

# INTÉGRATION ARCHITECTURALE DU SOLAIRE EN FAÇADE

ENONCE // EPFL // 2015

EPFL 2015  
Énoncé théorique  
Section Architecture

*Professeur responsable de l'Énoncé théorique*  
Yves WEINAND

*Maître EPFL*  
Fred HATT

Adrian GRAMUNT & Fabio GUGGISBERG





# TABLE DES MATIÈRES

<b>1. Introduction</b>	<b>1</b>
Énergie et confort dans les bâtiments	8
Le rayonnement solaire	14
<b>2. Ingrédients</b>	<b>19</b>
Le solaire photovoltaïque	24
Le solaire thermique actif	32
Le solaire thermique passif	42
<b>3. Recettes</b>	<b>47</b>
Orientation des façades	54
Chaleur et électricité	58
Utilisations du solaire thermique actif et passif	60
Stratégies sur les parties opaques	64
Utilisations du solaire thermique vitré et non vitré	66
Types de murs	68
Mur solaire thermique	72
Utilisation et expression du solaire thermique non vitré	80
Utilisation et expression du solaire thermique vitré	82
Utilisation et expression du photovoltaïque	86
Rafraîchissement en été	90
<b>4. Conclusion</b>	<b>95</b>
<b>5. Bibliographie</b>	<b>101</b>



“Bien que  
des technologies  
éprouvées et fiables  
soient aujourd’hui  
largement disponibles  
à des prix compétitifs,  
le solaire thermique  
ne joue de loin pas  
le rôle qu’il mérite  
dans la réduction  
de la consommation  
d’énergies fossiles  
des bâtiments.”

- Maria Cristina Munari Probst, 2008



# *Introduction*

*1*

Aujourd'hui, notre consommation énergétique mondiale se base à plus de 80% sur des ressources non renouvelables<sup>1</sup>. L'exploitation de ces ressources, épuisables par définition, entraîne d'importantes émissions de gaz à effet de serre. Ainsi, la nécessité d'adopter une démarche de développement durable, en vue de ne pas compromettre la capacité des générations futures à répondre à leurs propres besoins, n'est plus à justifier.

Le secteur du bâtiment, responsable pour plus de 40% de la consommation énergétique européenne<sup>2</sup>, représente un potentiel d'économie non négligeable. Il est donc peu étonnant de constater une volonté croissante de réduire les besoins énergétiques des bâtiments et d'utiliser des énergies renouvelables, comme le montre par exemple la croissance exponentielle des bâtiments labellisés Minergie au cours des dix dernières années<sup>3</sup>.

Le soleil, source d'énergie propre et illimitée, «fournit à la Terre en une heure autant d'énergie que la civilisation humaine consomme chaque année<sup>4</sup>». Le rayonnement solaire est donc particulièrement propice à supplanter les ressources non renouvelables et a le potentiel de répondre à tous les besoins énergétiques du bâtiment.

Notre intérêt s'est donc porté sur cette nouvelle tendance de l'architecture pour le développement durable, et plus spécifiquement sur l'utilisation et l'intégration du solaire en architecture.

Nous portons cependant un regard critique face à la concrétisation actuelle de ces volontés écologiques. En effet,

---

1. REN21, *Renewables 2012 Global Status Report*. 2012. p 21.

2. EUROPEAN COMMISSION, *EU energy trends to 2030*. 2010. p 24.

3. MINERGIE®, *Statistiques 2011*. <http://www.minergie.ch>, 2012. p 2.

4. MORTON, Oliver, *Solar energy: A new day dawning? Silicon Valley sunrise*. Nature, 2006. p 443.

*“Le soleil  
fournit à la Terre  
en une heure  
autant d’énergie  
que la  
civilisation humaine  
consomme  
chaque année.”*

- Oliver Morton, 2006

ces intentions se résument généralement à une surenchère d'isolation, une utilisation d'un monobloc double-flux pour récupérer la chaleur sur l'air vicié ou encore à une simple pose de «panneaux solaires» sur les toits.

L'isolation joue un rôle crucial dans la diminution des besoins énergétiques des bâtiments. L'épaisseur mise en œuvre a fortement progressé au cours des quarante dernières années, améliorant considérablement le bilan des bâtiments construits<sup>5</sup>. Les épaisseurs standards actuelles ont atteint le stade de rendements décroissants. En effet, chaque centimètre supplémentaire d'isolation apporte un gain thermique de plus en plus faible, alors que l'énergie grise et le prix continuent à croître avec l'épaisseur. Ainsi, passé un certain point, le rendement financier de cette isolation supplémentaire devient négatif. Malgré cela, un des premiers réflexes «écologiques» continue d'être une augmentation sans limite de l'épaisseur d'isolation au delà du seuil de rentabilité, plutôt que d'investir dans la conception du bâtiment.

Les installations techniques sont nécessaires pour garantir un certain confort intérieur. Aujourd'hui, le choix se porte automatiquement sur ces dernières pour répondre à tous les besoins. L'utilisation excessive de la technique pour rattraper une conception non idéale finit par réduire le confort des utilisateurs, en rajoutant par exemple des nuisances sonores ou en empêchant l'ouverture des fenêtres, tout en engendrant des coûts et une complexité supplémentaires.

L'utilisation du solaire en architecture pour diminuer les besoins en énergies non renouvelables est associée à l'utilisation de panneaux photovoltaïques, communément appelés «panneaux solaires». Néanmoins, leur installation est souvent laissée par l'architecte à un autre corps de métier - installateur ou ingénieur - et à un stade avancé du projet,

---

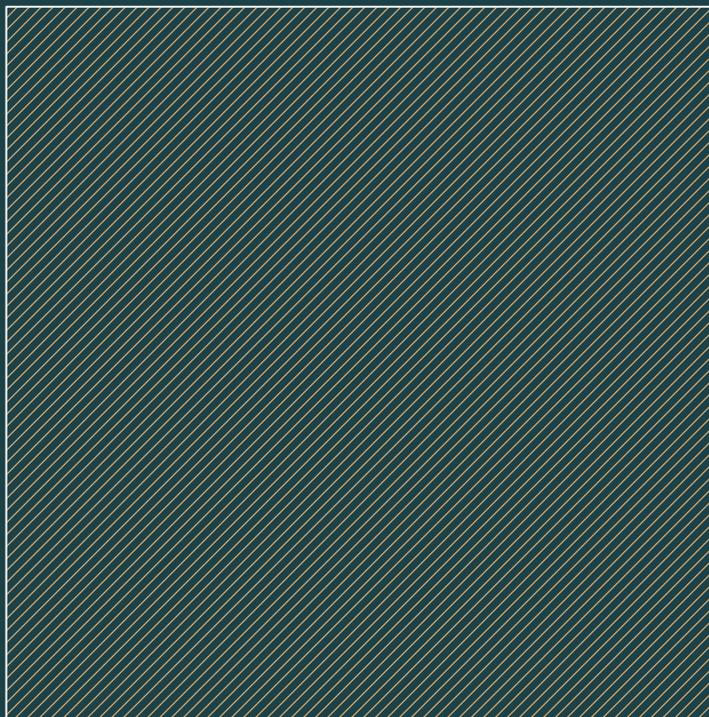
5. Services cantonaux de l'énergie et de l'environnement, *Situer sa consommation de chauffage*. <http://www.energie-environnement.ch> (site consulté en janvier 2015)

 consommation énergétique annuelle globale

 réserves prouvées de gaz

 réserves prouvées de charbon

 réserves prouvées de pétrole



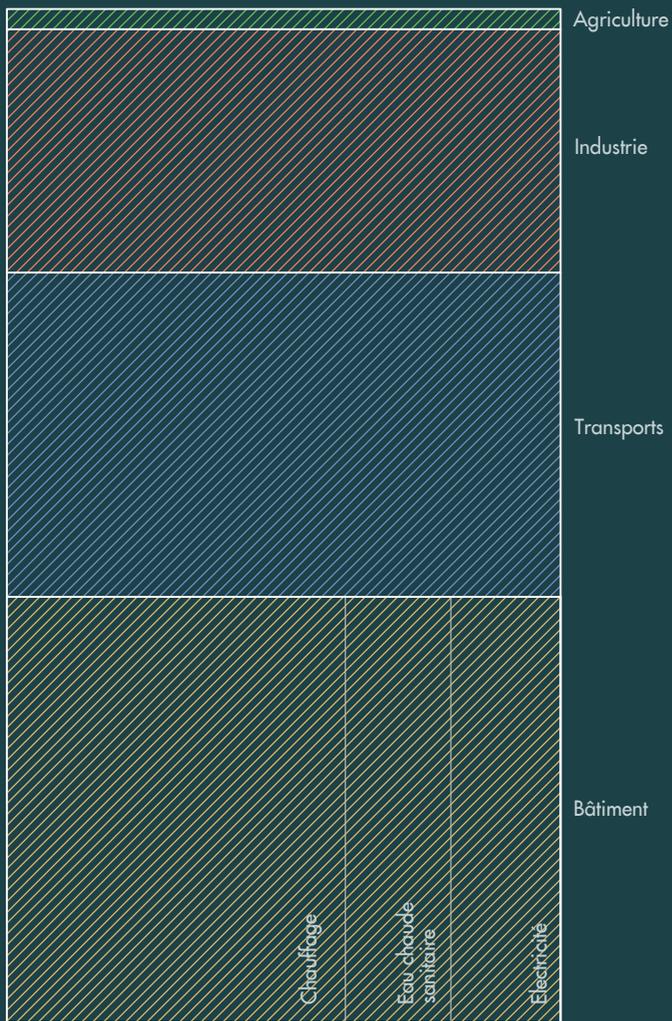
énergie solaire annuelle reçue par la terre

ce qui se traduit inévitablement par un ajout à l'extérieur de l'enveloppe, dénaturant l'architecture.

Nous estimons qu'il est primordial de réfléchir au solaire dès le début de la phase de conception d'un bâtiment. L'utilisation de la porte, de la fenêtre, de la cheminée, ou de tout autre élément fonctionnel, fait depuis longtemps partie intégrante de l'architecture. Afin de garantir une intégration réussie, l'utilisation d'un panneau solaire devrait faire partie de la même réflexion et du même travail par l'architecte sur la forme, les matériaux, les proportions, les dessins de façades, les jeux de lumière, etc.

Nous sommes convaincus qu'une intégration réussie du solaire en architecture n'est pas forcément synonyme d'une augmentation de coûts. À l'inverse, il n'est pas logique que la pose de panneaux solaires sur le toit soit la solution la plus économique. En effet, certains éléments solaires devraient pouvoir remplacer d'autres éléments de construction, évitant l'utilisation de composantes redondantes ainsi que l'implication de corps de métiers différents. Par exemple, les panneaux solaires sont à même de remplir - entre autres - la fonction de revêtement, pouvant ainsi remplacer les tuiles d'un toit. De plus, si toute la surface du toit est recouverte de panneaux solaires, le couvreur n'est plus nécessaire, offrant en plus des gains économiques une planification plus rapide et simplifiée.

Une compréhension des principes en jeu permettrait même à l'architecte de se passer des produits et d'intégrer la fonction solaire dans des éléments d'architecture ordinaires, tels que les murs. Après tout, il ne suffit à priori que d'une simple surface noire pour capter la chaleur du soleil...



RÉPARTITION DE LA CONSOMMATION ÉNERGÉTIQUE EUROPÉENNE

## ÉNERGIE ET CONFORT DANS LES BÂTIMENTS

Le climat est l'un des principaux moteurs de l'évolution humaine. Il a été l'une des raisons principales du progrès de la construction et de l'architecture.

On peut postuler que l'essence de l'architecture est de maintenir le corps à sa température naturelle et de le protéger des agressions extérieures. «Aujourd'hui, nous passons plus de 90% de notre temps à l'intérieur des bâtiments<sup>1</sup>». Destinés à être occupés, ceux-ci sont construits avant tout pour être confortables et sains. Ils doivent protéger les occupants de l'environnement extérieur, assurer un climat et une qualité d'air agréables à l'intérieur, et fournir des services tels que les communications et l'électricité.

Les exigences actuelles en terme de confort peuvent être classées en plusieurs catégories qui interagissent entre elles: confort thermique, qualité de l'air et de l'environnement, éclairage et acoustique.<sup>2</sup>

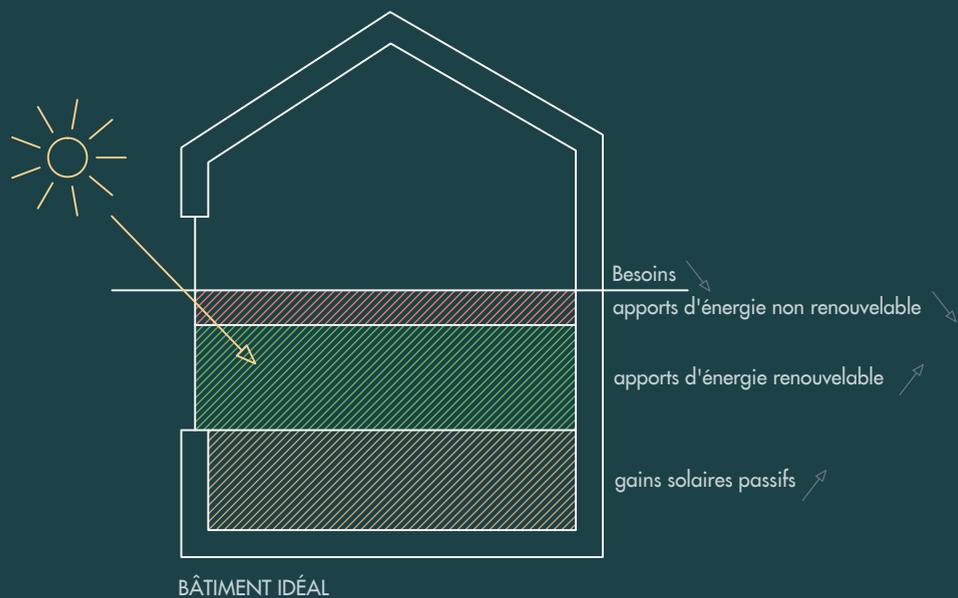
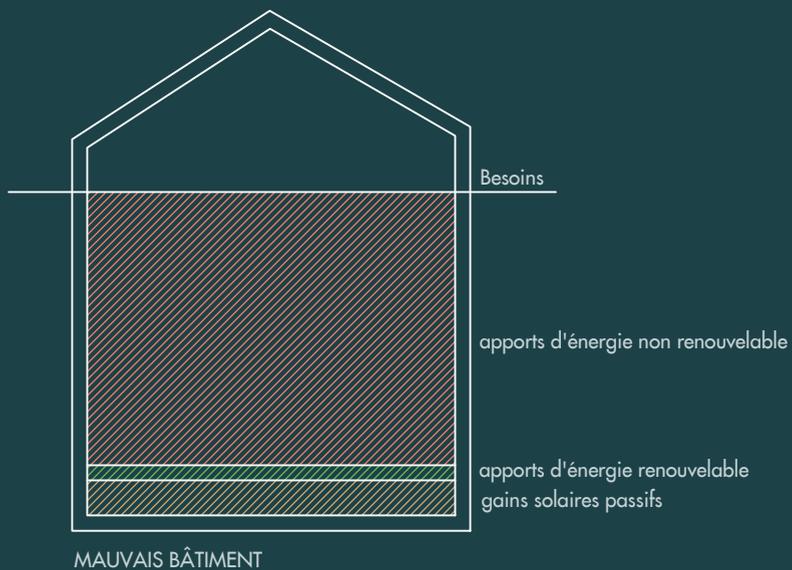
La satisfaction de ces exigences implique dans la plupart des cas un apport d'énergie. Celle-ci assure diverses prestations telles que le maintien du climat intérieur par le chauffage ou le refroidissement; la ventilation si l'aération naturelle ne suffit pas; la circulation de fluides (eau chaude sanitaire et chauffage); l'éclairage; les ascenseurs; les communications (internet, téléphone); la production de biens (cuisine, industrie) ou les services (lessive, ordinateur).<sup>3</sup>

---

1. ROULET, Claude-Alain. *Eco-confort pour une maison saine et à basse consommation d'énergie*. PPUR. 2012. p 1.

2. ROULET, Claude-Alain. *Santé et qualité de l'environnement intérieur dans les bâtiments*. Lausanne, PPUR. 2008. p 1.

3. ROULET, Claude-Alain. *Thermique du bâtiment: tout le confort avec peu d'énergie*. Polycopiés de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, LESO. 2000. p 1.



