

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Abou-Bakr Belkaid Tlemcen

Faculté des Sciences

Département de Physique

Unité de Recherche Matériaux & Energies Renouvelables (URMER)



Mémoire de Master

En Matériaux, Systèmes Et Energies Renouvelables

Présentée par

Melle. Boudjenane Wassila

THEME

**Etude thermique d'une vitre en film composite de type
PDLC.**

Soutenue le 22 juin 2016.

Devant le jury composé de :

Président

Mr. A. BERAYAH

Professeur

Université de Tlemcen

Directeur de thèse

Mr. Z. ZIANI

Maître de Conférences B

C. U. Naâma

Examineurs

Mr. R. BENMOUNA

Professeur

Université de Tlemcen

Mr. S. AMARA

Maître de Conférences A

Université Panafricaine

Année Universitaire 2015–2016

Remerciement

En tout premier lieu, je remercie le bon Dieu, tout puissant, de m'avoir donné la force et l'audace pour dépasser toutes les difficultés.

Mes remerciements vont enfin à toute personne qui a contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

Tout d'abord, je tiens à remercier le directeur Pr Abdelhalim BENMANSOUR Directeur de l'Unité de Recherche Matériaux et Energies Renouvelables pour m'avoir accueillie au sein de l'Unité, pendant l'année de travail.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à Mr Zakarya Ziani Maître de Conférences au Centre Universitaire Salhi Ahmed de Naâma, qui par ses enseignements et ses conseils m'a été un guide précieux dans l'aboutissement de mes travaux de recherches de mémoire de Master et dans l'élaboration de ce modeste manuscrit, et pour la manière dont il a encadré mes travaux, avec bonne humeur, rigueur scientifique et enthousiasme. J'ai eu beaucoup de chance de travailler avec lui. Je lui suis sincèrement reconnaissante pour son soutien constant et pour l'intérêt qu'il a porté à ce travail. Sa disponibilité, sa modestie et ses compétences m'ont été très précieuses.

Je remercie très chaleureusement Monsieur Abdelkader BERRAYAH Professeur à l'Université Abou Bakr Belkaid de Tlemcen pour m'avoir fait l'honneur de présider ce jury.

Mes remerciements les plus élogieux à :

Monsieur Sofiane AMARA Maître de conférences à l'Université Panafricaine de Tlemcen, et Monsieur Réda BENMOUNA Professeur à l'Université Abou-Bakr Belkaïd de Tlemcen, pour avoir bien voulu examiner ce travail.

Je tiens à remercier, par ailleurs tous ceux et celles qui m'ont aidé de loin ou de près dans la réalisation de ce travail. Je tiens à présenter mes chaleureux remerciements à Mr Abderezzak MAROUF, Directeur du Centre Universitaire Salhi Ahmed de Naâma, qui m'a beaucoup aidé dans mes travaux de recherche, et qui m'a donné l'autorisation d'utiliser l'équipement du Centre Universitaire.

Enfin, je tiens à remercier tous mes enseignants du primaire à l'Université, en passant par le moyen et le secondaire qui m'ont donné l'éducation et les enseignements adéquats pour aboutir au ce mémoire.

Dédicace

Je dédie ce travail

Avant tout à mes chers Parents qui m'ont soutenu durant toutes ces années d'études et qui ont été toujours présent pour me pousser vers toujours plus loin et qui sans eux je ne serais pas arrivé a ce stade, un grand merci à eux.

A ma sœur Souhila et ma nièce Fatima Zohra, je leurs souhaite toute la réussite et que du bonheur dans leurs vie.

Ainsi a tous mes amis, collègues de la spécialité « Physique des Matériaux Systèmes et Energie Renouvelable », et en particulier mes copines que j'adore « Sara et Zoulikha »

A mes professeurs, mes amis et a tous ceux qui m'ont assisté et soutenu dans mes études.

Sommaire

Introduction Générale	1
-----------------------------	---

Chapitre I Les Modes de Transfert de Chaleur

I Introduction :	5
I.1 Notion général de transfert de chaleur :	5
I.1.1 Conduction :	6
I.1.2 La théorie de la conduction repose sur l'hypothèse de Fourier :	7
I.1.3 La convection :	8
I.1.3.1 La convection forcée.....	8
I.1.4 Rayonnement :	10
I.2 Perte de chaleur :	14
I.2.1 Déperditions par les parois vitrées	18
I.2.2 Le confort thermique :	20
I.2.3 Les technologies permettant d'améliorer les performances thermiques	21
I.3 Conclusion :	23
I.4 Bibliographie :	24

Chapitre II Types de Vitrages

II Introduction :	28
II.1 Les verres à couches pour l'isolation thermique renforcée et le contrôle solaire . 28	
II.1.1 Le verre et le rayonnement solaire	28
II.2 Les vitrages électrochromes	35
II.2.1 Introduction.....	35
II.2.2 Les vitrages « obturateurs » à cristaux liquides	35

II.2.3	Le vitrage électro chrome « assombrissant » :	38
II.2.4	La thermochromie	40
II.2.5	Les dépôts set couches thermochromes pour vitrages	41
II.2.6	Autres variétés de vitrages thermochromes.....	42
II.3	Modification des propriétés optiques du verre	43
II.3.1	Introduction.....	43
II.3.2	Applications pratiques des traitements « antireflets ».....	43
II.3.3	Applications pratiques des traitements	44
II.4	Conclusion :	45
II.5	Bibliographie	46

Chapitre III Couche Polymère PDLC

III.	Introduction :	49
III.1	Polymère :	49
III.1.1	Définition des polymères :	49
III.1.2	Différents types de polymère.....	49
III.2	Classification des polymères :	52
III.3	Propriétés des polymères	53
III.3.1	Propriétés physiques	53
III.3.2	Propriétés chimiques.....	53
III.3.3	Propriétés thermiques	53
III.3.4	Propriétés électriques	53
III.3.5	Propriétés acoustique	53
III.3.6	Propriétés mécaniques.....	54
III.3.7	Propriétés optiques	54
III.4	Catégories de polymère :	54
III.4.1	Les cristaux liquides :	54
III.5	Propriétés des cristaux liquides :	55
III.5.1	La biréfringence (anisotropie des indices de réfraction)	55
III.5.2	Application des cristaux liquides :	58

III.6	Les cristaux liquides dispersés dans une matrice polymère (PDLC) :	58
III.7	Définition et fonctionnement :.....	59
III.8	Méthode de préparation des PDLC :.....	60
III.9	Morphologie des matériaux PDLC :.....	60
III.10	Propriétés électro-optique des PDLC :	61
III.11	Application de PDLC :.....	62
III.12	Conclusion :	63
III.13	Bibliographie	64

Chapitre IV Résultats et Discussions

III	Introduction	67
III.1	L'auto-adhésif intelligent PDLC FILM.....	67
III.1.1	Blanc intelligent film A4 taille échantillon :.....	67
III.1.2	Gris clair un film intelligent A4 Taille échantillon :	67
III.1.3	Information technique du film PDLC utilisé	68
III.2	Caractéristique :.....	69
III.3	Simple vitrage :	69
III.3.1	Variation de température de la face interne et externe :.....	69
III.3.2	Résultats obtenues :.....	70
III.3.3	Détermination de la conductivité du verre.....	71
III.4	Double vitrage sans la présence de l'air immobile :.....	72
III.4.1	Variation de température de la face interne et externe :.....	72
III.4.2	Détermination de la conductivité thermique :	73
III.5	L'ajout d'une feuille de PDLC adhésive :.....	74
III.5.1	Variation de température de la face interne et externe :.....	74
III.5.2	La conductivité thermique du PDLC à l'état opaque	75
III.5.3	La conductivité thermique du PDLC à l'état transparente.....	75
III.5.4	Détermination de la conductivité thermique du PDLC pour différent voltage .	76
III.6	Conclusion :	78
	Conclusion Générale:.....	80

Liste des figures et Tableaux

Chapitre I

Figure (1.1) : transfert par conduction	3
Figure (1.2) : transfert par conduction à l'échelle microscopique	3
Figure (1.3) : l'augmentation du flux de chaleur	4
Figure (1.4) : la loi fondamentale du flux de chaleur traversant une paroi	4
Figure (1.5) : transfert par convection.	5
Figure (1.6) : Les deux modes de transfert de chaleur par convection	6
Figure (1.7) : principe de coefficient d'échange par convection	6
Figure (1.8) : transfert par rayonnement	7
Figure (1.9) : le mécanisme du rayonnement	7
Figure (1.10) : Réflexion, transmission et absorption du rayonnement	10
Figure (1.11) : Les déperditions thermiques d'un habitat non isolée	12
Figure (1.12) : anatomie d'une fenêtre	15
Figure (1.13) : présente les coefs de déperdition thermique k pour des vitrages clairs	16
Figure (1.14) : températures de surface des vitrages	17
Figure (1.15) : mise en parallèle U_g / S_w , la réduction des transmissions thermiques	19
Figure (1.16) : les fenêtres intelligentes (smart Windows)	20

Chapitre II

Figure (2.1) : Puissance spectrale du rayonnement solaire reçu sur Terre	25
Figure (2.2) : isolations thermiques comparées d'un simple vitrage, d'un double vitrage.....	30
Figure (2.3) : vitrage Electrochrome « obturateur » à cristaux liquides.....	32
Figure (2.4) : structure d'un vitrage obturateur.	32
Figure (2.5) : principe de fonctionnement d'un vitrage 'obturateur'	34
Figure (2.6) : vitrage Electrochrome pour un bâtiment.....	35

Figure (2.7) : Principe de fonctionnement d'un vitrage	36
Figure (2.8) : structure d'un vitrage « intelligent » Thermochrome	37
Figure (2.9) : les feuilles de verre traitées anti-réfléchissantes	40

Chapitre III

Figure (3.1) : Ensemble de macromolécules formant un polymère	44
Figure (3.2) : Homopolymère Polyméthacrylate de méthyle	45
Figure (3.3) : Copolymère poly (méthacrylate de méthyle-co-acrylonitrile).....	45
Figure (3.4) : Voies, Types et Procédés de polymérisation.....	46
Figure (3.5) : montre que Le cristal liquide est une phase intermédiaire	50
Figure (3.6) : Illustration de la phase nématique.....	52
Figure (3.7) : Illustration de la phase smectique A (a) et smectique C (b)	52
Figure (3.8) : Illustration d'une cellule de cristal liquide	54
Figure (3.9) : fonctionnement des P.D.L.C	55
Figure (3.10) : Configurations des gouttelettes	56

Chapitre IV

Figure (4.1): Film PDLC blanc	67
Figure (4.2): Film PDLC Gris.....	67
Figure (4.3) : Composition du film PDLC.....	68
Figure (4.4) : Teste de conformité du film PDLC	68
Figure (4.5) : Les limites d'utilisation du film PDLC	68
Figure (4.6) : Schéma équivalent de l'expérimental	70
Figure (4.7) : Variation de la température interne et externe	70
Figure (4.8) : Variation de la conductivité thermique avec la différence de température	71
Figure (4.9) : Variation de la température interne et externe	72
Figure (4.10) : Variation de la conductivité thermique	73

Figure (4.11) : Variation de la température interne et externe	74
Figure (4.12) : Variation de la conductivité thermique	75
Figure (4.13) : Variation de la conductivité thermique	76
Figure (4.14) : Variation de la conductivité	77
Tableau. (4.1) : tableau des valeurs des conductivités à l'état permanent.....	77

Nomenclatures

Symboles	Notations principales
φ	Flux de chaleur
λ	Conductivité thermique du milieu ($W\ m^{-1}\ K^{-1}$)
ϕ	Densité du flux de chaleur (W/m^2)
e	L'épaisseur de la paroi en (m)
T_f	Température du fluide ($^{\circ}C$)
T_s	Température de surface ($^{\circ}C$)
h	Le coefficient de transfert thermique par convection ($W\ m^{-2}K^{-1}$)
S	Surface d'échange (m^2).
α	Coefficient d'absorption
ϵ	Coefficient d'émission
ρ	Coefficient de réflexion.
λ	Longueur d'onde (nm).
h	$h = 6.62\ 10^{-34}J.s$ Constate de PLANCK.
E	Niveau d'énergie (J).
C	$C = 3\ 10^8m.s^{-1}$ La vitesse des ondes électromagnétiques dans le vide.
v	La vitesse de propagation (m/s).
FS	Facteur solaire (%).
K, U_g	Coefficients de déperdition thermique pour des vitrages ($W/m^2.k$)
Sw	Apport solaire (%).
U	Le coefficient de transmission énergétique ($W\cdot m^{-2}\cdot K^{-1}$).
g	Le coefficient appelé <i>SHGC</i> , est exprimé par un nombre compris entre 0 et 1.
TL	Transmission lumineuse (%).
G	Flux incident (la puissance incidente) (W/m^2)
αG	Flux G est absorbée. (W/m^2)
ρG	Flux G est réfléchi. (W/m^2)
τG	Flux G est transmise. (W/m^2)
T_c	Température de transition ($^{\circ}C$).
R	Le coefficient de réflexion.
n_e	Indice de réfraction extraordinaire.
n_o	Indice de réfraction ordinaire
n_m	Indice de réfraction de la matrice polymère.

Introduction générale

L'énergie est un atout incontournable pour le développement économique. Elle contribue à l'amélioration des conditions de vie, car elle propose un niveau de confort de vie dont la population a besoin.

La forte demande actuelle de consommation énergétique en Algérie est due principalement à l'augmentation du niveau de vie de la population et du confort qui en découle, ainsi qu'à la croissance des activités industrielles. Cette demande, nous interpelle qu'une nouvelle politique énergétique et de nouveaux comportements des usages sont nécessaires. (FOURA 2007)

En outre, les relations entre la construction et son environnement climatique, en ce qui concerne l'impact des échanges thermiques, ont été particulièrement négligées en Algérie. Mais, en raison de la crise de l'énergie, elles sont devenues un des principaux sujets de préoccupation des chercheurs dans le domaine de la construction. Aujourd'hui, le comportement des habitats du point de vue thermique, en corrélation avec les conditions climatiques et économiques, fait l'objet de nombreuses études et recherches dans tous les pays.

Par ailleurs, en Algérie, un grand nombre de logements ne semblent pas répondre aux exigences du confort thermique et d'économie d'énergie. Cela s'explique par l'absence d'une réglementation spécifique d'une part et par le manque de savoir-faire et une méconnaissance du sujet par les maîtres d'ouvrage d'une autre part.

Néanmoins, L'amélioration des techniques au niveau des matériaux de construction et d'isolation permet aujourd'hui de réaliser des habitats qui rassemblent à la fois les qualités esthétiques et thermiques, tout en offrant un cadre de vie plus confortable en étant consommateur de très peu d'énergie. (FOURA 2007)

A partir de ces données nous avons constatés que la nécessité de l'option de l'économie énergétique dans les habitats est devenue primordiale. Pour cette raison nous allons aborder une des méthodes utilisé pour minimisé les pertes d'énergie à travers les vitres et pour cela nous allons étudier le PDLC.

Dans ce mémoire on va parler des déperditions thermiques surfaciques plus précisément les pertes par transmission à travers les vitres, Contrairement aux idées reçues, les vitrages ne représentent que 13% des pertes et n'arrivent qu'en 4^{ème} position après les fuites d'air, Les murs et les toitures.

Le but de cette étude est de diminuer ce pourcentage en améliorant les performances thermiques des vitrages, par exemple on peut insérer entre deux vitrages un excellent isolant, transparent, disponible et gratuit « l'air immobile sec » ou bien agir sur les caractéristiques de surface du verre en le couvrant d'une mince couche d'oxyde métallique parfaitement transparent.

Ce pendant à cause d'épaisseur des deux vitrages, une nouvelle gamme de matériaux composites à base de cristaux liquides a été découvert destiné aux applications optiques et électro optiques.

Ces matériaux se présentent sous forme d'une dispersion de micro gouttelettes de cristal liquide, de bas poids moléculaire, dans une matrice polymère, « PDLC » (Polymer Dispersed Liquid Crystals). Leur intérêt tient à leurs intéressantes propriétés électro optiques, comme l'atteste le nombre croissant de publications, qui leur sont consacrés. La caractéristique importante de ces matériaux est le passage d'un état opaque (OFF) à un état transparent (ON). Ces matériaux peuvent, en effet, commuter d'un état fortement diffusif à un état transparent par application d'un champ externe (électrique, magnétique).

Dans ce contexte nous abordons le sujet en quatre chapitres, On a consacré le premier chapitre aux définitions et aux notions générales de transferts thermiques et aussi les pertes de chaleur dans un habitat.

Le deuxième chapitre nous a permis de présenter les différents types de vitrage et aussi introduire les modifications des propriétés optiques du verre par dépôt multicouches diélectriques.

Dans le troisième chapitre on a abordé les concepts généraux sur les polymères, les cristaux liquides et les PDLCs.

Le quatrième chapitre représente les aboutissements de notre expérience avec discussion et interprétation des résultats obtenus.

A la fin une conclusion qui résume notre travail, et présente l'intérêt de notre étude suivis des perspectives intéressantes dans ce domaine énergétique.

Chapitre I

Transfert Thermique

Chapitre I

Les Modes de Transfert de Chaleur

Sommaire

I	Introduction :	2
I.1	Notion général de transfert de chaleur :.....	2
I.1.1	Conduction :	3
I.1.2	La théorie de la conduction repose sur l’hypothèse de Fourier :	4
I.1.3	La convection :.....	5
I.1.3.1	La convection forcée.....	5
I.1.4	Rayonnement :	7
I.2	Perte de chaleur :	11
I.2.1	Déperditions par les parois vitrées.....	15
I.2.2	Le confort thermique :.....	17
I.2.3	Les technologies permettant d’améliorer les performances thermiques	18
I.3	Conclusion :	20
I.4	Bibliographie :	21

I Introduction :

Le phénomène de transfert de chaleur existe depuis toujours. Cependant, comprendre ces principes fondamentaux et de les appliquer à l'échelle mondiale est l'un des scénarios qui fait l'objet de nombreuses recherches dans différents domaines. Les mécanismes de transferts de chaleur dépendent bien évidemment de la température. En conduction et convection, cette dépendance met en jeu principalement les différences de températures car cette énergie de chaleur est transmise de la surface la plus chaude à celle la plus froide ; par contre en rayonnement l'importance des échanges est fortement liée au niveau de la température car dans ce mode la transmission d'énergie est à distance, entre deux parois séparées par un milieu transparent ou semi transparent (Climat, 2016).

I.1 Notion générale de transfert de chaleur :

Les deux notions fondamentales en transferts thermiques sont la température et la chaleur. D'un côté La température caractérise l'état d'un corps ; et de l'autre coté la chaleur exprime une énergie échangée.

Cette dernière est une forme d'énergie, qui est dégradée, car on peut souvent transformer différentes formes d'énergie en chaleur, mais la réciproque n'est pas vraie, par ailleurs toutes les pertes d'énergie dans les machines et les transformations (frottement tourbillons, pertes de charge etc....) se transforment en chaleur et peuvent se produire par des échauffements. Pour qu'il ait transfert de chaleur. (BENTHAMI, 2004).

L'étude des transferts thermique se décompose en trois parties principales, avec chacune un mode de transfert de chaleur bien déterminé on cite :

La conduction, la convection et le rayonnement, avec des principes, des conditions et des processus physiques bien définis pour chacune de ces modes. En effet, comme l'énergie thermique d'un milieu matériel correspond à l'énergie cinétique de ses constituants fondamentaux ayant une certaine liberté de mouvement (molécules, atomes, électrons libres, ...), ceux-ci pourront échanger tout ou une partie de leur énergie thermique, c'est-à-dire gagner ou perdre l'énergie cinétique :

- Soit par interaction directe avec les particules voisines (choc de molécules par exemple), ce qui correspond à la conduction.

Chapitre I : Les Modes de Transfert de Chaleur

- Soit par absorption ou émission de radiations électromagnétiques, ce qui correspond au rayonnement. (Maamar, Etude et Effet de l'Orientation de deux Pièces, 2010/2011).

Enfin le dernier mode de transfert la convection n'intervient que pour les gaz et les liquides (le fluide en mouvement qui transporte de la chaleur) il agit avec un mouvement macroscopique de la matière.

I.1.1 Conduction :

Le mode de transfert thermique qui est provoqué par une différence de température entre deux régions d'un même milieu, ou entre deux milieux en contact, et se réalisant sans déplacement global de matière (à l'échelle macroscopique) est La conduction thermique. Qui s'interprète comme la transmission de poche en poche de l'agitation thermique : un atome ou une molécule cède une partie de son énergie cinétique à l'atome voisin. Dans les solides, la conduction thermique est assurée simultanément par les électrons de conduction et les vibrations du réseau cristallin (Wikipedia, 2016).

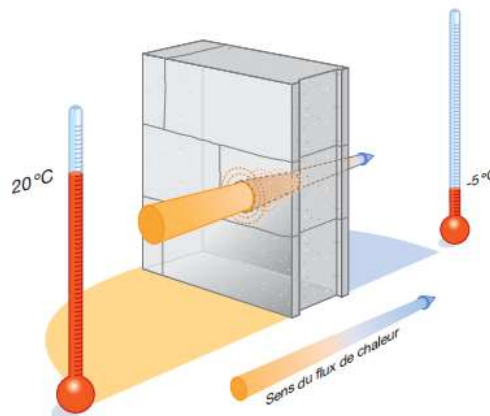


Figure (1.1) : transfert par conduction. (EcoEnergieTech, 2014)

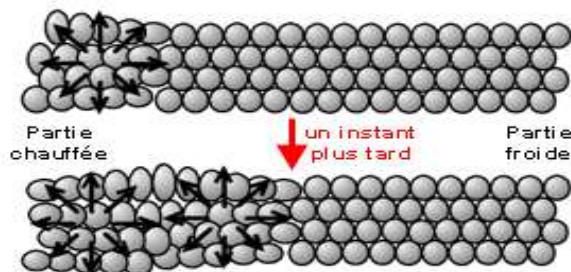


Figure (1.2) : transfert par conduction à l'échelle microscopique. (EcoEnergieTech, 2014)

1.1.2 La théorie de la conduction repose sur l'hypothèse de Fourier :

1.1.2.1 Loi de Fourier :

Le flux de chaleur augmente quand l'écart de température augmente lui aussi. Pour une même paroi, de nature et d'épaisseur identiques, et pour un écart de température 2 fois plus grand, la fuite de la chaleur se traduira par un effet double. (<http://www.ecoenergiotech.fr/spip.php?auteur1>, 2014)

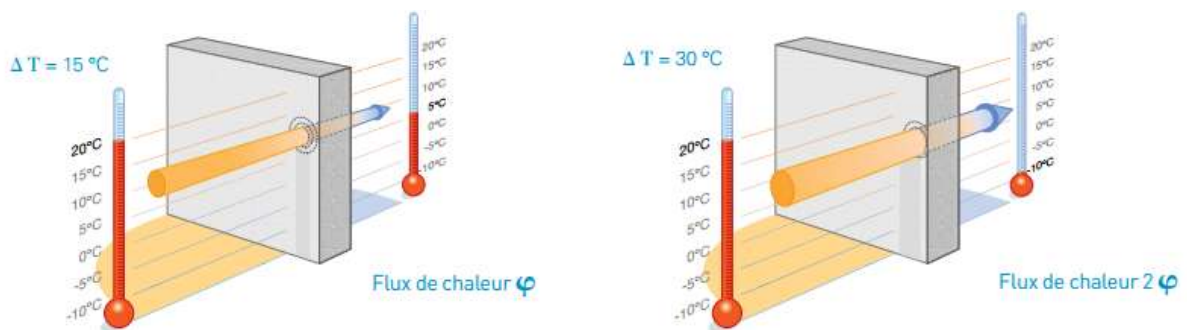


Figure (1.3) : l'augmentation du flux de chaleur quand l'écart de température augmente aussi, la température double donc la fuite de chaleur s'interprète par un effet double aussi. (<http://www.ecoenergiotech.fr/spip.php?auteur1>, 2014)

La loi fondamentale de Fourier, gouvernant la densité de flux de chaleur (ϕ) dans une paroi homogène s'exprime par la formule :

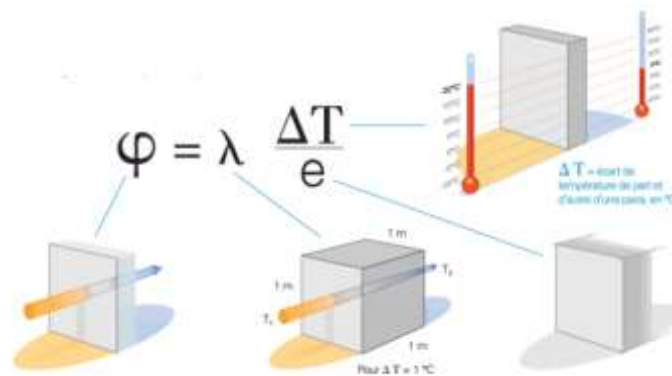


Figure (1.4) : la loi fondamentale du flux de chaleur traversant une paroi dépend du lambda des matériaux qui constitue la paroi, l'épaisseur de la paroi et l'écart de température entre l'intérieur et l'extérieur (EcoEnergieTech, 2014)

$$\phi = \lambda \frac{\Delta T}{e} \quad (1.1)$$

- λ : conductivité thermique du milieu ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$).
- ϕ : densité du flux de chaleur (W/m^2).
- e : l'épaisseur de la paroi en (m).

