

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE CONSTANTINE 3



FACULTE DES SCIENCES DE LA TERRE DE GEOGRAPHIE
ET DE L'AMENAGEMENT DU TERRITOIRE
DEPARTEMENT D'ARCHITECTURE ET D'URBANISME

N° d'ordre :
Série :

Mémoire de Master 2

Filière : Architecture

Spécialité : AET

**INTEGRATION ARCHITECTURALE DES SYSTEMES DE
CAPTEURS PHOTOVOLTAÏQUES ET SOLAIRES THERMIQUES
DANS LES BATIMENTS**

Dirigé par :

Mr. Abdel Wahab GRINI [*Docteur*]

Présenté par :

Mr. Smaïne MOKHTARI

Membres de jury :

Mr. Oussama SEBTI

President

DAU - U. Constantine 3

Mme. Badia BELABED

Examineur

DAU - U. Constantine 3

Année Universitaire 2019/2020.
Session : Octobre 2020

RESUME :

À l'heure où le monde soulève des questions relatives au changement climatique, qui est essentiellement dû à l'utilisation de combustibles fossiles, l'utilisation de **l'énergie solaire** sous diverses formes est pertinente. Les bâtiments existants sont responsables de l'utilisation d'une grande quantité d'énergie pour l'éclairage, le chauffage, le refroidissement et l'utilisation de divers équipements fonctionnant à l'énergie, principalement alimentés par des énergies fossiles. L'intérêt actuel devrait se porter sur comment remplacer ce combustible fossile par l'énergie solaire qui est gratuite et disponible en abondance.

A l'heure actuelle, les **technologies solaires** sous forme de **photovoltaïques [PV]** et de **capteurs solaires thermiques [CST]** sont disponibles à des prix compétitifs. Cependant, leur utilisation n'a pas été à la hauteur des attentes, notamment dans le secteur du bâtiment, pour remplacer l'utilisation des combustibles fossiles. La raison principale pour laquelle ces technologies ne sont pas populaires dans l'intégration des bâtiments est le manque de bonne qualité architecturale, qui ne répond pas aux considérations de conception souhaitées. Des approches innovantes doivent être explorées en termes de conception et de mise en œuvre afin d'adapter les composants technologiques modernes à l'échelle, aux proportions, aux matériaux, aux couleurs et à l'équilibre des bâtiments. Ainsi, l'objectif de ce mémoire est de paver les voies possibles d'intégration de ces technologies dans les bâtiments, tant sur les constructions existantes que sur les nouvelles constructions afin de mettre en exergue l'expression architecturale globale en plus de la production d'énergie. L'intention ici est de mettre en évidence les possibilités de conception concernant l'utilisation des **technologies solaires** dans les bâtiments avec des approches innovantes. L'accent est essentiellement mis sur **l'aspect ou l'esthétique de l'intégration**, car c'est ce qui a le plus d'impact sur les gens. Les CPV et les CST peuvent être délibérément utilisés comme éléments de conception architecturale de manière distinctive.

L'évolution vers la maison passive, les bâtiments à énergie nulle et à émissions nulles entraînera une utilisation plus fréquente des systèmes d'**énergie solaire** intégrés aux bâtiments comme source d'**énergie renouvelable**. En raison des limitations de l'intégrabilité de ces systèmes par rapport à la conception, à la couleur et à l'échelle de l'enveloppe du bâtiment, leur intégration peut ruiner la qualité architecturale finale du bâtiment. De nombreux systèmes solaires existent sur le marché, et avec un rendement énergétique de plus en plus élevé. Mais, s'ils ne sont pas conçus pour être intégrés dans les bâtiments afin d'améliorer la qualité de

l'architecture, il est probable que personne n'optera pour l'utilisation de ces systèmes comme source de production d'énergie renouvelable. Dans ce cas, même s'il y aura de plus en plus de systèmes PV ou CST efficaces sur le marché, ils ne seront pas utiles si l'on ne cherche pas à les intégrer de façon esthétique. Il semble que l'intégration du PV ait apporté quelques améliorations à la qualité architecturale de l'intégration aux bâtiments, mais les CST manquent sur cette partie dans une certaine mesure.

