K_1 désignent les valeurs de coefficient de transmission thermique, avant et après isolation.

R: Rendement de l'installation de chauffage d'appoint.

- **Application**

En utilisant un chauffage d'appoint à fuel (chaudière à mazout par exemple): $R = 0,75$.

D_j : est donné pour chaque zone climatique. Pour notre maison mannequin située dans la zone climatique II : $D_j = 1800$.

L'énergie économisée suite à l'isolation thermique optimale du mur:

$$K_0 = 2,50 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}.$$

$$K = 0,8 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}.$$

$$S = 100 \text{ m}^2$$

$$(IV.9) \Rightarrow E = \frac{0,024}{0,75} (2,50 - 0,8) \times 100 \times 1800$$

$$E = 9792 \text{ KWh/an}$$

La variation de l'énergie économisée en fonction de l'épaisseur de la couche isolante du mur extérieur ($K_0 = 2,50$) est montré dans la figure (IV.3).

Le conductivité thermique du matériau utilisé : $\lambda = 0,041 \text{ W/m.}^\circ\text{C}$.

Le seuil d'énergie économisée $E = 22400 \text{ KWh}$ est l'énergie dissipée en une saison de chauffe à travers le mur de la maison mannequin.

Les épaisseurs des couches isolantes installées dans les murs extérieurs ont des valeurs comprises entre 35 et 45 mm. Cependant l'isolation thermique exécutée peut nous assurer une économie d'énergie annuelle allant de 15.500 à 17.000 KWh

- **La valeur de cette économie annuelle en DA**

En divisant le nombre de kWh économisées par le pouvoir calorifique du combustible utilisé, nous obtenons la quantité du combustible utilisé.

Le pouvoir calorifique du mazout = $10,3 \text{ kWh/l}$

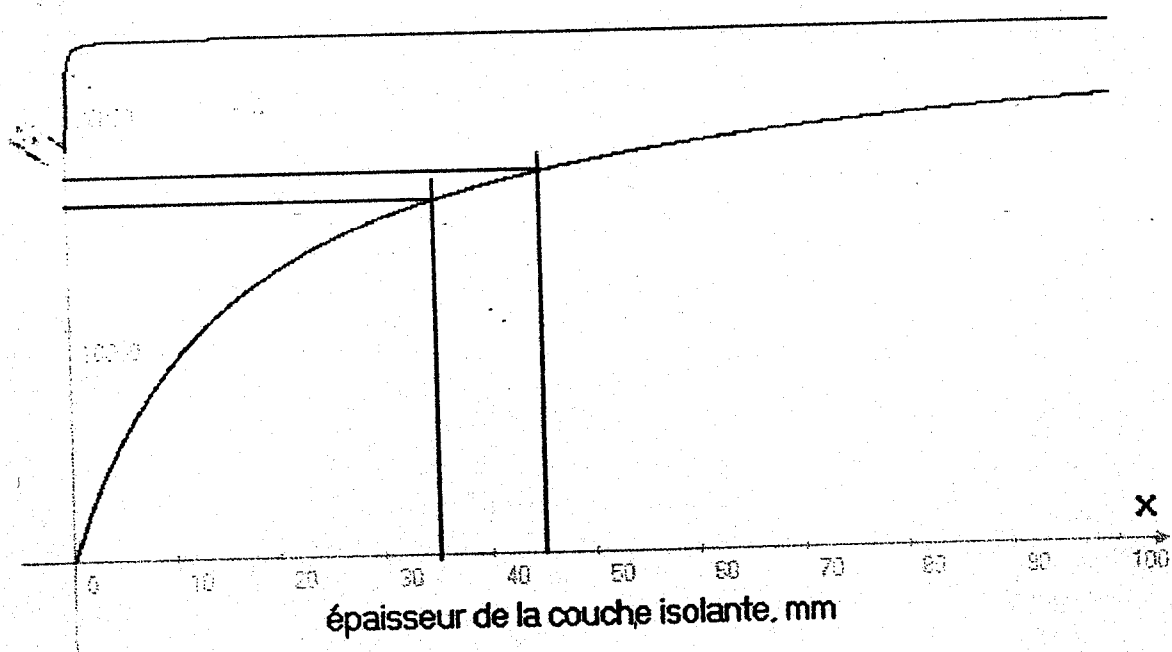
La valeur de l'économie annuelle S :

$$S = \frac{9792}{10,30} \times 11,75 = 11.170,49 \text{ DA}$$

11,75 DA est le prix d'un litre de mazout.