1.1.3 La convection :

La convection est un mode de transfert qui engage un déplacement de matière dans le milieu. Le transfert d'énergie par convection d'une surface dont la température est supérieure à celle du fluide qui l'entoure s'effectue en plusieurs étapes. D'abord la chaleur s'écoule par conduction de la surface aux molécules du fluide adjacent. L'énergie ainsi transmise sert à augmenter la température.

Ensuite les molécules vont se mélanger avec d'autres molécules situées dans une région à basse température et transférer une partie de leur énergie. Dans ce cas, l'écoulement transporte le fluide et l'énergie. L'énergie est, à présent, emmagasinée dans les molécules du fluide et elle est transportée sous l'effet de leur mouvement. (Maamar, Etude et Effet de l'Orientation de deux Pièces, 2010/2011)

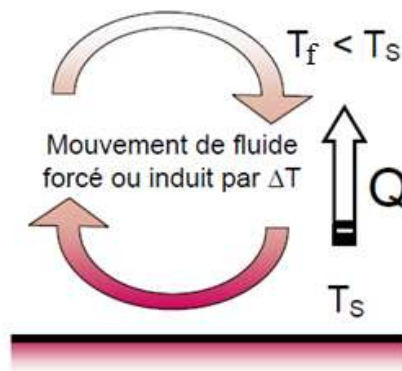


Figure (1.5) : transfert par convection (EcoEnergieTech, 2014).

Le transfert thermique par convection est divisé en deux parties suivant la nature de l'écoulement :

1.1.3.1 La convection forcée

Apparaît lorsque l'écoulement est engendré par des moyens externes comme un ventilateur ou les vents atmosphériques.

I.1.3.2 La convection naturelle

Se produit lorsque l'écoulement est induit par une différence de masse volumique qui varie en fonction de la température au sein du fluide.

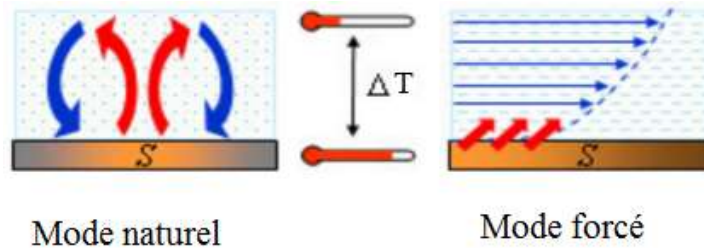


Figure (1.6) : Les deux modes de transfert de chaleur par convection.

(<http://hmf.enseeiht.fr/travaux/bei/beiep/content/g21/i-phenomene-convection>)

Ce mécanisme de transfert est géré par la loi de Newton :

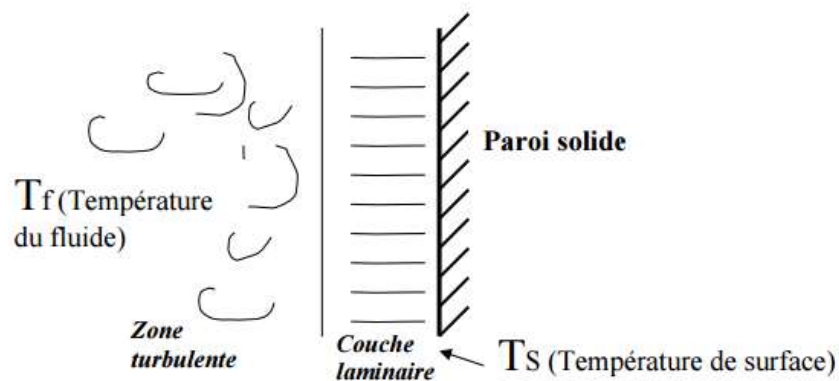


Figure (1.7) : principe de coefficient d'échange par convection.

(<http://hmf.enseeiht.fr/travaux/bei/beiep/content/g21/i-phenomene-convection>).

Pour un écoulement à une température T_f autour d'une structure à une température uniforme T_s de surface S , l'expression du flux de chaleur en convection est la suivante :

$$\phi = hS(T_s - T_f) \quad (1.2)$$

- h : le coefficient de transfert thermique par convection ($\text{W m}^{-2}\text{K}^{-1}$)
- S : surface d'échange (m^2).

La valeur du coefficient de transfert de chaleur par convection est en fonction de la nature du fluide, de sa température, de sa vitesse et des caractéristiques géométriques de la surface de contact solide/fluide. (J.Brau).

I.1.4 Rayonnement :

C'est une transmission d'énergie à distance, l'échange de chaleur se fait entre deux parois séparées par un milieu transparent ou semi-transparent.

Tous les corps, quel que soit leur état : solide, liquide ou gazeux, émettent un rayonnement de nature électromagnétique. Cette émission d'énergie s'effectue au détriment de l'énergie interne du corps émetteur.

Le rayonnement se disperse de manière rectiligne à la vitesse de la lumière, il est constitué de radiations de différentes longueurs d'onde.

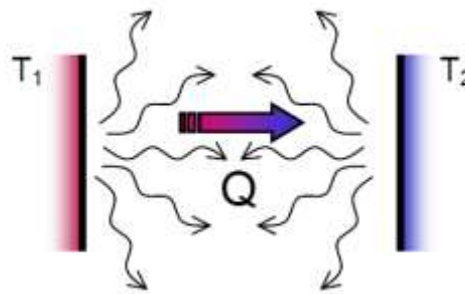


Figure (1.8) : transfert par rayonnement (EcoEnergieTech, 2014).

Remarque : le rayonnement ne chauffe pas la pièce. Il dépose de l'énergie dans les parois et se sont ensuite ces parois qui vont émettre de la chaleur (vibrations).

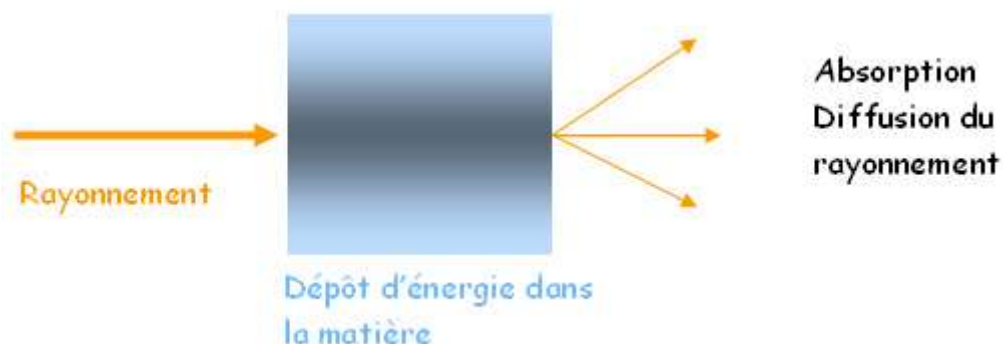


Figure (1.9) : le mécanisme du rayonnement (EcoEnergieTech, 2014)

On définit :

- Coefficient d'absorption $\alpha = \frac{\text{flux absorbé}}{\text{flux incident}}$ (1.3)

- Coefficient d'émission ε

- Coefficient de réflexion $\rho = \frac{\text{flux réfléchi}}{\text{flux incident}}$ (1.4)

La conservation de l'énergie implique : $\alpha + \varepsilon + \rho = 1$. (1.5)

I.1.4.1 Corps noir et corps réel :

Le corps noir est un corps qui absorbe tout le rayonnement qui lui parvient, quel que soit la longueur d'onde λ . Ceci signifie donc que son coefficient d'absorption $\alpha=1$ et son coefficient de réflexion $\rho = 0$ (Kamel, 2009/2010).

La luminance spectrale (puissance émise par unité de surface apparente, par unité de longueur d'onde et par unité d'angle) et l'émittance totale (puissance émise par unité de surface dans le demi espace supérieur sur l'ensemble de toutes les longueurs d'onde possibles) sont régies par les lois de Planck et de Stéfan-Boltzmann (Kamel, 2009/2010).

Les propriétés d'émission des corps réels sont définies par rapport à celles du corps noir.

On définit l'émissivité ε d'un corps comme le rapport de sa luminance (ou de son émittance) à celle du corps noir. L'émissivité est un nombre strictement inférieur à 1. En toute rigueur, l'émissivité dépend de la direction et de la longueur d'onde (Kamel, 2009/2010).

Un corps réel est donc défini par :

- Son émissivité ε en ce qui concerne le rayonnement qu'il émet.
- Son coefficient d'absorption en ce qui concerne le rayonnement reçu de son environnement (Kamel, 2009/2010).

La loi de Kirchhoff indique que $\alpha = \varepsilon$ pour la même longueur d'onde et la même direction.

On considère la plupart du temps que l'hypothèse des corps réels se comportent comme des corps gris à émission diffuse. Cette hypothèse entraîne que l'émissivité, et par conséquent le coefficient d'absorption, ne dépend ni de la direction ni de la longueur d'onde. Un corps réel est alors caractérisé par une seule quantité son émissivité ϵ . (Kamel, 2009/2010)

I.1.4.2 Structure du rayonnement :

Le rayonnement est un mode d'échange d'énergie par émission et absorption de radiations électromagnétiques. L'échange thermique par rayonnement se fait suivant le processus :

I.1.4.3 Émission

Il y a conversion de l'énergie fournie à la source en énergie électromagnétique

I.1.4.4 Transmission

La transmission de cette énergie électromagnétique se fait par propagation des ondes avec éventuellement absorption par le milieu traversé (Kamel, 2009/2010).

I.1.4.5 Réception

A la réception, il y a conversion du rayonnement électromagnétique incident en énergie thermique (absorption). (PERROT, 2010/2011)

I.1.4.6 Loi de Planck

Le passage du niveau d'énergie E à un niveau d'énergie $E - \Delta E$ s'accompagne de l'émission d'un rayonnement de fréquence ν et d'énergie $h \nu$ où h est la constante de Planck :

$$E = h\nu \text{ Avec } h = 6.62 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} \quad (1.6)$$

$$\text{Avec } [E]=\text{J} \quad [h]=\text{J} \cdot \text{s} \quad [\nu]=\text{s}^{-1}$$

I.1.4.7 Condition de rayonnement d'un corps

A la température zéro absolu, les électrons ne peuvent se déplacer : ils sont prisonniers des atomes. Par contre, tous les corps matériels, dont la température est supérieure à

Chapitre I : Les Modes de Transfert de Chaleur

0°K, sont capables d'émettre de l'énergie sous forme de rayonnement et d'en échanger entre eux (PERROT, 2010/2011).

Un corps à la température T émet des ondes de plusieurs fréquences différentes, et la répartition de cette énergie dépend de la température du corps. La quantité d'énergie émise est liée à la température (PERROT, 2010/2011).

I.1.4.8 Vitesse de propagation des ondes électromagnétiques :

La vitesse des ondes électromagnétiques dans le vide est :

$$C = 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Dans un milieu d'indice n la vitesse de propagation est $v = \frac{c}{n}$ avec n indice du milieu.

I.1.4.9 Principe du chauffage par rayonnement :

Lorsqu'un rayonnement arrive sur un corps opaque, celui-ci peut être :

- Transmis,
- Absorbé,
- Réfléchi,

Dans des proportions variables selon la nature du corps.

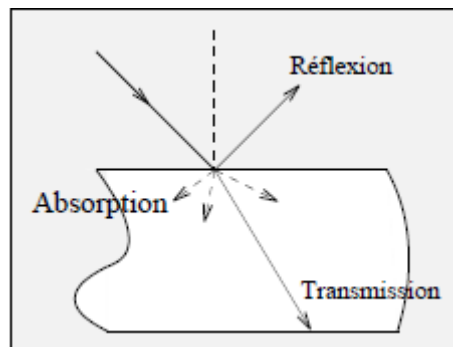


Figure (1.10) : Réflexion, transmission et absorption du rayonnement (PERROT, 2010/2011).

I.1.4.10 Classification des corps soumis à un rayonnement :

- ✓ Corps transparents :

Lorsqu'un rayonnement ne subit aucune atténuation lors de la traversée d'un milieu, on dit que le milieu est transparent pour ce rayonnement. C'est le cas du vide pour toutes les radiations.

✓ **Corps opaques :**

La grande majorité des solides et des liquides sont dits « Opaques », car ils arrêtent la propagation de tout rayonnement dès leur surface : ces corps se réchauffent par absorption du rayonnement.

✓ **Corps semi-transparents :**

Par contre certains corps sont partiellement transparents car l'onde électromagnétique peut se propager dans le milieu considéré. La propagation s'accompagne d'une absorption électromagnétique qui accroît l'énergie du milieu traversé. (PERROT, 2010/2011)

I.2 Perte de chaleur :

La déperdition thermique est la perte de chaleur que subit un habitat par ses parois et ses échanges de fluide avec l'extérieur. Elle est d'autant plus significative quand l'isolation thermique est faible (Technologie, 2015).

Les déperditions thermiques se produisent de trois façons :

- Les déperditions à travers les parois, dites surfaciques : Cas général de ces pertes sont par transmission à travers les parois opaques (murs, toitures...) ou vitrées.
- Les déperditions par ponts thermiques : ces déperditions sont par transmission linéique. Ce sont des zones de passage de calories qui possèdent une plus faible résistance thermique, classiquement ce sont les jonctions parois-planchers, parois-toitures ou parois extérieures-parois intérieures de structure.
- Les déperditions par renouvellement d'air : La ventilation, qu'elle soit voulue (fenêtre ouverte) ou involontaire (parois non étanche), naturelle ou mécaniquement assistée, est indispensable pour la salubrité de l'air intérieur. (Technologie, 2015)

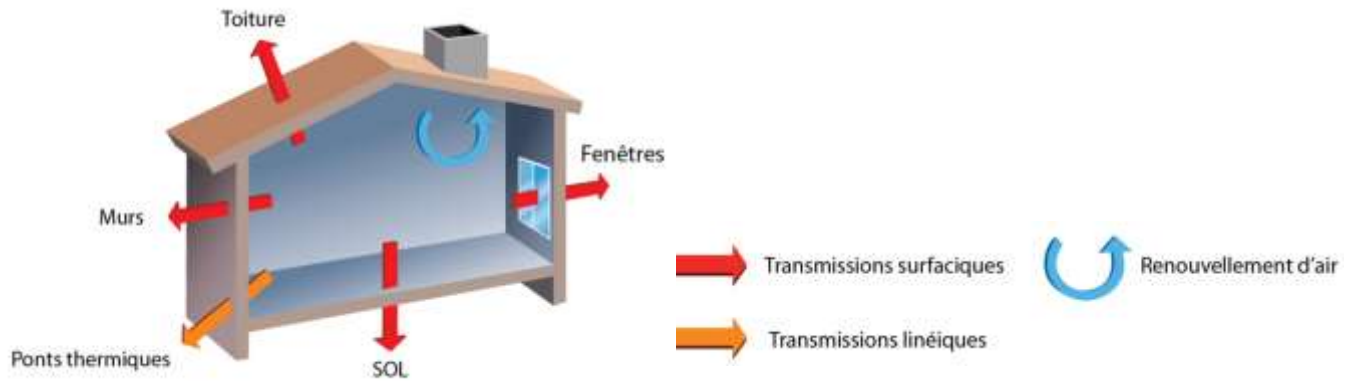


Figure (1.11) : Les déperditions thermiques d'un habitat non isolé. (Technologie, 2015)

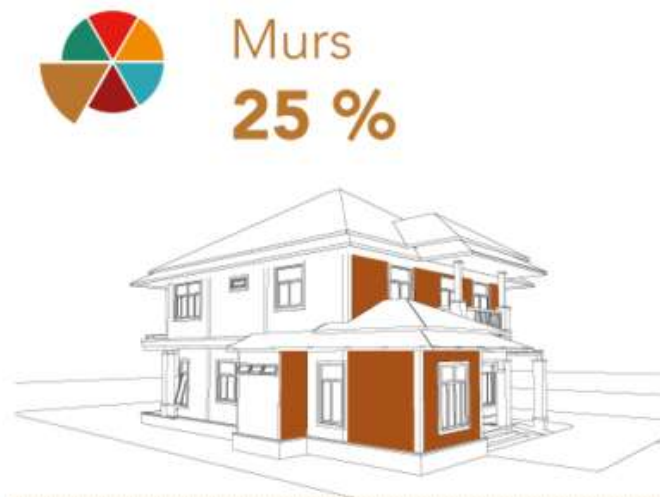
En général, quand on pense « isolation », on imagine les murs. Or le 1^{er} point faible est le toit. Il est responsable à lui seul de 30 % des pertes thermiques (HABITAT, 2012-2014):



- Il présente une forte surface de contact entre l'intérieur et l'extérieur
- Il est exposé au vent
- La chaleur produite dans la maison a tendance à monter et donc à s'accumuler sous les toitures

Le manque d'isolation du dernier plafond et l'isolation des sous-pentes et des combles et aussi les fuites d'air, entre les tuiles et au niveau des jonctions de la charpente avec le mur, présentent les différentes sources de perte dues aux toitures.

Les murs arrivent en seconde position et représentent un quart des pertes (HABITAT, 2012-2014).



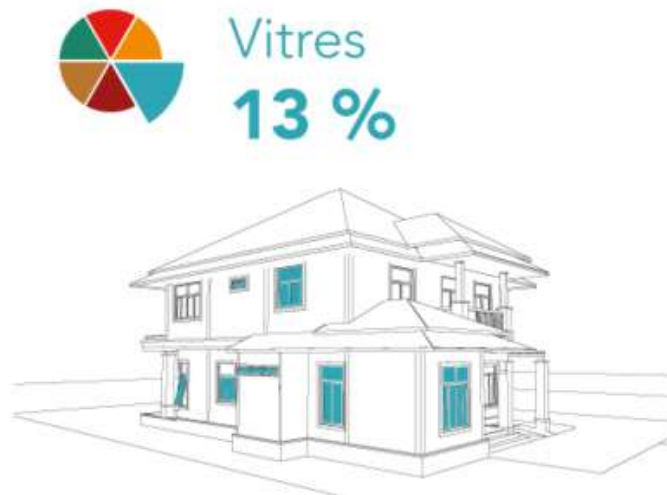
Néanmoins c'est la 2^{ème} cause des pertes de chaleur. Bien souvent la technique utilisée est une fine isolation par l'intérieur, alors qu'il faut une forte épaisseur et de préférence à l'extérieur. Et aussi il faut particulièrement prendre en compte les murs exposés au nord et à l'ouest qui sont moins ensoleillés et soumis plus fréquemment à la pluie.

Pour qu'une maison soit saine et agréable à vivre, elle doit permettre le renouvellement de l'air. Cependant le flux doit être assez réduit pour que la chaleur de la maison ne se perde pas inutilement (HABITAT, 2012-2014).



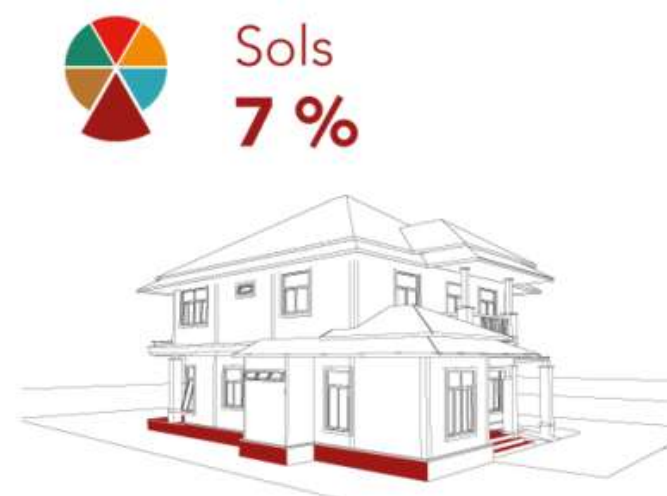
Donc les fuites d'air sont les grandes oubliées de la construction, On n'y pense pas et beaucoup de constructeurs ne sont pas formés à les traiter. Pourtant les pertes par fuites d'air sont presque aussi importantes que les pertes des murs et plus importantes que les pertes dues aux huisseries. On estime que dans chaque maison, il y a l'équivalent d'une fenêtre grande ouverte en permanence.

Contrairement aux idées reçues, les vitrages ne représentent que 13% des pertes et n'arrivent qu'en 4^{ème} position (HABITAT, 2012-2014).



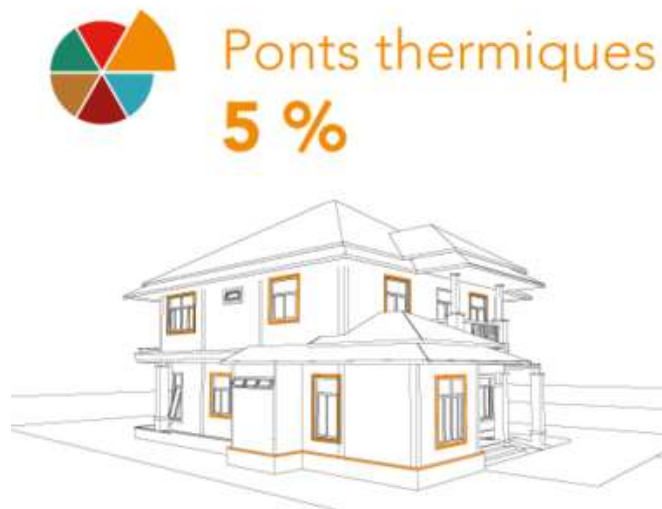
De plus les fenêtres sont fabriquées en usine avec des processus bien maîtrisés, elles sont en général bien conçues et relativement performantes.

En avant dernier on a Le plancher bas (le sol) qui est de mieux en mieux traité, par contre, sur les maisons anciennes, il n'est pas du tout isolé. Les pertes sont assez faibles environ 7%, mais elles peuvent donner facilement une sensation d'inconfort (HABITAT, 2012-2014)



Selon le type de sol on peut être confronté à des pertes d'énergie. En fonction de la hauteur du vide-sanitaire, si y'en a un, la déperdition est plus ou moins importante. Il faut savoir que même un plancher bien posé ne suffit pas, il faut également penser à placer une couche d'isolante avant.

Enfin on a les ponts thermiques qui présentent des zones qui se retrouvent en contact direct avec l'extérieur, sans aucune isolation (HABITAT, 2012-2014).



La structure de l'habitation fait que naturellement des endroits sont moins bien isolés, comme le tour des fenêtres et des portes, ou encore les angles de la maison. Le fait que l'isolation soit absente ou en faible proportion par rapport à la surface extérieure génère une perte d'énergie qui est près de 5%. (HABITAT, 2012-2014)

I.2.1 Déperditions par les parois vitrées

Les fenêtres sont une source de lumière naturelle mais elles permettent également de renouveler l'air intérieur de manière active par l'ouverture des châssis et de manière passive par les défauts d'étanchéité entre ouvrants, dormant et murs (figure (1.12)) (HABITAT, 2012-2014) . (énergie, 2015).