Dans les pays industrialisés, l'énergie utilisée par le secteur du bâtiment représente plus de 40% de la consommation énergétique nationale. De cette énergie, la majorité est dédiée au chauffage. En effet, dans les climats tempérés et froids, le celui-ci est responsable pour 70% de la consommation des ménages<sup>4</sup>.

La chaleur entrant dans le bâtiment finit tôt ou tard par en ressortir, soit par les transmissions thermiques à travers l'enveloppe et le sol, soit par la chaleur évacuée avec l'air vicié et l'eau sale. Ces déperditions doivent être compensées par un apport constant d'énergie. On peut comparer cet échange de flux constant à un tonneau des Danaïdes dans lequel on maintient un niveau d'eau en le remplissant continuellement pour compenser les pertes<sup>5</sup>.

Cet apport se fait par les installations de chauffage, le rayonnement solaire entrant principalement par les fenêtres, la chaleur dégagée par les occupants et les installations, ainsi que par les capteurs solaires.

Jusqu'au 18<sup>e</sup> siècle, les énergies renouvelables couvraient près de la totalité des énergies nécessaires aux activités de construction et d'exploitation des bâtiments. Le chauffage se faisait au bois, mais seulement dans certaines pièces et à certains moments de la journée.

Ce n'est qu'au siècle dernier, avec le développement des transports, que s'est répandu l'usage du charbon pour le chauffage. Le 20<sup>e</sup> siècle a été une période d'utilisation de l'énergie axée sur le confort: eau chaude à profusion, éclairage excessif, chauffage dans toutes les pièces entre 23 et 25° C, ainsi qu'un développement important de la surface et du nombre de logements. La facilité d'accès aux réseaux

---

4. Office fédéral de l'énergie OFEN

5. *Ibid.* 3. p 21.



J.W. Waterhouse  
1890

d'électricité et de gaz naturel, ainsi que le faible coût de cette énergie, n'incitent guère à modifier ces habitudes, générant une consommation d'énergie démesurée.<sup>6</sup>

L'évolution des attentes influence la façon de construire. Il est inimaginable aujourd'hui de construire selon les normes des siècles passés. Cependant, malgré un niveau de confort souhaité en constante augmentation, il est possible de faire baisser les besoins énergétiques d'un bâtiment, en augmentant par exemple l'épaisseur de l'isolation. C'est d'ailleurs ce qui se fait depuis ces quarante dernières années.

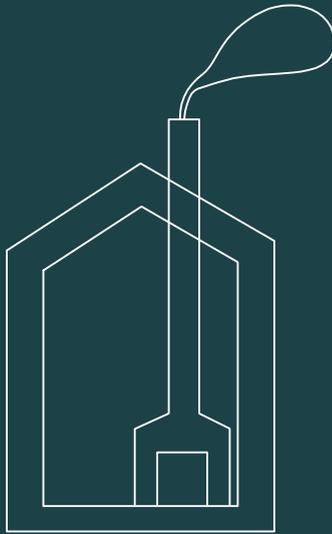
*“Introduire le soleil, c’est le nouveau et le plus impératif devoir de l’architecte.”*

- Le Corbusier, 1933

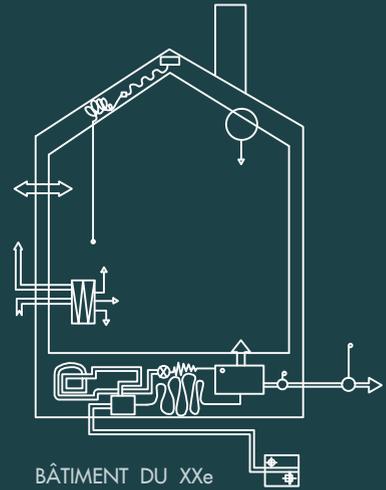
À présent, il est important de changer également le type d'approvisionnement en énergie, car les ressources non renouvelables ne sont pas une solution à long terme. Le soleil, source d'énergie gratuite et illimitée, a un rôle prépondérant à jouer dans cette mission.

---

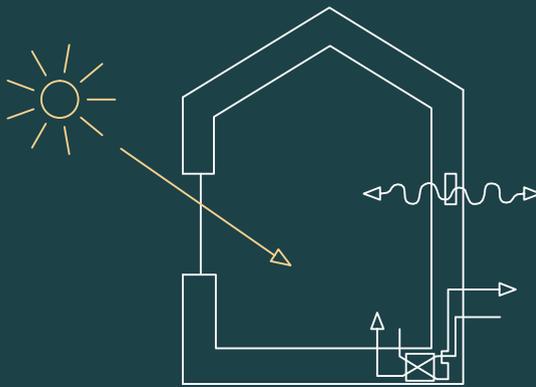
6. HOLLMULLER, Pierre, LACHAL, Bernard, *et al. Quels systèmes énergétiques pour le XXI<sup>e</sup> siècle? : Production*. Genève, CUEPE. 2000, p 53-54.



BÂTIMENT AVANT XIXe



BÂTIMENT DU XXe



BÂTIMENT AUX STANDARDS ACTUELS

## LE RAYONNEMENT SOLAIRE

Grande boule de plasma, le soleil est l'unique étoile de notre système solaire. Il est la principale source d'énergie directe ou indirecte à l'origine du cycle de l'eau, du vent et de la photosynthèse, elle-même à l'origine des énergies fossiles. Toute vie sur Terre dépend de cette source d'énergie.

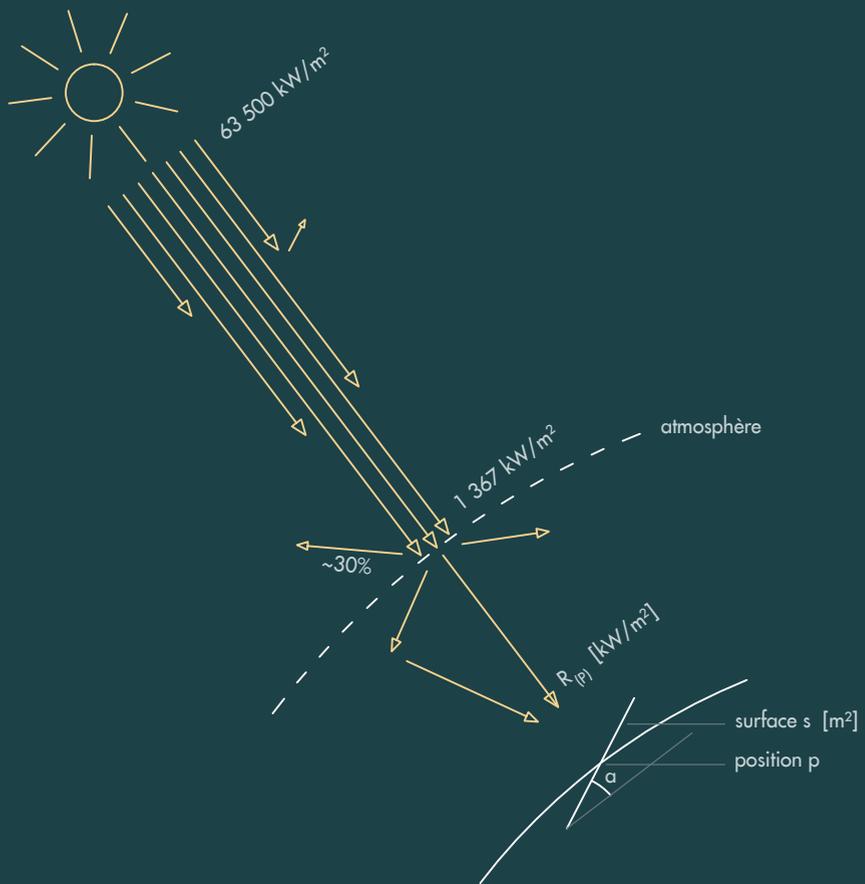
Par un processus de transformation d'hydrogène en hélium, il émet d'énormes quantités d'énergie dans l'espace. La puissance à la surface du soleil est estimée à  $63\,500\text{ kW/m}^2$ . Après avoir parcouru les 150 millions de kilomètres qui la sépare de la Terre, l'irradiation solaire atteint l'atmosphère avec une puissance d'environ  $1\,367\text{ W/m}^2$ .

Au moins 35% du rayonnement est ensuite réfléchi vers l'espace par la Terre et son atmosphère. En traversant cette dernière, il est en partie diffusé dans toutes les directions, procurant au ciel sa couleur bleue. Quelques dix pour-cents se perdent dû à l'absorption par l'eau, le gaz carbonique et l'ozone. Au final, l'intensité énergétique parvenue en ligne droite depuis le soleil sur la surface de la Terre est réduite à  $492\text{ W/m}^2$  en moyenne. Une partie non négligeable du rayonnement diffus arrive également à la surface de la Terre. L'addition du rayonnement direct et diffus donne le rayonnement global sur la surface de la Terre, qui s'élève à  $1000\text{ W/m}^2$  en moyenne. La valeur précise varie en fonction du lieu, de l'heure, de la saison, de la météo et de l'altitude.<sup>1</sup>

Le rayonnement rencontrant ensuite de la matière peut être réfléchi, transmis et/ou absorbé. La partie absorbée se transforme directement en chaleur. Le taux d'absorption, de réflexion et de transmission déterminent ainsi la quantité de chaleur reçue par la matière ainsi que son apparence. En effet,

---

1. GANZ, Christophe, Muller, A, *et al.* *Le Soleil - Chaleur et lumière dans le bâtiment.* Zürich, SIA. 1990



ÉNERGIE E reçue par une surface s à inclinaison a avec l'horizontale pour une position P sur la terre:

$$E = s \times \cos(\alpha) \times R_{(p)} \text{ [W]}$$

on perçoit la neige comme blanche car elle réfléchit les ondes de toutes les longueurs. Au contraire, un pneu devient chaud à la vue du soleil car il absorbe la majorité du rayonnement, et sa couleur est noire car il ne réfléchit aucune longueur d'onde visible. D'autres matières, dont le verre, transmettent les rayons et paraissent ainsi transparentes.

La quantité d'énergie reçue par une surface dépend de son orientation par rapport au soleil, et est donnée en multipliant le rayonnement par le cosinus de l'angle d'incidence des rayons. Plus la surface est perpendiculaire au rayonnement, plus la elle recevra d'énergie. Hors comme nous le savons, la Terre n'est pas immobile.

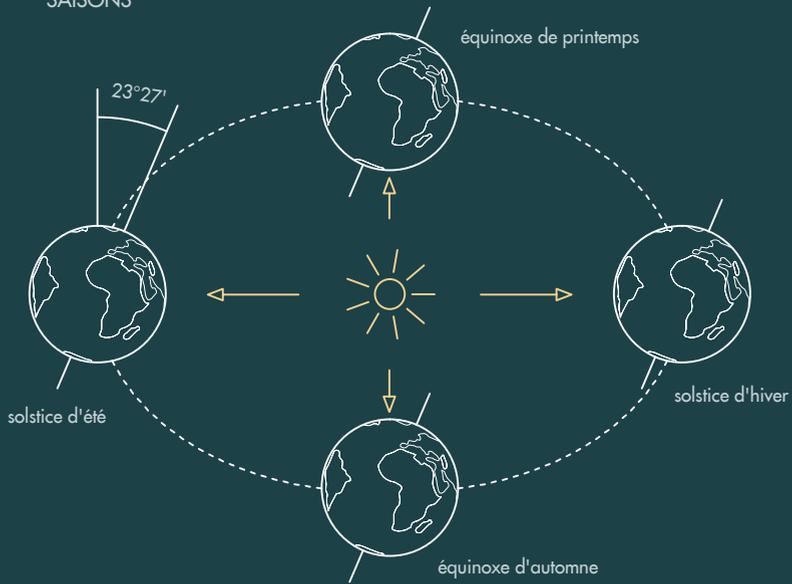
La maîtrise de l'énergie solaire nécessite donc de connaître la position du soleil pour un point donné tout au long de l'année. La position relative du soleil dans le ciel est décrite par la hauteur et l'azimut. Pour faciliter la compréhension, c'est donc le mouvement apparent du soleil que l'on considère.

La course de la Terre autour du soleil décrit une ellipse. De plus, elle effectue un tour complet sur elle-même en vingt-quatre heures. L'axe de rotation de la Terre sur elle-même fait un angle de  $23^{\circ}27'$  avec l'axe de rotation de la Terre autour du soleil. Cette inclinaison, responsable des variations saisonnières, explique pourquoi le soleil est plus ou moins bas durant l'année.<sup>2</sup>

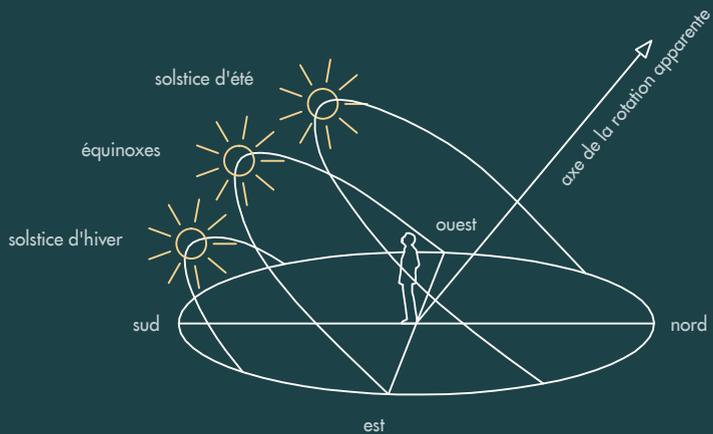
---

2. UCL - Architecture et Climat, *Le mouvement soleil - terre*. <http://www-energie2.arch.ucl.ac.be> (site consulté en janvier 2015)

## SAISONS



## MOUVEMENT APPARENT DU SOLEIL





# *Ingrédients*

2

L'énergie solaire, dans ses utilisations actives ou passives, est en mesure de livrer l'ensemble des besoins énergétiques de la construction: le chauffage, l'éclairage, l'eau chaude sanitaire, l'électricité, et également, récemment, la climatisation<sup>1</sup>.

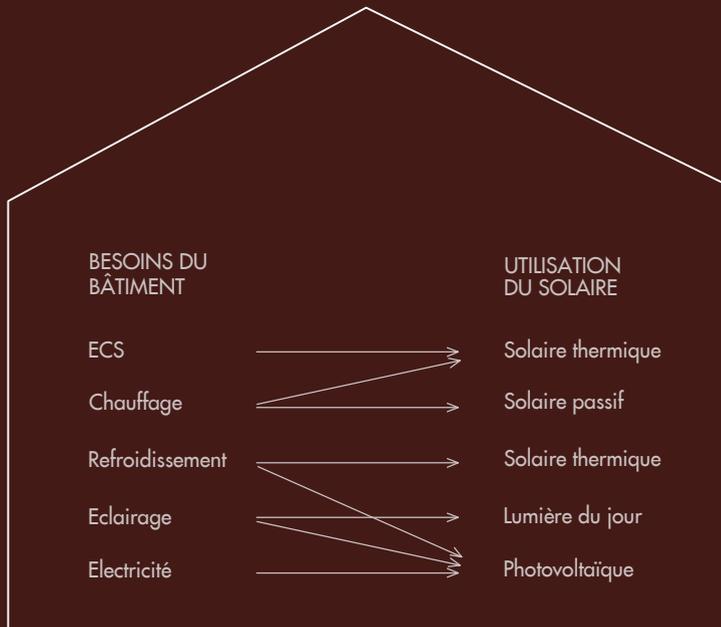
L'eau chaude sanitaire peut être produite en utilisant des capteurs solaires thermiques actifs. Le chauffage des locaux peut facilement être assuré par des gains solaires passifs, chauffant le bâtiment à travers les fenêtres, par effet de serre. La chaleur nécessaire peut également être fournie indirectement, en utilisant des capteurs solaires thermiques actifs. L'électricité peut être produite par des modules photovoltaïques. L'éclairage devrait être fourni autant que possible en utilisant la lumière du jour, les modules photovoltaïques peuvent alors fournir ce qui est nécessaire pour l'éclairage électrique. Le rafraîchissement peut être garanti en grande partie par une ventilation nocturne passive appropriée. Récemment, des systèmes thermiques solaires capables d'utiliser la chaleur solaire pour le rafraîchissement des espaces ont été développés. Ces systèmes utilisent des capteurs solaires thermiques standard, mais sont encore en phase expérimentale.<sup>2</sup>

Avant de pouvoir penser à intégrer le solaire dans une architecture, il est nécessaire de comprendre les principes et technologies en jeu.