Bien que le développement technique et les améliorations de la performance énergétique soient toujours en cours, l'utilisation réelle de ces systèmes dans les bâtiments n'augmente pas comme elle pourrait et devrait le faire. Les bâtiments existants représentent plus de 40 % de l'utilisation totale d'énergie primaire dans le monde et 24 % des émissions de gaz à effet de serre (Wall, 2009). Il est donc essentiel de combiner l'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments et l'utilisation d'une plus grande proportion **d'énergie renouvelable** pour réduire la consommation d'énergie non renouvelable et les émissions de gaz à effet de serre. Dans ce sens, l'intégration des systèmes de CPV et CST dans les bâtiments devient cruciale.

L'intégration de ces systèmes de CPV et CST dans les bâtiments ne sert pas seulement à produire de l'énergie propre, mais aussi à les utiliser comme éléments multifonctionnels lorsqu'ils remplacent les éléments de construction conventionnels. Ainsi, la viabilité économique de l'intégration est assurée et surtout, ils deviennent des éléments architecturaux.

En somme, nous tacherons dans notre recherche d'explorer et d'analyser les possibilités d'intégrations architecturale des systèmes de CPV et CST tout en se focalisant sur le côté esthétique, de plus nous procéderons à la comparaison de l'intégrabilité afin de démontrer les avantages d'intégration des deux systèmes.

Mots Clés :

Energie solaire, technologies solaires, capteurs photovoltaïques [CPV], capteurs solaires thermiques [CST], aspect ou esthétique de l'intégration, énergie renouvelable, intégration architecturale.

المخلص :

في الوقت الذي تثار فيه قضايا منوطة بتغير المناخ ، والذي يعدّ الوقود الأحفوري سببه الرئيسي ، يعتبر استخدام الطاقة الشمسية بأشكال مختلفة أمرا غاية في الأهمية. حيث يستعمل في المباني الحالية كمية كبيرة من الطاقة من أجل الإضاءة والتدفئة والتبريد واستخدام مختلف المعدات التي تعمل بالطاقة ، والتي تعمل أساسًا بالوقود الأحفوري. لذا فالأجدر أن ينصب الاهتمام الحالي على كيفية استبدال هذا الوقود الأحفوري بالطاقة الشمسية لأنها مجانية ومتوفرة بكثرة.

تعرف تقنيات الطاقة الشمسية على شكل الخلايا الكهروضوئية [CPV] والمجمعات الحرارية الشمسية [CST] وفرة حاليا و بأسعار تنافسية. ومع ذلك ، فإن استخدامها لم يرق إلى مستوى التوقعات ، خاصة في قطاع البناء ، لتحل محل الوقود الأحفوري. السبب الرئيس لعدم شيوع هذه التقنيات في بناء التكامل هو الافتقار إلى الجودة المعمارية الجيدة، والتي لا تلبى شروط التصميم المطلوبة. يجب استكشاف الأساليب المبتكرة من حيث التصميم والتنفيذ من أجل تكييف المكونات التكنولوجية الحديثة مع الحجم والنسب والمواد والألوان وتوازن المباني.

وبالتالي، فإنّ الهدف من هذه الرسالة هو تمهيد الطرق الممكنة لإدراج هذه التقنيات في المباني، سواء في المنشآت القائمة أو في المنشآت الجديدة من أجل إبراز التعبير المعماري العام بالإضافة إلى إنتاج الطاقة. الهدف هنا هو تسليط الضوء على إمكانيات التصميم فيما يتعلق باستخدام تقنيات الطاقة الشمسية في المباني ذات الأساليب المبتكرة. ينصب التركيز الأساسي على شكل أو جماليات الإدماج ، لأن هذا هو أكثر ما يؤثر على الناس. يمكن استخدام أنظمة CPV و CST بشكل متعمد كعناصر تصميم معماري بطرق مميزة.