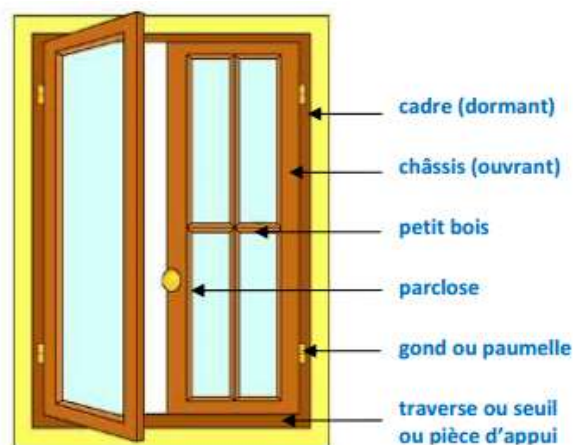


Figure (1.12) : anatomie d'une fenêtre. (énergie, 2015)

Le verre est quant à lui un matériau très conducteur de chaleur. Les caractéristiques thermiques et acoustiques des fenêtres en font des parois complexes à appréhender dans un projet de rénovation. Elles sont notamment conduites à :

- De fortes déperditions hivernales par défauts d'étanchéité et par conductivité thermique ;
- Un abaissement rapide de leur température en hiver (par effusivité et émissivité thermique) qui peut provoquer une sensation de froid gênante ;
- Des apports solaires par effet de serre, bénéfiques en hiver sur les orientations sud mais pouvant être à l'origine de surchauffes estivales sur certaines parois (fenêtres de toits, façades ouest...).
- Une transmission du bruit privilégiée par la faible épaisseur des vitrages et par leurs fréquents défauts d'étanchéité.

Les points faibles de l'isolation thermique d'un habitat sont symbolisés par les vitrages, mais leurs performances ne cessent de s'améliorer. Grâce aux différents assemblages et traitements disponibles aujourd'hui, les vitrages peuvent mieux jouer leur rôle en assurant une bonne isolation thermique. (énergie, 2015)

Plus le vitrage utilisé est isolant (coefficient k faible), plus les déperditions thermiques à travers sa surface sont réduites en hiver et plus le vitrage est chaud en face intérieure. Il s'ensuit que la température de l'air ambiant doit être moins élevée pour assurer le confort de l'occupant (Gratia, 2000).

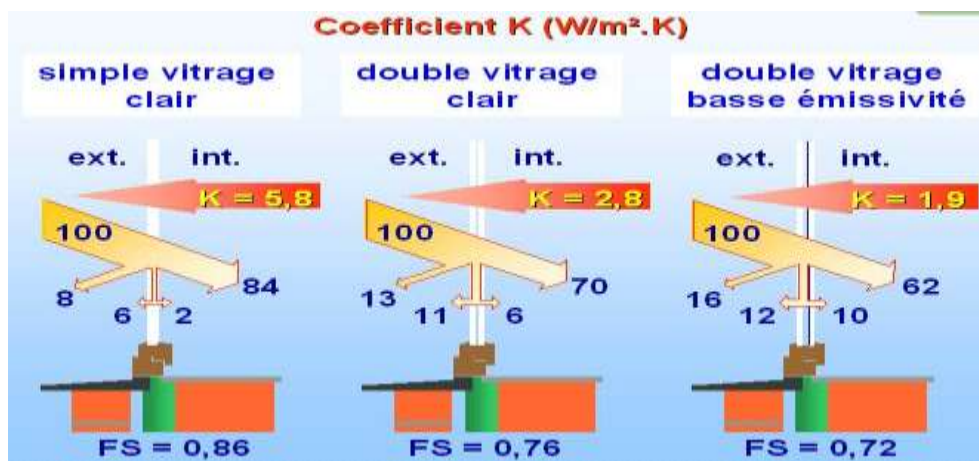


Figure (1.13) : présente les coefficients de déperdition thermique k pour des vitrages clairs : simple vitrage, double vitrage et double vitrage à basse émissivité ainsi que les proportions d'énergie réfléchie, transmise et absorbée permettant le calcul du facteur solaire (FS). (Gratia, 2000)

I.2.2 Le confort thermique :

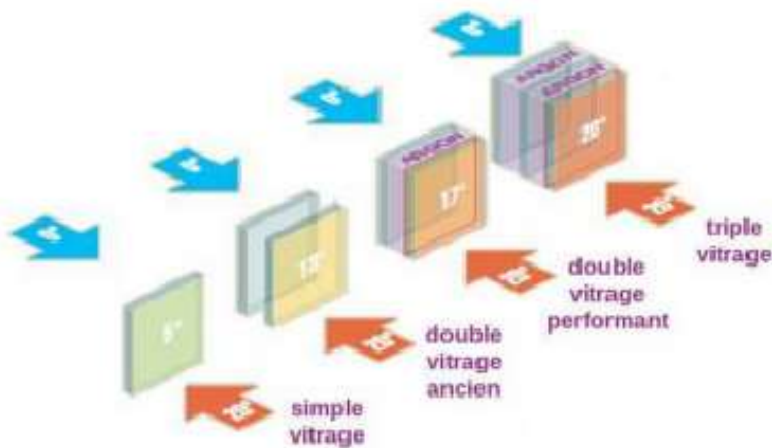


Figure (1.14) : températures de surface des vitrages. (énergie, 2015)

Une fenêtre double vitrage performant aura une déperdition cinq fois moins importante qu'une fenêtre simple vitrage.

Simple vitrage :

Le simple vitrage ne satisfait pas toutes les conditions climatiques il est très largement insuffisant en zone froide, l'isolation thermique est dépassée, le simple vitrage même épais a une très mauvaise performance thermique, S'il fait 0°C à l'extérieur, il fera 5 °C à côté d'une fenêtre équipée d'un simple vitrage (ALE, 2010).

Double vitrage ancien :

Est une paroi vitrée constituée de deux vitres séparées par une épaisseur d'air immobile dite « lame d'air ». Le double vitrage réduit l'effet "de vitre froide", empêche la condensation en rapprochant la température du vitrage de la température ambiante, et donc, abaisse la consommation d'énergie jusqu'à 10 %. S'il fait 0°C à l'extérieur, il fera 10 à 13 °C à côté d'une fenêtre à double vitrage classique (ALE, 2010).

Double vitrage performant à faible émissivité :

Les vitrages faibles émissivité sont des vitrages sur lesquels on a ajouté un film d'oxyde métallique afin de contenir le rayonnement infrarouge (chaleur) à l'intérieur du bâtiment. Pour encore renforcer l'isolation d'un double vitrage, on peut remplacer l'air entre les deux vitres par un gaz rare (argon) afin de diminuer la convection entre celles-

ci. On peut ainsi obtenir en couplant ces techniques des vitrages très performants avec un $K=1.1\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{°K}$ (coefficient de déperdition) (ALE, 2010)

Triple vitrage :

Les triples vitrages présentent un net avantage thermique, (le coefficient de déperdition K peut arriver jusqu'à $0.5\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{°k}$), ainsi qu'un confort d'été intéressant. Néanmoins leur mise en œuvre peut s'avérer délicate : ils sont plus lourds et ne s'adaptent pas à toutes les menuiseries. Egalement plus épais il faut donc prévoir des huisseries plus larges, capables de les supporter. La quasi-totalité des triples vitrages présentent un facteur solaire relativement bas, il faut donc mieux les réserver pour les expositions nord, est, ouest, si on veut profiter d'apport solaire en façade sud. (ALE, 2010)

La température réellement ressentie est une moyenne des températures de l'air et de celles des parois voisines. Or, la température de surface d'un simple vitrage peut facilement descendre en dessous de 10°C en hiver. La température ressentie est donc influencée par la température des parois mais elle l'est également par les mouvements d'air (courants d'air, souffleries), par son taux d'humidité ou encore par le métabolisme de l'occupant (repos / activité physique). Les éventuels défauts d'étanchéité des parois vitrées et les courants d'air qu'ils peuvent générer peuvent donc également dégrader ce confort. Le phénomène de la paroi froide sera facilement neutralisé par la fermeture de volets, complétés de rideaux intérieurs opaques et épais. A contrario, un voile fin et transparent ne stoppera pas le « rayonnement froid » du vitrage (ALE, 2010).

1.2.3 Les technologies permettant d'améliorer les performances thermiques des vitrages :

- La multiplication du nombre de vitres emprisonnant une ou deux lames de gaz rares plus isolants que l'air (argon, krypton, xénon). La nomenclature précise alors en mm les épaisseurs de verre, de gaz et sa nature : 4/10/4/10/4 Argon pour un triple vitrage avec 2 lames d'air de 10 mm
- Les traitements des vitrages notés « IR », « VIR » pour isolation renforcée, « FE », « BE » ou « TBE » pour faible ou basse émissivité, consiste à appliquer sur l'une ou l'autre des vitres une fine couche d'oxyde métallique transparent ayant un fort pouvoir de réflexion du rayonnement infrarouge qu'ils proviennent du soleil ou du local chauffé. Ce traitement abaisse encore les déperditions (K ou U_g) mais également les apports solaires (S_w). (énergie, 2015)

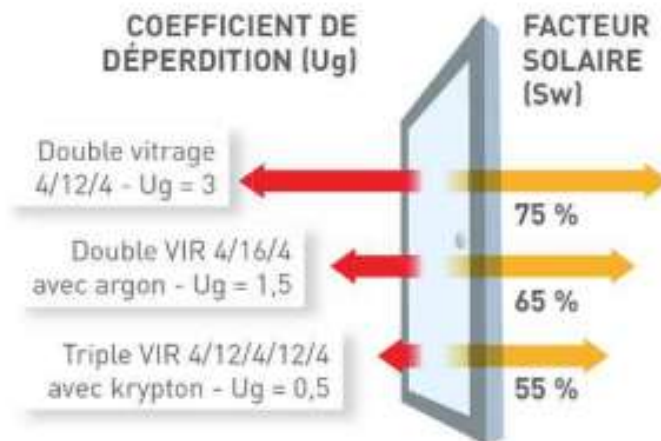


Figure (1.15) : mise en parallèle U_g / S_w , la réduction des transmissions thermiques s'accompagne d'une perte d'apports solaires (énergie, 2015)

D'autres moyens ont aussi été mis en œuvre pour réduire la transmission thermique au droit des vitrages.

I.2.3.1 Premier moyen

Le premier a été de diminuer les pertes par conduction en insérant entre deux vitrages un excellent isolant, transparent, disponible et gratuit : **l'air immobile sec**. L'air présente, en effet, une grande résistance thermique pour que les mouvements de convection soient empêchés. La capacité d'isolation de ces vitrages dépend de l'épaisseur de la lame d'air : plus celle-ci sera épaisse, plus le vitrage sera isolant. Les valeurs k de ces vitrages sont comprises entre 2,76 et 3,59 (Gratia, 2000).

I.2.3.2 Deuxième moyen

Une autre voie consiste à agir sur les caractéristiques de surface du verre. Le vitrage à basse émissivité est recouvert d'une mince couche d'oxyde métallique parfaitement transparent, qui permet de réduire considérablement l'émission des infrarouges vers l'extérieur. Les vitrages peuvent disposer d'une ou de deux couches à basse émissivité, mais on peut également remplacer la couche d'air par un gaz rare comme (argon) dont la conductivité thermique est plus faible que l'air. Ces gaz sont non toxiques et ininflammables. Les valeurs k de ces vitrages sont comprises entre 1,13 et 2,40 (Gratia, 2000).

De nombreux matériaux expérimentaux permettent aujourd'hui d'atteindre des valeurs k comprises entre 0,3 et 0,7, comparables à celles des parois isolées. Citons pour mémoire les "super fenêtres" (triple couche, basse émissivité, gaz rare), les vacuums

Chapitre I : Les Modes de Transfert de Chaleur

Windows (vide maintenu entre les deux vitrages), les fenêtres à aérogel (mousse microporeuse transparente et isolante), les "smart Windows". Ces dernières consistent en un film de cristaux liquides, intercalé dans le vitrage. Un champ électrique suffit à orienter les cristaux pour que le vitrage devienne transparent comme le montre l'image ci-dessous (Gratia, 2000) :



Figure (1.16) : les fenêtres intelligentes (smart Windows) (Gratia, 2000).

I.3 Conclusion :

Dans ce chapitre on a abordé en premier lieu les concepts de transfert de chaleur, d'où on a pu voir ces trois modes de transmission de chaleur (conduction, convection et rayonnement), par la suite, on a évoqué les différents types de déperditions thermiques mais on sait focaliser sur les pertes de chaleur à travers les vitres.

I.4 Bibliographie

- ALE. (2010, 01 07).** *info énergie* . Consulté le 03 22, 2016, sur http://www.ale-lyon.org/IMG/pdf/eie_vitrages_performants_2011.pdf
- BENTHAMI, S. (2004).** *MODÉLISATION NUMÉRIQUE D'UN FOUR ÉLECTRIQUE*. UNIVERSITÉ DU QUÉBEC .
- Climat, A. e. (2016, 04).** <http://www-energie2.arch.ucl.ac.be/transfert%20de%20chaleur/3.2.htm>. Consulté le 2016, sur Les trois modes de transfert de chaleur: <http://www-energie2.arch.ucl.ac.be/transfert%20de%20chaleur/3.2.htm>
- EcoEnergieTech. (2014, 03 23).** Consulté le 03 21, 2016, sur <http://www.ecoenergiotech.fr/spip.php?article104>
- énergie, i. (2015).** Consulté le 03 22, 2016, sur L'ISOLATION DES PAROIS VITREES: http://www.infoenergie64.org/wp-content/uploads/2011/08/isolation-parois-vitrees-2015_10.pdf
- Gratia, M. L.-E. (2000).** Architecture et Climat.
- HABITAT, C. E. (2012-2014).** *ECONOMIE D'ÉNERGIE*. Consulté le 03 21, 2016, sur <http://www.creaeco-habitat.fr/nos-promesses/economie-d-energie.html>
- <http://hmf.enseiht.fr/travaux/bei/beiep/content/g21/i-phenomene-convection>. (s.d.).
<http://hmf.enseiht.fr/travaux/bei/beiep/>.
- <http://www.ecoenergiotech.fr/spip.php?auteur1>. (2014).
<http://www.ecoenergiotech.fr/spip.php?article104>.
- J.Brau. (s.d.).** convection. *INSA de Lyon* .
- Kamel, M. C. (2009/2010).** *Etude Théorique et Expérimentale de l'Isolation Thermique Intérieure d'une Pièce d'un Habitat dans la région de Ghardaïa*. tlemcen .
- Maamar, M. H. (2010/2011).** *Etude et Effet de l'Orientation de deux Pièces*. tlemcen .
- Maamar, M. H. (2010/2011).** *Etude et Effet de l'Orientation de deux Pièces*.
- PERROT, O. (2010/2011).** COURS DE RAYONNEMENT. 9-10.
- Poulikakos, D. (1996).** « *Advances in Heat Transfer* » . San Diego, California: Academic Press, Inc. A Division of Harcourt Brace & Company.
- Technologie. (2015).** *cours.fr*. Consulté le 03 22, 2016, sur <http://lms.cours.fr/#/classe/5e/arbo/23475/opd/442209>
- Wikipedia. (2016, 01).** https://fr.wikipedia.org/wiki/Conduction_thermique. Consulté le 2016, sur Conduction thermique.

Chapitre II

Types de Vitrages

Chapitre II

Types de Vitrages

Sommaire

II	Introduction :	24
II.1	Les verres à couches pour l'isolation thermique renforcée et le contrôle solaire	24
II.1.1	Le verre et le rayonnement solaire	24
II.2	Les vitrages électrochromes	31
II.2.1	Introduction.....	31
II.2.2	Les vitrages « obturateurs » à cristaux liquides	31
II.2.3	Le vitrage électro chrome « assombrissant » :.....	34
II.2.4	La thermochromie	36
II.2.5	Les dépôts set couches thermochromes pour vitrages.....	37
II.2.6	Autres variétés de vitrages thermochromes.....	38
II.3	Modification des propriétés optiques du verre par dépôts multicouches diélectriques	39
II.3.1	Introduction.....	39
II.3.2	Applications pratiques des traitements « antireflets »	39
II.3.3	Applications pratiques des traitements 'semi-réfléchissants' et 'réfléchissants'	40
II.4	Conclusion :	41
II.5	Bibliographie	42

I Introduction :

Le verre occupe une place de plus en plus importante dans l'habitat. C'est un matériau très prisé par les architectes pour sa transparence, il évolue continuellement et de nombreux produits variés actuellement sur le marché. De ce fait le verre est passé de la simple vitre aux vitrages possédant de multiples propriétés : résistance mécanique, sécurité, isolation thermique et acoustique, contrôle solaire, résistance au feu, décoration, ...etc.

D'ailleurs, au jour d'aujourd'hui, il habille des façades entières et les architectes le proposent également de plus en plus comme matériau de structure dans de nombreux ouvrages particuliers tels les dalles de plancher, les vitrines, les portes, ...etc. (Detremmerie, s.d.)

De plus les fenêtres et les surfaces vitrées en général, sont les plus exposées aux transferts de chaleur non désirés. Ce sont donc des éléments constructifs à ne surtout pas négliger lors de la construction ou la réhabilitation d'un habitat, car outre le fait qu'ils constituent des surfaces de déperditions énergétiques importantes, ils représentent aussi une surface stratégique de captage de l'énergie solaire. Ils peuvent constituer un énorme gisement d'économies d'énergie. (Nadia, 2011).

I.1 Les verres à couches pour l'isolation thermique renforcée et le contrôle solaire

I.1.1 Le verre et le rayonnement solaire

I.1.1.1 Introduction et définitions

L'énergie du rayonnement solaire reçu sur Terre est constituée approximativement de 43% de lumière visible (longueurs d'onde comprises entre 400nm et 800nm), de 52% de rayonnement Infrarouge (longueurs d'onde supérieures à 800nm) et de 5% d'Ultraviolet (longueurs d'onde inférieures à 400nm). (ETIENNE, 2009)

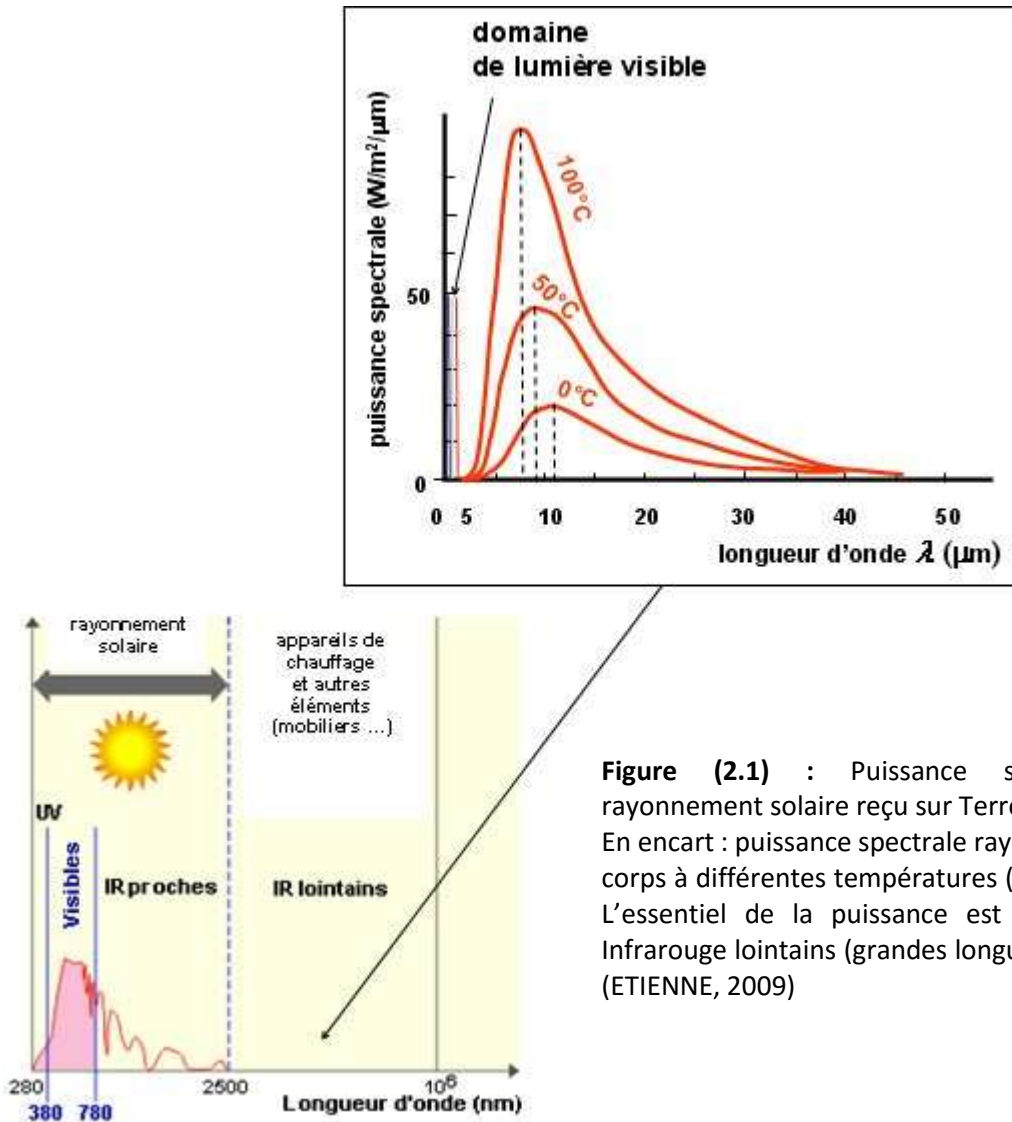


Figure (2.1) : Puissance spectrale du rayonnement solaire reçu sur Terre. En encart : puissance spectrale rayonnée par des corps à différentes températures (loi de Stefan). L'essentiel de la puissance est rayonnée en Infrarouge lointains (grandes longueurs d'onde). (ETIENNE, 2009)

Pour réduire l'échauffement à l'intérieur des locaux (et des véhicules) dû au rayonnement solaire (surtout pendant les mois d'été) on utilise depuis longtemps des vitrages absorbant préférentiellement le rayonnement infrarouge (IR). C'est le cas des vitres 'teintées' utilisées dans le domaine des habitats mais aussi des transports. L'absorption du rayonnement infrarouge par les verres teintés est due aux ions Fe^{2+} dans la masse du verre, qui leur donne une coloration verdâtre. L'inconvénient de cette méthode est que le verre absorbant le rayonnement s'échauffe et, puisque sa température s'élève, réémet un rayonnement IR vers l'intérieur des locaux ce qui produit un échauffement supplémentaire qui s'ajoute à celui produit par conduction et convection dans l'air du local (energie-environnement., 2011).

Une méthode plus efficace, qui a tendance à se généraliser, pour contrôler le transfert d'énergie par rayonnement à travers un vitrage est d'utiliser des verres revêtus d'une couche à faible émissivité. Les dépôts à faible émissivité contribuent à l'isolation thermique déjà obtenue grâce à la structure en doubles (et éventuellement triples) vitrages (diminution de la conduction et de la convection) : c'est l'isolation thermique 'renforcée' (energie-environnement., 2011).

Les caractéristiques d'un vitrage sont :

- Le coefficient de transmission lumineuse (lumière visible) TL
- Le facteur solaire g (ou FS)
- Le coefficient de transmission énergétique U
- L'émissivité ϵ

La valeur du coefficient U est essentiellement déterminée par la structure du vitrage (double ou triple, l'épaisseur des vitres et des espaces et la nature du gaz de remplissage). Les couches à faible émissivité participent à l'isolation thermique.

I.1.1.2 Les vitrages à faible émissivité (appelés aussi peu émissifs)

Dans le domaine du bâtiment, les couches à faible émissivité (réfléchissant préférentiellement l'IR mais transparents dans le domaine visible) permettent d'éclairer une pièce par la lumière du soleil tout en limitant l'échauffement en été ainsi que les déperditions d'énergie en hiver (Caractérisation d'un vitrage, 2015).

Pour produire des vitres à faible émissivité, on utilise généralement des verres clairs (de type « float ») qui sont revêtus d'un dépôt (soit de type pyrolytique, soit par procédé PVD Magnétron) d'un métal ou d'un oxyde métallique qui réduit l'émissivité du verre. Ainsi :

- Dans les climats froids, la chaleur générée par le rayonnement solaire et les appareils de chauffage est gardée à l'intérieur.
- Dans les climats chauds, le transfert de chaleur depuis l'extérieur est réduit.