---

1. IEA SHC, *Solar Energy Systems In Architecture - integration criteria and guidelines*.  
Report T.41.A.2: Task 41, 2012. p 5.

2. *Ibid.*



Une distinction est faite entre l'exploitation active et l'exploitation passive de l'énergie solaire.

L'exploitation active de l'énergie solaire consiste à se servir de la technologie solaire pour produire directement de l'électricité ou de la chaleur. Les modules solaires photovoltaïques permettent de produire de l'électricité, tandis que les capteurs solaires thermiques assurent la préparation d'eau chaude sanitaire ou le chauffage d'appoint.<sup>1</sup>

L'exploitation passive de l'énergie solaire vise à optimiser, par des mesures constructives, l'énergie thermique reçue gratuitement par la simple exposition d'un bâtiment au soleil.

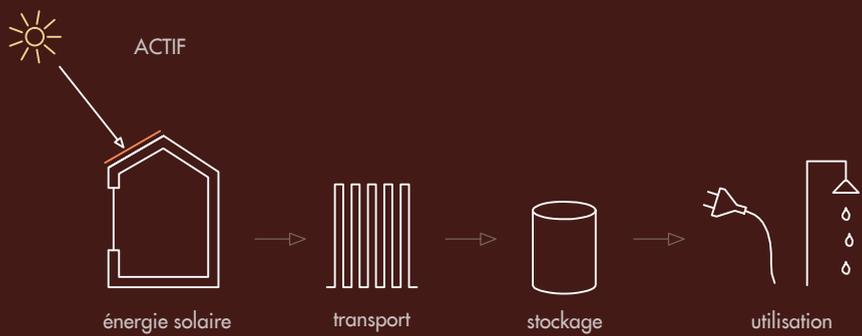
---

1. Swissolar, *Exploitation active et passive de l'énergie solaire*.  
<http://www.swissolar.ch> (site consulté en janvier 2015)

PASSIF



ACTIF



## **LE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE**

Le photovoltaïque est un moyen de produire de l'électricité à l'aide du rayonnement solaire, sans déchets, ni bruit, ni gaz nocifs. Cette technologie a un rôle important à jouer dans la diminution de l'utilisation des énergies non renouvelables. Intégré ou ajouté au bâtiment, le photovoltaïque permet d'amener la production d'électricité à l'endroit de son utilisation, évitant la nécessité de surfaces supplémentaires pour des centrales de production et des infrastructures de distribution.

Communément appelés «panneaux solaires», les produits photovoltaïques sont utilisés dans le bâtiment depuis plus de vingt ans, mais de façon modeste. Ce n'est qu'avec la volonté récente d'augmenter la partie renouvelable de notre approvisionnement en énergie que l'on observe une croissance de l'utilisation du photovoltaïque.

Découvert par le physicien Antoine Becquerel en 1839, l'effet photovoltaïque est obtenu par absorption des photons de la lumière dans un matériau semi-conducteur, créant une tension ou un courant électrique.

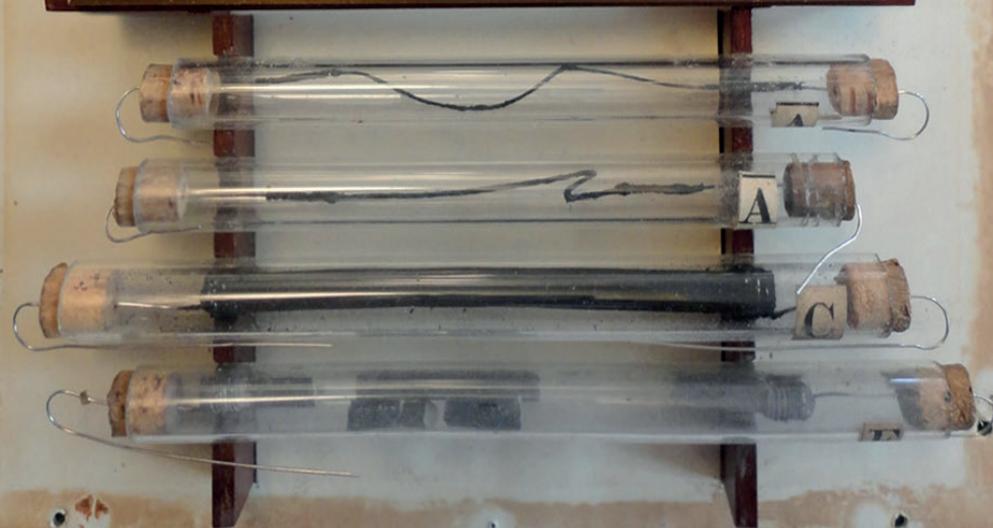
Les cellules produites actuellement peuvent être classées en trois catégories: les cellules traditionnelles en silicium cristallin, les cellules à couche mince et les cellules émergentes basées sur des technologies innovantes, parfois appelées «cellules de troisième génération».

### **Cellules en silicium cristallin**

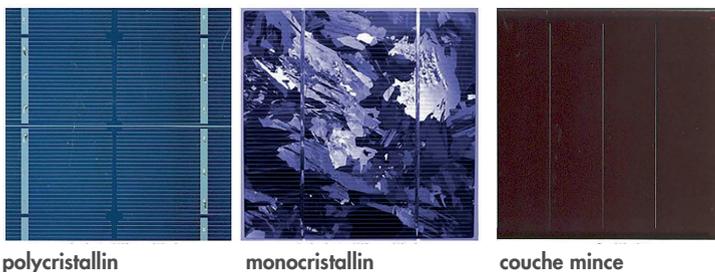
Les cellules solaires en silicium cristallin représentent environ 85% du marché mondial. Elles sont subdivisées en deux catégories: les cellules monocristallines et les cellules polycristallines. Leur production est un procédé de fabrication complexe, et ne sera pas traité ici.



DISCOVERY OF THE EFFECT OF LIGHT  
UPON THE ELECTRICAL PROPERTIES OF SELENIUM  
BY WILLOUGHBY SMITH IN 1873  
ORIGINAL BARS OF SELENIUM USED IN HIS EXPERIMENTS.



Pour devenir un produit utilisable, les cellules cristallines, de forme carrée de 10 à 15 cm de côté, sont câblées électriquement et encapsulées pour créer un module photovoltaïque. La petite taille des cellules permet une grande flexibilité dans les dimensions finales et les formes des modules.

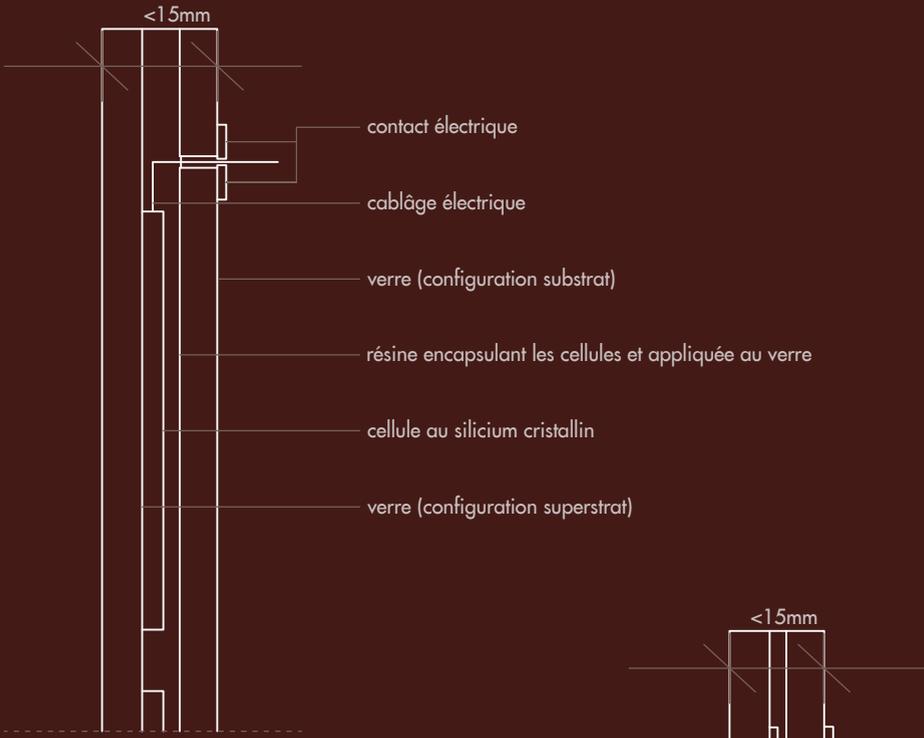


Ces cellules offrent les rendements les plus élevés disponibles sur le marché, allant de 17% à 22% pour les monocristallines, et de 11% à 17% pour les polycristallines.

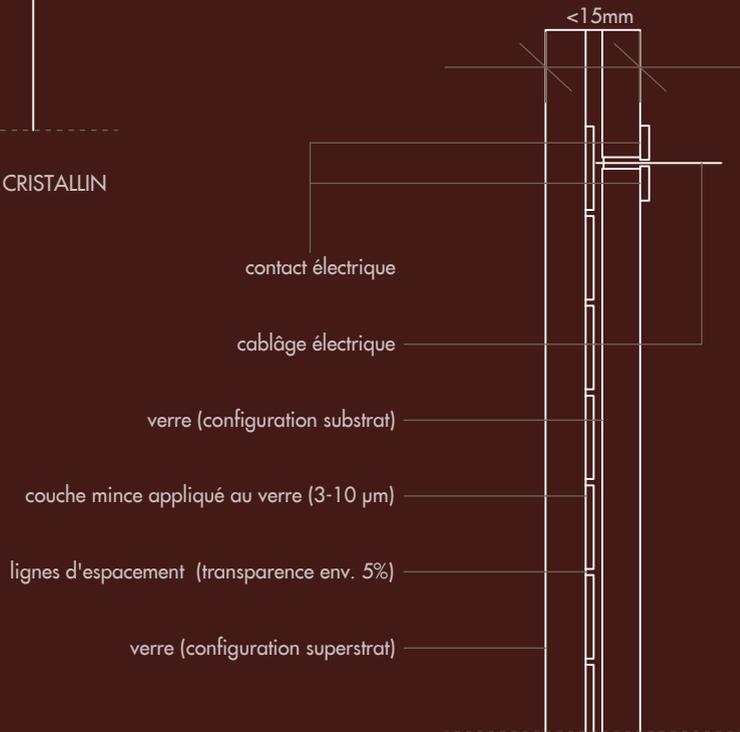
### **Cellules à couches minces**

Les cellules à couches minces, également appelées «cellules de deuxième génération», peuvent être considérées comme une couche microscopique de matériel photovoltaïque «désordonné», déposée directement sur de grandes surfaces, tels que panneaux de verre, polymères ou feuilles métalliques. Les modules ainsi formés peuvent atteindre plusieurs centaines de mètres de long, dont la surface a une apparence relativement homogène. Leur couleur varie de brun / orange à violet et noir, avec des lignes parallèles plus ou moins marquées.

Le rendement des cellules à couches minces se situe généralement entre 4% et 10%, avec un maximum atteignant 12% actuellement.



PV À SILICIUM CRISTALLIN



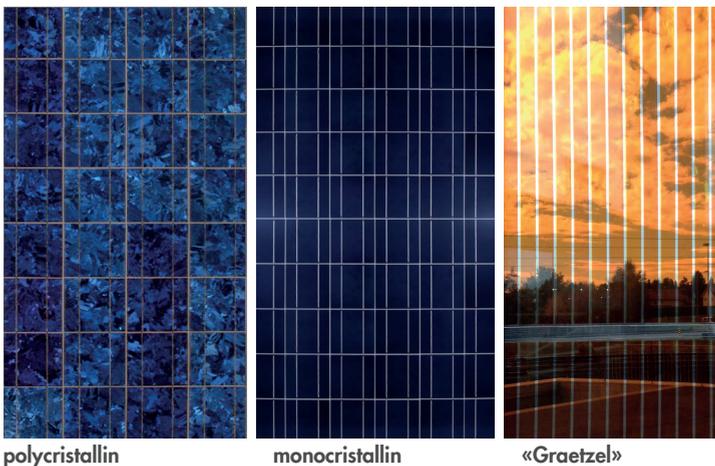
PV À COUCHE MINCE

## Cellules de troisième génération

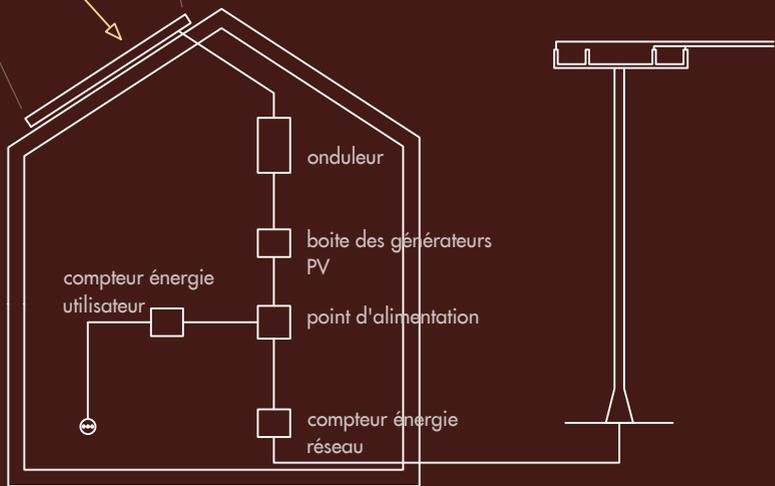
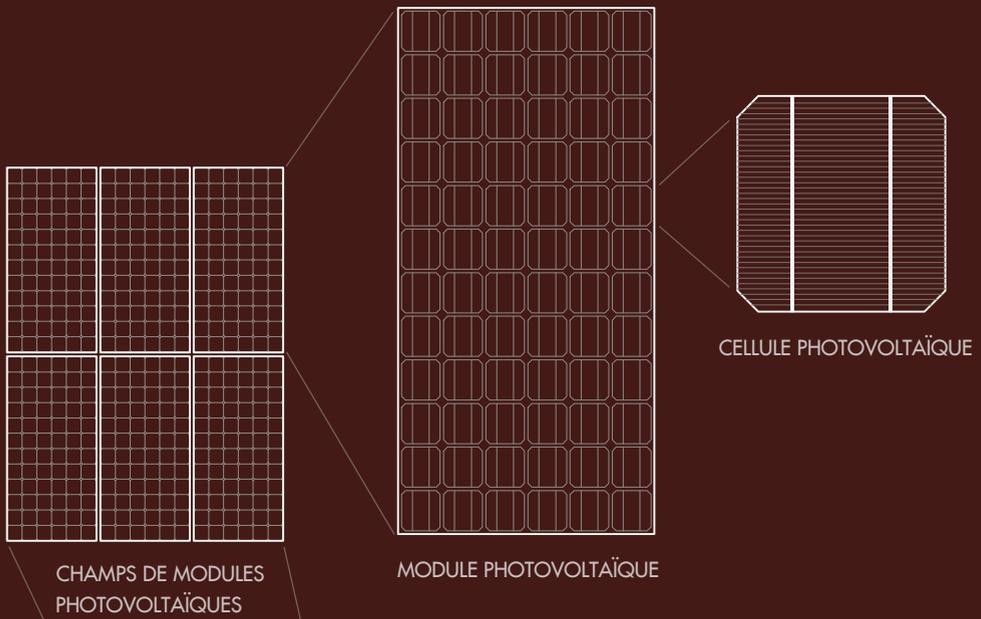
Dans la troisième catégorie sont regroupées toutes les technologies photovoltaïques innovantes.

Parmi celles-ci, les cellules solaires organiques jouent un rôle important. Les cellules solaires à colorant type «Graetzel» en sont un exemple intéressant. Elles utilisent un colorant moléculaire afin de produire de l'électricité par photosynthèse artificielle.

Le principal avantage de ces cellules organiques est un coût de production potentiellement plus faible que pour les deux premières catégories, mais en raison de leur faible efficacité et durabilité actuelle, elles ne sont pas encore considérées comme concurrentielles sur le marché. Leur efficacité varie de 4% à 10%<sup>1</sup>.



1. IEA SHC, *Solar Energy Systems In Architecture - integration criteria and guidelines*.  
Report T.41.A.2: Task 41, 2012. p 83 - 89.



*“L’énergie grise entrant dans  
la fabrication et la démolition  
des installations photovoltaïques  
ne peut jamais être compensée.”*

*idees  
recueillies*

“Une production  
photovoltaïque suisse  
est totalement insensée,  
il vaut mieux la faire  
dans le Sahara.”