Y E (KWh/an)

graphe IV.3



Ce même travail doit être réalisé pour d'autres parties de la maison; on en déduit la valeur totale d'énergie économisée lors d'exécution d'une structure complète d'isolement thermique.

Il est évident que si on dépasse la valeur optimale de l'épaisseur de la couche isolante, on a une énergie économisée en plus. Cependant cette augmentation d'épaisseur signifie un investissement plus grand dans le projet de la structure d'isolation thermique. Ainsi une étude économique est nécessaire dans ce contexte.

IV.5 Evaluation économique du projet d'isolation thermique

En utilisant le chauffage solaire, le grand public bute immédiatement sur le paradoxe d'une énergie à la fois gratuite et chère.

Le chauffage solaire exige dans la plupart des cas une installation perfectionnée servant à capter et retenir cette énergie fugitive. Les calories solaires ainsi utilisées ne sont plus gratuites que celles que permet d'économiser l'isolation de la maison.

Mais d'autre part, une bonne isolation coûte plus chère qu'une mauvaise isolation thermique.

Dans ce paragraphe, on réalise une évaluation économique du projet d'isolation thermique d'une maison solaire.

Soit S_1 la somme à dépenser pour réaliser une structure d'isolation thermique, et S_2 la somme que l'on espère économiser chaque année grâce à cette opération.

- **La durée d'amortissement de l'isolation** : s'évalue par le nombre d'années

$$n = \frac{S_1}{S_2} \quad (IV.10)$$

- **La rentabilité de l'opération**: est le nombre inverse

$$R = \frac{1}{n}$$



Il est évident que pour être rentable, la structure d'isolation doit rester opérationnelle et fiable, au moins pendant la durée de son amortissement. Si on estime à V années la durée de vie probable de la structure d'isolation, on

définira l'indice de rentabilité comme le rapport de total des sommes économisées à la somme investie.

$$r = \frac{V \cdot S_2}{S_1} \quad (IV.12)$$

L'opération sera dite rentable si $r > 1$.

D'autre part, il faut tenir en compte un facteur défavorable à la décision d'investir: les intérêts que pourrait rapporter la somme S_1 , si on l'a plaçait dans une banque.

Pour évaluer de façon plus exacte la rentabilité économique de la réalisation, il y a lieu donc de comparer la somme investie aujourd'hui non pas avec les sommes qui ne seront disponibles que dans l'avenir, mais avec l'équivalent actuel (ou valeur actualisée) de ces sommes, compte tenu des échéances annuelles auxquelles elles deviendront disponibles.

La somme S_2 que l'opération doit faire gagner dans un an pourrait également être retirée, l'année prochaine, d'une banque ou l'on aurait placé aujourd'hui une somme inférieure S_3 qui deviendra égale à S_2 dans un an, par le jeu des intérêts qu'elle va rapporter.

Soit τ le taux annuel de ces intérêts. Au bout d'un an, S_3 devient:

$$S_3 + \tau S_3 = S_3(1 + \tau) = S_2$$

$S_3 = \frac{S_2}{1 + \tau}$ est appelée la valeur actualisée de la somme S_2 qui sera disponible dans un an.

De même la valeur actualisée d'une somme S_2 qui sera disponible dans n années est :

$$S_n = \frac{S_2}{(1 + \tau)^n} \quad (IV.13)$$

On voit que la valeur actualisée du gain total espéré pendant n années vaut:

$$G_n = \frac{S_2}{1+\tau} + \frac{S_2}{(1+\tau)^2} + \frac{S_2}{(1+\tau)^3} + \dots + \frac{S_2}{(1+\tau)^n}$$

ou, en posant $X = \frac{1}{1+\tau}$

$$G_n = S_2 \cdot (1 + X + X^2 + X^3 + \dots + X^{n-1})$$

Le terme entre parenthèses est le résultat de la division de $1-X^n$ par $1-X$.

