



Série Bricolage

Les capteurs solaires à air

Réaliser – Installer – Gérer

Guy Isabel

© Groupe Eyrolles, 2012, ISBN : 978-2-212-13403-2

EYROLLES



SOMMAIRE

Avant-propos	11
L'eau	13
Le vent	14
Le soleil	14
PARTIE 1	
INTRODUCTION À L'ÉNERGIE SOLAIRE	19
Le soleil, ses croyances, ses inventeurs	20
Les croyances	20
Les inventeurs	21
Le soleil et la Terre	24
L'énergie solaire	31
Constitution de l'atmosphère	31
L'aérothermie solaire	35
Un peu d'histoire... ..	35
Quelques expérimentations... ..	37
Première expérience : découvrir le coefficient d'absorption	38
Deuxième expérience : limiter les pertes thermiques	38
Troisième expérience : tester l'effet de serre	39
Quatrième expérience : choisir un matériau absorbeur naturel	39
Du corps noir à l'absorbeur	42
Soleil et vitrage	44
L'air, fluide caloporteur	48
Orienter le capteur	49

PARTIE 2

RÉALISATION D'UN CAPTEUR SOLAIRE À AIR 53

Construire un capteur à air 54

Le cadre du capteur 56

1. Préparation du bois 56

2. Assemblage du cadre 59

3. Équipement, finition du cadre 62

4. Fixations du cadre et conduits 64

Préparation des ouvertures 65

Mise en place et aménagements intérieurs 69

Chicanes et ardoises 72

Vitrage du capteur 75

La gestion estivale 79

Se protéger du soleil 79

Construire une protection solaire 81

Complément : l'albédo 84

Rafraîchissement estival 85

Les options électroniques 86

Solarimètre numérique 86

Principe du montage 87

Régulation de vitesse PWM 90

Principe du montage 91

Analyse du schéma électronique 92

Trappe automatisée 95

Réalisation mécanique 96

Module de commande électronique 98

Centrale à microcontrôleur 103

La programmation 108

À propos d'une alimentation photovoltaïque...	110
Le panneau solaire	110
La batterie	110
Le régulateur de charge solaire	110
PARTIE 3	
ANNEXES	113
Les bonnes adresses	114
Les liens utiles	114
Les fournisseurs de matériels...	115
Bibliographie	116
Index	117

AVANT-PROPOS

Nul n'ignore plus, de nos jours, que la surexploitation des ressources fossiles de notre planète, ajoutée à la hausse constante de la démographie, laisse entrevoir à plus ou moins brève échéance une crise énergétique majeure. Pour ne rien arranger, des changements climatiques dus aux émissions de gaz à effet de serre (GES), des pollutions diverses, des déchets nucléaires dont on ne sait que faire, appellent à une réorganisation radicale et urgente de la filière énergétique mondiale.

L'Environnement est devenu une priorité, une obsession même, et les scientifiques, politiques, et responsables mondiaux de tout genre cherchent à instaurer par leur réflexion un ordre nouveau dans ce domaine. Rappelons-nous des différents Sommets de la Terre, de 1972 à Stockholm, en passant par Kyoto, Rio à nouveau en 2012. Dans notre quotidien déjà, les pollueurs seront les payeurs : bonus-malus à propos des véhicules neufs, campagnes de sensibilisation pour le tri et la gestion des déchets (puce électronique dans la poubelle pour une incitation financière personnalisée). Toute une panoplie d'aides et de crédits d'impôts pour des économies d'énergie réelles : prêts à taux zéro, classes énergétiques du gros électroménager (A, A+) Haute qualité environnementale pour les constructions neuves (HQE), bilan et taxe carbone, notions de négawatts... L'énergie la moins polluante étant bien celle que l'on ne consomme pas, nous nous faisons les témoins, ces dernières années de diverses campagnes d'économies d'énergie, d'une véritable chasse au gaspillage énergétique...

On a pu constater la suppression progressive des lampes à incandescence, à commencer par les plus puissantes au profit des lampes dites à économie d'énergie (les lampes fluocompactes, dont le recyclage doit être organisé), et le choix de plus en plus important de lampes à leds qui offrent une consommation encore plus réduite et une durée de vie très importante.