سيؤدي التحرك نحو المنازل السلبية ، والمباني الخالية من الطاقة والانبعاثات الصّفرية إلى زيادة استخدام أنظمة الطاقة الشمسية المدمجة في المباني كمصدر للطاقة المتجددة. نظرًا للقيود المفروضة على تكامل هذه الأنظمة فيما يتعلق بتصميم ولون وحجم غلاف المبنى ، فإن تكاملها يمكن أن يفسد الجودة المعمارية النهائية للمبنى. توجد العديد من أنظمة الطاقة الشمسية في السوق ، مع زيادة إنتاجية الطاقة بشكل متزايد. ولكن، إذا لم يتم تصميمها بحيث يتم دمجها في المباني لتحسين جودة الهندسة المعمارية ، فمن المحتمل ألا يختار أحد استخدام هذه الأنظمة كمصدر لإنتاج الطاقة المتجددة. في هذه الحالة ، حتى لو كان هناك المزيد والمزيد من الأنظمة الكهروضوئية أو أنظمة CST الفعالة في السوق ، فلن تكون مفيدة إذا لم يسعى المرء إلى دمجها بطريقة جمالية. يبدو أن دمج الكهروضوئية قد أدى إلى بعض التحسينات على الجودة المعمارية للاندماج في المباني ، لكن CST تفتقر إلى هذا الجزء إلى حد معين.

على الرغم من أن التطور التقني والتحسينات في أداء الطاقة لا تزال مستمرة ، فإنّ الاستخدام الفعلي لهذه الأنظمة في المباني لا يتزايد كما يمكن له أن يكون ولا كما ينبغي. تمثل المباني الحالية أكثر من 40٪ من إجمالي استخدام الطاقة الأولية في جميع أنحاء العالم و 24٪ من انبعاثات غازات الاحتباس الحراري (Wall, 2009). لذلك من الضروري الجمع بين تحسين كفاءة استخدام الطاقة في المباني واستخدام نسبة أكبر من الطاقة المتجددة لتقليل استهلاك الطاقة

غير المتجددة وانبعاثات غازات الاحتباس الحراري. بهذا المعنى ، يصبح إدماج الأنظمة الكهروضوئية وأنظمة CST في المباني أمرًا بالغ الأهمية.

لا يتيح إدماج أنظمة CPV و CST في المباني توليد طاقة نظيفة فحسب، بل يتيح أيضًا استعمال عناصر متعددة الوظائف باستبدال عناصر البناء التقليدية. ولهذا، فإن إدماج هذه التقنيات له جدوى اقتصادية مضمونة كما تصبح علاوة على ذلك عناصر معمارية.

باختصار ، سنحاول في بحثنا استكشاف إمكانيات إدماج أنظمة CPV و CST في المجال المعماري وتحليلها مع التركيز على الجانب الجمالي ، علاوة على ذلك سنعتمد على مقارنة التكامل من أجل توضيح مزايا إدماج النظامين.

الكلمات المفتاحية :

الطاقة الشمسية ، تقنيات الطاقة الشمسية ، المجمعات الكهروضوئية [CPV] ، المجمعات الحرارية الشمسية [CST] ، جوانب أو جماليات التكامل ، الطاقة المتجددة ، التكامل المعماري.

TABLE DES MATIERES

DEDICACE & REMERCIEMENTS

RESUME.....	III
RESUME [ARABE].....	V
TABLE DES MATIÈRES.....	VII
LISTE DES FIGURES.....	X

CHAPITRE I : Chapitre Introductif

I.1.Introduction	1
I.1.1. Besoin d'énergie renouvelable.....	1
I.1.2. L'énergie solaire.....	3
I.1.3. Les technologies solaires dans le bâtiment.....	3
I.1.4. Question de recherche.....	4
I.1.5. Portée de la recherche.....	5
I.2.Litterature	6
I.2.1. Capteurs Photovoltaïque [CPV].....	6
I.2.1.1. Les cellules photovoltaïques.....	6
I.2.1.2. Modules photovoltaïques.....	11
I.2.2. Capteurs solaires thermiques [CST].....	12
I.2.2.1. Systèmes de collecte à base d'air.....	12
I.2.2.2. Systèmes de collecte à base d'eau.....	13
I.2.3. Intégration du CPV et du CST.....	17