$$G_n = S_2 \left(X \cdot \frac{1-X^n}{1-X} \right) \quad (\text{IV.14})$$

La durée de l'amortissement n de la réalisation du prix S_1 s'en déduit en posant:

$$G_n = S_1 \quad (\text{IV.15})$$

• Application

Dans l'exemple traité en (IV.3), la somme S_2 économisée chaque année suite à l'isolation thermique du mur de notre maison mannequin:

$$S_2 = 11.170,49 \text{ DA.}$$

La somme S_1 à dépenser pour isoler le mur, par le polystyrène expansé thermo-comprimé (Voir la solution proposée en chap. III):

$$e = 35 \text{ mm}$$

On prend l'épaisseur existant au marché : $e = 40 \text{ mm}$ (entreprise nationale des lièges et produits isolants)

Le prix unitaire du matériau isolant:

$$P = 6000 \text{ DA/m}^3 \text{ (janvier 2003)}$$

La surface du mur $S = 100 \text{ m}^2$

$$\text{Le volume d'isolant } V = 100 \times 0,04 = 4 \text{ m}^3$$

$$\text{Le prix total de l'isolant égale à } 6000 \times 4 = 24.000 \text{ DA.}$$

On estime le coût d'installation de la couche isolante à 200 DA le mètre carré isolé.

$$\text{Le coût total d'installation égale à } 200 \times 100 = 20.000 \text{ DA.}$$

$$\text{Finalement } S_1 = 24.000 + 20.000 = 44.000 \text{ DA.}$$

- Calcul économique élémentaire

$$\text{Durée d'amortissement: } n = \frac{S_1}{S_2} = \frac{44.000}{11.170,49} = 3,9 \text{ ans}$$

$$\text{Rentabilité: } R = \frac{1}{n} = 0,26 \text{ ou } 26 \%$$

- Calcul actualisé

Si on a la possibilité de placer l'argent dans une banque avec un taux d'intérêts $\tau = 0,14$, la durée d'amortissement n peut être tirée à partir des équations (IV.14) et (IV.15).

$$S_1 = S_2 \left(X \cdot \frac{1 - X^n}{1 - X} \right) \quad \text{avec} \quad X = \frac{1}{1 + \tau}$$

$$X = \frac{1}{1+0,14} = 0,88$$

$$44000 = 11170,44 \left(0,88 \cdot \frac{1-(0,88)^n}{1-0,88} \right)$$

$$0,88 \cdot \frac{1-(0,88)^n}{1-0,88} = 3,94$$

$$1-(0,88)^n = 0,54$$

$$n = \frac{\ln(0,46)}{\ln(0,88)} = 6 \text{ ans}$$

$$\text{et } R = \frac{1}{6} = 0,17 \text{ ou } 17 \%$$

Comme le matériau isolant n'aura aucune peine à durer plus de 6 ans, sans dégradation de qualité et de performances, il s'agit là d'une opération très rentable.

Conclusion

L'inclusion d'un matériau isolant thermiquement dans la structure de la maison, est nécessaire pour avoir le confort souhaitable à l'intérieur de notre maison solaire, ainsi que pour économiser l'énergie d'appoint utilisé et pour que le système solaire de chauffage et de climatisation soit économiquement rentable.

Notre étude consiste à optimiser l'isolation thermique. La méthode de calcul d'optimisation basée sur les lois empiriques de GIVONI, nous a donné des valeurs élevées des épaisseurs des couches isolantes qui est économiquement non rentable.

En utilisant les règles d'isolation citées dans la réglementation thermique, on a analysé le problème d'isolation thermique des maisons. Le calcul est basé sur le coefficient de transmission surfacique K souhaitable pour chaque partie de la maison. Ce coefficient est donné pour chaque partie de la maison, ainsi que pour chaque zone climatique.

Les résultats ainsi trouvés sont très intéressants et peuvent être directement utilisés par le public concerné.

Un programme de calcul des épaisseurs des couches isolantes est ainsi réalisé, permettant d'obtenir directement les résultats finaux pour différents types des maisons.

Il est à noter avant la conclusion de ce travail que les coefficients K utilisés dans le calcul, sont les coefficients de transmission surfacique optimaux dictés par la réglementation thermique française. Pour les maisons situées dans la zone climatique algérienne II (le littoral), on a utilisé les résultats concernant la zone climatique française C, vu la ressemblance de climat.