En contribuant à la réduction de la valeur du coefficient U (voir normes et standards), les dépôts à faible émissivité participent aux économies d'énergie en réduisant la consommation de chauffage en hiver et de climatisation en été. Pour optimiser les économies d'énergie, il faut tenir compte non seulement de l'émissivité mais aussi du

facteur solaire ainsi que du choix de la face du vitrage (face 2 ou 3) qui doit recevoir la couche (Carmody J., 1996.).

Les premiers vitrages à faible émissivité ont été réalisés plutôt pour minimiser les dépenses de chauffage. Ils présentaient un facteur solaire g et un facteur de transmission lumineuse TL élevés. Ces vitrages des vitrages à basse émissivité et haute transmission. Ils devaient donc transmettre les longueurs d'onde du rayonnement solaire (visible et proche Infrarouge, voir figure (2.1)) mais arrêter le rayonnement Infrarouge lointain à grandes longueurs d'onde produits par les appareils de chauffage et autres corps terrestres (voir figure (2.1)) (Carmody J., 1996.).

Actuellement, dans les immeubles dédiés au secteur d'activité tertiaire (bureaux) on recherche à minimiser les gains solaires, tout en gardant une bonne transmission lumineuse et une bonne isolation. Les vitrages correspondant doivent donc transmettre la lumière visible, mais arrêter les Infrarouges du rayonnement solaire et les Infrarouges lointains (voir Figure (2.1)). Il s'agit des vitrages à faible émissivité sélectifs (Caractérisation d'un vitrage, 2015).

Si en outre la couche à faible émissivité sélective est déposée sur une vitre teintée ou si le coefficient de réflexion de la couche est augmenté, on obtient un vitrage à basse émissivité sélectif et à basse transmission (Carmody J., 1996.).

I.1.1.3 Mode de dépôt et performance

Comme expliqué en introduction, un verre revêtu d'une couche à faible émissivité réfléchit la partie du spectre à grande longueur d'onde (IR). Le dépôt à faible émissivité est un mince film métallique ou d'oxyde métallique. Ce dépôt peut être de type pyrolytique (CVD) ou obtenu par pulvérisation (PVD). Le dépôt pyrolytique est plus résistant, plus commode à manipuler et à fabriquer. Le dépôt obtenu par pulvérisation est plus fragile mais présente de meilleures performances (Larbi, 2001).

I.1.1.4 Les produits industriels

Il existe deux familles de vitrage à faible émissivité

- **Les verres à couches classe C**

La couche est déposée sous vide (dépôt PVD magnétron). Il s'agit d'une couche dite 'tendre'. Pour obtenir un vitrage de sécurité à faible émissivité, le verre est trempé mais

la trempe doit avoir lieu avant le dépôt de la couche afin de ne pas détériorer celle-ci. Ces couches sont plus performantes en termes d'isolation thermique que les couches dites 'dures' mais elles doivent être utilisées uniquement en double vitrage car elles sont délicates (N., 1996).

▪ **Les verres à couches classe A**

La couche est de type pyrolytique, déposée 'en ligne' à chaud pendant que la température du verre est encore au voisinage de 600°C. Ce dépôt est appelé couche 'dure'. Le verre peut être trempé après le dépôt de la couche (Larbi, 2001).

La trempe thermique de ces verres classe A de type pyrolytique est plus délicate que celle de verres classiques non traités. En effet, la trempe thermique pose des problèmes engendrés par la dissymétrie de rayonnement des deux faces (revêtue et non revêtue). La chauffe symétrique nécessaire pour éviter une déformation du verre impose des consignes de chauffage différenciées sur les deux faces. De plus, pour ne pas dégrader la couche à faible émissivité, la température atteinte avant refroidissement ne doit pas dépasser 600°C (contre près de 650°C pour la trempe thermique d'un verre clair classique). Il en résulte qu'un refroidissement plus rapide s'impose pour obtenir un verre trempé (CSTC, 1999).

Ci-dessus on a la comparaison des propriétés des deux types de couche

Revêtement « dur » (pyrolytique)

Avantages

- Bonne durabilité, manutention facile
- La vitre traitée peut être trempée
- Utilisation possible en simple vitrage

Inconvénients

- Valeur de U plus élevée
- Diffusion optique légèrement plus visible
- Coefficient de gain solaire plus élevé

Revêtement « tendre » (dépôt PVD)

Avantages

- Transmission dans le visible élevé
- Bonne clarté, peu de diffusion
- Des coefficients U plus faibles (meilleure isolation)
- Jusqu'à 70% de transmission UV en moins comparée au vitrage standard
- Disponible en verre trempé et feuilleté

Inconvénients

- Fragile à la manipulation, précautions nécessaires pendant la fabrication du vitrage
- Doit être utilisé exclusivement en double (ou triple) vitrage

I.1.1.5 Les économies d'énergie

Près de 25% de la facture énergétique (chauffage et rafraîchissement) sont dus à la mauvaise qualité des vitrages en termes d'isolation thermique. L'efficacité des vitrages en ce qui concerne l'énergie est caractérisée par le coefficient U et le coefficient g (appelé *SHGC* pour « Solar Heat Gain Coefficient »). Le coefficient g est exprimé par un nombre compris entre 0 et 1. Un faible coefficient g signifie moins d'apport de chaleur par le rayonnement solaire et plus d'effet d'ombrage (Mohammed, 2012).

Les performances d'un vitrage isolant sont caractérisées par sa valeur U . Le coefficient U , exprimé en $W/(m^2 \cdot K)$ (watts par m^2 et par degré) représente le niveau de déperdition de chaleur. Ainsi la valeur U d'un simple vitrage classique est 5,8. La valeur U est 2,8 pour un double vitrage ordinaire et 1,9 pour un double vitrage avec couche isolante à faible émissivité déposée sur la face 3 (figure 2.2). La valeur de U est abaissée à 1,1 si l'air entre les feuilles de verre est remplacé par de l'azote. L'épaisseur totale d'un tel double vitrage est 24mm. La valeur de U pour un triple vitrage à faible émissivité et rempli d'azote est aussi basse que 0,65 $W/(m^2 \cdot K)$.

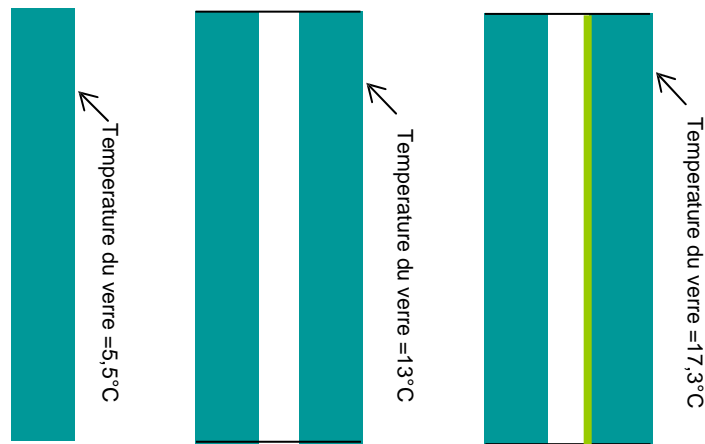


Figure (2.2) : isolations thermiques comparées d'un simple vitrage, d'un double vitrage ordinaire et d'un double vitrage avec couche à faible émissivité en face 3. La température extérieure est 0°C et la température intérieure est 20°C. A noter que la température de la face interne du vitrage double avec couche à faible émissivité est proche de la température ambiante (17,3 °C à comparer avec 20°C) (Energie, 2015).

Dans un proche avenir, les vitrages isolants thermiques auront des performances encore meilleures. Ainsi, un double vitrage isolant où la lame d'air intermédiaire est remplacée par du 'vide' pourrait avoir une valeur de U aussi basse que $0,6\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ pour une épaisseur totale n'excédant pas 8mm (Caractérisation d'un vitrage, 2015). Rappelons qu'un mur sans isolation particulière a une valeur de U typique de l'ordre de $0,5\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. Les meilleures performances actuelles en termes d'isolation thermique sont obtenues avec des triples vitrages composés de feuilles de verre à dépôts peu émissifs et dont les espaces sont remplis de gaz xénon (Energie, 2015).

Si dans tous les cas on a intérêt à avoir une valeur de U la plus faible possible, la valeur du facteur solaire g optimale dépend du climat. Pour les pays à climats chauds (où la dépense d'énergie en climatisation est prépondérante), g doit être faible. Au contraire, dans les pays à climat froid (où les dépenses de chauffage sont prépondérantes), une valeur de g est préférable pour profiter de l'apport d'énergie solaire (Caractérisation d'un vitrage, 2015).

I.2 Les vitrages électrochromes

I.2.1 Introduction

Les matériaux ou structures électrochromes ont la particularité de changer de propriétés optiques (couleur et/ou transparence lumineuse) sous l'effet d'un champ électrique appliqué. L'effet est réversible mais il peut être rémanent ou non rémanent. Nous montrons ici deux exemples de vitrages électrochromes. Ces vitrages électrochromes fonctionnent sous basse tension et consomment une puissance électrique extrêmement faible (Larbi, 2001).

I.2.2 Les vitrages « obturateurs » à cristaux liquides

- **Description du fonctionnement**

Le premier exemple est un vitrage apte à passer de l'état diffusant à l'état transparent sous l'effet d'une tension alternative de quelques dizaines de volts. Le film actif est constitué d'une matrice polymère contenant de fines gouttelettes de cristaux liquides (PDLC est l'acronyme de Polymer Dispersed Liquid Crystals) ; Ces vitrages, qui sont commercialisés, même avec des dimensions importantes (plusieurs m²) sont plutôt utilisés pour les bureaux, banques, hôtels, hôpitaux ... Les applications domestiques sont encore peu diffusées.

Au repos (lorsqu'aucune tension électrique n'est appliquée) le vitrage est translucide. Le vitrage devient transparent quand une tension électrique est appliquée. Il n'y a pas d'effet 'Mémoire' : le vitrage redevient translucide dès que la tension électrique est supprimée. Le temps de réponse est très court (inférieur au 1/10^{ème} de seconde).

Une série de démonstrations sur les possibilités offertes dans différents secteurs (immobilier, transport) de ce type de vitrage est disponible sur le site de Saint-Gobain Glass : www.privalite.com. Un exemple est donné sur la figure (2.7)



Figure (2.3) : vitrage électrochrome « obturateur » à cristaux liquides.
A droite : le vitrage est 'opaque' (pas de tension électrique).
A gauche : le vitrage est 'transparent' (tension électrique appliquée).
(Document Saint-Gobain) (N., 1996)

- **Réalisation et structure du vitrage obturateur**

La réalisation est obtenue en plusieurs étapes. Un liquide comprenant un mélange de molécules cristaux liquides, de molécules polymérisables (appelées monomères) et d'une petite quantité de billes de silice de très petit diamètre (quelques dizaines de microns, en fait leur diamètre correspond à l'épaisseur du film électro chrome à former) et appelées à jouer le rôle d'espaces est versée sur la face d'une vitre rendue conductrice par un dépôt d'ITO (voir dépôt conducteur à base d'oxyde d'étain et d'indium). Ensuite, une deuxième vitre dont la face interne est elle aussi rendue conductrice par un dépôt d'ITO est appliquée sur le film liquide. On obtient ainsi une structure 'sandwich' schématisée sur la figure (2.8) (ETIENNE, 2009).

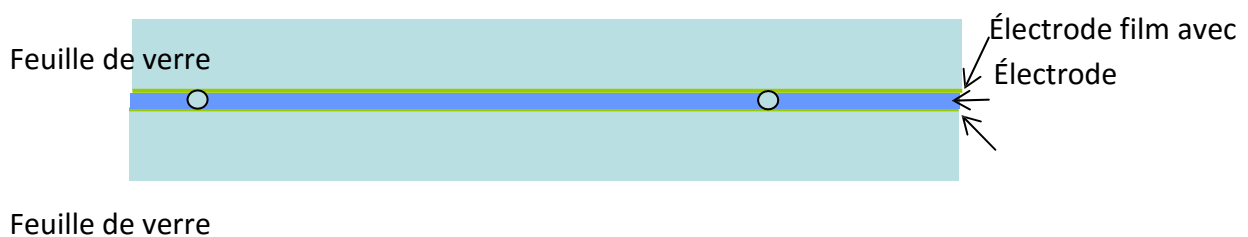


Figure (2.4) : structure d'un vitrage obturateur. L'épaisseur du film est de quelques dizaines de micromètres. Les « ESPACEURS » (en silice) maintiennent l'épaisseur du film constante et évitent tout court-circuit entre les deux électrodes transparentes. Ces ESPACEURS occupent un très petit volume du film et sont pratiquement invisibles. L'épaisseur totale du vitrage est de l'ordre de 3 millimètres (energie-environnement., 2011).

La morphologie de type 'micro composite' composée d'un film mince polymère renfermant de fines gouttelettes (dont le diamètre est de l'ordre de la dizaine de micromètres) de cristaux liquides est formée au moment de la polymérisation qui provoque une séparation de phase entre molécules de cristaux liquides et molécules monomères formant le film polymère (Caractérisation d'un vitrage, 2015).

A l'intérieur d'une gouttelette, les molécules de cristaux liquides sont orientées les unes par rapport aux autres. Une gouttelette est donc anisotrope du point de vue optique. Cette anisotropie est caractérisée par la présence d'un axe optique correspondant à la direction d'alignement des molécules de cristaux liquides dans la gouttelette.

Au repos, les axes optiques des gouttelettes sont distribués au hasard et la lumière est diffusée (le vitrage est opaque, ou plutôt translucide) car le film PDLC n'est pas homogène (il diffuse la lumière à l'instant du brouillard qui est constitué de fines gouttelettes d'eau en suspension dans l'air) (Mohammed, 2012).

Sous l'effet d'un champ électrique, les axes optiques des gouttelettes sont alignés. Les molécules de cristaux liquides sont choisies de telle façon que l'indice ordinaire n_o des gouttelettes soit égal à l'indice de la matrice polymère. Le film apparaît 'homogène' au rayonnement incident et la lumière n'est plus diffusée (le vitrage devient transparent) comme indiqué sur la figure (2.9).

Rappelons que l'effet est non rémanent : le vitrage redevient translucide si la tension électrique est supprimée (Larbi, 2001).

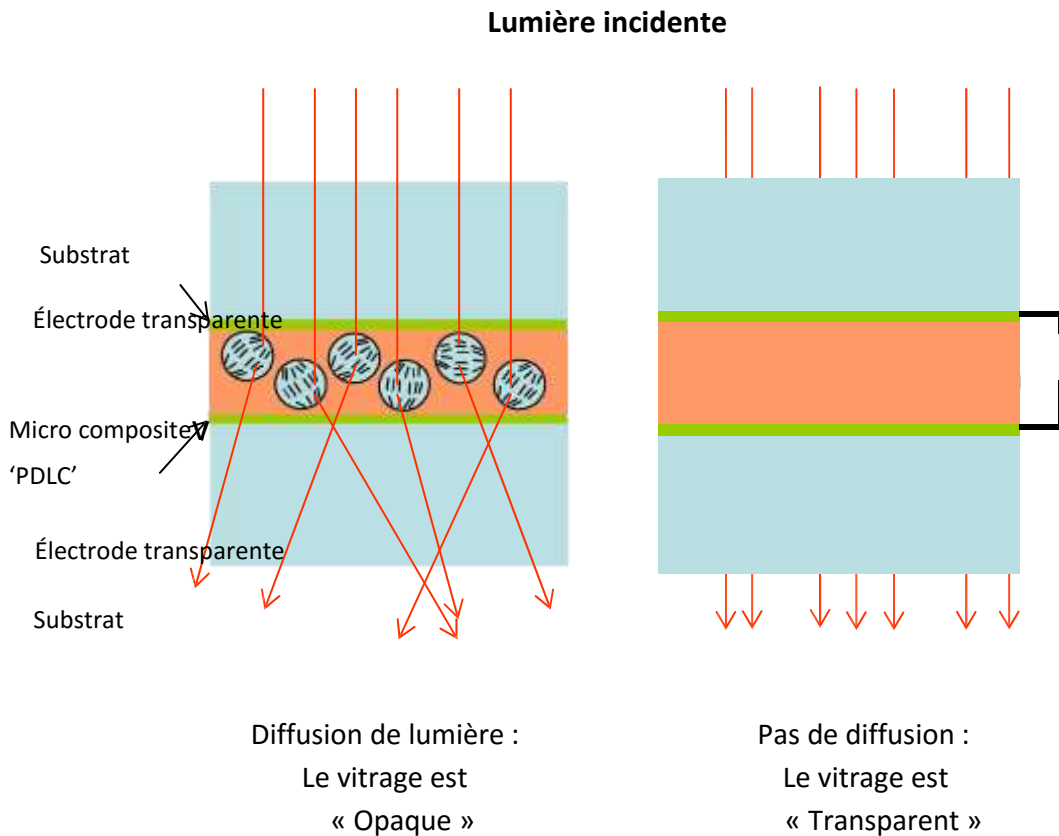


Figure (2.5) : principe de fonctionnement d'un vitrage « obturateur ». Sous l'effet d'une tension électrique alternative de quelques volts, les molécules de cristaux liquides s'orientent (Mohammed, 2012) (Larbi, 2001).

I.2.3 Le vitrage électro chrome « assombrissant » :

- **Description du fonctionnement**

Le deuxième exemple de vitrage électro chrome est basé sur le changement de transparence d'une fine couche déposée entre deux feuilles de verres. Supposons le vitrage initialement transparent (Energie, 2015). L'application d'un courant électrique pendant un certain temps (quelques secondes à une minute) rend le vitrage 'sombre'. Si le courant électrique est supprimé, le vitrage reste sombre. Pour rendre le vitrage à nouveau transparent, il suffit d'appliquer un courant électrique en sens inverse. Contrairement au cas précédent, l'effet est rémanent. Le courant électrique appliqué n'est pas alternatif mais continu (Caractérisation d'un vitrage, 2015).



Figure (2.6) : vitrage électrochrome pour le bâtiment (Detremmerie, s.d.).

- **Applications**

Ce type de vitrage trouve des applications dans le domaine du bâtiment, comme en témoigne la figure (2.4), mais aussi dans le domaine du transport automobile (haut de gamme). Par exemple, le toit en verre rétractable et repliable qui équipe la Ferrari *Super america* a été mis au point par Saint-Gobain. Une commande au tableau de bord permet d'ajuster l'opacité sur 5 niveaux, depuis l'état 'clair' jusqu'à un état très 'sombre'. Les rétroviseurs électrochromes qui équipent certains véhicules sont sensés éviter l'éblouissement par les véhicules suiveurs car sont basés sur ce principe (ici, le changement de transparence est commandé automatiquement par une cellule photoélectrique) (Larbi, 2001).

- **Réalisation et structure du vitrage assombrissant**

La structure ressemble à la précédente : le film mince électrochrome est placé entre deux feuilles de verre. La face interne de chaque feuille de verre est rendue conductrice par un dépôt d'ITO. Ces films d'ITO servent d'électrodes transparentes. Le changement contrôlé de transparence est basé sur le changement de composition d'un film mince (ici de l'oxyde de tungstène WO_3) (Energie, 2015) entraînant un changement d'absorption optique. Ce système est commandé par un courant continu. Initialement le film WO_3 est transparent. L'application d'une tension électrique entraîne la migration d'ions métalliques M^+ vers la couche d'oxyde de tungstène qui change de composition

et devient absorbante (bleu foncé). Si la tension est supprimée, le vitrage reste sombre : l'effet est rémanent. Pour revenir à l'état clair, il suffit d'appliquer une tension électrique en sens opposé : l'effet est donc rémanent mais réversible.

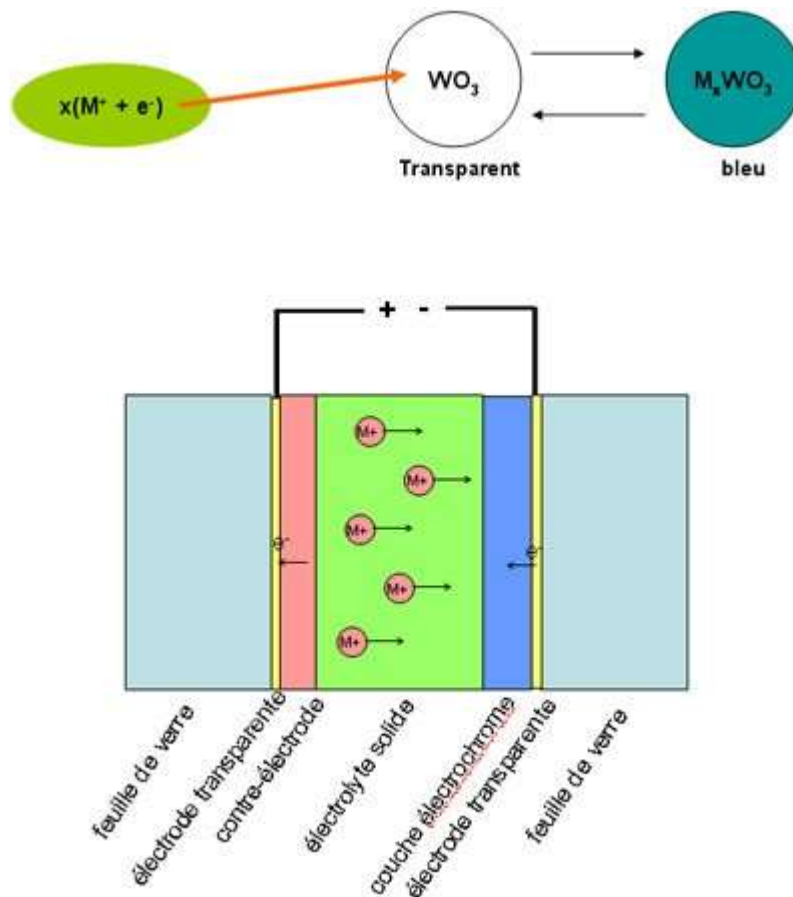


Figure (2.7) : Principe de fonctionnement d'un vitrage électrochrome à transparence contrôlée, Les vitrages thermochromes : vers un contrôle solaire « intelligent » (Thermochromisme, 2015)

1.2.4 La thermochromie

Un matériau thermochrome, par définition, est un matériau dont les propriétés optiques changent en fonction de la température et ceci de façon réversible ou quasi réversible (Thermochromisme, 2015).

Dans la vie courante, les matériaux thermochromes sont de type organique, comme par exemple les cristaux liquides de type cholestérique ou des molécules formant des pigments appelés « leucocolorants ». Ces matériaux thermochromes sensibles à la température ordinaire trouvent des applications dans le domaine grand public. Un exemple est donné par des encres pour étiquettes collées sur des bouteilles pour vérifier si la température optimale est atteinte ou encore des encres pour étiquettes de boîtes de médicaments pour vérifier que la température de conservation est suffisamment

basse. Une application en voie de développement des matériaux thermochromes est l'application de peinture sur la chaussée changeant de couleur vers 0°C (la peinture passe de l'état 'transparent' à haute température prend une couleur rouge si la température devient inférieure à +1°C) donnant ainsi l'alerte en cas de risque de verglas (Thermochromisme, 2015).

I.2.5 Les dépôts des couches thermochromes pour vitrages

L'effet thermochrome souhaité pour une application vitrage est le passage réversible d'un état transparent vers un état plutôt sombre ou réfléchissant au-dessus d'une certaine température. Certains verres contenant des nanoparticules de composés métalliques (diamètres de l'ordre de quelques millièmes de centimètres) sont susceptibles de présenter cet effet (Larbi, 2001).

Il est possible de déposer un film thermochrome de nature organique (un film de cristaux liquides par exemple) sur une vitre en verre, ou plutôt entre deux feuilles de verres, l'ensemble réalisant un vitrage appelé thermochrome. Une autre méthode est un dépôt d'oxyde métallique judicieusement choisi, qui présente un pouvoir réflecteur sélectif pour la lumière visible et pour le rayonnement Infra Rouge (Larbi, 2001).