CHAPITRE II : Intégration Architecturale et Intégration aux Bâtiments

II.1. Construire l'intégration.....	19
II.2. Différence entre l'intégration architecturale et l'intégration aux bâtiments.....	21
II.3. L'intégration architecturale favorise-t-elle vraiment l'esthétique d'un bâtiment?..	22
II.4. Quels sont les défis entre l'intégration dans un bâtiment existant et dans un nouveau bâtiment ?.....	23
II.5. Une bonne intégration.....	24
II.6. Intégration des CPV et CST dans les bâtiments.....	24
II.7. Méthode d'intégration.....	25
II.7.1. Superposé.....	25

II.7.2. Intégré.....	25
----------------------	----

CHAPITRE III : Intégration des Capteurs Photovoltaïques

III.1. Intégration du photovoltaïque sur le toit.....	26
III.1.1. PV sur toit plat.....	29
III.1.2. PV sur toit incliné/en pente.....	29
III.1.3. Toit avec tuiles photovoltaïques intégrées.....	31
III.1.4. PV dans le toit en dents de scie de la lumière du nord / lumière du ciel.....	32
III.1.5. PV sur toit/mur courbé.....	33
III.1.6. PV dans l'atrium/les lucarnes.....	34
III.2. Intégration du PV en façade.....	35
III.2.1. Intégration verticale du PV.....	37

CHAPITRE IV : Intégration des Capteurs Solaires Thermiques

IV.1. Intégration des systèmes CST sur les toits.....	42
IV.1.1. Intégration sur toit plat.....	43
IV.1.2. Intégration sur toit en pente.....	44
IV.2. Intégration des systèmes CST en façade.....	45
IV.2.1. Intégration directe en façade.....	46
IV.2.2. Capteurs solaires thermiques comme balustrades de balcon.....	49

CHAPITRE V : Qualité et Exigences de l'intégration

V.1. Qualité de l'intégration architecturale.....	50
V.1.1. Aspect fonctionnel de l'intégration architecturale.....	50
V.1.2. Aspect constructif de l'intégration architecturale.....	52
V.1.3. Aspect formel (esthétique).....	54
V.2. Exigences en matière d'intégration architecturale.....	57
V.2.1. Taille et position du champ.....	57
V.2.2. Matériaux et texture de la surface.....	60
V.2.3. Couleur.....	61
V.2.4. Forme et dimension des modules.....	62
V.2.5. Type d'assemblage.....	62
V.2.6. Éléments multifonctionnels.....	63

CHAPITRE VI : Analyse et Evaluation

VI.1. CPV ou CST : une meilleure capacité d'intégration architecturale ?.....	64
VI.1.1. Forme et dimensions.....	65
VI.1.2. Positionnement.....	66
VI.1.3. Flexibilité dans l'intégration.....	67
VI.1.4. Gamme de couleurs.....	68
VI.1.5. Texture et finition de la surface.....	71
VI.1.6. Assemblage visible des modules.....	72
VI.1.7. Multifonctionnalité.....	73
VI.1.8. Transport de l'énergie.....	75
VI.1.9. Stockage.....	76
VI.1.10. Effet de l'ombrage.....	76
VI.1.11. Efficacité par unité de surface.....	77
VI.1.12. Durée de vie utile.....	78
VI.1.13. Température.....	78
VI.2. Evaluation de l'intégration architecturale des projets sélectionnés.....	80
VI.2.1. Photovoltaïque : cellules monocristallines.....	80
VI.2.2. Photovoltaïque : cellules polycristallines.....	82
VI.2.3. Photovoltaïque : cellules à couche mince.....	84
VI.2.4. Collecteur solaire thermique : Plaque plane vitrée.....	86
VI.2.5. Capteurs solaires thermiques : Tubes à vide.....	88
VI.2.6. Capteurs solaires thermiques : Capteurs non vitrés.....	90
CONCLUSION.....	92
REFERENCES.....	94

LISTE DES FIGURES

PREMIERE PARTIE : Partie Théorique

CHAPITRE I :