**“Le prix de revient de  
l’énergie solaire est  
exorbitant, si bien que  
l’Etat doit y contribuer  
par des subventions  
extrêmement élevées.”**

*Pendant sa durée de service,  
une installation photovoltaïque  
économise entre 14 et 20 fois  
sa propre énergie grise.*

8 m<sup>2</sup> couvrent  
20% des besoins électriques  
d'une personne.

L'ensoleillement est de  
1'400kWh/m<sup>2</sup> en suisse contre  
2'000kWh/m<sup>2</sup> au Sahara.

**Actuellement le prix  
de revient du solaire  
se situe entre 15 et 21  
centimes par kWh.**

**Ce prix est estimé  
entre 7 et 11 centimes  
par kWh d'ici 2030.**

## **LE SOLAIRE THERMIQUE ACTIF**

L'énergie solaire thermique est l'utilisation de la chaleur du rayonnement solaire. Cette chaleur peut être recueillie activement à l'extérieur de l'enveloppe du bâtiment, pour être transportée soit à l'endroit d'utilisation soit vers un stockage pour une utilisation ultérieure. Le captage se fait par des surfaces de couleur foncée optimisées pour l'absorption de chaleur.

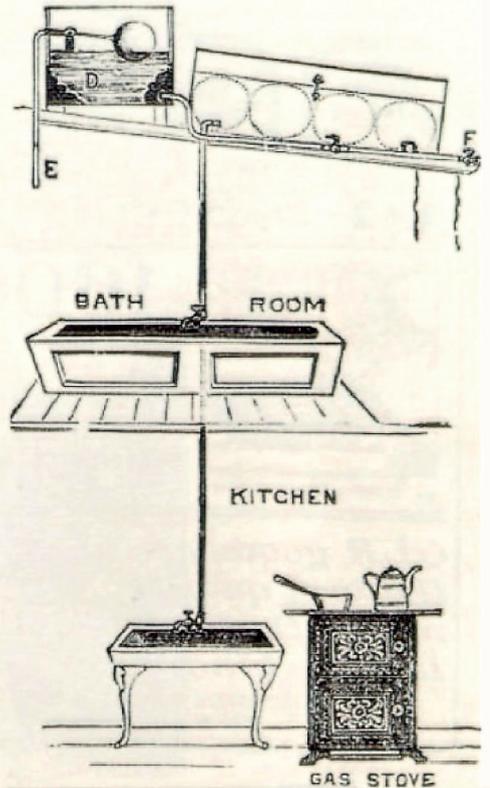
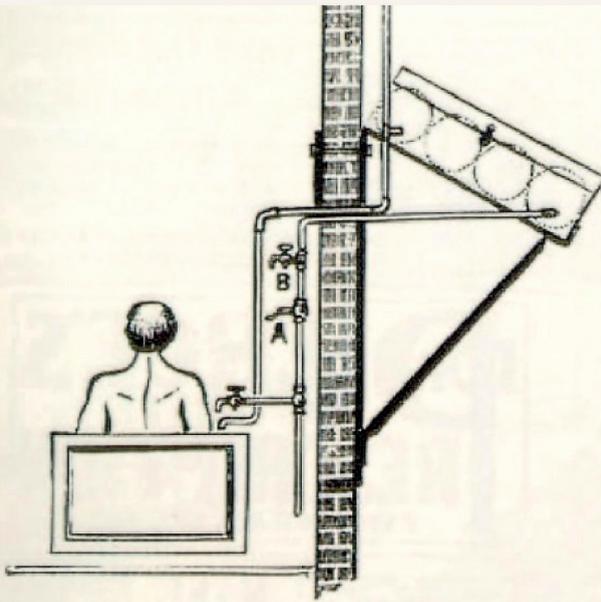
En architecture, le terme «solaire thermique» est essentiellement utilisé pour sa version active décrite ci-dessus, alors que le solaire thermique passif, traité dans une prochaine section, est simplement appelé «solaire passif».

Laisser un récipient contenant de l'eau se réchauffer au soleil afin de pouvoir prendre une douche chaude était probablement une des premières utilisations actives du solaire thermique.

Le premier chauffe-eau solaire commercialisé date déjà de plus d'un siècle. En 1891, Clarence Kemp, un fabricant de chauffage, eu l'idée de mettre plusieurs réservoirs d'eau cylindriques à l'intérieur d'une boîte vitrée, reprenant l'expérience de Horace de Saussure qui, en 1767, piégea la chaleur solaire dans une boîte recouverte de verre.

Parmi les systèmes actifs proposés aujourd'hui, deux grandes familles peuvent être identifiées en fonction du support utilisé pour le transport de chaleur: les capteurs à air et les systèmes hydrauliques.

Les systèmes à air sont caractérisés par des coûts plus faibles, mais aussi une efficacité moindre principalement due à la faible capacité thermique de l'air. Les gains thermiques solaires sont généralement utilisés immédiatement et sans stockage pour préchauffer l'air frais nécessaire à la ventilation du bâtiment. Ces systèmes sont relativement peu utilisés.



— Shows a Climax Solar-Water Heater supported by a bracket on the wall.

A.—Is the cock to use when the hot water is wanted. This passes cold water into the heater, displacing the hot water and forcing it through a pipe to the bath tub.

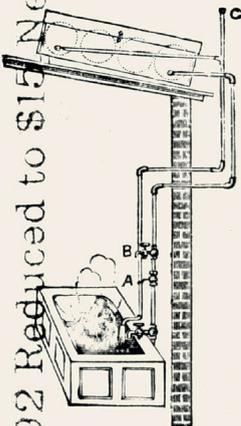
B.—Is the drain cock which is used to prevent freezing.

# Climax Solar-Water Heater

UTILIZING ONE OF NATURE'S GENEROUS FORCES

**THE SUN'S HEAT** { Stored up in Hot Water for Baths, Domestic and other Purposes.

Price Of No. 1 Heater for 1892 Reduced to \$15 Net



GIVES HOT WATER at all HOURS OF THE DAY AND NIGHT.

NO DELAY.

FLOWS INSTANTLY.

NO CARE. NO WORRY.

ALWAYS CHARGED.

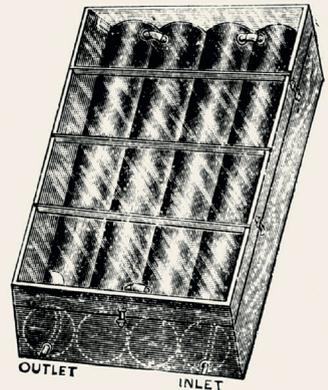
ALWAYS READY.

THE WATER AT TIMES ALMOST BOILS.

**Price, No. 1, \$25.00**

This Size will Supply sufficient for 3 to 8 Baths.

CLARENCE M. KEMP, BALTIMORE, MD.



Les systèmes hydrauliques, plus courants, permettent un stockage facile des gains solaires et conviennent à la fois pour l'eau chaude sanitaire et le chauffage. La grande capacité thermique de l'eau assure une très bonne qualité de l'échange de chaleur. Pour éviter le gel, l'eau est généralement chargée de glycol.

Les capteurs thermiques hydrauliques se répartissent en trois familles que sont les capteurs plans vitrés, les capteurs plans non-vitrés et les tubes sous vide.

### **Capteurs plans vitrés**

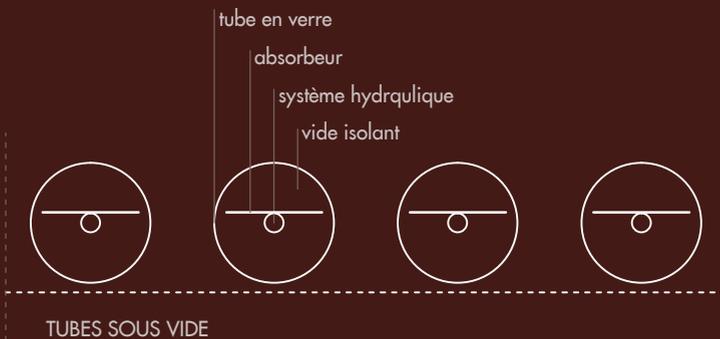
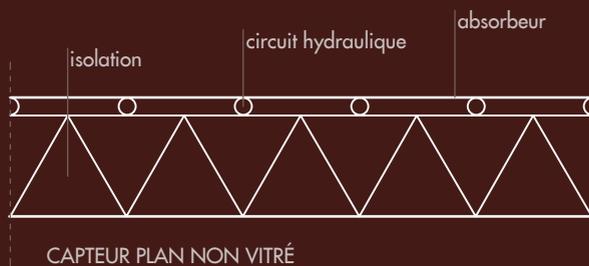
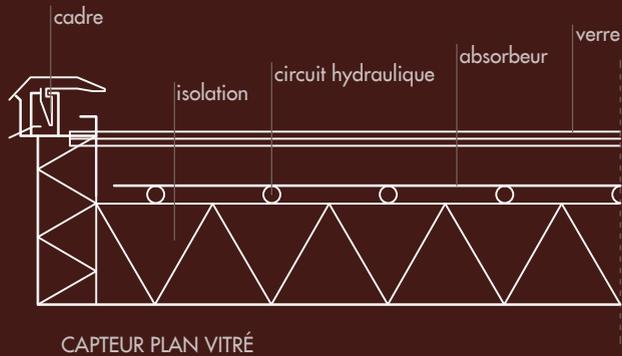
Les capteurs plans vitrés sont les plus répandus en Europe et sont généralement utilisés pour le chauffage et pour la production d'eau chaude sanitaire. Le vitrage permet de retenir la chaleur à l'intérieur du module par effet de serre.

Ils se présentent sous forme de boîtes rectangulaires vitrées d'environ 2 à 3 m<sup>2</sup>. Ces produits sont proposés par la plupart des fabricants dans un choix assez limité de dimensions standard et avec un cadre relativement large en caoutchouc ou en métal. Le module, d'une épaisseur de 10 cm environ, est constitué de plusieurs couches: le fluide caloporteur passe dans un serpentín plaqué en sous face d'une feuille absorbante, le tout placé derrière une vitre, dans un caisson isolé; la vitre est transparente à la lumière du soleil mais opaque aux rayons infrarouges de l'intérieur, ce qui piège la chaleur<sup>1</sup>.

Sous nos latitudes, les températures habituelles de fonctionnement se situent entre 50° C et 100° C, mais elles peuvent s'élever à plus de 150° C en été. Par conséquent, des mesures devraient être prises pour éviter le risque de surchauffe qui peut endommager les pièces sensibles telles que les joints en caoutchouc.

---

1. wikipedia [http://fr.wikipedia.org/wiki/Capteur\\_solaire\\_thermique](http://fr.wikipedia.org/wiki/Capteur_solaire_thermique)



## **Capteurs plans non vitrés**

Les capteurs plans non vitrés sont adaptés pour les piscines, les systèmes de chauffage à basse température et pour le préchauffage de l'eau chaude sanitaire.

La partie visible du capteur est l'absorbeur, une fine plaque de cuivre, d'aluminium ou d'acier présentant une surface homogène lisse ou ondulée et recouverte d'une peinture sélective de couleur foncée brillante ou mate. Le circuit hydraulique est en contact avec la face cachée de l'absorbeur. Lorsqu'il est utilisé pour l'eau chaude ou le chauffage, une isolation à l'arrière du capteur est nécessaire. Mais à l'inverse des capteurs vitrés, la partie avant de l'absorbeur n'est pas isolée par un verre. En conséquence, les températures de fonctionnement sont plus faibles, de l'ordre de 25 à 50° C.

## **Les capteurs à tubes sous vide**

Les tubes sous vide sont particulièrement recommandés pour les applications nécessitant des hautes températures de fonctionnement tels que pour l'industrie ou le refroidissement solaire. Cependant, ils sont également utilisés pour la production d'eau chaude sanitaire et le chauffage des locaux, en particulier dans les climats froids. Ils sont composés de plusieurs tubes de verre sous vide, à l'intérieur desquels passent un tuyau absorbant contenant le fluide caloporteur. Ce tuyau est parfois soudé à une plaque absorbante afin d'augmenter la surface exposée au soleil. La haute capacité d'isolation du vide permet d'atteindre de très hautes températures (120-180° C) tout en minimisant les pertes, même dans les climats froids. Leur intégration, fortement limitée par leur forme, est souvent limitée à des barrières.<sup>2</sup>

---

2. IEA SHC, *Solar Energy Systems In Architecture - integration criteria and guidelines*.  
Report T.41.A.2: Task 41, 2012. p 13 - 22.

	CAPTEURS NON-VITRÉS	CAPTEURS PLANS VITRÉS	CAPTEURS À TUBES SOUS VIDE
Températures de fonctionnement	25-50°C	50-120°C	120-180°C
Applications principales	chauffage, piscines, pré-chauffage de l'ECS	ECS, chauffage	ECS, chauffage, industrie
Production d'énergie (6m2, suisse)	300-350 kWh/m2	400-600 kWh/m2	480-650 kWh/m2
Coût moyen (6m2, suisse, 2010)	250-300 CHF/m2	390-570 CHF/m2	600-1300 CHF/m2
Coût moyen par unité d'énergie produite	0,81 CHF/kWh	0,88 CHF/kWh	1,6 CHF/kWh

## Climatiser avec la chaleur du rayonnement solaire

La technique la plus commune consiste à utiliser des capteurs solaires pour fournir de la chaleur qui est dirigée vers une machine à absorption. Cette machine dissocie, par ébullition, une solution d'eau et de bromure de lithium. Après refroidissement, la recombinaison des deux composants produit du froid, par absorption de chaleur. Le froid est ensuite distribué comme pour la climatisation classique.

C'est une solution propre, efficace et silencieuse. Elle réduit les émissions de CO<sub>2</sub>, l'emploi de fluides frigorigènes et le bruit urbain. Mais la technique est encore en phase de développement et il n'y a qu'une cinquantaine d'installations en Europe<sup>3</sup>.



3. <http://outilssolaires.com/installation/chauffage-solaire/climatisation/>



# PHOTOVOLTAÏQUE CRISTALLIN

TAILLE 0.1 à 2 m<sup>2</sup>

FORME très libre

ÉPAISSEUR 0.4 à 1 cm

COULEUR noir / bleu

MATÉRIAU verre + cellule pv

ÉNERGIE électricité

RENDEMENT 4 à 22 %

PRIX/SURFACE 450 à 700 Chf/m<sup>2</sup>

PRIX/ÉNERGIE 4 à 7 Chf/kWh

# SOLAIRE THERMIQUE

1.5 à 3 m<sup>2</sup>

TAILLE

rectangulaire

FORME

3 à 12 cm

ÉPAISSEUR

noir / foncé

COULEUR

métal / verre

MATÉRIAU

chaleur

ÉNERGIE

50 à 90 %

RENDEMENT

250 à 700 Chf/m<sup>2</sup>

PRIX/SURFACE

0.6 à 1.6 Chf/kWh

PRIX/ÉNERGIE

## LE SOLAIRE THERMIQUE PASSIF

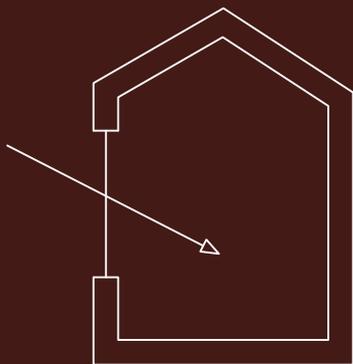
Appelée aussi indirecte, le principe du solaire passif est relativement simple. Les rayons du soleil pénètrent dans le bâtiment à travers les parties transparentes de l'enveloppe, sont absorbés par les murs, les planchers et les meubles, puis sont restitués sous forme de chaleur. Plus l'inertie thermique du bâtiment est forte, plus le déphasage entre l'absorption et la restitution de cette chaleur est long.

Cet apport passif peut couvrir jusqu'à 40 % du chauffage, sans prouesse technologique et pour un coût raisonnable. Pour atteindre ces chiffres, cela requiert néanmoins de l'architecte ou de l'ingénieur de connaître quelques principes de physique, tels que l'effet de serre et l'inertie thermique du bâtiment.

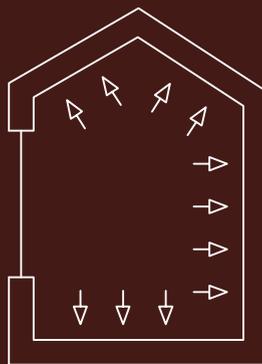
*“Quand les maisons regardent le midi en hiver, le soleil ne pénètre-t-il pas sous les galeries extérieures, et passant au-dessus de nos têtes et par-dessus les toits en été, ne nous procure-t-il pas de l'ombre ?”*

- Socrate, 5e siècle avant J.-C.