Vitre en verre dépôt

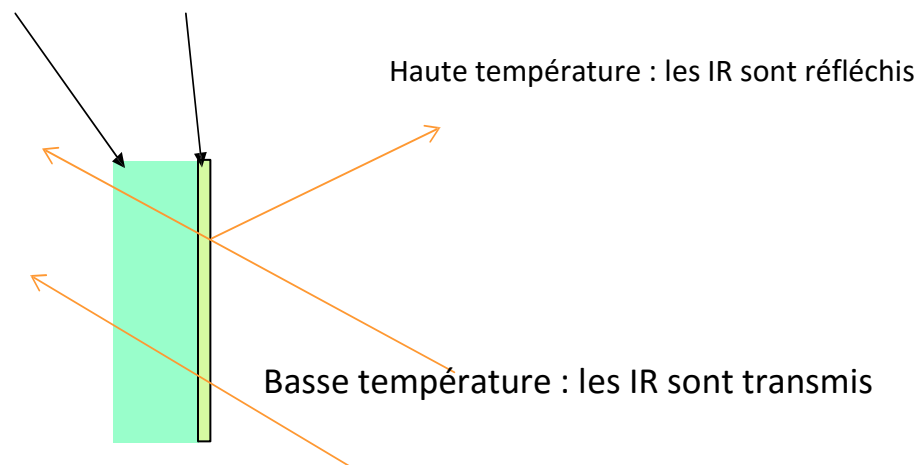


Figure (2.8) : structure d'un vitrage 'intelligent' thermochrome. Le contrôle solaire s'ajuste automatiquement en fonction de la saison. Par dopage de l'oxyde de vanadium VO₂, il est possible de modifier la température de transition T_C et obtenir une température de transition de +10°C jusqu'à 70°C. Par exemple, le dopage de l'oxyde de vanadium avec 1,9% de tungstène abaisse la température de transition vers 29°C (Thermochromisme, 2015).

Ainsi, le dépôt sur un vitrage d'une couche mince d'oxyde de vanadium convenablement dopé pour avoir une température de transition vers 30°C, pourrait être considéré comme une version 'automatique' et « intelligente » de vitrage à isolation thermique renforcée. Il s'agit d'un verre fonctionnel « innovant ». Un inconvénient pour sa commercialisation est un abaissement de transparence pour la lumière visible et une légère tendance à être coloré en jaune (ETIENNE, 2009).

De grands progrès ont été réalisés récemment, basés sur des dépôts de couches multiples et un contrôle de l'épaisseur. Ces progrès permettent d'envisager une application pratique prochaine. Il faut aussi noter parmi ces progrès qu'un mode de dépôt où l'oxyde de vanadium est formé de grains de très petites tailles (quelques nanomètres) permet d'abaisser la température de transformation de 68°C à près de 30°C, ce qui est appréciable pour une application vitrage (N., 1996).

I.2.6 Autres variétés de vitrages thermochromes

Il existe d'autres possibilités pour qu'un vitrage soit thermochrome.

Première variété : la pose sur un vitrage qui a un film constitué d'une solution polymère et d'eau prise en sandwich entre deux films très minces de polymère. Ce film est pratiquement transparent à basse température mais laisse passer peu la lumière si la température dépasse une certaine valeur (thermique, 2009).

Une autre variété de vitrages thermochromes est constitué des vitrages feuilletés thermochromes au lieu de verres à couches minces. La couche intermédiaire est un polymère dopé avec des complexes de métaux de transition (thermique, 2009).

Les métaux dans ces complexes changent de coordination, modifiant ainsi la transmission et la couleur du film polymère sous l'effet de la température. Le vitrage s'adapte automatiquement en fonction des conditions climatiques. Là encore il s'agit d'obtenir un vitrage thermochrome 'auto adaptatif' en fonction des conditions climatiques, mais l'avantage du film VO₂ est qu'il s'agit d'une version 'tout minéral' de bonne durabilité (Caractérisation d'un vitrage, 2015).

I.3 Modification des propriétés optiques du verre par dépôts multicouches diélectriques

I.3.1 Introduction

Lorsqu'une onde lumineuse qui se propage dans l'air arrive sur la surface d'un verre, une fraction de l'intensité du rayonnement lumineux est réfléchi. On appelle coefficient de réflexion R le rapport entre l'intensité lumineuse réfléchi et l'intensité lumineuse incidente. Le coefficient de réflexion dépend de l'angle d'incidence. Si les rayons lumineux arrivent perpendiculairement à la surface du verre, environ 4% de l'intensité lumineuse est réfléchi. Ainsi, puisque la vitre a deux faces, c'est donc environ 8% de l'intensité lumineuse qui est réfléchi (Cotton, 2006).

Ces reflets peuvent être gênants. Dans ce cas, il faudrait trouver une méthode pour réduire ces reflets. Au contraire, dans certaines applications, il peut être intéressant d'avoir un facteur de réflexion R très élevé. De plus, pour des applications plus spécifiques, il est souhaitable d'avoir un coefficient de réflexion dont la valeur est contrôlée selon la 'couleur' du rayonnement lumineux incident. Il s'agit donc de modifier le coefficient de réflexion du verre par des dépôts judicieusement choisis (Cotton, 2006).

Ce contrôle sélectif du coefficient de réflexion R d'un verre est obtenu par un dépôt, généralement multicouche, de films diélectriques (c'est-à-dire transparents et donc non absorbants) de très faible épaisseur. Les cas des dépôts métalliques et à faible émissivité seront traités dans d'autres chapitres (Cotton, 2006)

I.3.2 Applications pratiques des traitements « antireflets »

I.3.2.1 Dans le domaine du bâtiment et de l'architecture

Les traitements anti-réfléchissants sont utilisés pour les vitrines d'exposition (musées, vitrines de magasins), rendant ainsi plus commode l'observation des objets sans reflets parasites (Carmody J., 1996.).

Les cabines de presse dans les stades font appel aussi à des vitres anti-réfléchissantes car l'intérieur est fortement éclairé en comparaison avec l'extérieur.

Le traitement anti-réfléchissant n'est pas toujours souhaitable dans le domaine du bâtiment. C'est le cas en particulier, des portes constituées d'une feuille de verre (aéroports, halls d'accueil du public...), des abris bus, bains etc... Il est même recommandé dans cette application illustrée par la figure (2.13) d'utiliser des verres comportant une sérigraphie (Carmody J., 1996.).



Figure (2.9) : Il n'est pas souhaitable que les feuilles de verre utilisées pour les portes de bâtiments avec accès au public et le mobilier urbain soient traitées anti-réfléchissantes. Au contraire, ces feuilles comportent des sérigraphies afin d'être visibles (ETIENNE, 2009).

I.3.2.2 Dans le domaine de l'optique

Les traitements multicouches anti-réfléchissants sont très utilisés dans les instruments d'optique et la lunetterie. Ces traitements sont très utiles pour augmenter la luminosité des objectifs d'appareils photographiques et éliminer les reflets parasites provoqués par des réflexions multiples (Larbi, 2001).

I.3.2.3 Dans le domaine des énergies renouvelables

Pour augmenter le rendement des cellules solaires (photovoltaïques et thermiques), les verres de protections sont revêtus de couches anti réfléchissantes.

I.3.3 Applications pratiques des traitements 'semi-réfléchissants' et 'réfléchissants'

Ces traitements de surface du verre sont essentiellement utilisés dans le domaine de l'instrumentation optique. Nous donnons ici des exemples d'application (thermique, 2009).

Application1 : le dépôt sur du verre d'une couche transparente d'indice de réfraction élevé, par exemple d'oxyde de titane, est utilisé pour produire un effet décoratif par réflexion sélective. Ce dépôt est obtenu en condition industrielle par pulvérisation PVD magnétron.

Application2 : la cavité résonnante d'un LASER utilise un traitement réfléchissant voisin de 1 pour une couleur (c'est-à-dire une longueur d'onde) bien précise : celle du rayonnement émis par le LASER.

Application3 : les présentateurs de journaux télévisés utilisent souvent un 'prompteur'. Cet appareil, qui met en œuvre une glace semi-réfléchissante, permet de lire un texte déroulant tout en fixant la caméra de prise de vue.

Application4 : il peut être intéressant dans certains instruments d'optique scientifique de disposer de deux faisceaux de même intensité lumineuse issus d'une seule source. Ceci est obtenu en utilisant un 'séparateur de faisceaux' élaboré à partir d'un verre traité 'semi réfléchissant'.

I.4 Conclusion :

Le verre n'est plus le matériau fragile posé dans de petites ouvertures aménagées dans une paroi afin de laisser pénétrer un peu de lumière naturelle dans les intérieurs.

Dans ce chapitre on a traité les différents types de vitrage, l'architecture actuelle, du verre, sa disposition ses épaisseurs. Ce dernier doit donc assumer toutes les fonctions telles que la protection contre le froid, la chaleur, l'eau, le vent, l'excès de lumière, parfois la transparence, le bruit, le feu, les rayonnements nocifs,

Aujourd'hui, dans un monde de compétition industrielle, où tout est plus difficile, le succès et la rentabilité d'un produit passent par l'amélioration constante des techniques de fabrication en termes de productivité, de qualité, de consommation d'énergie, et de réduction de la pollution.

I.5 Bibliographie

Caractérisation d'un vitrage. (2015). Récupéré sur L'Eclairage Naturel des Batiments:

http://www-energie.arch.ucl.ac.be/eclairage/guide_parois_transparentes.htm

Carmody J., S. S. (1996.). Residential windows, a guide to new technologies and energy performances. Norton, NY.

Cotton, S. P. (2006). Couches minces optiques: approche théorique et mise en œuvre. (CNRS, Interprète) Institut Fresnel, Marseille, France.

CSTC. (1999). Le verre et les produits verriers - les fonctions du vitrage. Centre Scientifique et Technique de la Construction, Note d'information technique n°214.

Detremmerie, V. (s.d.). Guidance Technologique "Le verre dans le bâtiment". (service publique de wallonie) Consulté le 06 01, 2016, sur [cstc.be](http://www.cstc.be):

http://www.cstc.be/homepage/index.cfm?cat=services&sub=innov_support&pag=09

Energie. (2015). Efficacité énergétique. Récupéré sur Le vitrage isolant thermique et le vitrage isolant acoustique: <http://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=10397>

Energie-environnement. (2011). Récupéré sur Pour éviter la chaleur dans la voiture: <http://www.energie-environnement.ch/le-saviez-vous/431-pour-eviter-la-chaleur-dans-la-voiture-la-couleur-du-vitrage-a-encore-plus-dimportance-que-celle-de-la-carrosserie>

ETIENNE, S. (2009). Les verres à couches. Serge Etienne, Laboratoire de Physique des Matériaux, UMR CNRS 7756, Nancy : Pôle Verrier/Cerfav.

Larbi, H. Z. (2001). Le verre dans les Batiments. Alger: Université Mhelmed Bougara Boumerdes.

Mohammed, M. (2012). Etude et évaluation du confort thermique des bâtiments. 45, 35, 60.

N., N. (1996). Energy-efficient windows : research, ideas, and product reviews, Energy Design Update. Cutter Information Corp., 27.

Nadia, N. (2011). LA REHABILITATION ENERGETIQUE DANS LES LOGEMENTS COLLECTIFS EXISTANTS. 67-68. Constantine.

Thermique, V. e. (2009). Vitrage et casse thermique. Récupéré sur Vitrage et casse thermique: <http://www.cstc.be/homepage/index.cfm?cat=publications&sub=bbri-contact&pag=Contact36&art=557>

Thermochromisme. (2015). Thermochromisme. Récupéré sur Thermochromisme: <https://fr.wikipedia.org/wiki/Thermochromisme>

Chapitre III

Couches Polymères PDLC

Chapitre III

Couche Polymère PDLC

Sommaire

III.	Introduction :	44
III.1	Polymère :	44
III.1.1	Définition des polymères :	44
III.1.2	Différents types de polymère.....	44
III.2	Classification des polymères :	47
III.3	Propriétés des polymères	48
III.3.1	Propriétés physiques.....	48
III.3.2	Propriétés chimiques.....	48
III.3.3	Propriétés thermiques	48
III.3.4	Propriétés électriques	48
III.3.5	Propriétés acoustique	48
III.3.6	Propriétés mécaniques.....	49
III.3.7	Propriétés optiques	49
III.4	Catégories de polymère :	49
III.4.1	Les cristaux liquides :.....	49
III.5	Propriétés des cristaux liquides :	50
III.5.1	La biréfringence (anisotropie des indices de réfraction)	50
III.5.2	Application des cristaux liquides :.....	53
III.6	Les cristaux liquides dispersés dans une matrice polymère (PDLC) :	53
III.7	Définition et fonctionnement :	54
III.8	Méthode de préparation des PDLC :	55
III.9	Morphologie des matériaux PDLC :	55
III.10	Propriétés électro-optique des PDLC :	56
III.11	Application de PDLC :	57
III.12	Conclusion :	58
III.13	Bibliographie	59

III. Introduction :

Pendant plusieurs décennies la compréhension des phénomènes physiques associés aux cristaux liquides a attiré l'attention de plusieurs physiciens. Cependant, le travail des chimistes a aussi été nécessaire pour créer les cristaux liquides ainsi que les diverses matrices de polymère. Par ailleurs, L'amélioration des propriétés mécaniques de cette dernière a depuis longtemps un intérêt aussi bien sur le plan industriel que sous l'aspect fondamental (ABDELKADER, 2014).

Pour cela ils établissent un pont entre la physique et la chimie, et de là ils offrent un vaste domaine par la diversité de leurs structures.

III.1 Polymère :

III.1.1 Définition des polymères :

Les polymères sont des matières organiques constituées d'un ensemble de chaînes moléculaires, dites macromolécules, de différentes longueurs comme l'indique la figure (3.1). Une macromolécule est une très grande molécule résultant de l'enchaînement covalent d'un motif récurrent, de bas poids moléculaire appelé monomère.

La cohésion du polymère est assurée par des liaisons de Van der Waals, (interactions dipôle-dipôle, et liaisons hydrogène si elles existent) entre les chaînes. (ZOUBIDA, JUIN 2015)

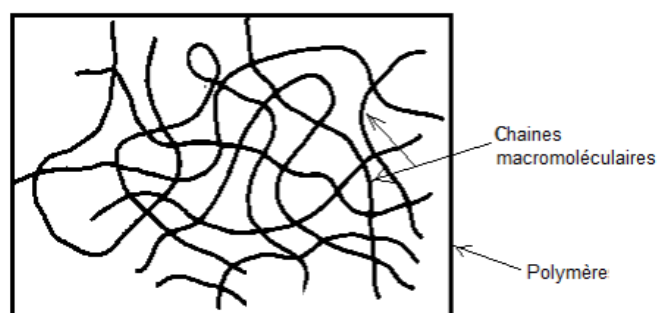


Figure (3.1) : Ensemble de macromolécules formant un polymère (ABDELKADER, 2014).

III.1.2 Différents types de polymère

Classification selon la structure chimique

- Si les chaînes de polymère sont formées de la même unité de répétition, on parle d'homopolymère.

Exemple : le poly méthacrylate de méthyle correspond à la répétition du méthacrylate de méthyle (Fig. (3.2)).

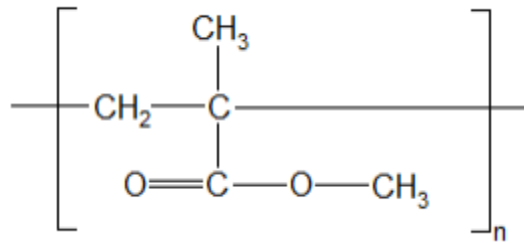


Figure (3.2) : Homopolymère poly-méthacrylate de méthyle (MEBROUK, 2016).

- Si le polymère comporte dans ses chaînes deux unités de répétition différentes A et B, on parle de copolymère.

Exemple : le poly (méthacrylate de méthyle-co-acrylonitrile) correspond à la corépétition des deux unités, le méthacrylate de méthyle et l'acrylonitrile (Fig. (3.3)).

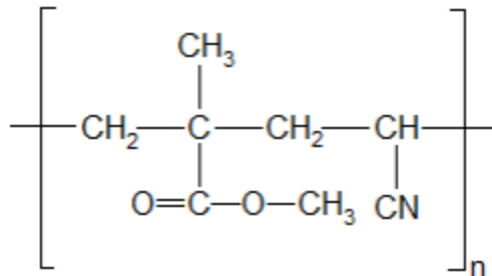
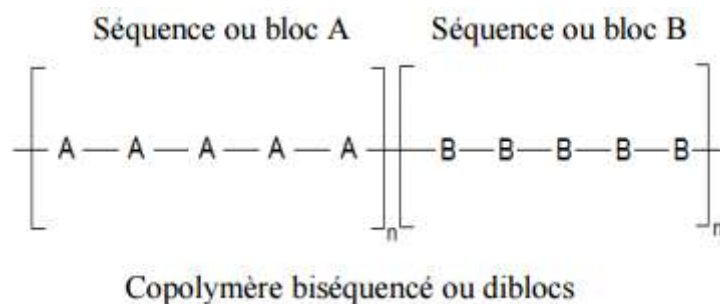


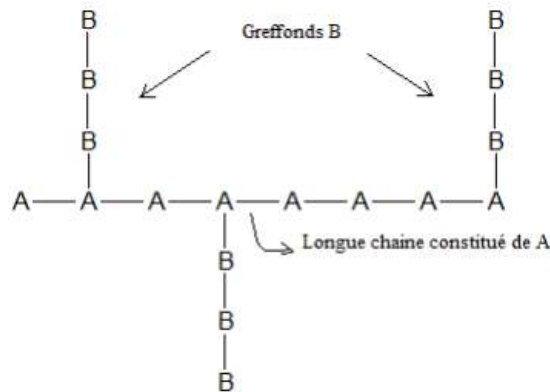
Figure (3.3) : Copolymère poly (méthacrylate de méthyle-co-acrylonitrile (Mebrouk, 2016)).

Selon la distribution des monomères (A) et (B) dans les chaînes macromoléculaires, on distingue :

- Les copolymères statistiques $A-A-B-A-B-B-A-A-A-B-A-$
Les motifs A et B sont distribués d'une manière aléatoire dans les chaînes macromoléculaires.
- Les copolymères alternés $A-B-A-B-A-B-$
Il y a alternance des motifs A et B dans les chaînes. -Les copolymères blocs ou séquencés



- Les copolymères greffés



III.1.2.1 Synthèse des polymères :

La synthèse des polymères est appelée la polymérisation. Il existe deux grandes méthodes de Synthèse : la polycondensation et la polymérisation en chaîne.

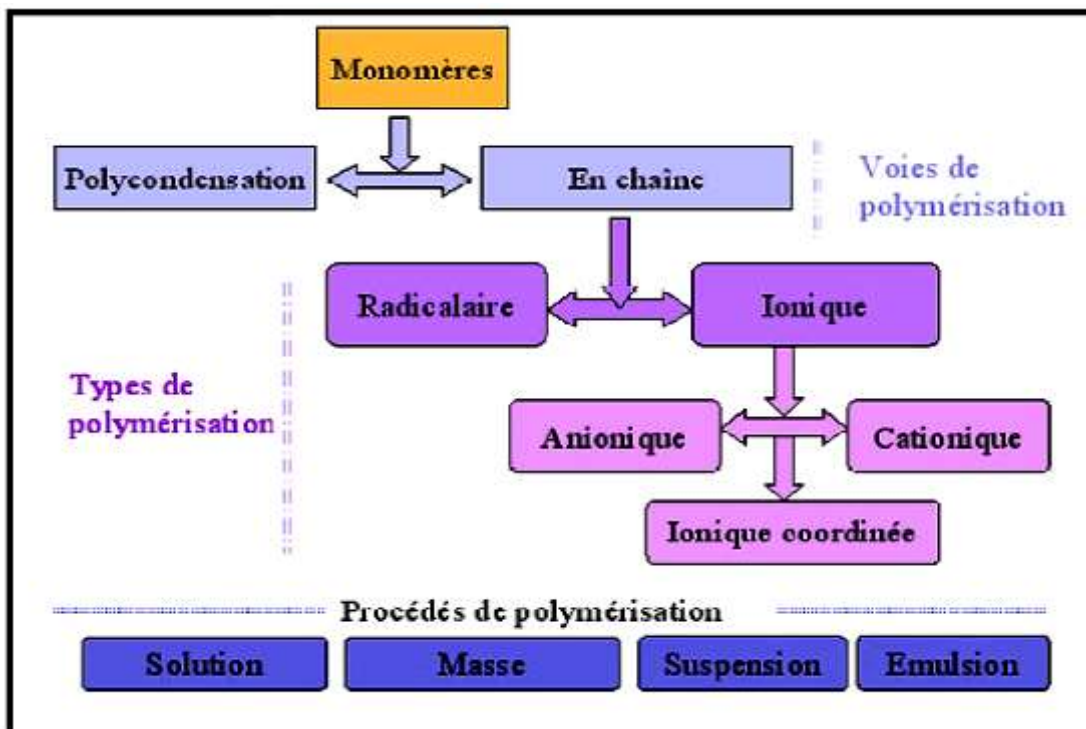


Figure (3.4) : Voies, Types et Procédés de polymérisation (AMINA, 2012).

III.1.2.2 La polycondensation :

La polycondensation est également désignée par le terme « polymérisation par étapes » la formation de la macromolécule se fait par des réactions de condensation successives entre les fonctions chimiques des monomères ou polyfonctionnels. Ces réactions s'accompagnent généralement de l'élimination de petites molécules, l'eau en générale. Dans cette voie de

polymérisation, la chaîne grossit soit par addition de monomères, soit par addition d'oligomères. Cette polymérisation est longue et peut durer plusieurs heures.

III.1.2.3 La polymérisation en chaîne :

La polymérisation radicalaire suit un mécanisme de réaction en chaîne. L'espèce active est un radical libre, Cette polymérisation comporte trois étapes essentielles qui sont : l'amorçage, la propagation et la terminaison de chaînes.

- Amorçage : Décomposition de l'amorceur : la décomposition d'une molécule conduit à des radicaux R^* .

Cette réaction est lente et se produit tout au long de la polymérisation. Les amorceurs comportent une liaison faible susceptible de se rompre sous l'action de la chaleur d'un rayonnement par dissociation homolytique.

- Propagation : La propagation est la séquence des réactions d'addition du monomère M sur un centre actif RM^* , conduisant ainsi à la croissance de la chaîne macromoléculaire.
- Terminaison : Les réactions de terminaisons sont celles qui conduisent à la destruction des centres actifs et à la fin des réactions de la croissance des chaînes.
(AMINA, 2012)

III.2 Classification des polymères :

Il existe plusieurs types de classification des polymères, cependant les plus courantes sont celles qui font appel à leurs origines ou l'usage que l'on en fait :

- **Selon l'origine :**
 - Polymères naturels : protéines fibreuses (cheveux, laine, soie, coton cellulose ...)
 - Polymères artificiels : polymères naturels ayant subi une ou plusieurs modifications chimiques
 - Polymères de synthèse.
- **Selon l'usage :**
 - Polymères d'usage courant ou de commodité
 - Polymères techniques
 - Polymères spéciaux (usage restreint en médecine, pharmacie ...).
- **Selon l'ordre moléculaire :** l'organisation spatiale des molécules.
- **selon leur comportement mécanique à la chaleur et au refroidissement.** (WEGHE, 2011-2012)

III.3 Propriétés des polymères

III.3.1 Propriétés physiques

Les propriétés physiques des matériaux polymères sont une moyenne de celles des composants quand il s'agit de la masse volumique ou de la reprise l'humidité pour le reste, ces matériaux sont souvent inhomogènes et il n'y a pas de règle d'addition pour les propriétés à partir de celles des composants (RETHO, 2003).

III.3.2 Propriétés chimiques

Le comportement chimique du matériau dépend en grande partie de la nature chimique de la partie polymère mais aussi de son accessibilité aux agents extérieures. La distinction entre mise en solution et attaque chimique est théoriquement claire une solution devant laisser intacte la structure chimique du produit (AMIN, 2014).

III.3.3 Propriétés thermiques

La conductibilité thermique est faible, quelque $0.1W.K^{-1}.m^{-1}$. Les polymères sont des isolants. Les charges peuvent augmenter la conductibilité. La capacité thermique à pression constante est de l'ordre du $KJ.K^{-1}.Kg^{-1}$. Les variations importantes ne se manifestent que pour les semi – cristallins au passage de la fusion (RETHO, 2003).