FIG I.1 : Consommation mondiale d'énergie par combustible jusqu'à 2018, sur la base de l'étude statistique de BP sur l'énergie mondiale de 2019.....	1
FIG I.2 : L'abondance de la disponibilité de l'énergie solaire.....	2
FIG I.3 : Types de cellules photovoltaïques.....	8
FIG I.4 : Échangeur de transport de Vauxhall.....	9
FIG I.5 : Le bureau solaire - The Solar Office, Sunderland, Royaume-Uni.....	10
FIG I.6 : Principe de la cellule photovoltaïque.....	10
FIG I.7 : Système de collecteur à base d'air.....	13
FIG I.8 : Collecteurs à tubes thermiques évacués sur le toit de la maison.....	14
FIG I.9 : [Gauche] Parties d'un capteur solaire thermique plat, [Droite] Collecteurs sur le toit.....	15
FIG I.10 : Capteurs plans non vitrés intégrés à la façade, (en haut à droite, en bas) Capteurs plans non vitrés intégrés au toit.....	16
FIG I.11 : Collecteurs en plastiques non vitrés.....	17

CHAPITRE II :

FIG II.1 : Utilisation élégante de capteurs solaires thermiques sur le toit incurvé de la "Solar City".....	20
FIG II.2 : (Gauche) Bâtiment de bureaux à la NTNU avant l'intégration PV, (Droite) Même bâtiment après l'intégration PV sur la façade en verre.....	22

DEUXIEME PARTIE : Partie Pratique

CHAPITRE III :

FIG III.1: Toit à double vitrage intégré au système photovoltaïque du Café Ambient, Allemagne.....	27
FIG III.2 : PV combiné à une façade de système thermique du centre de recherche Fiat.....	28
FIG III.3: (Gauche) Modules PV ajoutés sur le toit en tant qu'élément technique pur, (Droite) Modules PV semi-intégrés sur le toit.....	30

FIG III.4: (Gauche) PV intégré sur le toit incliné de la maison de vacances Bartholomä-Park en Allemagne (Droite) Toits PV intégrés dans le quartier solaire de Schlierberg à Fribourg.....	31
FIG III.5: Tuiles photovoltaïques intégrées sur le toit.....	32
FIG III.6: (Gauche) PV intégré sur le toit en verre en dents de scie de la Paul Lobe Haus, Berlin (Droite) Toit en dents de scie avec intégration PV, magasin de bricolage, Hambourg.....	32
FIG III.7: Intégration photovoltaïque sur le toit incurvé de la vitrine solaire de BP à Birmingham.....	33
FIG III.8: (Gauche) Atrium avec modules PV, Ludesch/Vlbg, Autriche ; (Droite) PV sur puits de lumière colorés au marché Bejar, Salamnca, Espagne.....	35
FIG III.9: PV intégré dans les parties opaques de la façade du bâtiment Solar XXI, Portugal.....	36
FIG III.10: Le bâtiment de production Tobias Grau en Allemagne est équipé d'un système photovoltaïque intégré à la façade sud vitrée.....	37
FIG III.11: Façade PV en dents de scie composée d'écrans d'ombrage PV en surplomb.....	37
FIG III.12: Façade vitrée inclinée à intégration photovoltaïque du lycée professionnel du Tyrol, en Autriche.....	38
FIG III.13: Façade inclinée photovoltaïque intégrée d'un bâtiment de la Solar-Fabrik, Fribourg, Allemagne.....	39
FIG III.14: Mur incliné intégré au système photovoltaïque du bureau solaire de Daxford...	39
FIG III.15: PV utilisé comme ombrage au Centre de recherche sur l'énergie, Pays-Bas.....	41
FIG III.16: PV intégré dans les brise-soleil à lames en verre du bureau de la rédaction, Albstadt-Ebingen, Allemagne.....	41

CHAPITRE IV :

FIG IV.1 : Capteur solaire thermique posé sur le toit plat d'un logement de vacances à Jois, en Autriche.....	44
FIG IV.2 : Intégration d'une CST sur le toit incliné d'une maison unifamiliale.....	44
FIG IV.3 : Systèmes CST intégrés dans une maison multifamiliale de Hambourg Bramfeld, Allemagne.....	45
FIG IV.4 : Systèmes CST intégrés sur la façade de l'immeuble de bureaux d'AKS DOMA Solartedhnik.....	47
FIG IV.5 : Intégration en façade d'un collecteur plat non vitré, CeRN, Suisse.....	48
FIG IV.6 : Utilisation de collecteurs à tubes sous vide comme garde-corps de balcon, logement multifamilial Sunny Woods à Zurich, Suisse.....	49