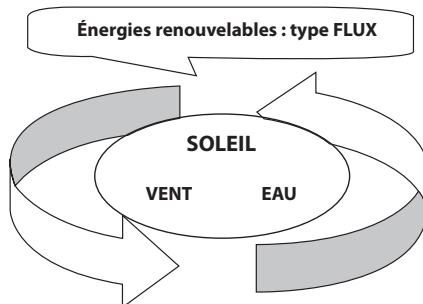
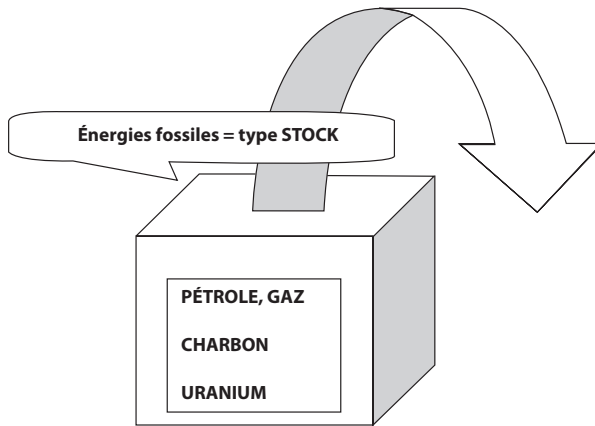
Jamais sans doute dans son Histoire, l'Homme n'a ressenti aussi fortement le besoin impératif de changer les habitudes du passé. Déjà, Augustin Mouchot, un inventeur français d'applications solaires entrevoyait l'épuisement des énergies fossiles : « Si dans nos climats, l'industrie peut se passer de l'emploi direct de la chaleur solaire, il

arrivera nécessairement un jour, où, faute de combustible, elle sera bien forcée de revenir au travail des agents naturels. Que les dépôts de houille et de pétrole fournissent longtemps encore leur énorme puissance calorifique, nous n'en doutons pas. Mais les dépôts s'épuisent sans aucun doute... pourquoi n'en serait-il pas de même un jour d'une provision de combustible où l'on puise si largement sans jamais combler les vides qui s'y forment ? On ne peut s'empêcher de conclure qu'il est prudent et sage de ne pas s'endormir à cet égard sur une sécurité trompeuse. »

C'était en 1869 !

Une clairvoyance restée lettre morte pourtant par l'industrie du siècle dernier.

Et si les énergies renouvelables représentaient la solution à la crise énergétique ? Elles sont quasiment inépuisables et gratuites, quoique variables selon les latitudes et les saisons. Elles sont, bien entendu, non polluantes dans leur exploitation, et généralement présentes en tous points du globe, évitant des conflits liés à leur approvisionnement.



Notion de Stock
ou Flux

Elles sont de nos jours largement sous-exploitées. Pourtant, ces solutions écologiquement intéressantes devront s'intégrer dans une démarche qui privilégie l'humain pour accomplir une révolution sociale autant que technologique.

Jetons un rapide coup d'œil sur ces énergies de l'avenir, que nous offre la Nature depuis toujours, et qui s'intègrent si parfaitement dans le terme de développement durable, que nous pourrions traduire également par « énergies qui assurent les besoins des générations actuelles, sans compromettre ceux des générations à venir ».

Si les énergies fossiles sont plutôt des énergies de type **Stock** (charbon, pétrole, gaz, uranium), donc amenées à s'épuiser on pourra qualifier les énergies renouvelables d'énergies de type **Flux**, qui se renouvellent en permanence au fil des jours, des saisons ou de cycles bien définis. Elles émanent du soleil, de l'eau, du vent ou encore de la biomasse. Pas ou peu de pollution donc, et l'utilisation du bois comme combustible dans le cadre d'une exploitation raisonnée du patrimoine forestier permet d'affirmer que, dans ce cas, les émissions de CO₂ sont considérées comme neutres, si l'on tient compte du carbone réutilisé lors de la croissance des arbres. Biomasse et géothermie ne sauraient se passer totalement de systèmes électriques, et nous semblent donc peu enclins à mériter entièrement l'appellation renouvelable.

L'eau

L'énergie hydraulique produit depuis fort longtemps déjà de l'électricité à partir de l'énergie cinétique. Au fil de l'eau pour des fleuves avec un débit important ou moyennant un barrage ; avec des volumes artificiels de retenue constituant des réserves potentielles en cas de besoin immédiat. Notons que l'eau peut être « remontée » par pompage aux heures ou périodes de faible consommation, puis être turbinée à la demande (c'est bien là une façon astucieuse de stocker l'énergie électrique). L'usine marémotrice de la Rance dans la baie du Mont St Michel exploite depuis 1967 la puissance hydraulique des marées à fort coefficient, dans un sens, puis dans l'autre par inversion des turbines. Des projets plus sophistiqués sont régulièrement étudiés pour une implantation en pleine mer.