III.3.4 Propriétés électriques

Certains polymères sont théoriquement conducteurs comme les polyacétylènes, polyparaphénylène, polypoles, polyanalines. Cependant un dopage est nécessaire pour le rendre effectivement conducteurs (agent, oxydant qui prélève les électrons dans la structure principale). Actuellement la limite est qu'en présence d'air et d'humidité. Ils sont instables et perdent leur aspect conducteur. Cependant, les polymères actuellement disponibles dans le commerce en standard sont des isolants électriques les polymères chargés des particules conducteurs comme le noir de carbone ou des poudres métalliques peuvent avoir une faible conduction électrique permettent, par exemple, d'évacuer des charges électrostatiques (HISTOIRE-SCIENCE, 2012).

III.3.5 Propriétés acoustique

Certains polymères sont disponibles sous forme de structure alvéolaire ou masse qui ont la particularité d'être isolant thermique mais aussi acoustique. Les réglementations en matière d'isolation acoustique deviennent de plus en plus sévères dans les domaines de bâtiment et de la machine notamment.

III.3.6 Propriétés mécaniques

Les propriétés mécaniques des matériaux polymères dépendent de la position de la température expérimentale par rapport aux températures caractéristiques que sont les températures de fusion, de transition vitreuse et de transition secondaire. Les essais de traction permettent de déterminer qualitativement si un matériau est fragile ou ductile, rigide ou souple. Ils permettent aussi de quantifier certaines propriétés mécaniques telles que le module d'élasticité. La résistance maximale ou la contrainte et l'allongement à la rupture en traction (ATROUS RAHIMA, JUIN 2013).

III.3.7 Propriétés optiques

- Transparence.
- Translucidité.
- Opacité.
- Coloration. (ATROUS RAHIMA, JUIN 2013)

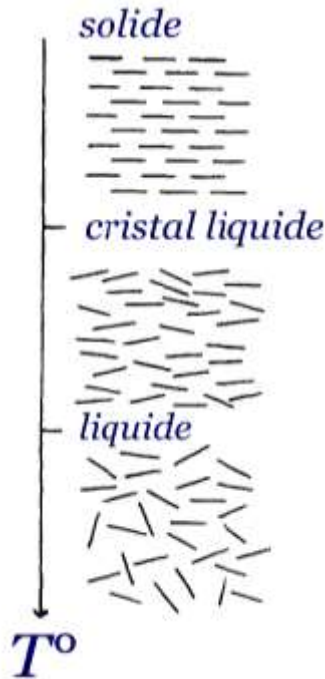
III.4 Catégories de polymère :

- **Les polymères cristallins** : ils sont formés uniquement de zones cristallines ; ces matériaux sont essentiellement de taille fortement réduite ; ils ne sont abordés qu'au travers des polymères semi-cristallins utilisés plus couramment. Les polymères cristallins sont des solides ordonnés à grande distance.
- **Les polymères semi-cristallins** : ils comportent des zones cristallines donc organisées et des zones amorphes désordonnées. Les polymères orientés ou fibre font partie de cette famille cristalline.
- **Les polymères amorphes** : s'obtient lorsque l'arrangement régulier des chaînes macromoléculaires n'est pas possible (AMINA, 2012).

III.4.1 Les cristaux liquides :

Leurs découverts étaient en 1888 par le botaniste autrichien nommé Friedrich Reinitzer en extrayant de la racine de la carotte des cristaux de « benzoate de cholestéryle » afin d'élucider leur structure. À son grand étonnement, ceux-ci se présentent en étant que « Le composé perd sa dureté à 145,5 °C mais conserve sa couleur, qui ne disparaît qu'à 178,5 °C. Et le phénomène est réversible. Ce comportement est surprenant : un cristal devrait perdre solidité et couleur à une seule et même température. » (Mebrouk, 2016).

Du coup Reinitzer fit part de sa découverte à Lehmann, sachant qu'elle l'intéressait beaucoup, et ce dernier fut donc un des premiers scientifiques à étudier ce qu'il appela lui-même les « cristaux liquides ». (HISTOIRE-SCIENCE, 2012) Et voici l'exemple du matériau utilisé lors de ses expériences :



A 20 °C on est en phase solide, les molécules du cristal sont rangées avec un ordre de position et d'orientation.

A 71 °C, le solide fond, mais le " liquide" résultant est trouble. L'ordre positionnel a disparu mais toutes les molécules ont plus ou moins gardé leur orientation d'origine.

Si on continue à augmenter la température, on remarque un autre changement à 85 °C. Le liquide trouble devient clair. On a obtenu une phase liquide classique où ne subsiste aucun ordre.

Figure (3.5) : montre que Le cristal liquide est une phase intermédiaire entre la phase solide et la phase liquide (MEBROUK, 2016).

Ce sont des molécules généralement fortement polarisées, présentant des états intermédiaires entre l'état solide et l'état liquide. Ces phases intermédiaires nommées mésophases, sont décrites en fonction du degré d'arrangement des molécules dans l'espace.

III.5 Propriétés des cristaux liquides :

Les cristaux liquides ont une géométrie et une nature particulière, où les mésophases présentent des propriétés anisotropes : la biréfringence et l'anisotropie diélectrique. La nature anisotropique des cristaux liquides est responsable de la propriété optique exploitée dans différentes applications (MEBROUK, 2016).

III.5.1 La biréfringence (anisotropie des indices de réfraction)

L'anisotropie du cristal liquide amène à une biréfringence du système : il possède deux axes optiques et deux indices de réfraction.

III.5.1.1 L'anisotropie diélectrique :

L'anisotropie diélectrique caractérise la propriété intrinsèque d'une molécule lui permettant de s'orienter sous l'effet d'un champ électrique ou magnétique. (AMINA, 2012).

- **Catégories de cristal liquide :**

L'état mésomorphe possède des propriétés intermédiaires entre celles d'un cristal solide, constitué d'atome ou de molécules rangées avec un ordre de position et d'orientation et celles d'un liquide, où aucun ordre de position n'existe. Le cristal liquide a le caractère de mésophases avec des symétries différentes. On peut distinguer le cristal liquide thermotrope, lyotrope, polymérique et colloïdal (ABDELKADER, 2014).

- **Les thermotropes :**

Les thermotropes sont des cristaux liquides qui présentent une phase stable dans un intervalle de températures ; ils forment donc des mésophases par chauffage. Ces cristaux liquides peuvent être séparés en deux types, soit les cristaux liquides énantiotropiques et les cristaux liquides monotropiques. Les cristaux liquides énantiotropiques peuvent atteindre leur phase cristal liquide en augmentant ou en diminuant la température (les deux façons sont possibles) tandis que les cristaux liquides monotropiques peuvent atteindre la leur d'une seule façon, soit en chauffant, soit en refroidissant, mais pas les deux.

- **Les lyotropes**

Les lyotropes sont des molécules biologiques appartiennent à la famille des molécules amphiphiles qui possèdent deux parties d'affinité différentes.

Dans les phospholipides par exemples, qui sont les principaux constituants des membranes cellulaires, une partie de la molécule est hydrophobe (fuit l'eau par tous les moyens) tandis que l'autre est hydrophiles (recherche un environnement aqueux). Ces molécules se regroupent alors en plus grandes entités qui peuvent s'arranger spatialement. La concentration de soluté est le paramètre déterminant l'apparition d'une mésophase dans ce type de composé (AMINA, 2012).

III.5.1.2 Les phases du cristal liquide

Le cristal liquide peut se subdiviser en trois catégories (phases) suivant l'orientation et la disposition des molécules. Les principales mésophases sont les phases nématique, cholestérique et smectique, ayant toutes des degrés d'ordre différent. Evidemment, toutes ces phases ne sont pas présentes chez tous les cristaux liquides en même temps.

III.5.1.3 La phase nématique

Les mésophases nématiques ne présentent pas d'ordre de position à longue portée des unités mésogènes mais un ordre d'orientation à longue distance. Les axes longs des molécules sont en moyenne parallèles à une direction macroscopique repérée par un vecteur directeur \vec{n} . Un tel ordre orientationnel donne au système des propriétés optiques anisotropes (biréfringence) alors que le manque d'ordre de position autorise une grande fluidité. Une rotation de la molécule autour d'un axe parallèle au directeur laisse la molécule inchangée contrairement à des rotations autour d'axes perpendiculaires. L'angle que fait

l'axe long de chaque molécule par rapport au directeur étant noté Θ . La phase nématique est la plus employée pour les applications en électronique.

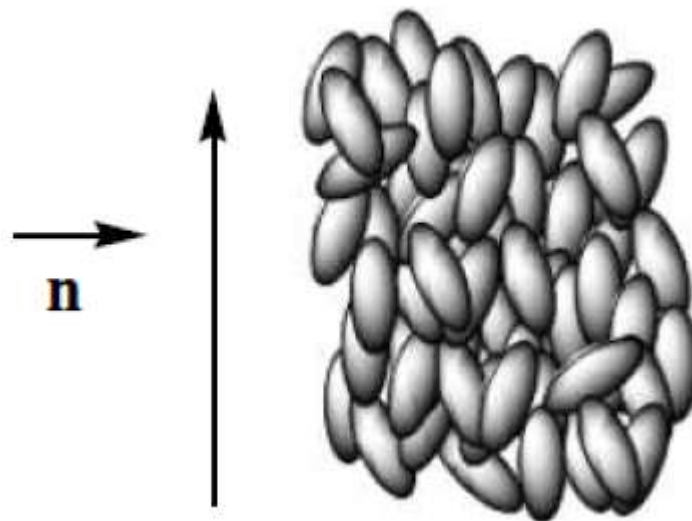


Figure (3.6) : Illustration de la phase nématique (MEBROUK, 2016).

III.5.1.4 La phase smectique

Les mésophases smectiques sont caractérisées par un ordre de position de type solide dans une direction spatiale et un ordre de type liquide dans les deux autres ; elles sont donc des empilements réguliers de couches liquides. Pas moins de 13 phases smectiques ont été répertoriées. Sans toutes les mentionner et les décrire, disons que les deux plus connues sont la phase smectique A (SA) et la phase smectique C (SC). Dans la phase smectique A (SA), l'axe directeur est perpendiculaire aux plans tandis que dans la mésophase smectique C, il forme un angle avec les plans. L'épaisseur des couches (d) est en général voisine de la longueur a d'une molécule dans sa conformation la plus étendue (YACINE, 2015).

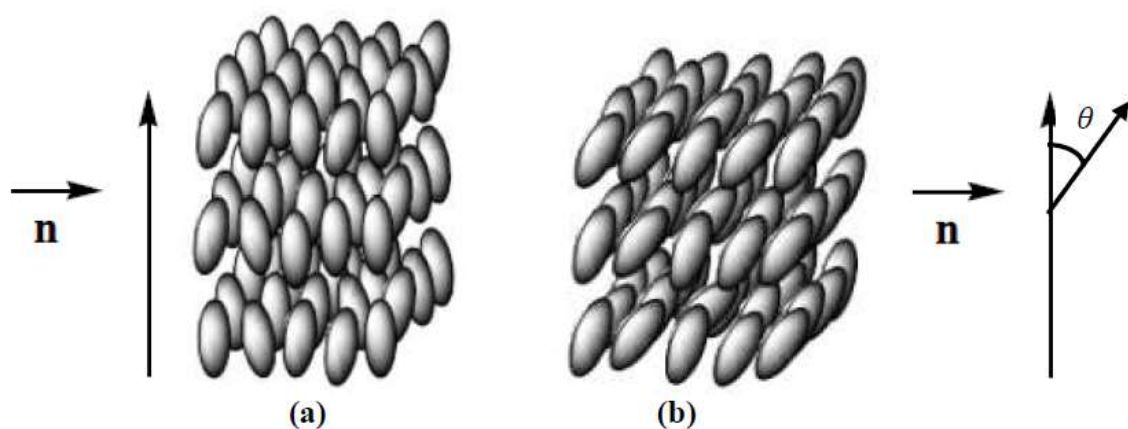


Figure (3.7) : Illustration de la phase smectique A (a) et smectique C (b) (ABDELKADER, 2014).

III.5.1.5 Les phases chirales

Dans certaines phases liquides-cristallines, la chiralité des molécules induit une chiralité macroscopique. Les molécules s'organisent dans une structure chirale en forme d'hélice. Cette structure a la propriété de réfléchir sélectivement la lumière de longueur d'onde égale au pas de l'hélice.

III.5.2 Application des cristaux liquides :

Les cristaux liquides sont utilisés dans le domaine de l'affichage (montres, écrans de télévision), Ces dernières années on les retrouve dans certains thermomètres changeant de couleur en fonction de la température, ainsi qu'en holographie (stockage des données).

Des chercheurs ont en effet montrés qu'il est possible de différencier deux énantiomères d'un composé par RMN en plaçant simplement celui-ci en solution dans un cristal liquide.

(AMIN, 2014)

III.6 Les cristaux liquides dispersés dans une matrice polymère (PDLC) :

Les cristaux liquides dispersés dans les polymères (PDLC) sont une nouvelle classe de nouveaux matériaux présentant d'intéressantes propriétés. Ils sont obtenus en incorporant un CL à une matrice de polymère choisie. Le point de départ pour la fabrication de systèmes de PDLC comprenant des CL est l'obtention d'une séparation de phases entre le CL et le polymère utilisé. La séparation de phases s'effectuant dans l'échantillon est cruciale pour obtenir des gouttelettes CL distinctes de la matrice de polymère. Le principe d'opération des systèmes de PDLC repose sur la modulation électrique de l'indice de réfraction d'un CL, dans le but de correspondre ou non à l'indice de réfraction d'un solide (polymère) transparent, optiquement isotrope (Amina, 2012).

La figure ci-dessous est une représentation schématique d'un système de PDLC.

L'exemple présenté démontre la possibilité de contrôler la transparence d'un film par l'effet d'un champ électrique appliqué. Il s'agit donc de trouver un système où les indices de réfraction du CL et de la matrice de polymère sont compatibles. Le polymère possède un indice de réfraction appelé n_{pol} tandis que le CL possède deux indices de réfraction : l'indice de réfraction extraordinaire et l'indice de réfraction ordinaire.

Généralement, les gouttelettes de CL ont une taille de l'ordre du micron. Cela dépasse largement la longueur d'onde de la lumière utilisée et c'est pour cette raison que nous sommes en mesure d'assister aux différents phénomènes optiques et électro-optiques dans les films de PDLC. Considérons une seule gouttelette CL, si la lumière incidente se propage avec son champ électrique parallèle à l'axe de symétrie de la gouttelette, elle va ressentir l'indice de réfraction n_e . Par contre, si son champ électrique est perpendiculaire à l'axe de symétrie, c'est n_o , qui est effectif. En ce qui a trait au montage, concrètement il s'agit d'un

film mince de PDLC inséré entre deux lamelles de verre recouvertes d'une couche d'électrode transparente.

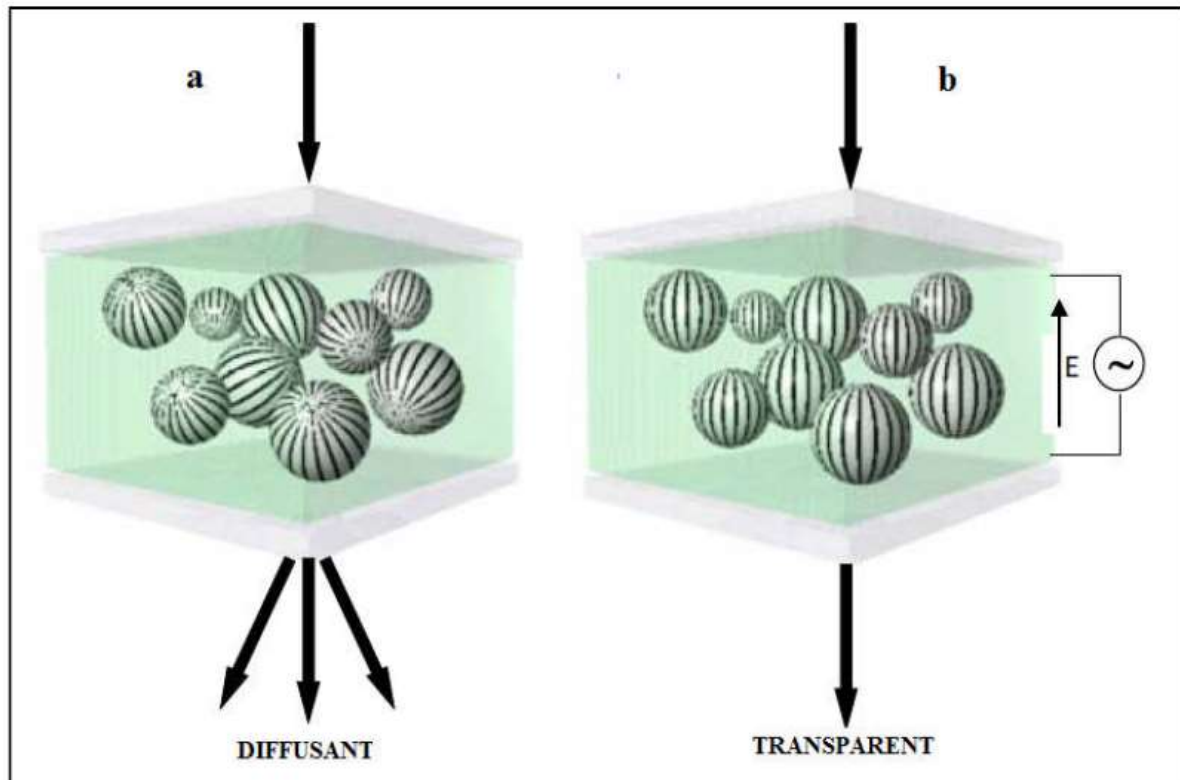


Figure (3.8) : Illustration d'une cellule de cristal liquide dispersé dans une matrice de polymère (RACHID, 2008).

III.7 Définition et fonctionnement :

Cristaux liquides dispersés dans un polymère (PDLC) sont une classe relativement nouvelle des matériaux prometteurs pour de nombreuses applications allant des fenêtres commutables à des écrans de projection. Ces matières, qui sont simplement une application combinée des polymères cristaux liquides, et font l'objet de recherches approfondies dans le secteur d'affichage (AMINA, 2012).

PDLC sont constituées de gouttelettes de cristaux liquides qui sont dispersés dans une matrice polymère solide. Le matériau obtenu est une sorte de polymère "fromage suisse" avec des gouttelettes de cristaux liquides de remplissage dans les trous. Ces minuscules gouttelettes (quelques microns de diamètre pour les applications pratiques) sont responsables du comportement unique de la matière. En modifiant l'orientation des molécules de cristaux liquides à un champ électrique, il est possible de faire varier l'intensité de la lumière transmise.

En faisant un choix adéquat des constituants du mélange, on peut obtenir un système transparent quand on soumet le film à un champ électrique suffisant « état ON » et opaque en l'absence de champ « état OFF ».

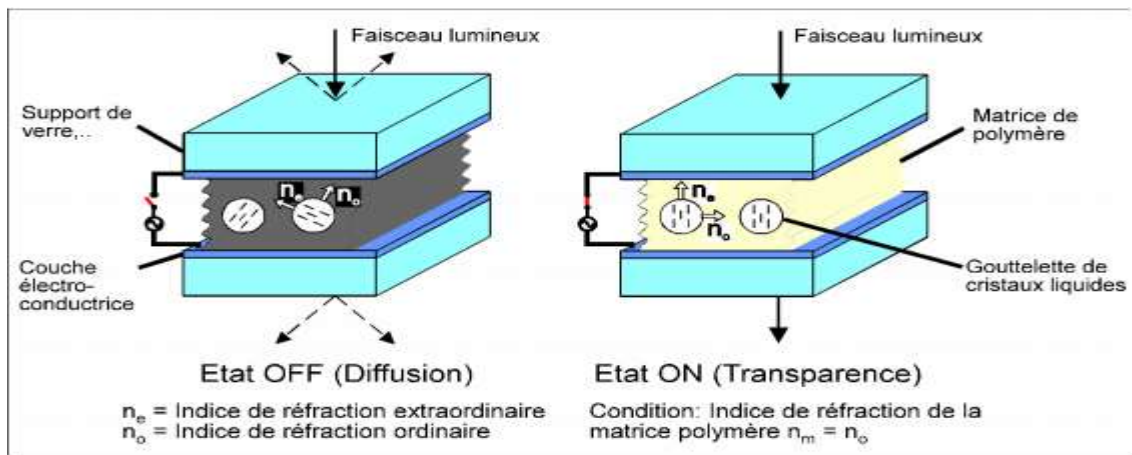


Figure (3.9) : fonctionnement des P.D.L.C (Mebrouk, 2016).

III.8 Méthode de préparation des PDLC :

Il existe plusieurs méthodes pour élaborer ces matériaux hétérogènes à partir de mélanges homogènes de cristal liquide et d'un prépolymère.

Le prépolymère peut contenir un ou plusieurs monomères et une oligomère.

Ces méthodes d'élaboration aboutissent toutes à une séparation de phase entre le cristal liquide et la matrice polymère. C'est notamment la nature chimique du précurseur de la phase polymère qui décidera de la technique à employer.

III.9 Morphologie des matériaux PDLC :

Après polymérisation des PDLC, le cristal liquide s'organise sous forme de gouttelettes de l'ordre de quelques microns. Ces gouttelettes se trouvent alors encerclées par les molécules de la matrice polymère. Néanmoins, toutes les molécules de cristal liquide ne se regroupent pas obligatoirement et certains peuvent être dispersés aléatoirement au sein de la matrice polymère (Abdelkader, 2014).

Divers configurations des gouttes peuvent apparaître, la plus probable étant la configuration bipolaire est généralement rencontrée pour un ancrage planaire. Lorsque l'ancrage est homéotrope, on observe d'autres textures, comme les structures radiale et axiale. L'observation d'une configuration parmi celles qui ont été présentées dépend, entre autres, de la nature du cristal liquide, de la température et de la forme ou de la taille des domaines ségrégués.

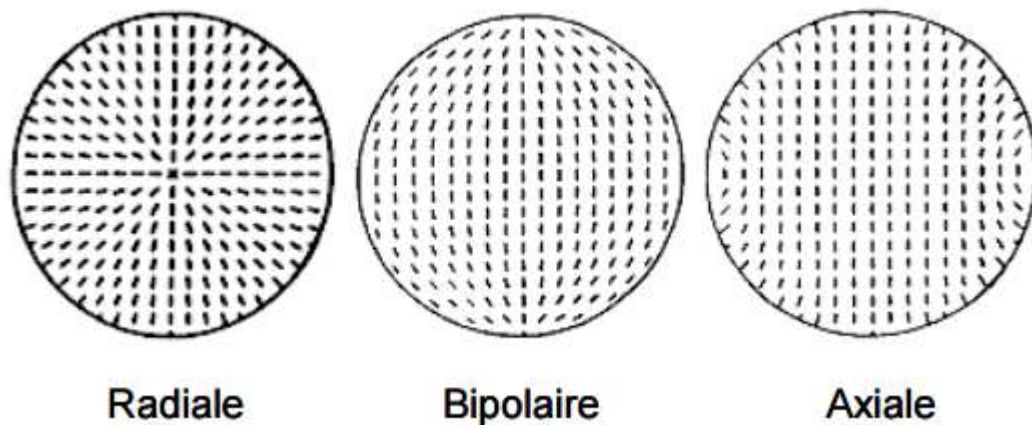


Figure (3.10) : Configurations des gouttelettes (Mebrouk, 2016)

III.10 Propriétés électro-optiques des PDLC :

Les PDLC présentent des propriétés électro optiques intéressantes, ils peuvent commuter d'un état « off » diffusant vers un état « on » transparent par application d'un champ électrique.

- **Absence du champ appliqué "état OFF"**

Les gouttelettes de cristal liquide ont, dans cet état non adressé, une orientation aléatoire. Elles présentent, par conséquent, des indices de réfraction n différents entre elles par rapport au faisceau de lumière incident (perpendiculaire à la surface du film PDLC). Il en résulte une diffusion de celle-ci dans le milieu et donc une transmission limitée de la lumière à travers la cellule. Cet état OFF est caractérisé par l'opacité de la cellule.

- **Application du champ électrique " état ON"**

Lors de l'application d'une tension supérieure ou égale à la tension seuil V_s , les molécules de cristal liquide s'orientent selon la direction du champ électrique imposé. Les gouttelettes présentent alors principalement l'indice de réfraction n_0 (indice ordinaire moyen) par rapport à la lumière incidente. Il en résulte une transmission de la lumière $\Delta n = |n_m - n_0|$ d'autant que la différence est petite (n_m est l'indice de réfraction de la matrice). Cet état ON est caractérisé par la transparence de la cellule à la lumière incidente (MEBROUK, 2016).