CHAPITRE V :

- FIG V.1 :** (Gauche) Intégration du PV comme contrôle de l'ombrage et de la lumière du jour ; (Droite) Capteur à tube sous vide utilisé comme balustrade de balcon.....52
- FIG V.2 :** Cavité de ventilation derrière les modules PV dans le bâtiment BP Solar skin, NTNU, Trondheim.....54
- FIG V.3 :** Intégration de la PV, en considérant l'aspect formel. (Gauche) Cabane du Mont Rose, (Droite) Bâtiment Novartis, Suisse.....55
- FIG V.4 :** Intégration de la PV comme élément de spectacle, Collège des Beaux-Arts, Hambourg Allemagne.....56
- FIG V.5 :** Intégration architecturale du photovoltaïque sur le toit d'une église, Carlow, Allemagne.....59
- FIG V.6 :** Intégration architecturale des systèmes CST sur la façade inclinée d'une habitation multifamiliale, Gleisdorf, Allemagne.....59
- FIG V.7 :** Illustrations de quelques variations possibles de la texture de la surface du PV....60
- FIG V.8 :** (Gauche) Gamme de couleurs du PV ; (Droite) couleurs visibles en raison de la lumière du soleil frappant le verre extra blanc au-dessus de l'absorbeur du système CST.....62
- FIG V.9 :** (en haut à gauche) : Intégration des bardeaux PV sur la façade du Surplus-home de l'équipe d'Allemagne, (en bas à gauche) : Assemblage des bardeaux PV utilisés, (en haut à droite) : Intégration du système CST dans le logement multifamilial, Gleisdorf, Autriche, (en bas à droite) : Raccordement du système CST dans le logement multifamilial.....63

TROISIEME PARTIE : Partie Analyse

CHAPITRE VI :

- FIG VI.1 :** (à gauche) : Tuiles PV sur le toit, (à droite) : PV sur le toit du Delamont Country Park Ireland building, (au centre) : Systèmes CST Techtile Therma sur le toit.....66
- FIG VI.2 :** Gamme de couleurs des cellules photovoltaïques.....68
- FIG VI.3 :** (Gauche) : Des modules PV à base de cellules Metallic Gold sont intégrés dans le balcon, les rails et la façade, Tirol, Autriche
(En bas à droite) : Une partie du CST sur le Pavillon de la Chine pendant l'Exposition universelle 2010 à Shanghai, en Chine.
(En haut à droite) : Modules de toit photovoltaïques fabriqués à partir de tuiles de couleur rouge sur cette résidence du sud de la France.....69
- FIG VI.4 :** Système PV multi cristallin avec des cellules solaires au silicium de couleur bronze et or utilisé dans le projet de construction "home+" présenté par l'université des sciences appliquées de Stuttgart.....70

FIG VI.5 : Une des premières applications de l'utilisation multifonctionnelle des systèmes photovoltaïques dans le bâtiment administratif des Stadtwerke, Aix-la-Chapelle, Allemagne.....	74
FIG VI.6 : Utilisation multifonctionnelle des systèmes CST dans la façade du logement à Bjoernveien, Oslo.....	75
FIG VI.7 : Effet de l'ombrage sur les modules PV (à droite) et le résultat (à gauche).....	77
FIG VI.8 : Revêtement photovoltaïque monocristallin sur la façade en verre, bâtiment BP Solar, NTNU, Trondheim.....	81
FIG VI.9 : Intégration de cellules solaires polycristallines colorées, Paul Horn Arena, Tübingen Allemagne.....	83
FIG VI.10 : Intégration d'une couche mince de photovoltaïque sur le brise-soleil coulissant, maisons d'habitation Spinnereistraße, Autriche.....	85
FIG VI.11 : Intégration des collecteurs de plaques vitrées plates, Logement social, Paris France.....	87
FIG VI.12 : Intégration des collecteurs évacués comme garde-corps de balcon, Sunny Woods, Suisse.....	89
FIG VI.13 : Intégration en façade de capteurs plans non vitrés comme élément de revêtement multifonctionnel, (CeRN), Suisse.....	91