Exemples

En 2010, le projet SEM-REV, site d'expérimentation en mer va tenter de profiter de l'énergie des vagues, à 20 km au large de la pointe du Croisic. Ce site bénéficiera d'instrumentation océanographique de mesure, d'une infrastructure électrique reliant le système à la côte (câble de puissance), et un local pour l'accueil des équipements de réception, de suivi et de contrôle du système en cours d'expérimentation depuis la terre. Pour plus d'informations, consultez le lien www.semrev.fr.

Le 19 octobre 2011, EDF vient d'immerger au large de l'île de Bréhat sa première hydrolienne, d'une puissance de 0,5 MW. (voir www.meretmarine.com).

Le vent

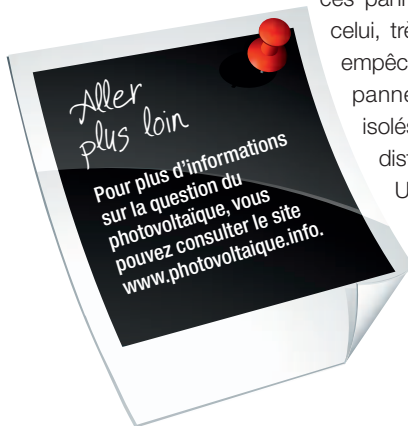
L'énergie éolienne exploite, dans les régions suffisamment balayées, la puissance du vent à l'aide d'éoliennes de plus en plus puissantes, constituant des parcs éoliens sur le territoire proche des côtes généralement ou en mer (parc offshore). Des puissances de l'ordre de 2 MW par machine sont courantes, pour des hauteurs dépassant souvent la centaine de mètres. Un couplage sur le réseau 20 kV est assuré moyennant adaptation, régulation et synchronisation.



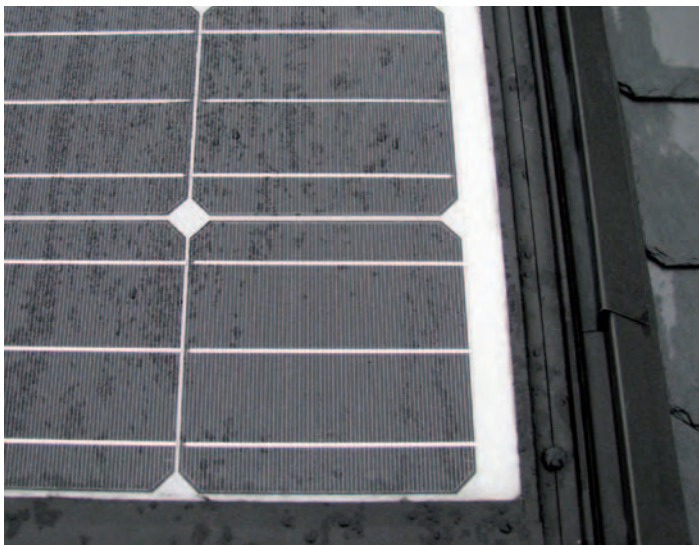
Éolienne de 2 MW

Le soleil

L'énergie solaire active, omniprésente aujourd'hui, permet des applications différentes : le solaire photovoltaïque produit directement de l'électricité (sous forme de courant continu), à partir de modules électroniques exposés correctement à la lumière du soleil. Ils garnissent de plus en plus les toits de nos maisons, en raison sans doute de la forte incitation financière qui oblige EDF à racheter cette énergie électrique au prix fort. Toutefois pour les particuliers, la puissance maximale est limitée à 3 kWc. Le rendement énergétique de ces panneaux n'est pas très élevé, mais n'oublions pas que celui, très modeste aussi, des moteurs à explosion, n'a pas empêché le développement de l'industrie automobile. Ces panneaux alimentent en énergie électrique des sites isolés ou des populations non connectées à un réseau de distribution fiable.