III.11 Application de PDLC :

Ils sont destinés à être utilisés pour diverses et intéressantes applications électro-optiques comme les dispositifs d'affichage, les vitrages à opacité variable opaque ou transparents, les commutateurs optiques, les capteurs optiques. Récemment, les PDLC à nanogouttes du Cristal liquide destinés pour les applications en holographie et en télécommunications comme des filtres optiques.

Les deux applications des composites polymère/cristal-liquide les plus recherchées sont la visualisation et les vitrages à opacité contrôlée. (AMIN, 2014)

Visualisation : Dans la réalisation des écrans de visualisation à base de PDLC deux procédés optiques entrent en jeu : le procédé électro-optique diffusif et la modulation de l'absorption par un colorant dichroïque incorporé en faible pourcentage dans le film permettant d'avoir une visualisation en couleur.

Notons aussi que ces matériaux composites s'adaptent aisément à la technologie des matrices actives grâce à leurs faibles tensions de commande et leurs temps de réponse compatibles avec la vidéo.

Vitrage à opacité variable : La seconde grande application des PDLC est la fabrication de vitrages à opacité contrôlable électriquement. En fonction de l'utilisation souhaitée on peut utiliser le mode normal (stores extérieurs ou partition de bureaux) ou le mode inverse (pare-brise d'automobile par exemple).

Les contraintes électro-optiques sont différentes de celles imposées par la visualisation : la tension de seuil et les temps de réponse ont peu d'importance alors que l'angle de vue, la simplicité de la mise en œuvre sur de très grandes surfaces et le coût des matériaux sont cruciaux (Amin, 2014).

Des études ont été menées pour contrôler l'atténuation des rayons infrarouges provenant du soleil à travers ces vitrages dans l'état diffusant. Différents paramètres sont ajustables pour augmenter l'atténuation solaire par ces composites :

La taille des gouttelettes : Montgomery. Montre à l'aide d'un calcul tenant compte de l'approximation de Rayleigh-Gans, que la rétrodiffusion des rayons visibles ainsi que leur absorption par réflexion interne totale sont $\lambda/7$: dans ce cas, λ maximale si le rayon des gouttelettes est de l'ordre de l'atténuation solaire est maximale. (Amin, 2014) .

III.12 Conclusion :

Le but de ce chapitre était de rappeler les caractéristiques principales de PDLC (cristaux liquides disperser dans un polymère) et de ces constituants (cristaux liquides et polymères). En outre, on a pu concevoir les structures des phases des cristaux liquides et les structures moléculaires des polymères. Aussi, on a pu présenter Les méthodes de préparation des composites ainsi que les principales propriétés de ces matériaux liées aux applications.

III.13 Bibliographie

Abdelkader Berrayah propriétés de certains matériaux a base de polymères soumis a des champs électriques. - tlemcen : [s.n.], 2014.

Amin Medjdoub Mohamed El Effets des nanoparticules de TIO₂ sur la réponse électro-optique du matériau composite PDLC à base de matrice acrylique. - tlemcen : UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAÏD DE TLEMEN, départemet de chimie , 2014.

Amina Bouriche Étude électro-optique des films PDLC à base de matrice. - 2012. - pp. 28-30.

ATROUS rahima NACER rabiaa Développement d'un mélange à base de résine PVC de. - biskra : [s.n.], Juin 2013.

histoire-science La naissance des cristaux liquides [En ligne] // larecherche. - histoire-science, 01 04 2012. - 17 02 2016.

Mebrouk DJEDID Synthèse et étude des propriétés de nouveaux cristaux liquides monomériques thermotropes [Ouvrage]. - [s.l.] : Thèse de Doctorat, Chimie Organique Appliquée, 2016. - Vol. Page 13-37.

Rachid Meziane structure dynamique et transition de phase d'un cristal liquide smectique au milieu polymère [Ouvrage]. - [s.l.] : Thèse de Doctorat, 2008. - Vol. P 13-45,67.

RETHO Patrice Propriétés physiques de nanofils de polymères [Ouvrage]. - [s.l.] : Thèse de Doctorat, Sciences des Matériaux, 2003. - Vol. P 47.

Weghe Pr. Pierre van de cours_polymere_L3. - Rennes : Equipe Produits Naturels, Synthèses, Chimie Médicinale, 2011-2012.

YACINE BENNACEUR Commande d'un convertisseur CA/CC et contrôle par différentes techniques [Ouvrage]. - [s.l.] : Mémoire de Master, 2015. - Vol. Page 77, 80.

Zoubida DJENANE Étude de mélanges PVC/PS obtenus par malaxage et. - Biskra : Université Mohamed Khider – Biskra, Juin 2015.

Chapitre IV

Résultats et Discussions

Chapitre IV

Résultats et Discussions

Sommaire

III Introduction	67
III.1 L'auto-adhésif intelligent PDLC FILM.....	67
III.1.1 Blanc intelligent film A4 taille échantillon :	67
III.1.2 Gris clair un film intelligent A4 Taille échantillon :	67
III.1.3 Information technique du film PDLC utilisé.....	68
III.2 Caractéristique :	69
III.3 Simple vitrage :	69
III.3.1 Variation de température de la face interne et externe :	69
III.3.2 Résultats obtenues :	70
III.3.3 Détermination de la conductivité du verre	71
III.4 Double vitrage sans la présence de l'air immobile :	72
III.4.1 Variation de température de la face interne et externe :	72
III.4.2 Détermination de la conductivité thermique :	73
III.5 L'ajout d'une feuille de PDLC adhésive :	74
III.5.1 Variation de température de la face interne et externe :	74
III.5.2 La conductivité thermique du PDLC à l'état opaque	75
III.5.3 La conductivité thermique du PDLC à l'état transparente	75
III.5.4 Détermination de la conductivité thermique du PDLC pour différent voltage	76
III.6 Conclusion :	78

III Introduction

Le but de ce travail est de déterminer l'amélioration du film de PDLC introduit dans des vitres à face simple ou double face ceci nous permet de déterminer la conductivité thermique du polymère PDLC smart verre film, nous appelons intelligent Film le PDLC Smart verre Film, le commutable intelligent Film électronique entre la partie grise et la partie transparente.

Nous vous proposons le type de Smart PDLC Film dans notre travail

III.1 L'auto-adhésif intelligent PDLC FILM

La taille : max 21cm (largeur) * 29cm (longueur) pour une seule pièce auto-adhésive intelligent PDLC FILM

III.1.1 Echantillon d'un film intelligent taille A4 en Blanc :



Fig. (4.1) : Film PDLC blanc

III.1.2 Echantillon d'un film intelligent taille A4 en Gris clair :

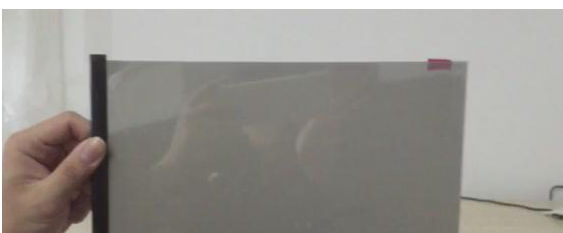


Fig. (4.2) : Film PDLC gris

III.1.3 Information technique du film PDLC utilisé

Les informations données dans les tableaux ci-dessous, ont été fournies par le vendeur du film PDLC, DeFi Tech CO., LTD China (Mainland)

Item	Judging Standard		Test Equipment
impurity, eutectic spots, pits, bubbles, pinholes etc. spot-like defect.	$\Phi < 0.1\text{mm}$	disregard	Visual Inspection
	$0.1 \leq \Phi \leq 0.2\text{mm}$	$\leq 3 \text{ pcs/m}^2$ OK	
	$\Phi \geq 2.0\text{mm}$	not allow	
	Intensive existence	not allow	
linear discontinuities	$W < 0.1$	disregard	Visual Inspection
	$0.1 \leq W < 0.2$ & $L \leq 30\text{mm}$	$\leq 3 \text{ pcs/m}^2$ OK	
	$W \geq 0.2\text{mm}$ or $L \geq 30\text{mm}$	not allow	
	Intensive existence	not allow	
Cloud-like, Fibrous, etc. stripe	Invisible stripe from 1m away	disregard	Visual Inspection
	Visible stripe from 1m away	$\leq 20\text{mm}^2 / \text{m}^2$	
	Visible and Intensive stripe from 1m away	not allow	

Fig. (4.3) Composition du film PDLC

Item	Unit	Specification	Testing Method & Standard
Power Consumption	ON	<5	Multiparameter gauge
Parallel light transmittance	ON	>65	GB5137.2-2002
	OFF	<6	
Full light transmittance	ON	>76	JISK 7105
	OFF	>50	
Haze	ON	<6	
	OFF	>90	
Visible Angle	ON	>140	Laser source
Response Time	ON	<45	Photomultiplier tube
	OFF	<45	
Life-span	ON	>50000	GB18910.5-2008

Fig. (4.4) : Teste de conformité du film PDLC

Testing Item	Condition	Standard
High temperature testing	70 °C, 240hours	No abnormal phenomena on the surface; No abnormal optical performance; The composite structure of smart LC film is strong; peel strength reduce less than 5%.
Low temperature testing	-20 °C, 240hours	
High temperature humidity testing	70 °C, 90% Humidity, 240hours	
High and low temperature impact testing	-20 °C, 30min, 70 °C, 30min; 50 times Circulation	

Fig. (4.5) : Les limites d'utilisation du film PDLC

III.2 Caractéristique :

1. Réalise les doubles exigences :
 - a. l'éclairage naturel
 - b. la vie privée.

Car quand on applique une tension électrique, il est transparent ; en supprimant le courant il redevient opaque,

2. Sécurité : les fragments se colle sur le film lorsque le verre est cassé
3. Protection de l'environnement : au- dessus de 90% UV et 98% infrarouge peut être blindé.
4. Isolation acoustique : 2-3 fois du verre ordinaire

Dans ce travail on va commencer par étudier la quantité de chaleur dissiper par le verre des fenêtres pour un simple vitrage, puis la double vitre, on va considérer cette étude comme une étude de référence par la suite on va introduire le film de PDLC dans la face avant et la face arrière du vitrage dans un dessin détaillé on va montrer la procédure.

Un cube de 21cm X 29cm Réalisé par le même type de verre, une porte en dessus ou verte pour, variée les positions, une résistance électrique à l'intérieur, génère une puissance de 900W/h.

Une colle adhésive résistante à des températures supérieures à 60°C regroupe les faces du cube.

36 thermocouples sensibles à des variations de températures de l'ordre de 0.1°C.

Un scotch pour tenir les sondes de thermocouples, et un chronomètre pour prélevé le temps nécessaire pour le chauffage et le refroidissement de notre cube avec et sans la présence d'une source de chaleur électrique.

III.3 Simple vitrage :

III.3.1 Variation de température de la face interne et externe :

Dans cette partie on va étudier un cube en verre, qui contient à l'intérieur des résistances qui vont dégager de la chaleur au cours de la manipulation.

Des sondes de mesures de température (thermocouple) ont été placées dans les cinq façades du cube

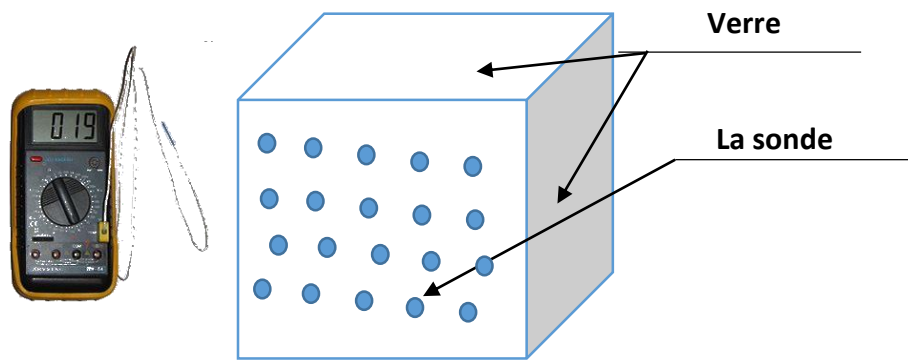


Fig. (4.6) : Schéma équivalent de l'expérimental

III.3.2 Résultats obtenus :

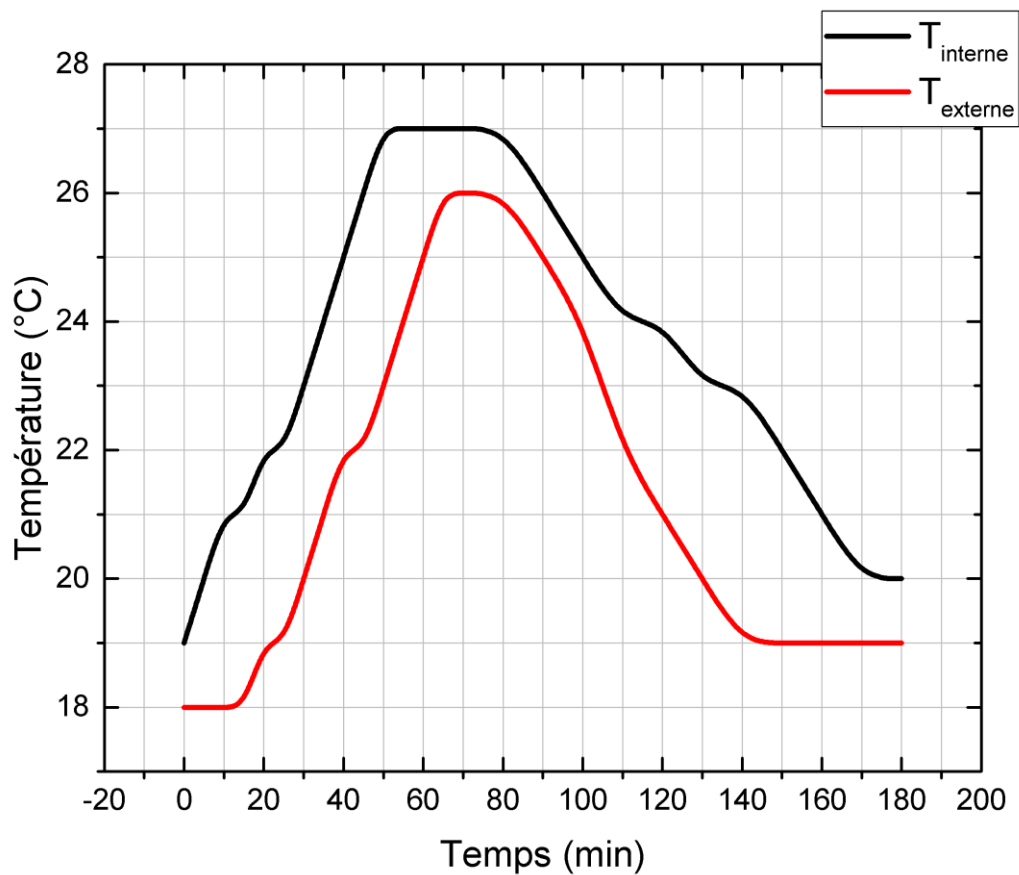


Fig.(4.7) : Variation de la température interne et externe avec la variation du temps pour le cube en verre

Cette figure représente la variation de la température des deux faces interne et externe avec le temps, on remarque qu'on allumant la résistance à l'intérieur du cube, une augmentation de la

température sur la face interne est progressive et graduelle, suivie par une augmentation de température dissipée de la face externe, cette augmentation est dû à un flux de chaleur entraîné par une variation de température jusqu'à une saturation. Avec l'absence de la source de chaleur le cube se retrouve à sa température initiale progressivement.

III.3.3 Détermination de la conductivité du verre

La figure ci-dessous représente la variation de la conductivité avec la différence de température interne et externe, pour déterminer la valeur de la conductivité thermique il faut avoir un état de saturation de la température et l'équilibre du flux entrant et sortant. On peut expliquer ceci par la variation minimale de température entre deux parois, on peut conclure que la conductivité thermique déterminée du graphe égale à une valeur de $\lambda=1.05 \text{ W.m}^{-1}.\text{C}^{-1}$, cette valeur elle est proche de celle de la littérature qui est égale à $\lambda=1 \text{ W.m}^{-1}.\text{C}^{-1}$

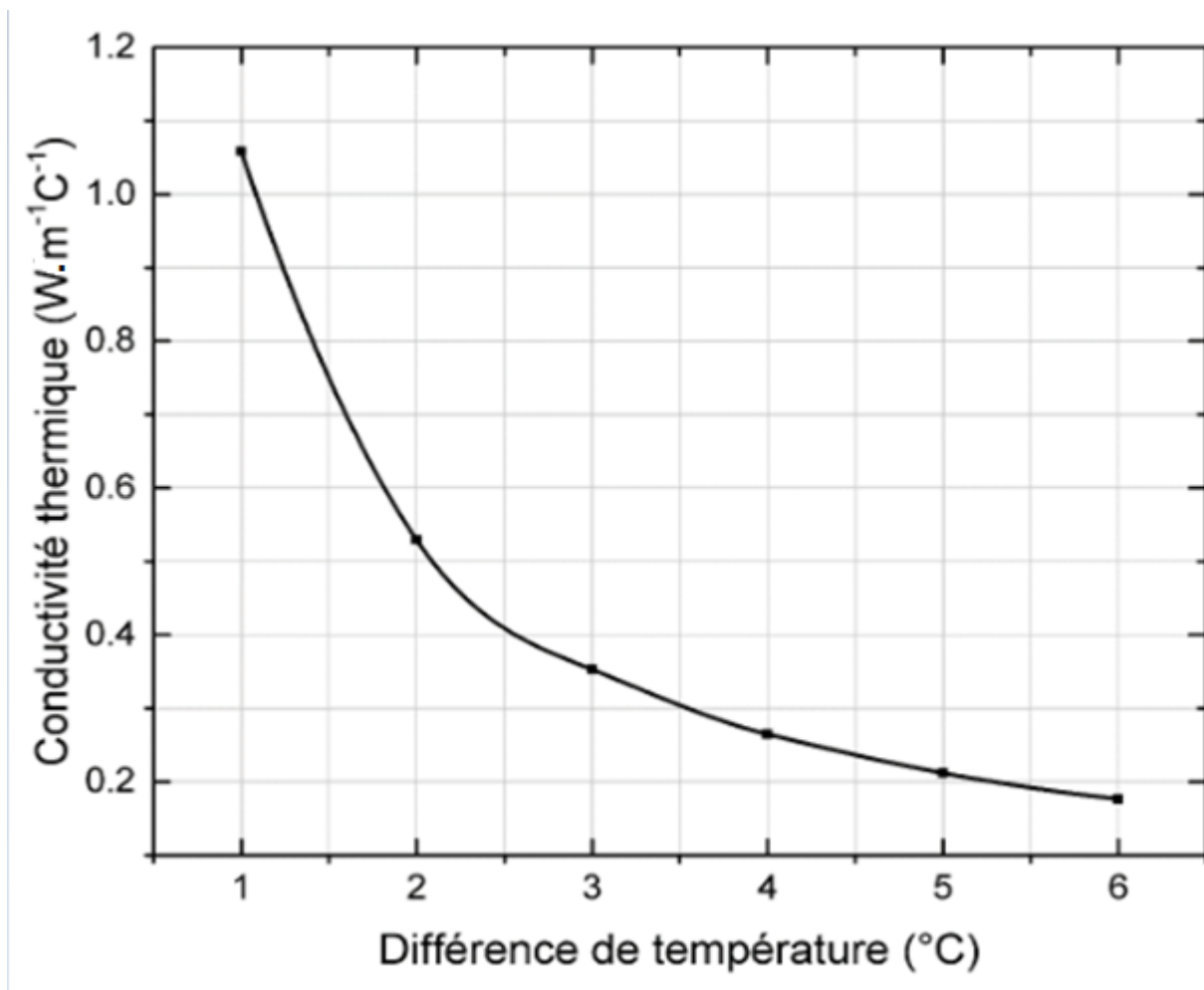


Fig.(4.8) : Variation de la conductivité thermique avec la différence de température

III.4 Double vitrage sans la présence de l'air immobile :

III.4.1 Variation de température de la face interne et externe :

Dans cette partie on a ajouté un autre vitrage à toutes les faces du cube pour déterminer avec précision la conductivité thermique du verre, la figure ci-dessous montre le résultat expérimental de cette partie, on remarque une augmentation graduelle de température de la face interne avec la présence de la source de chaleur. Par ailleurs, on remarque une saturation à une température égale à 30°C pour la face avant, et une diminution à l'absence de source de chaleur.

Par contre la face arrière montre une augmentation progressive très lente due à l'augmentation de la résistance du verre en augmentant l'épaisseur.

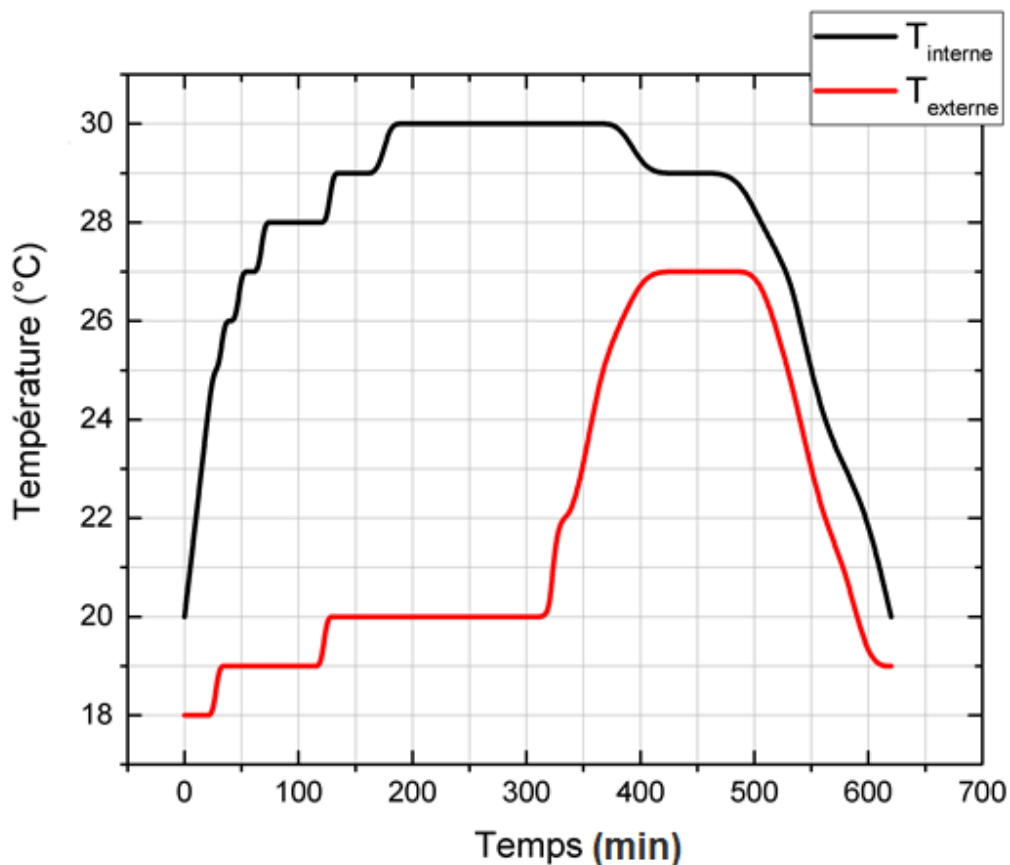


Fig.(4.9) : Variation de la température interne et externe avec la variation du temps pour le cube à double vitrage

III.4.2 Détermination de la conductivité thermique :

On remarque dans la courbe ci-dessous, une variation de la conductivité thermique en fonction de la variation de la température, on peut constater que cette dernière est plus grande pour un cube à simple vitrage, ceci s'explique par le fait d'avoir un cumul de chaleur à l'intérieur du cube, et à l'absence d'une rapide variation avec le milieu extérieur, avec l'augmentation de la résistance thermique du verre contre cette valeur de chaleur dissipée.