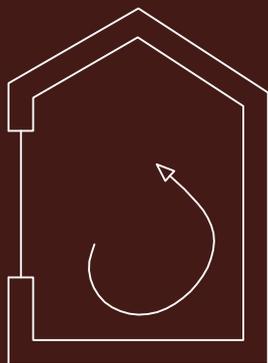
L'utilisation de l'énergie solaire en architecture n'est pas un phénomène récent. Il y a six-mille ans, des maisons en Chine étaient déjà construites de façon à optimiser les gains solaires en hiver. Il y a plus de deux-mille ans, les Grecs concevaient leurs bâtiments en fonction du soleil pour améliorer le confort des habitants. Aristote disait d'une maison qu'elle devait être ventilée en été et ensoleillée en hiver. Les bains Romains avaient de grandes fenêtres orientées vers le sud. Vitruve, ayant vu des maisons solaires lors de son passage en Grèce, en rendit compte dans ses dix livres de l'Architecture, où il y conseille notamment d'avoir la salle à manger d'hiver à l'ouest afin de profiter de la chaleur du soleil en soirée.



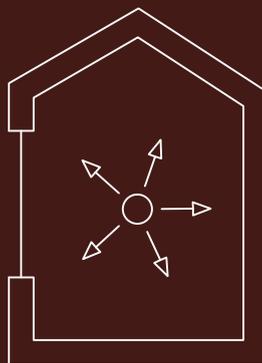
CAPTER



STOCKER



DISTRIBUER



CONSERVER

Dès le 16e siècle, la serre exposée au sud est devenue populaire pour encourager la croissance de plantes exotiques dans le climat plus froid de l'Europe. Parfois, une serre était attachée au côté sud de la salle de séjour ou de la bibliothèque de la maison, afin de transformer «l'intérieur terne» en un espace «dynamique et chaleureux» où les gens se rassembleraient. Les jours ensoleillés d'hiver, les portes séparant la serre de la maison étaient ouvertes pour laisser l'air réchauffé par le soleil circuler librement à l'intérieur.

En 1940, La Maison Sloan de l'architecte George F. Keck a été appelée «maison solaire» par le Chicago Tribune, première utilisation moderne du terme .

Au cours du 20e siècle, l'exploitation du solaire passif fut progressivement raffinée, aidée entre autres par le développement de la modélisation informatique.

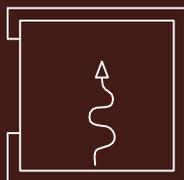
Dans le but de promouvoir la recherche sur le solaire en architecture, le ministère américain de l'Énergie a créé, en 2002, la compétition internationale Solar Decathlon. De nombreux prototypes combinant le solaire passif et actif sont proposés à chaque édition, démontrant les possibilités illimitées .



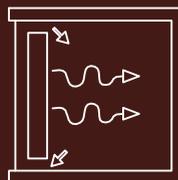
maison passive

## SYSTÈMES PASSIFS

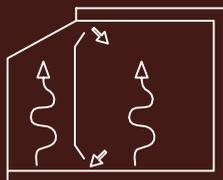
Fenêtre



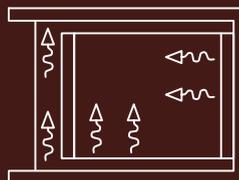
Mur Trombe



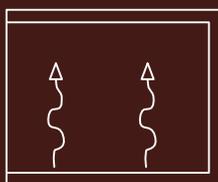
Jardin d'hiver



Capteur à air



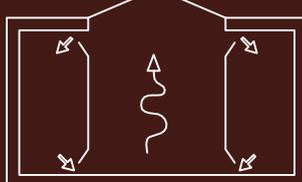
Véranda



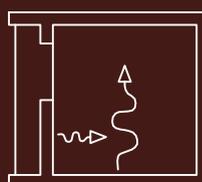
Isolation transparente



Atrium



Double peau





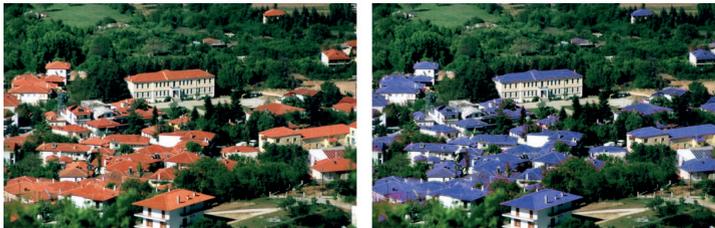
# *Recettes*

3

Bien que les systèmes solaires soient des éléments fonctionnels, il est du devoir de l'architecte de réfléchir à leur intégration. En effet, comme l'a énoncé Vitruve, l'architecture devrait présenter les trois qualités de «firmitas, utilitas, et venustas», autrement dit de pérennité, utilité et beauté.

Le devoir d'assurer un environnement confortable à l'intérieur du bâtiment («utilitas») limite certes la liberté d'expression («venustas») de l'architecte, qui n'est pas aussi grande que celle d'un sculpteur par exemple. Cependant, une bonne compréhension des phénomènes en jeu permet d'élargir cette liberté d'expression<sup>1</sup>.

Aujourd'hui, la texture et la couleur des modules photovoltaïques semble déranger. Peut-être est-ce simplement une question d'habitude ? L'expression formelle de la cheminée, comme pour tout nouvel élément fonctionnel, a évolué avec le temps. Mais il n'est pas impensable que leur présence sur les toits eu été plus choquante au moment de leur apparition que cent ans plus tard, où, faisant partie intégrante du décor, elles sont considérées «banales».



Le orange est-il vraiment plus esthétique que le bleu ?

Au cours de notre recherche, nous nous sommes rendus compte qu'il existe déjà un bon nombre de travaux sur la

1. ROULET, Claude-Alain. *Santé et qualité de l'environnement intérieur dans les bâtiments*. Lausanne, PPUR. 2008.

*“Solar architecture  
is not about fashion,  
it is about survival.”*

- Lord Norman Foster, 1993

question de l'intégration du solaire en architecture. Ces travaux traitent le sujet de manière plutôt scientifique. Par conséquent, les architectes ne font pas l'effort de s'y intéresser, minimisant l'impact que ces travaux méritent d'avoir.

Nous sommes persuadés que la majorité des idées et solutions visant à améliorer l'intégration du solaire en architecture partent d'une logique simple.

Dans ce chapitre, nous avons essayé de retranscrire avec un graphisme uniforme une sélection pertinente de principes rencontrés lors de nos recherches. À ceux-ci ont été rajoutées nos propres découvertes, afin d'en faire une collection pertinente.

Nous proposons donc un recueil de «recettes», allant de la simple réflexion ou idée au principe constructif et détail de façade, combinant différents éléments solaires avec des éléments de construction classiques, dans le but de rendre l'utilisation du solaire en architecture moins artificielle. Combiner des éléments nouveaux ou existants, les utiliser différemment, envisager de nouvelles approches, analyser chacune des composantes et en extraire les éléments-clefs, tels ont été nos procédés. Libre à l'architecte lecteur de mettre en œuvre les propositions qui lui semblent pertinentes en fonction du programme, du contexte et de l'expression recherchée dans un projet. Tout comme le choix de la brique apparente ou du crépis, nous estimons qu'il n'y a pas une solution solaire parfaite pour toutes les situations, mais que plus la palette de «recettes» est grande, meilleures sont les chances de trouver une solution adaptée à chaque projet.

En analysant les différentes façon d'utiliser le solaire dans un bâtiment, nous avons observé plusieurs degrés d'intégration, décrits sur la double page suivante.





Bâtiment traditionnel.

---



Bâtiment traditionnel avec produit solaire rajouté, non intégré.

---



Bâtiment où le solaire est intégré dans le plan de l'enveloppe, sur une partie de la façade, remplaçant d'autres éléments, et restant clairement identifiable.

---



Bâtiment où le solaire est intégré dans le plan de l'enveloppe, couvrant la totalité de la surface, remplaçant d'autres éléments.

---



Bâtiment traditionnel en apparence, mais avec fonction solaire activée. Le solaire est soit invisible, soit fait partie intégrante du concept architectural.

---

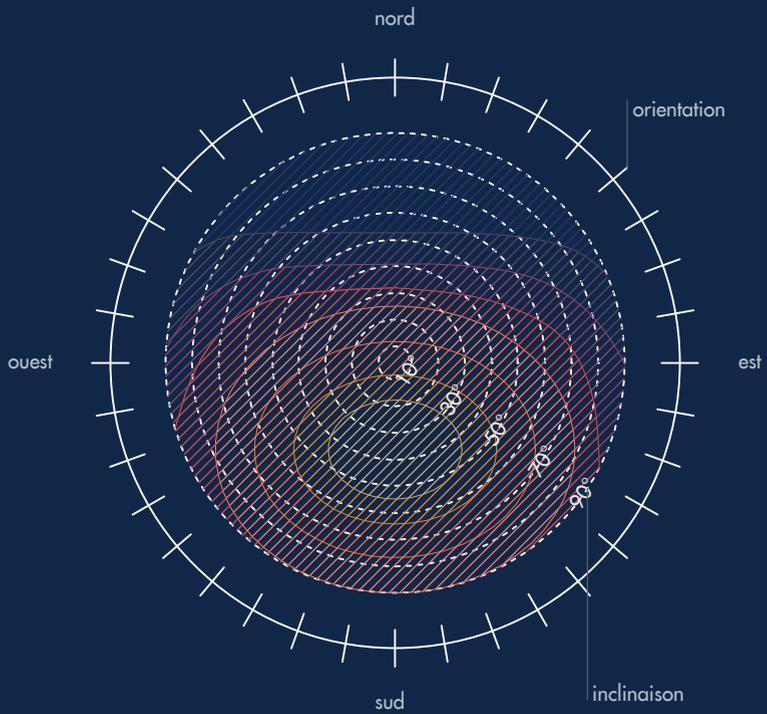


## **ORIENTATION DES FAÇADES**

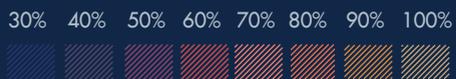
Toute architecture se confronte à un site, il faut donc commencer par des réflexions sur l'ensemble du bâtiment et à sa relation avec son environnement. La conception de l'enveloppe doit prendre en compte son exposition au soleil. Comprendre comment l'orientation et l'inclinaison d'une surface influence le rayonnement reçu permet de discerner les façades recevant suffisamment d'énergie pour une application solaire rentable.

On constate que, sous nos latitudes, les façades exposées au sud, sud-est ou sud-ouest ainsi que la toiture (sauf la face inclinée vers le nord), sont propices à l'usage du solaire. Les façades est et ouest, ne recevant que la moitié du rayonnement, ne sont à priori que moyennement rentables pour accueillir des fonctions solaires. Toutefois, si la possibilité s'offre d'appliquer à l'est et à l'ouest le système développé pour la façade sud, l'économie d'échelle peut rendre ce choix intéressant.

Les autres façades, c'est-à-dire nord, nord-est et nord-ouest, ne reçoivent pas suffisamment de rayonnement solaire pour récupérer de l'énergie.



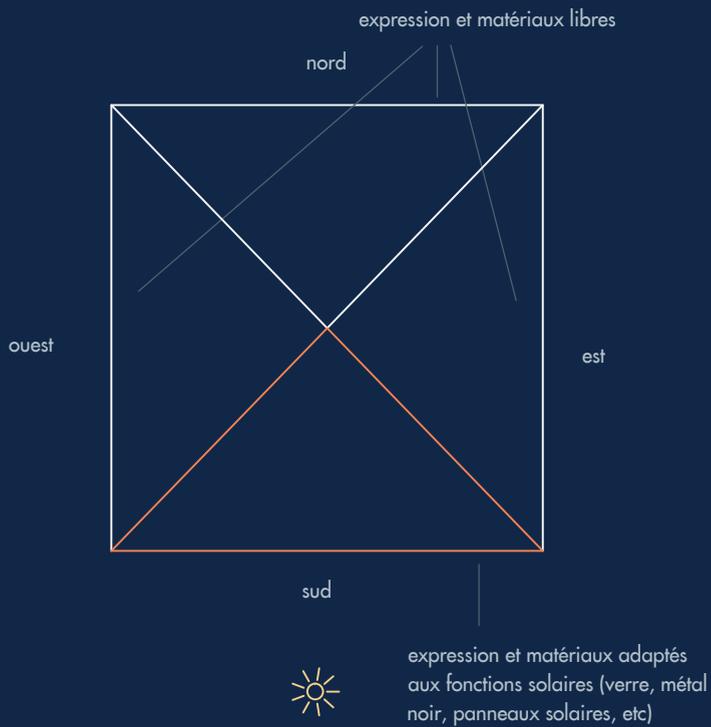
ÉNERGIE SOLAIRE RECUE SELON ORIENTATION ET INCLINAISON



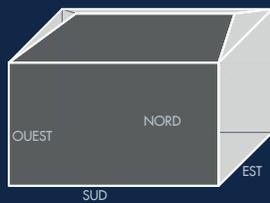
Suite à ces considérations, nous constatons deux stratégies possibles pour l'expression à l'échelle du bâtiment.

La première comprend une expression de la façade sud différente des autres façades. Ce scénario semble à priori contradictoire avec le principe d'«intégration», mais en réalité on le rencontre très souvent en architecture, des balcons ou des baies vitrées au sud en sont les exemples les plus courants.

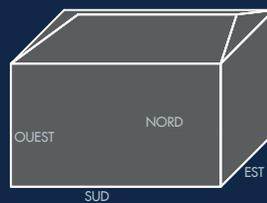
La seconde possibilité est de privilégier une unité de toutes les façades, soit en utilisant sur les autres façades des éléments factices dont l'aspect est identique aux éléments solaires de la façade sud, soit tout simplement en utilisant un système constructif identique.



En conséquence:



ou



## **CHALEUR ET ÉLECTRICITÉ**

Le chauffage et l'eau chaude sanitaire sont les plus grands consommateurs d'énergie. Le solaire thermique, transformant directement le rayonnement solaire en chaleur, répond parfaitement à ces besoins. De plus, il s'avère que le solaire thermique est moins cher, a un meilleur rendement, et son principe est plus simple que le photovoltaïque. En outre, chauffer avec de l'électricité obtenue par le photovoltaïque serait aberrant, étant donné que son rendement est d'environ quatre à cinq fois inférieur, sans compter les pertes de production du système de chauffage électrique.

Comme le montrent les calculs ci-contre, plus du double de la surface permettant au solaire thermique de couvrir 70% de la consommation des ménages est nécessaire au photovoltaïque pour couvrir uniquement 30%.

Il est donc étonnant de constater la popularité des panneaux photovoltaïques, alors que l'utilisation du solaire thermique semble clairement plus avantageuse.

données :

rayonnement solaire en suisse :  $\sim 1\,000 \text{ kW/m}^2$

maison de  $75 \text{ m}^2$ , 2 personnes

consommation annuelle pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire :  $\sim 330 \text{ Mj/m}^2$

ici  $330 \times 75 \times 0.28 = \sim 7\,000 \text{ kWh}$

consommation annuelle électrique par personne :  $\sim 1\,500 \text{ kWh}$

ici  $2 \times 1\,500 = 3\,000 \text{ kWh}$

rendement solaire thermique :  $\sim 75\%$

rendement solaire photovoltaïque :  $\sim 15\%$

orientation : façade verticale sud, recevant 70% du rayonnement

donc :

consommation énergétique annuelle :  $\sim 10\,000 \text{ kWh}$

part consacrée au chauffage :  $\sim 70\%$

part consacrée électricité :  $\sim 30\%$

ici,  $1 \text{ m}^2$  de solaire thermique produit  $1\,000 \times 0.75 \times 0.7 = 525 \text{ kWh}$  par année

et  $1 \text{ m}^2$  de solaire photovoltaïque produit  $1\,000 \times 0.15 \times 0.7 = 105 \text{ kWh}$  par année

ainsi, les besoins en chaleur sont couverts par  $7\,000 / 525 = \sim 13 \text{ m}^2$

et les besoins en électricité sont couverts  $3\,000 / 105 = \sim 29 \text{ m}^2$

on constate donc que  $13 \text{ m}^2$  recouverts de panneaux solaires thermiques couvrent 70% de la consommation des ménages, alors que  $29 \text{ m}^2$  de panneaux photovoltaïques sont nécessaires pour ne couvrir que 30% de la consommation des ménages.