Une autre filière de l'énergie solaire consiste à produire directement de la chaleur avec de l'eau, de l'air ou même de la vapeur pour les très hautes températures dans les centrales thermodynamiques. Dans ce dernier cas, le rayonnement du soleil est concentré en un foyer unique à l'aide de miroirs orientables ; la vapeur produite sera utilisée dans des turbines identiques à celles que l'on trouve dans les centrales



Panneau photovoltaïque sur un toit en ardoises

thermiques classiques, pour entraîner les alternateurs de puissance. Le capteur solaire thermique bien connu (capteur plan vitré ou tubes à vide) servira à produire l'eau chaude sanitaire dans un chauffe-eau particulier (CESI), utilisant comme fluide caloporteur souvent de l'eau glycolée en raison du risque de gel dans les panneaux capteurs exposés au soleil. On trouve également de plus en plus un mode de chauffage par le sol, à basse température, au moyen de conduits noyés dans le béton, nommé Plancher solaire direct (PSD). Une installation complète est fort complexe et se doit d'être en adéquation avec le bâtiment à chauffer, qui idéalement doit s'inscrire dans une démarche bioclimatique (isolation, orientation, protection estivale, stockage). L'investissement est conséquent, mais rentable sur le long terme et adapté à l'évolution des ressources énergétiques des années à venir. Souvent, sous nos régions, cette énergie solaire seule ne saurait couvrir tous les besoins et sera utilisée parfois avec l'appoint d'autres sources, fossiles bien sûr, ou par un chauffage au bois bien conçu.

La chaleur du soleil nous parvient à travers les couches de l'atmosphère, donc de l'air. L'énergie solaire reçue sur la Terre en une année équivaut environ à 10000 fois la quantité totale d'énergie consommée par l'ensemble de l'humanité sur la même période ! Or, malgré ses faibles caractéristiques thermophysiques, l'air peut facilement être utilisé comme fluide caloporteur, dans un système insolateur, vitré ou non. Il est donc capable de contribuer directement au chauffage partiel des locaux, au préchauffage des systèmes de ventilation ou encore au séchage de nombreux produits agro-alimentaires.

L'habitation bioclimatique exploite et favorise l'accumulation de la chaleur solaire dans des masses solides ou liquides et utilise la thermo circulation naturelle ou forcée de l'air,

comme c'est le cas par exemple pour le mur Trombe. Des capteurs aérothermiques vitrés (disposés sur la façade sud de préférence) peuvent réchauffer l'air extérieur pour l'insuffler ou élever la température ambiante des pièces d'habitation. Le Canada, chef de file dans la technologie du chauffage à air chaud, a inventé un système de capteur perforé non vitré, qui couvre les façades de nombreux bâtiments, et ce avec une durée de vie très longue en raison du peu d'entretien que nécessite ce procédé (procédé Solarwall).

Nous pensons qu'avec le chauffage solaire à air chaud, il y a matière à réduire considérablement la facture du chauffage des particuliers, et plus particulièrement de ceux qui occupent une habitation déjà ancienne ou non adaptée à des travaux importants de PSD. L'objet de notre ouvrage est justement de décrire et de justifier le choix de cette application solaire, peu prisée en France – il nous faut bien le reconnaître. Et pourtant, la simplicité de mise en œuvre de cette technologie autorise une personne motivée et pas trop maladroite à une autoconstruction totale. Et il n'est point utile de disposer d'un outillage particulier ou de composants coûteux ou introuvables. Bien entendu, on trouve sur le marché quelques offres de panneaux solaires à air, prêts à poser.

Les avantages des panneaux aérothermiques sont fort nombreux, surtout en les comparant à ceux qui font appel à un fluide caloporteur liquide. Jugez plutôt :

- Fiabilité élevée, due à la conception simple du capteur, sans aucune pièce mobile.

(« La simplicité est la sophistication suprême » disait Léonard de Vinci).

- Pose verticale aisée en façade sud dans l'idéal. Un léger décalage est ou ouest, ne diminue pas notablement le rendement. Démontage possible à l'occasion.

Cette verticalité solutionne en partie la surchauffe estivale.

- Rendement élevé, de l'ordre de 1000 W/m² pour un ensoleillement suffisant.

- Pas de fuites, ni de protection à prévoir contre le gel. Un épisode neigeux n'a aucune incidence sur son fonctionnement, au contraire même, car le sol blanc améliore l'albédo, donc la réflexion des rayons solaires.