Cependant un travail approfondi est réservé dans le contexte de l'élaboration d'une réglementation thermique algérienne pour tout type des maisons y compris les maisons solaires et pour chaque zone climatique.

Liste des figures, graphes et tableaux

Figure I.1 : Chauffage solaire passif : Mur TROMBE	9
Figure I.2 : Chauffage solaire passif : Gains directs	10
Figure I.3 : Chauffage solaire actif : Système actif à air.....	12
Figure I.4 : Chauffage solaire actif : Système actif à eau	13
Figure III.1 : Maison solaire mannequin : parties à isoler thermiquement.....	30
Figure III.2 : Isolation thermique des toitures avec combles non habités (Solution N°1)	31
Figure III.3 : Isolation thermique des toitures avec combles non habités (Solution N°2)	33
Figure III.4 : Isolation thermique des toitures-terrasses.....	35
Figure III.5 : Isolation des baies vitrées (survitrage).....	38
Figure III.6 : Isolation des murs extérieurs.....	40
Figure III.7 : Isolation des planchers bas extérieurs :	43
Figure III.8 : Calfeutrement des fenêtres	47
Figure III.9 : Calfeutrement en bas des portes.....	47
Figure III.10 : Calorifugeage des tuyauteries	49
Figure III.11 : Isolation thermique du capteur solaire.....	49
Tableau IV.1 : Règles d'isolation thermique des habitations.....	57
Graphe IV.1 : Variation de l'épaisseur optimale de la couche isolante en fonction de la conductivité thermique du matériau isolante.....	65
Graphe IV.2 : Variation de l'épaisseur optimale de la couche isolante en fonction du coefficient de transmission surfacique K	66
Graphe IV.3 : Variation de l'énergie économisée en fonction de l'épaisseur de la couche isolante.....	71

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Ingénierie des systèmes solaires – Application à l'habitat.
- [2] Isolation thermique des constructions en Algérie.
- [3] L'isolation thermique de la maison, P. CHAUVIGNY, Editions EYROLLES Paris, 1980.
- [4] Le rayonnement solaire – conversion thermique et applications, R. BERNARD –
G. MENGUY – M. SCHWARTZ, TECHNIQUE ET DOCUMENTATION, Paris, 1980.
- [5] Bilan thermique d'une maison solaire – méthode de calcul rapide.
- [6] Livre thermique du bâtiment. Tome 1.
- [7] L'isolation thermique- le répertoire des solutions pratiques pour l'habitat existant,
Michel FRENOT, Nabih SAWAYA, EDISUD , Aix-en-Provence, 1979.
- [8] Thermique du bâtiment, T. S. DEAN, Paris, 1999
- [9] Solar energy thermal processes, John A. Duffie – William A. Beckman, Wiley-Interscience,
US.A, 1974.
- [10] A. Giaccone, G. Rizzo: The evaluation of energy demand reductions by intermittent
heating of buildings, Advances in solar energy technology, Volume 1, 1978, p 564.
- [11] Rudolf Sizmann : Thermal storage systems – present status and trends, Advances in
solar energy technology, Volume 1, 1987, p 541.
- [12] J. Richard Williams : Solar heating and cooling of buildings, Solar energy
applications, 2000.
- [13] J.-P. Padet, A.-M. Cames-Pintaux: Etude d'un modèle unidimensionnel pour les
contacts thermiques en régime instationnaire, Revue physique appliquée, 20, p 599, 2001.

Sites Web

WWW.SOLUTIONS-ISOVER.FR

WWW.IFRANCE.COM

WWW.EA-POLE-EAU.COM

WWW.FYS.UIO.NO

WWW.CDER.DZ

WWW.CSTB.FR

WWW.BATIRENOVER.COM

WWW.CCW.BE

WWW.PERSO.WANADOO.FR

WWW.SSES.CH

WWW.REGISUQAM.CA

WWW.FYS.UIQNO.CA

WWW.SOLAR-CLUB.WED

WWW.ENERGIE-SCHWEIZ.CH

WWW.FST.AC.MA

WWW.ESPACE-ENVIRONNEMENT.BE

WWW.EIG.UNIGE.CH

WWW.DSP-PSD.COMMUNICATION.GC.CA