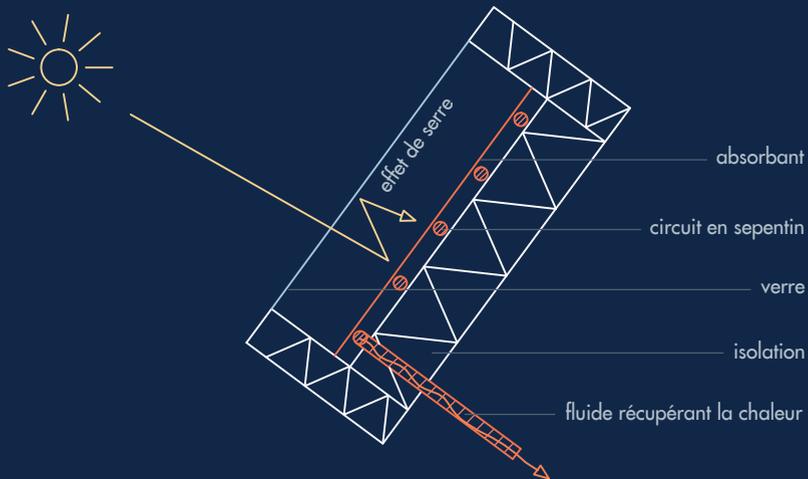
## **UTILISATIONS DU SOLAIRE THERMIQUE ACTIF ET PASSIF**

Si l'on distingue les mesures solaires actives ou passives pour leurs implications différentes, elles ne fonctionnent pas pour autant de façon très différente. On peut effectivement observer une analogie entre le capteur solaire thermique et la maison. Les rayons du soleil traversent un vitrage chauffant ainsi un espace clos par effet de serre. La chaleur est ensuite transmise à de la matière à forte capacité thermique pour être restituée plus tard ou ailleurs. Dans le cas du panneau thermique, on utilise de l'eau (quatre fois plus d'inertie que la brique) pour transporter cette chaleur, alors que dans une maison on compte sur l'inertie thermique pour emmagasiner la chaleur dans la masse pour être libérée la nuit.

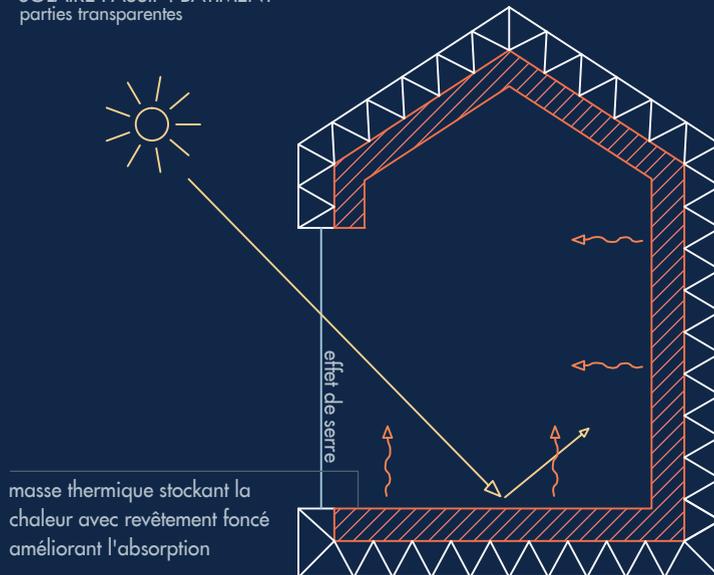
Bien que leur fonctionnement s'apparente, le solaire passif et actif ne s'appliquent pas pour autant aux mêmes parties de l'enveloppe. En effet, on s'aperçoit que les parties transparentes de la façade permettent des gains passifs, alors que pour exploiter l'énergie solaire sur les parties opaques, le solaire actif doit être employé. Comme le montre l'illustration à la double page suivante, ces deux techniques sont donc complémentaires.

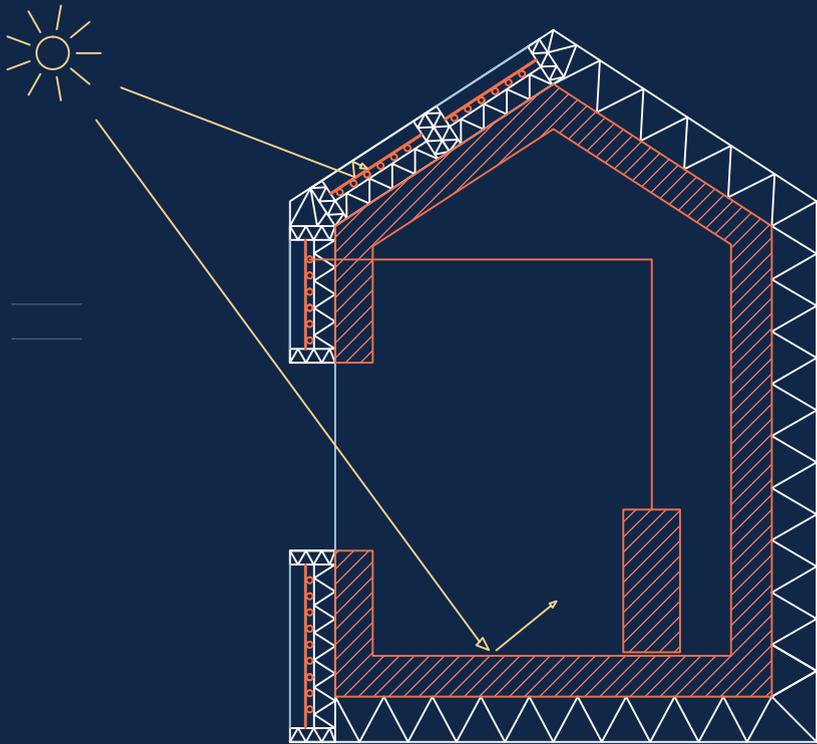


SOLAIRE ACTIF : PANNEAU THERMIQUE  
parties opaques



SOLAIRE PASSIF : BÂTIMENT  
parties transparentes



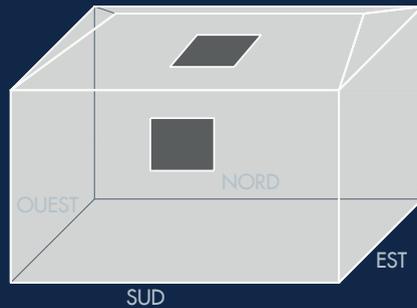


## **STRATÉGIES SUR LES PARTIES OPAQUES**

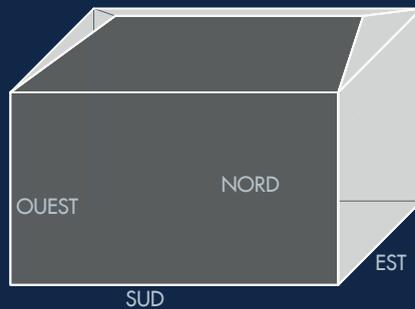
Nous avons rencontré de nombreux exemples où le solaire est appliqué sur une petite proportion de la façade. Un coût élevé au mètre carré des panneaux solaires proposés par les entreprises a probablement une conséquence sur la surface mise en œuvre. Les produits solaires thermiques et photovoltaïques sont souvent optimisés pour un rendement maximum au mètre carré.

En réalité, il n'est pas nécessaire de rechercher le rendement le plus élevé par unité de surface. En déployant un système uniforme sur toute une façade, on pourrait sans problème accepter un rendement plus faible, généralement synonyme de prix plus bas, compensé par une surface plus élevée.

Ainsi, le rendement total serait largement comparable, avec des avantages non négligeables. Le tout serait plus unitaire, l'expression plus libre, et le prix potentiellement plus bas car un seul type de système est utilisé sur la totalité de la façade.



Intégration "classique" de produits technologiques (panneaux solaires photovoltaïques ou thermiques)



Intégration proposée: mur classique avec fonction solaire, sans utilisation de produits technologiques. Rendement au mètre carré certainement inférieur mais coût réduit, intégration uniforme sur toute la façade

## **UTILISATIONS DU SOLAIRE THERMIQUE VITRÉ ET NON VITRÉ**

Après nous être rendu compte que le solaire thermique actif est la solution la plus intéressante pour les parties opaques, la question du choix entre le vitré ou non vitré se pose.

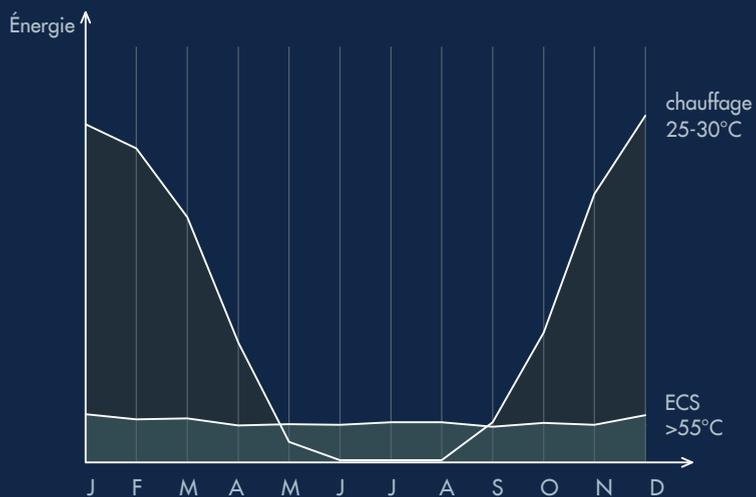
Explorons les différents besoins de chaleur d'un bâtiment:

L'eau chaude sanitaire et le chauffage ne requièrent pas les mêmes conditions. L'ECS doit être présente toute l'année à une température relativement élevée de minimum 55°C, alors que le chauffage est sollicité entre 4 et 8 mois, et dans le cas du chauffage au sol, à une basse température de 21 à 28°C. Le chauffage au sol offre l'avantage d'être plus uniforme et plus économique.

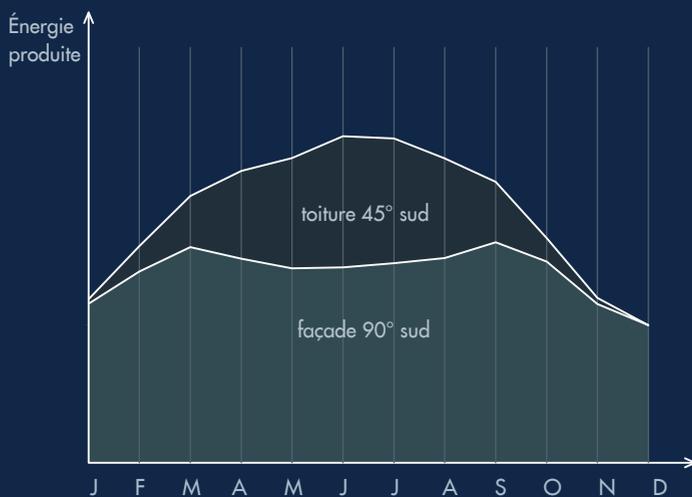
Le solaire thermique non vitré semble être adapté pour le chauffage à basse température et son orientation au sud sur un plan vertical est optimale car permet une grande efficacité en hiver et un gain minimisé en été, pour éviter la surproduction et la surchauffe.

En revanche, le solaire thermique non vitré ne peut répondre aux besoins de l'ECS. Dans ce cas, on privilégiera le solaire thermique vitré.

## BESOINS ÉNERGÉTIQUES MÉNAGES



## PRODUCTION SOLAIRE THERMIQUE



## TYPES DE MURS

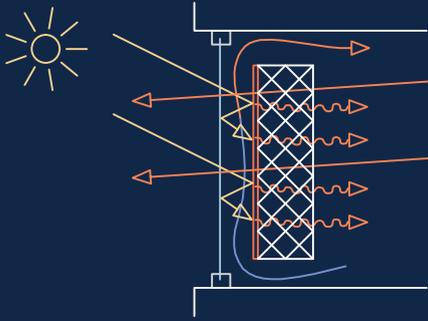
L'emploi du solaire sur les parties opaques peut donner lieu à plusieurs variantes constructives.

Il est aussi du devoir de l'architecte d'innover, c'est ce qu'ont fait par exemple le professeur Félix Trombe et l'architecte Jacques Michel qui, dans les années 1950-70, ont mis en œuvre le mur trombe. Ce dispositif consiste en un mur plein, de couleur foncée, exposé au sud, utilisant l'effet de serre grâce à un vitrage placé devant. L'inconvénient avec ce système étant les fortes déperditions qu'il engendre car il est dépourvu d'isolation.

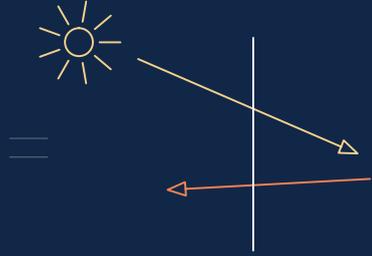
A l'inverse, un mur traditionnel retient au maximum la chaleur intérieure mais l'isolation empêche également de profiter des gains solaires très utiles en hiver.

Un mur doté d'éléments solaires actifs, ou «mur thermique actif», bénéficie des avantages des deux derniers murs. L'isolation empêche la chaleur intérieure de s'échapper, et le solaire actif récolte le rayonnement à l'extérieur pour l'amener à l'intérieur.

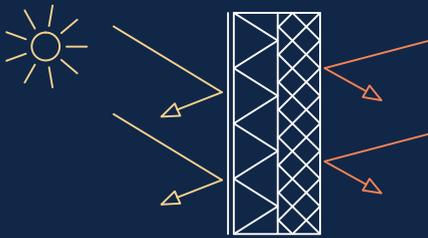
Ainsi, l'utilisation d'un système actif sur les parties opaques semble être la solution la plus logique. Malgré cela, ce ne sont ici que trois exemples de murs parmi tant d'autres. Pour chaque cas, l'architecte doit comparer les différentes solutions potentielles.



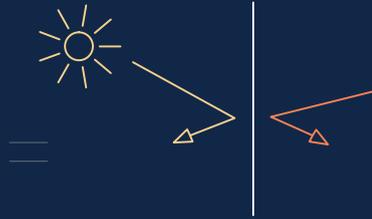
MUR TROMBE



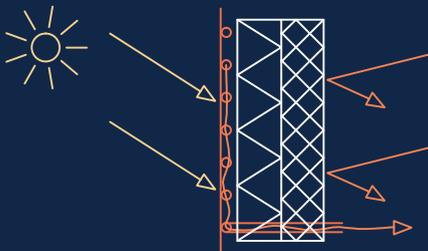
+ GAINS SOLAIRES  
— PERTES THERMIQUES ÉLEVÉES



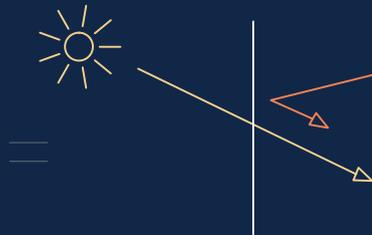
MUR TRADITIONNEL ISOLÉ



— GAINS SOLAIRES NÉGLIGEABLES  
+ PERTES THERMIQUES FAIBLES



MUR THERMIQUE ACTIF



+ GAINS SOLAIRES  
+ PERTES THERMIQUES FAIBLES

*“La simplicité est  
la sophistication ultime.”*

- Léonard de Vinci, 16e siècle



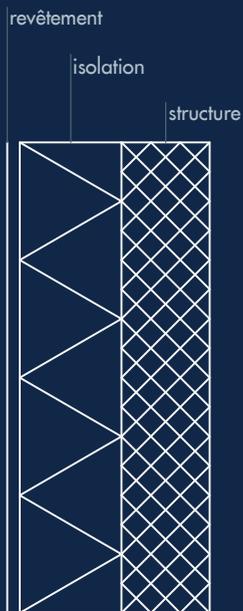
## **MUR SOLAIRE THERMIQUE**

Les entreprises proposent des produits. Vendre une idée est difficile. Afin d'attirer de nouveaux clients, un budget considérable est consacré par les entreprises pour de la publicité et des outils de marketing. Dans un domaine donné, l'influence qu'elles ont sur l'opinion public n'est donc pas à sous-estimer. Ainsi, dans le cas des produits solaires, nous sommes amenés à croire qu'utiliser des produits est la seule réponse rentable.