- Introduction d'une petite inertie quant à la restitution de la chaleur accumulée, en raison de l'utilisation d'un absorbeur particulièrement bien adapté à cet usage (prix, aspect, capacité et effusivité thermique). Le matériau naturel utilisé présente en outre une couleur sombre qui dispense de le revêtir d'une peinture ou d'un traitement plus ou moins toxique.

- Coût très réduit, le vitrage trempé pouvant être remplacé par une plaque de polycarbonate alvéolaire, si l'esthétique n'est pas un critère prioritaire.

- Auto-construction aisée, outillage très ordinaire pour la partie capteur.

- Amortissement très rapide et durée de vie très longue si les composants choisis sont prévus pour l'extérieur (30 ans ou plus sans intervention).

- Peu ou pas d'entretien (vitrage, filtre à air pour les poussières à l'entrée dans la pièce à chauffer).

- Automatisation totale possible par gestion électronique et trappe motorisée sur l'air chaud pour éviter l'inversion de flux nocturne.



Capteur thermique pour CESI

- Réglage éventuel de la température récupérée par action sur la vitesse, donc sur le débit d'un ventilateur externe de très faible puissance.
- Possibilité d'utiliser un dispositif photovoltaïque complet (capteur, régulateur, batterie 12 volts) afin de disposer d'une autonomie totale pour la commande électronique de l'insolateur.
- Une gestion astucieuse des flux d'air peut éventuellement contribuer à rafraîchir une pièce en période estivale. Un ensoleillement excessif pourra être fortement atténué par une évacuation supérieure sur le capteur, lui-même protégé par un dispositif brise-soleil adapté (latitude du lieu et saisonnalité).

Le point de vue de l'auteur

J'ai installé depuis plus de 25 ans un panneau de ce type, à titre expérimental, pour apporter un appoint solaire à une pièce orientée plein sud, de 12 m² environ. Le chauffage intégré par convecteur à thermostat électronique est alimenté par un double tarif EDF HC/HP. On a pu largement constater que le réglage à 15 °C environ du thermostat du convecteur électrique permet au capteur placé en façade de se comporter en quelque sorte comme un multiplicateur de chaleur, grâce notamment à la convection naturelle de l'air chaud. Et le système de ventilation à double flux de la maison n'est pas beaucoup perturbé par cet apport solaire.

On trouvera dans les chapitres suivants tous les détails pour la réalisation pas à pas de ce type de capteur, photos à l'appui. Une partie électronique présentera divers montages utiles à la gestion et surtout à l'automatisation de cette application solaire (solarimètre, thermostat à hystérésis pour la commande de trappe anti-retour, réglage PWM du petit ventilateur à courant continu, centrale de pilotage compacte à microcontrôleur pour un panneau aérothermique autonome). Une alimentation 12 volts par panneau photovoltaïque sera évoquée, le soleil restant dès lors le seul acteur de notre capteur aérothermique avec une énergie totalement renouvelable !



1

PARTIE

INTRODUCTION

à l'énergie solaire

Le soleil, ses croyances, ses inventeurs

Les croyances

Le soleil, source de lumière et de chaleur, de puissance, de vie et de mort, a été vénéré très tôt dans l'Histoire des civilisations, sous des noms et des formes très différentes.

Le dieu Soleil babylonien ou Shamash, est représenté symboliquement par une roue à rayons. Dans la mythologie égyptienne, Rê ou Râ est le grand Dieu du soleil, divinité principale avec une tête de faucon surmontée du disque solaire.

Les Grecs vénéraient Hélios, jeune homme d'une grande beauté, à la chevelure d'or, comme les rayons du soleil qu'il est sensé personnifier. Hélios fût éclipsé par Apollon (Dieu du soleil), que les Romains adoptèrent sous le nom de Phoebus. À noter que l'équivalent romain d'Hélios est Sol.



Dieu Râ



Le Roi Soleil

Inti est la manifestation inca du soleil, et cette force fût reconnue par bon nombre de peuples andins. Ceux-ci croyaient devoir nourrir leur Dieu solaire de sang et de cœurs humains, afin de le voir réapparaître le lendemain à l'Est. Il était représenté par un disque solaire à face humaine, entouré de rayons lumineux. De nos jours encore, le Japon est appelé « Pays du soleil levant ». Le drapeau japonais est précisément composé d'un cercle rouge sur un fond blanc, adopté officiellement en 1870. Chaque année, des milliers de Japonais se retrouvent à l'aube du jour de l'an pour claquer deux fois dans les mains, quand le soleil apparait, espérant ainsi s'attirer les bonnes grâces divines.