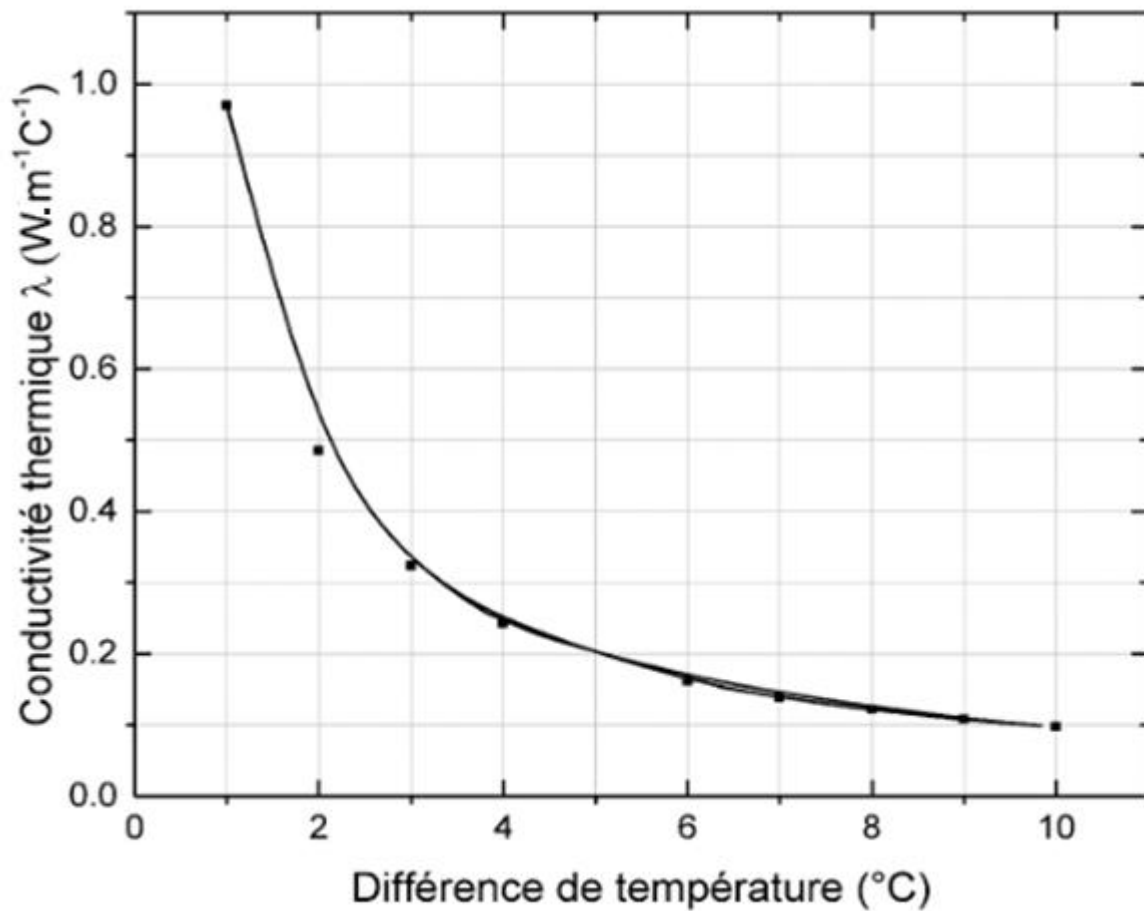


Fig.(4.10) : Variation de la conductivité thermique avec la différence de température à double vitrage

III.5 L'ajout d'une feuille de PDLC adhésive :

III.5.1 Variation de température de la face interne et externe :

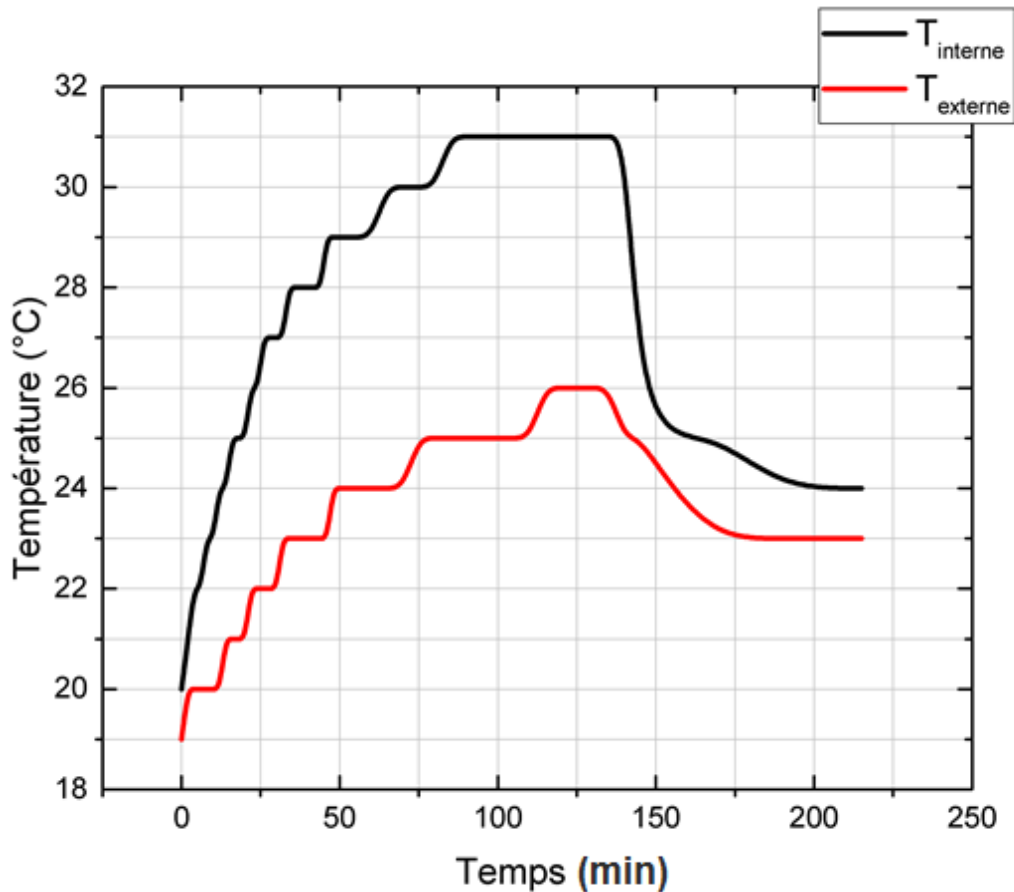


Fig.(4.11) : Variation de la température interne et externe avec la variation du temps avec une couche de PDLC

La figure ci-dessus montre la variation de la température avec le temps. On remarque qu'avec la présence d'une couche de PDLC opaque, la température à l'intérieur du cube a augmenté graduellement jusqu'à une valeur égale à 31°C dans un temps égale à 75 min contrairement au cas de double vitrage, la valeur maximale de la température mesurer est de 30°C pour un temps de 110 min, on peut remarquer aussi que la chaleur dissipée de la face externe du cube est minimale avec la présence de PDLC. On peut alors conclure qu'une petite couche de PDLC avec une épaisseur égale à 1mm est meilleure par rapport à une couche de verre égale à 5mm.

III.5.2 La conductivité thermique du PDLC à l'état opaque

On remarque dans cette figure (Fig. (4.7)) que la valeur de la conductivité thermique du PDLC à l'état opaque égale à une valeur proche de $0.6 \text{ W.m}^{-1}\text{C}^{-1}$, cette valeur nous montre que la résistance thermique du PDLC est plus importante qu'une deuxième couche de verre.

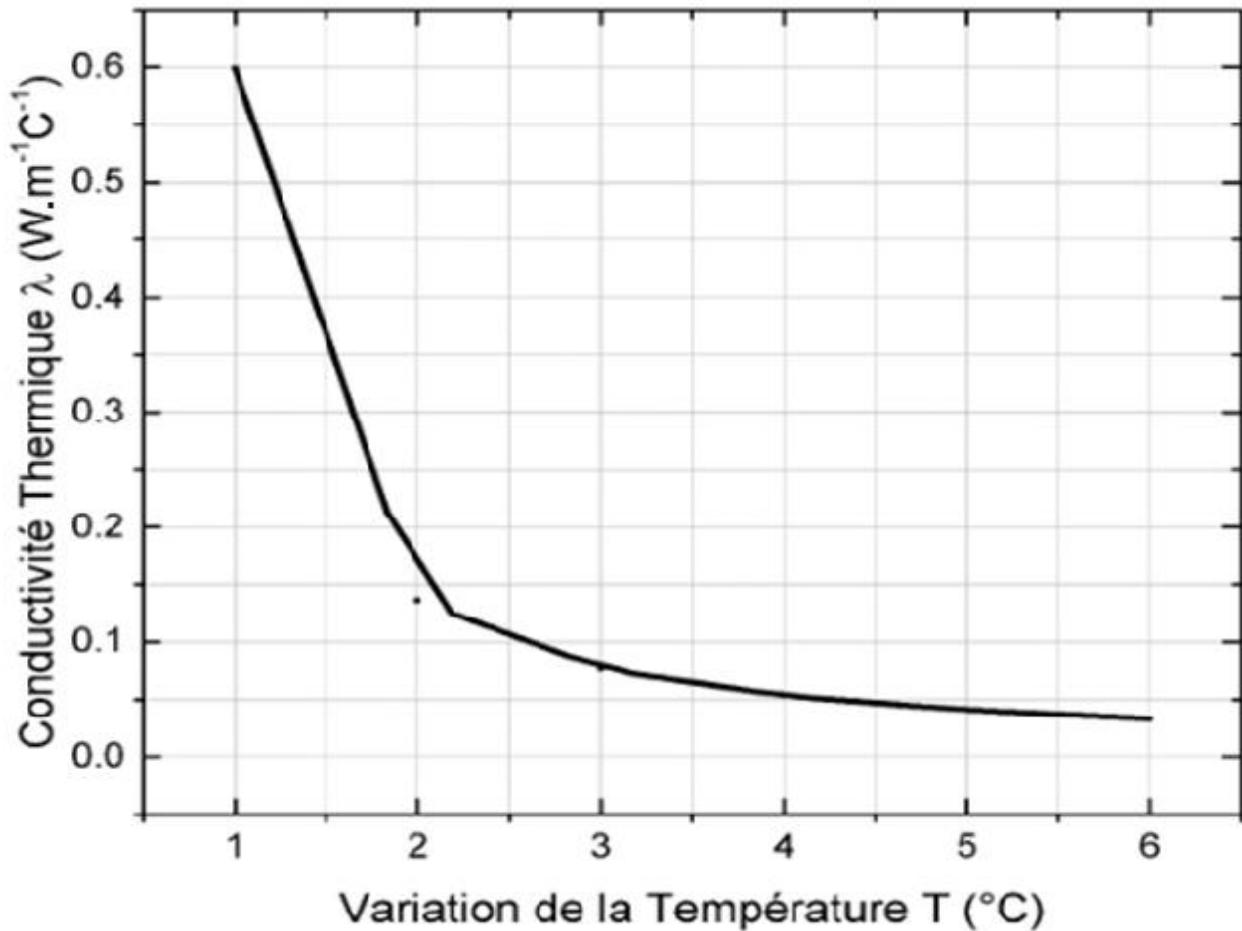


Fig.(4.12) : Variation de la conductivité thermique avec la différence de température pour une couche de PDLC opaque

III.5.3 La conductivité thermique du PDLC à l'état transparente

En allumant une tension aux bornes du PDLC, les cristaux liquide formant ce PDLC vont prendre une seule direction, le PDLC est donc transparent.

Dans la figure ci-dessous on a tracé la courbe de la variation de température avec la présence d'un PDLC transparent et on a déterminé la conductivité thermique de ce dernier, on remarque que λ a

augmenté par rapport au cas précédant et l'effet d'isolation thermique du PDLC opaque à disparus, dans ce cas la résistance thermique du PDLC a diminué et une grande quantité de chaleur a été dissipé.

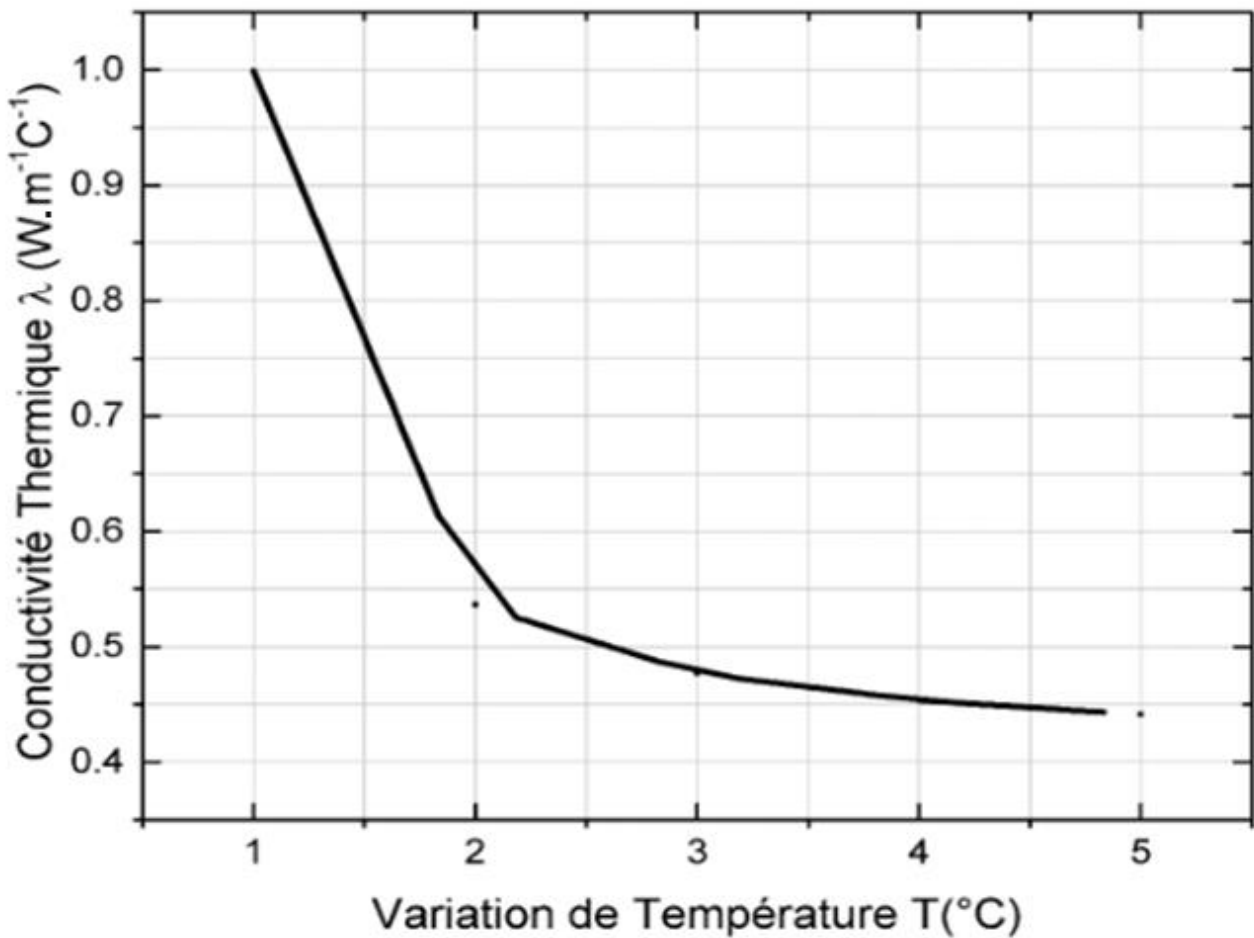


Fig.(4.13) : Variation de la conductivité thermique avec la différence de température pour une couche de PDLC transparent

III.5.4 Détermination de la conductivité thermique du PDLC pour différent voltage

On remarque dans la figure (4.14) que la tension au borne du PDLC varie avec la conductivité thermique de ce dernier, et le PDLC peut être un isolant à des basses tension et un conducteur thermique à des hautes tensions. On peut dire qu' à partir de 50V la tension est critique, ainsi la variation de la conductivité thermique est quasiment nulle.

ΔT	0V	20V	30V	50V	60V	70V
	λ (w.m ⁻¹ .C ⁻¹)	λ (w.m ⁻¹ .C ⁻¹)	λ (w.m ⁻¹ .C ⁻¹)	λ (w.m ⁻¹ .C ⁻¹)	λ (w.m ⁻¹ .C ⁻¹)	λ (w.m ⁻¹ .C ⁻¹)
1	0.5988024	0.7088024	0.8388024	0.9588024	0.9598024	0.9607024

Tab.(4.1) : tableau des valeurs des conductivités à l'état permanent

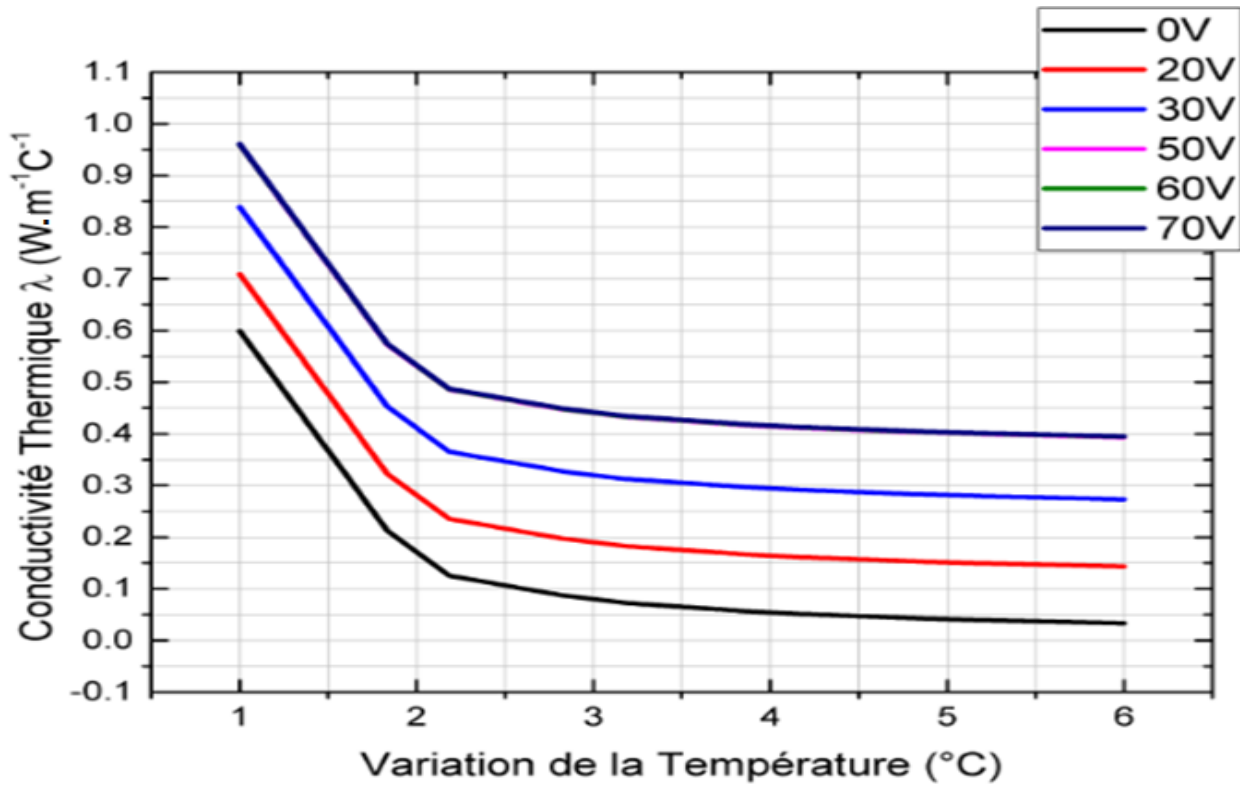


Fig.(4.14) : Variation de la conductivité thermique avec la différence de température pour des tension variables au borne du PDLC.

III.6 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons tout d'abord effectué une étude de référence, en étudiant la quantité de chaleur dissipée par le verre des fenêtres, pour un simple vitrage, puis pour un double vitrage. Ensuite, on a ajouté une feuille de PDLC adhésive dans la face avant et la face arrière du vitrage, ainsi on a pu conclure qu'une petite couche de PDLC avec une épaisseur de 1mm est meilleure par rapport à une couche de verre égale à 5mm. De plus, que la résistance thermique du PDLC est plus importante qu'une deuxième couche de verre.

Après cela, on a appliqué une tension aux bornes du PDLC, à ce moment-là, l'effet d'isolation thermique du PDLC opaque disparaît. Donc on a pu en déduire que le PDLC peut être un isolant à des basses tensions et un conducteur thermique à des hautes tensions.

Conclusion Générale

Au terme de ce modeste travail on peut dire que notre contribution a été axée sur plusieurs aspects.

Tout d'abord nous avons passé aux notions assez générales sur les modes de transfert de chaleur, en rappelant les principes fondamentaux de la loi de fourrier dans la partie de conduction.

Aussi d'autres phénomènes de transfert de chaleur ont été cités tel que les lois de convections et rayonnement, tels que les murs et les portes les toitures et les fenêtres, Cependant cette étude a été focalisée sur la minimisation des pertes thermique par les vitres précisément.

Dans la deuxième partie du mémoire, nous avons étudié les différents types de vitre utilisés à ce jour, on a ciblé les moyens technologiques utilisés pour optimiser ces pertes et augmenter le gain énergétique,

Ce sont les couches des cristaux liquides PDLC, qui ont été choisies pour résoudre cette problématique, Cependant une étude scientifique théorique et expérimentale concrète a été mise en place, les résultats obtenus montrent l'intérêt crucial de l'utilisation de ces films PDLC

Par ailleurs, nous avons établi trois parties de mesures de la conductivité thermique dans ce dernier chapitre, ces paramètres obtenus définis exactement et avec une exactitude les valeurs théoriques tel que la valeur de la conductivité égale à 1 W/m. K ,

Par ailleurs, un film de PDLC a été ajouté afin de mesurer sa valeur de conductivité thermique, l'expérience montre, qu'une couche de film PDLC de 1mm peut remplacer deux couches de verre de 4mm chacune, on remarque que la conductivité thermique du PDLC est très faible par rapport au verre, d'où l'intérêt de notre étude.

Une excitation est importante pour ce genre de molécule notre expérience montre que la conductivité thermique varie rapidement avec des tensions moins que 50V, pour laquelle le comportement du film PDLC ne change pas.

Résumé :

Dans ce présent travail, nous nous sommes intéressés à l'étude thermique d'une vitre en film composite de type PDLC, pour cela, nous nous sommes orientés en premier lieu vers la détermination de ses caractéristiques en se basant sur la variation de la température dans les deux faces internes et externes d'un cube, et ce par la présence d'une source de chaleur. Les résultats obtenus montrent une amélioration importante, ainsi qu'une minimisation des pertes de chaleur avec l'ajout d'une plaque PDLC opaque au près des vitres, au lieu de doubler l'épaisseur des vitres utilisés, nous déduisons donc l'intérêt cruciale de ces matériaux innovants.

Mots clés : transfert de chaleur, déperditions thermiques, vitrages, polymère, PDLC.

Abstract:

In this present work, we were interested in the thermal study of a composite film glass type PDLC, for that, we were oriented primarily determining its characteristics based on the variation of temperature in both internal and external faces of a single cube, and this by the presence of a heat source. The results show a significant improvement and a minimization heat loss with the addition of an opaque plate PDLC close to the windows, instead of doubling the thickness in most cases; we therefore deduced the crucial importance of these innovative materials.

Keywords: heat transfer, heat loss, glass, polymer, PDLC.

الملخص

في هذا العمل، نحن نهتم بالدراسة الحرارية لزجاج من فيلم مركب من نوع (ب،د،ل،س)، لهذا كان تركيزنا منصبا نحو تحديد خصائصها على اساس تغيير درجة الحرارة في الوجهين الداخليين والخارجيين للمكعب وذلك من خلال اظهرت النتائج المحصل عليها تحسنا كبيرا، وايضا التقليل من فقدان الحرارة بإضافة لوحة .وجود مصدر حراري معتمة قريبة من النوافذ، بدلا من مضاعفة السمك في معظم الحالات. ولهذا نستنتج الالهية الحاسمة لهذه المواد المبتكرة.

الكلمات المفتاحية: نقل الحرارة - فقدان الحرارة - الزجاج - (ب،د،ل،س)،