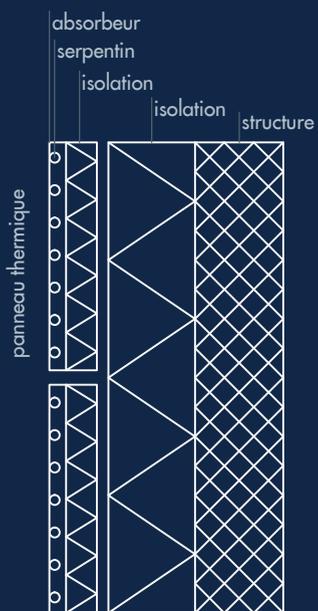
Comme constaté après avoir appréhendé leur principe de fonctionnement, les capteurs thermiques ne sont pas si compliqués. Avec un peu de bricolage, il est même possible d'en fabriquer soit-même chez soi, comme le témoigne le nombre impressionnant de marches à suivre «do it yourself» que l'on peut trouver sur internet. De plus, des objets de récupération sont souvent utilisés, comme par exemple des canettes en aluminium peintes en noir reliées entre elles pour former des tubes, ou différentes pièces de réfrigérateurs telles que les portes pour l'isolation et la grille arrière comme serpentín.

En analysant une construction de mur dotée de panneaux solaires thermiques non vitrés, on se rend compte que ceux-ci sont composés de matériaux de construction traditionnels, et que certains éléments sont présents de manière redondante. En effet, on retrouve de l'isolation et des éléments structurels à la fois dans le panneau et dans le mur.

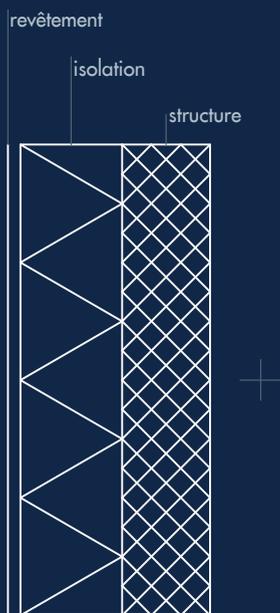
Ainsi, la seule particularité du panneau thermique est en fait la présence d'un circuit hydraulique pour le fluide caloporteur derrière un revêtement métallique foncé. Or, des revêtements similaires sont déjà utilisés en architecture...



MUR TRADITIONNEL

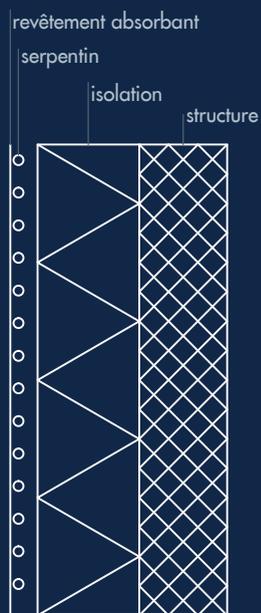


MUR AVEC PANNEAUX  
THERMIQUES NON-VITRÉS



MUR TRADITIONNEL

serpentin



MUR THERMIQUE

Ceci nous a mené vers l'idée d'appliquer ce système, non pas à l'échelle du module de panneau mais de considérer la façade entière comme un ensemble. En profitant de l'isolation déjà existante d'un mur classique, il suffit de rajouter des tuyaux devant l'isolation et d'utiliser un revêtement métallique foncé. La liberté du revêtement ne se limite donc pas aux propositions peu nombreuses des fabricants. Il est tout de même envisageable d'utiliser des absorbeurs destinés aux panneaux commercialisés, sur lesquels les tuyaux sont déjà soudés.

L'application d'un même principe constructif sur la totalité de la façade sud aura comme avantage une réduction de complexité et de coûts, ainsi qu'une expression bien plus uniforme et cohérente. Le rendement par mètre carré sera certainement inférieur à celui des produits proposés par les entreprises, mais si la surface d'application est nettement supérieure pour un coût moindre, l'ensemble pourrait même dépasser la rentabilité d'une façade utilisant des produits d'entreprises.

À titre d'exemple, la rentabilité pourrait être calculée comme suit: si le rendement énergétique du «mur thermique» au mètre carré est  $X$  fois inférieur à celui des produits technologiques, et que le coût au mètre carré est  $Y$  fois inférieur, alors la rentabilité est assurée si  $Y > X$ .

L'expression, quant à elle, ne répond pas à des lois quantitatives mais s'en retrouvera potentiellement améliorée grâce à la plus grande palette de matériaux et de systèmes constructifs disponibles. En effet, le métal est déjà largement utilisé en façade. Le revêtement utilisé dans le «mur thermique» étant à priori métallique, il n'est donc pas nécessaire de réinventer des principes constructifs spécifiques à cette solution. Les principes existants sont applicables avec



### CAISSONS

- I pliages de la tôle stabilisent le caisson
- II joints démontables



### PLIAGE APLATI

- I combinables aussi avec une fixation
- II joints démontables
- III réalisation du pli sur place



### FIXATION INVISIBLE PAR CONNECTION

- I éléments non changeables individuellement



### PANNEAUX AVEC JOINT ÉTANCHE

- I éléments changeables individuellement si l'étanchéité est démontable



### PIÈCES SPÉCIFIQUES EXTRUDÉES

- I veiller à la ventilation des cavités
- II structure secondaire nécessaire
- III éléments non changeables individuellement



### ÉLÉMENT INDIVIDUEL

- I autostabilisation
- II éléments changeables individuellement
- III fixé par un troisième élément



### ECAILLES

- I points de fixation cachés
- II dimension des éléments limités
- III plomb, zinc, cuivre



### SUPERPOSITION DE PANNEAUX AVEC ÉLÉMENTS RAPPORTÉS SUR PLACE

- I risque de corrosion au contact des matériaux
- II élément de fixation local invisible



### RECOUVREMENT PAR TÔLES PLIÉES

- I éléments changeables individuellement



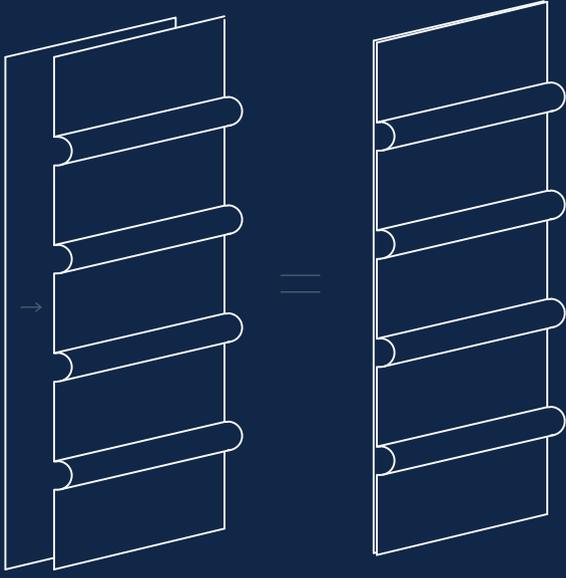
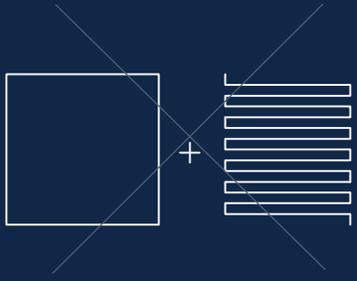
### CONTRE-TÔLE

- I pliages de la tôle supplémentaires pour stabiliser
- II éléments changeables individuellement

tout au plus quelques légères adaptations. En effet, la seule contrainte étant la présence de tuyaux entre l'isolation et le revêtement, il suffit que la sous construction de la façade puisse accueillir la tuyauterie dans son épaisseur.

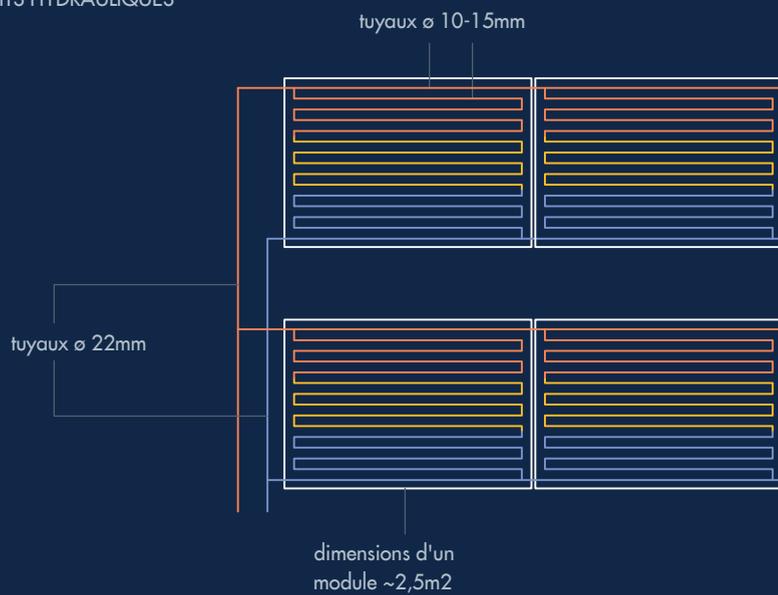
Ainsi, pour la structure de la façade, choix peut se porter parmi les solutions les plus courantes, celles dont le jointolement permet l'étanchéité. En outre, le métal se prête particulièrement bien à la réalisation de pièces préfabriquées.

En joignant une feuille métallique dans laquelle le relief du circuit hydraulique serait pressé à une autre feuille métallique plate, il est envisageable de développer un nouvel élément de revêtement, combinant à la fois l'absorbeur et le circuit d'eau.



Les tuyaux sont appliqués sur la façade après la pose de l'isolation. Le schéma de circuit hydraulique ci-contre n'est qu'une solution parmi tant d'autres. La documentation liée à la pose de panneaux solaires thermiques courants contient de nombreuses variations de circuits, permettant une mise en œuvre sur une grande variété de façades.

## CIRCUITS HYDRAULIQUES



jusqu'à 10 modules en série, souvent par étage



## UTILISATION ET EXPRESSION DU SOLAIRE THERMIQUE NON VITRÉ

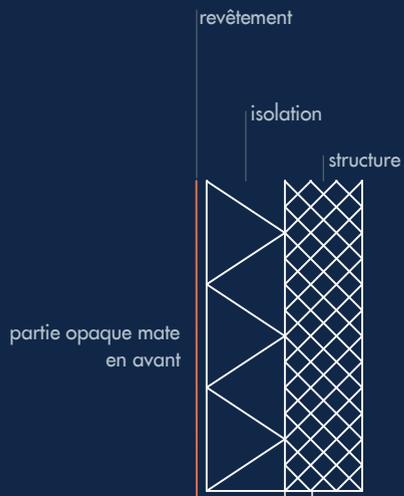
L'utilisation de produits solaires fabriqués par des entreprises offre tout de même de nombreux avantages, tels qu'une prise de risque inférieure d'une solution qui a fait ses preuves, une garantie offerte par le fabricant, une installation faite par un spécialiste et des performances assurées.

Bien que les performances du solaire thermique non vitré ne soient pas aussi élevées que le vitré, il est plus économique et permet d'étendre la palette de matériaux disponibles. Son apparence mate et non réfléchissante le distingue clairement des produits vitrés. A notre avis, il peut facilement substituer les parties pleines de la façade car l'absence de vitrage permet d'intégrer ce capteur à tous les types et styles de bâtiment. Par exemple un revêtement Eternit ou peint se laisse aisément suppléer par les panneaux non vitrés.

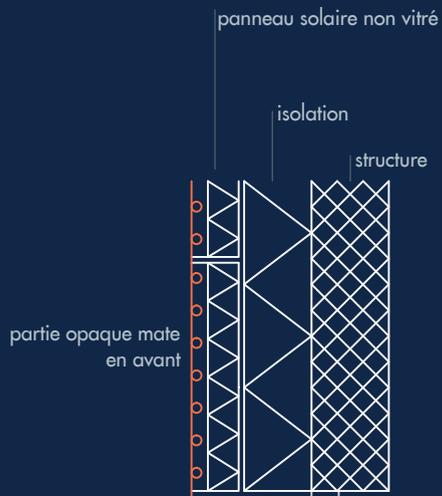
L'intégration de ce panneaux ne vient pas sans contrainte, elle impose en effet une teinte foncée. Cependant, pour des raisons esthétiques, il est possible de faire un compromis entre le rendement et la couleur de la surface. Certains fabricants proposent des produits disponibles dans des couleurs intéressantes.

Couleur du matériau (lustre mat)	Absorption du rayonnement direct %
Noir	90-95
Gris foncé	85-90
Bleu foncé	80-85
Vert olive foncé	80-85
Rouge foncé	70-75
Vert moyen ou orange moyen	55-65
Jaune pâle ou rose pâle	20-25
Blancs	15-20
Aluminium (poli)	10-15

tableau d'absorption du rayonnement solaire selon les couleurs



MUR CLASSIQUE



MUR AVEC PANNEAU  
THERMIQUE  
NON-VITRÉ

## **UTILISATION ET EXPRESSION DU SOLAIRE THERMIQUE VITRÉ**

Le solaire thermique vitré permet d'atteindre des rendements plus élevés. Nous estimons que le revêtement vitré de ces panneaux les prédispose à être intégrés avec le même langage que les vitrages.

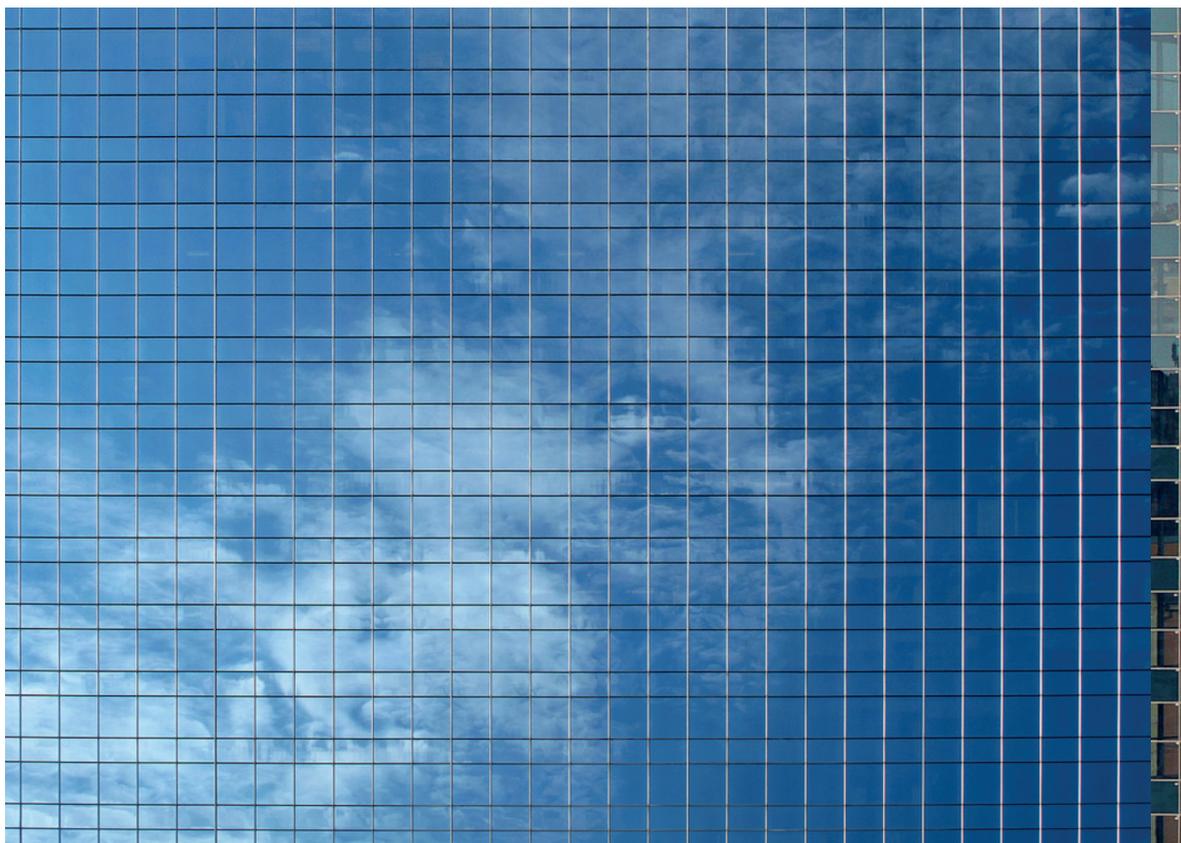
De nos jours, les bâtiments totalement vitrés font partie du paysage urbain. Personne ne les remet en cause alors que les panneaux solaires semblent être abhorrés. Or, ces bâtiments présentent souvent des parties opaques derrière le plan vitré. On pourrait très bien imaginer que ces parties opaques soient composées des panneaux solaires thermiques vitrés. Les panneaux vitrés se fondent ainsi très bien parmi les vitrages.



VARIANTE PANNEAUX  
SANS CADRE

PANNEAUX  
CLASSIQUE  
AVEC CADRE

VARIANTE PANNEAUX  
SANS CADRE





## **UTILISATION ET EXPRESSION DU PHOTOVOLTAÏQUE**

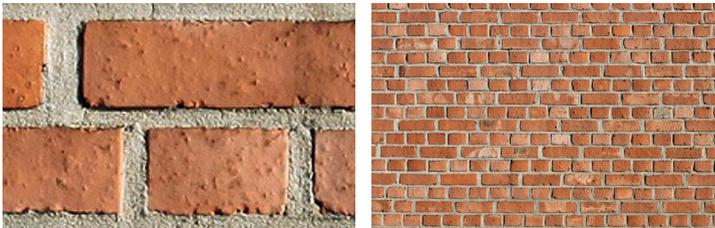
Contrairement aux panneaux solaires thermiques, les modules photovoltaïques offrent une flexibilité accrue dans la taille et la forme. Disponibles en surfaces rigides ou souples, ils peuvent être intégrés dans toutes les parties de l'enveloppe du bâtiment, c'est à dire aussi bien sur les parties opaques qu'en combinaison avec des vitrages. La très faible épaisseur de moins de un cm fait que dans certaines situations, le photovoltaïque est utilisable alors que le solaire thermique serait trop encombrant.

Le principal inconvénient des panneaux photovoltaïques réside dans leur couleur essentiellement bleue et leur texture particulière. Heureusement, de nombreuses innovations améliorent l'aspect esthétique de ces produits. L'EPFL a mis au point des verres de couleur qui permettent une intégration bien plus aisée. Récemment, le CSEM à Neuchâtel a même dévoilé un panneau blanc qui a un rendement de 10%, alors que les modules traditionnels les plus performants n'atteignent que 22%. Ces produits sont donc spécialement développés avec comme priorité l'aspect formel, afin de faciliter leur intégration.



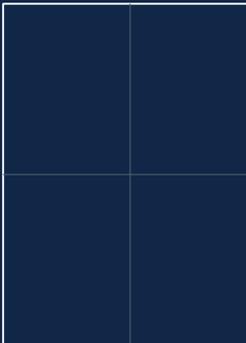
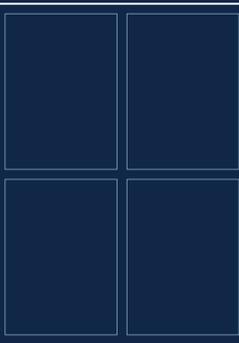
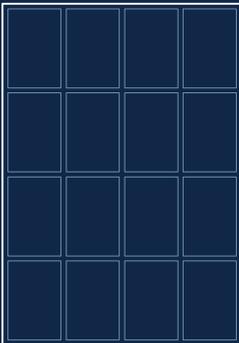
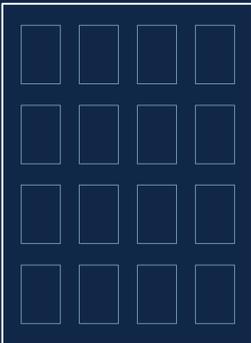
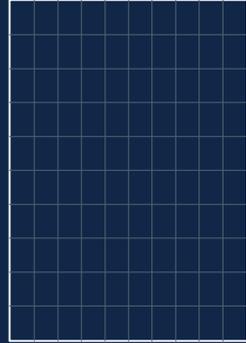
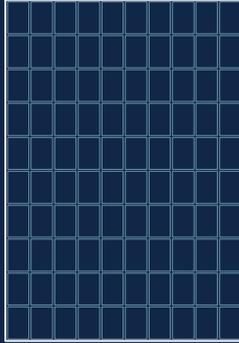
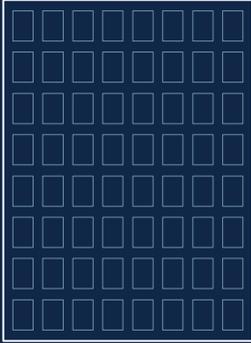
Dans la construction, le degré d'imprécision, que ce soit par rapport à la fabrication - à la main ou en usine- ou à la pose, est une quantité absolue. Si on considère l'exemple fictif de la pose de briques par un ouvrier donné, son imprécision serait une valeur absolue, soit ici de +/- 1 cm, quelle que soit la dimension des briques, des joints et du mur. Ainsi, pour un joint cible trop faible de 2 cm, l'imprécision fera varier la dimension du joint final entre 1 et 3 cm, soit une variation entre 100 à 300%. Alors que pour un joint cible de 6 cm, le joint final variera entre 5 et 7 cm, soit une variation entre 100 et 140% seulement. La conséquence sera une apparence beaucoup plus régulière et uniforme.

De plus, le schéma ci-contre illustre comment la variation de différents facteurs de proportion - entre joints, modules et nombre de répétitions - influence la perception d'uniformité du tout. A l'image du mur en brique ci-dessous, un plus grand nombre de répétitions augmente l'apparence d'uniformité du mur (rangée du haut ci-contre). Cela semble également être le cas pour une proportion relativement élevée de la taille du joint par rapport au module (colonne de gauche ci-contre), qui donne l'impression que le joint et le module forment un seul motif, alors que pour un joint trop faible, uniquement l'aspect d'interruption entre les modules ressort. Il est également possible de faire disparaître le joint (colonne de droite ci-contre), afin d'obtenir une surface lisse.



proportions joint / module

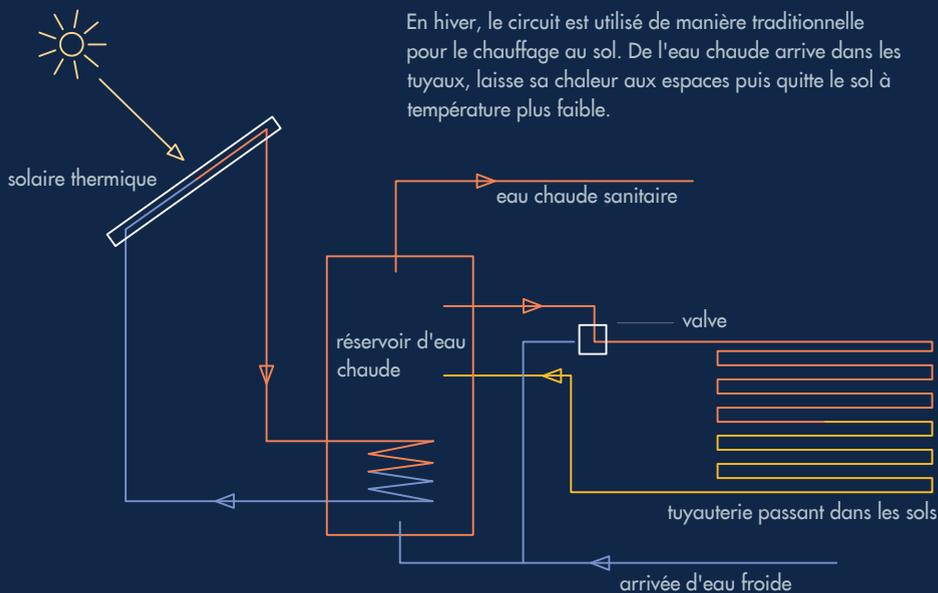
proportions module / façade



## **RAFRAÎCHISSEMENT EN ÉTÉ**

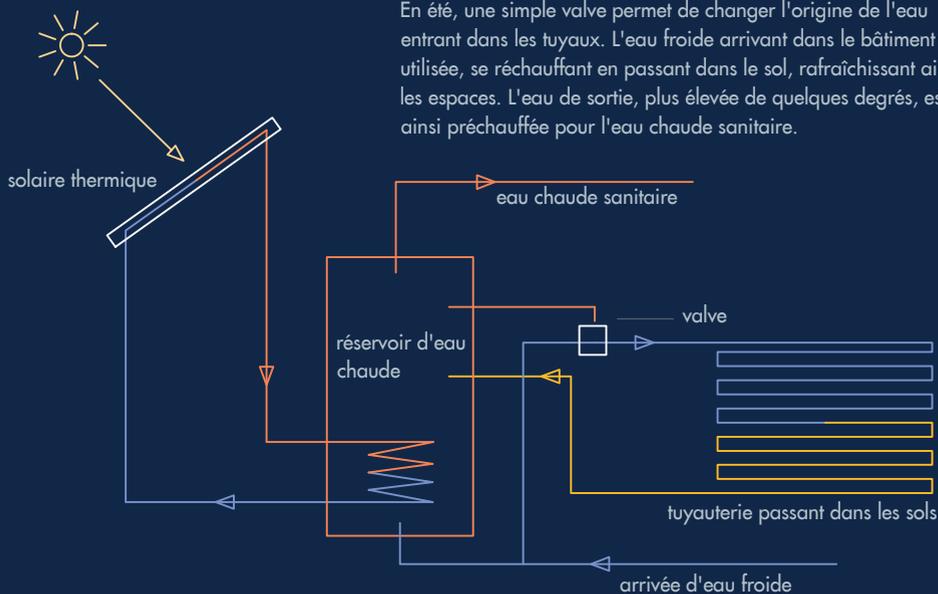
Aujourd'hui, les nouvelles constructions ont généralement un chauffage qui se fait par le sol. Le circuit existant peut également être utilisé afin de rafraîchir les pièces en été et la chaleur accumulée à travers le sol permet de préchauffer l'eau chaude sanitaire. Cette solution s'inscrit dans une démarche d'optimisation du bâtiment. En effet, pourquoi ne pas utiliser la chaleur extraite par les systèmes de refroidissement pour préchauffer l'air ou l'eau ?

## CHAUFFAGE EN HIVER



En hiver, le circuit est utilisé de manière traditionnelle pour le chauffage au sol. De l'eau chaude arrive dans les tuyaux, laisse sa chaleur aux espaces puis quitte le sol à température plus faible.

## RAFRAÎCHISSEMENT EN ÉTÉ



En été, une simple valve permet de changer l'origine de l'eau entrant dans les tuyaux. L'eau froide arrivant dans le bâtiment est utilisée, se réchauffant en passant dans le sol, rafraîchissant ainsi les espaces. L'eau de sortie, plus élevée de quelques degrés, est ainsi préchauffée pour l'eau chaude sanitaire.

## **ISOLATION NOCTURNE DES VITRAGES**

Pour maximiser les gains solaires passifs, de grandes surfaces vitrées orientées au sud sont nécessaires. Hors, une fois la nuit tombée, les vitrages n'apportent plus aucun gain solaire mais au contraire laissent une grande part de la chaleur s'échapper. En effet, même les vitrages les plus performants n'isolent pas aussi bien que les murs isolés actuels.

Au sud, l'utilisation de double vitrages au lieu de triple apporte une meilleure transmission solaire donc plus de gains. La différence de prix pourrait être investie dans des stores plus performants thermiquement, voire dans un système d'isolation nocturne des vitrages pour minimiser les pertes de nuit.





# *Conclusion*

Les besoins énergétiques du bâtiment peuvent être couverts en bonne partie par le rayonnement solaire en appliquant des principes simples. Le solaire thermique, qui est nettement plus rentable que le photovoltaïque, répond par exemple parfaitement aux exigences du chauffage, plus grand consommateur d'énergie.

L'utilisation du solaire en architecture pose la question de son intégration. Sa qualité se joue entre autres sur les finitions, les détails, les proportions, etc. De plus, pour que le solaire fasse partie intégrante du concept architectural, il faut impérativement qu'une réflexion soit présente dès le début du projet. Il faut donc traiter les stratégies solaires comme toute autre élément de la construction.

Pour l'instant, il est vrai que les produits solaires demeurent encore passablement contraignants. Leur fonctionnement nécessitant des conditions particulières, la liberté d'expression s'en trouve restreinte. De plus, un manque de produits conçus pour faciliter l'intégration subsiste. Cependant, certaines connaissances techniques peuvent aider à s'affranchir des contraintes, afin de se concentrer sur l'aspect formel. L'architecte a donc tout intérêt à s'y intéresser s'il veut maîtriser l'apparence de son bâtiment.

Les possibilités d'utilisation du solaire sont larges. En effet, bon nombre d'exemples et de solutions existent déjà. En essayant de les comprendre et de les analyser, il est possible de les réutiliser et même de proposer de nouvelles solutions. Ainsi, notre approche a par exemple montré qu'il est possible d'utiliser le solaire actif en se passant des produits technologiques offerts par les entreprises.

Malgré ces exemples, nous sommes frappés par le faible taux d'innovation chez les architectes, qui s'explique peut-

*“Nous n’héritons pas  
la Terre de nos parents,  
nous l’empruntons  
à nos enfants”*

- Antoine de Saint-Exupéry, 1939

être par le risque et le manque de garantie associés à toute expérimentation. Utiliser des produits connus et testés évite de nombreuses surprises par la suite.

L'architecture durable est aussi une opportunité de découvrir de nouveaux modèles architecturaux et d'élaborer de nouvelles stratégies de conception et de beauté.





# *Bibliographie*

5

## MONOGRAPHIES

GANZ, Christophe, Muller, A, *et al.* *Le Soleil - Chaleur et lumière dans le bâtiment.* Zürich, SIA. 1990

HEGGER, Manfred, FUCHS, *et al.* *Energy Manual: sustainable architecture.* Munich, Birkhäuser. 2008

HERZOG, Thomas, KRIPPNER, Roland & LANG, Werner. *Construire des façades.* Lausanne, PPUR. 2007

KNIPPERS, Jan, CREMERS Jan, *et al.* . *Construction Manual for Polymers + Membranes.* Munich, Birkhäuser. 2011

PERLIN John. *Let it shine : The 6,000-Year Story of Solar Energy.* Novato, New World Library. 2013

QUASCHNING, Volker. *Understanding Renewable Energy Systems.* London, Earthscan. 2005

ROULET, Claude-Alain. *Santé et qualité de l'environnement intérieur dans les bâtiments.* Lausanne, PPUR. 2008

ROULET, Claude-Alain. *Eco-confort pour une maison saine et à basse consommation d'énergie.* Lausanne, PPUR. 2012

THOMAS, Frank. *Protection thermique dans le bâtiment.* Zurich, Faktor Verlag. 2011

HOLLMULLER, Pierre, LACHAL, Bernard, *et al.* *Quels systèmes énergétiques pour le XXIe siècle? : Production.* Genève, CUEPÉ. 2000

ROULET, Claude-Alain. *Thermique du bâtiment: tout le confort avec peu d'énergie*. Polycopiés de l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne, LESO. 2000

MOREL, Nicolas & GNANSOUNOU, Edgard, *Energétique du bâtiment*. Polycopiés de l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne, ENAC. 2009

IEA SHC, *Solar Energy Systems In Architecture - integration criteria and guidelines*. Report T.41.A.2: Task 41 Solar energy and Architecture, 2012

MUNARI PROBST, Maria Cristina, *Architectural Integration and Design of Solar Thermal Systems*. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (thèse de doctorat en environnement). 2008

KISS CATHCART ANDERS ARCHITECTS, *Building Integrated Photovoltaics*.

## **SITES INTERNET**

<http://www.bfe.admin.ch/>

<http://www.energieplus-lesite.be>

[http:// www.solarpedia.fr](http://www.solarpedia.fr)

<http://www.swissolar.ch/>

## ICONOGRAPHIE

p 5. BP Statistical Review of World Energy, 2006.

p 7. Office fédéral de l'énergie

p 9. *Les Danaïdes*, John William Waterhouse, 1903

p 11. <http://www.alriti.com/sustainability> (Albert Righter and Tittman Architects)

p 15. <http://www.energieplus-lesite.be>

p 17. <http://clea-astro.eu/lunap/Revolution>

p 21. EPFL/LESO-PB

p 23. Munari Probst, *integration architecturale des systemes solaires actifs*

p 25. <http://cleantechnica.com/>

p 27. Kiss Cathcart Anders Architects, Building Integrated Photovoltaics.

p 29. IEA SHC, *Solar Energy Systems In Architecture - integration criteria and guidelines*

p 30-31. Daniel Rufer, *Electricité solaire : des faits contre les idées reçues*

p 35. IEA SHC, *Solar Energy Systems In Architecture - integration criteria and guidelines*

p 37. *ibid.*

p 40-41. *ibid.*

p 45. PACER, *Soleil et architecture – Guide pratique pour le projet*

p 61. <http://www.energieplus-lesite.be>

p 73. *ibid.*

p 83. HERZOG, Thomas, KRIPPNER, Roland & LANG, Werner. *Construire des façades*