Nous en terminerons par une évocation de Louis XIV le Grand, dit le Roi Soleil, qu'il avait choisi pour emblème. C'est l'astre qui donne vie à toute chose, symbole de l'ordre immuable et de la régularité. La couleur de l'or lui convient parfaitement, et ce luxe est omniprésent à Versailles. De plus, il se lève et se couche au vu et au su de tous. De même, Louis XIV sera lui le Soleil rayonnant sur son royaume, permettant aux courtisans d'assister à toutes les étapes de sa journée. Il ira jusqu'à apparaître habillé en Soleil lors d'une fête à la Cour.

Les inventeurs

Voici une liste non exhaustive de quelques personnages plus ou moins connus, qui ont contribué à leur manière et dans leur domaine à faire avancer nos connaissances du soleil et de ses applications...

Socrate (470-399 avant J.-C.)

On admet généralement que ce philosophe grec a enseigné la construction bioclimatique en faisant orienter au Sud les maisons, avec une bonne gestion des zones d'ombre l'été, et une pénétration solaire plus profonde en hiver, en raison d'un angle plus réduit sur l'horizon. L'architecture des cités de l'époque instituait donc un véritable droit au soleil.

Archimède (287-212 avant J.-C.)

Ce célèbre mathématicien aurait réussi à concentrer les rayons du soleil à l'aide de miroirs géants, pour incendier les navires romains lors du siège de Syracuse. On peut néanmoins en douter, car à cette époque, seuls des miroirs en bronze poli étaient utilisés. L'expérience renouvelée en 2006 n'a jamais été très probante. Nous en conservons l'idée, en admettant tout de même que la concentration des rayons solaires peut dans certaines conditions, aboutir à une très forte élévation de température, comme le prouveront plus tard Lavoisier et plus près de nous Mouchot et Trombe.

Nicolas Copernic (1473-1543)

Ce chanoine polonais fût convaincu très jeune que notre terre n'occupait pas le centre du monde, comme on l'affirmait à l'époque. Il publia en 1543, juste avant sa mort, son traité d'héliocentrisme, où le soleil est le centre de l'univers. Et la terre n'est plus qu'une planète parmi les autres, qui fait sa révolution solaire en une année tout en tournant sur son axe.

Isaac Newton (1642-1727)

Cette figure emblématique du monde scientifique donna en 1669 une théorie de la décomposition de la lumière blanche. Il mit en évidence la notion de longueur d'onde liée à la couleur, à l'aide d'un prisme.

Horace Bénédict de Saussure (1740-1799)

Ce physicien suisse est considéré comme l'inventeur de la « boîte chaude » en 1767. Il s'intéressa à l'effet de serre au moyen de vitrages superposés et de ce fait son invention est considérée, à juste titre d'ailleurs, comme le précurseur du capteur solaire plan. Nous aurons l'occasion de lui rendre hommage plus loin, notre réalisation n'étant qu'une version améliorée de sa « boîte chaude » nommée héliothermomètre.

Antoine Laurent de Lavoisier (1743-1794)

Plus connu sans doute comme chimiste, il réalisa pourtant en 1774 un premier four, en concentrant les rayons solaires à l'aide de lentilles convergentes. Il réussit à fondre des métaux, dont le platine à 1800 °C.

Joseph Fourier (1768-1830)

Mathématicien et physicien français, il est surtout célèbre grâce à la série et à l'intégrale qui porte son nom. Mais son œuvre *Mémoire sur les températures du globe terrestre et des espaces planétaires*, publié en 1824, nous concerne au plus haut point. Il interpréta scientifiquement les expériences de H.-B. de Saussure, et jeta les bases de la compréhension des équilibres thermiques qui régissent notre atmosphère. Il aborde la notion de chaleur obscure que nous dénommons de nos jours sous le terme d'ondes infrarouges. Il décortique parfaitement le fonctionnement du capteur plan décrit dans cet ouvrage et précise le rôle du vitrage dans la création de l'effet de serre et la capture des calories solaires.



Antoine Becquerel (1788-1878)

L'effet photovoltaïque, c'est-à-dire la conversion de la lumière directement en électricité est l'une de ses découvertes en 1839. Il nous faudra attendre un siècle de plus pour voir se développer vraiment cette énergie photovoltaïque, alimentant notamment les premiers satellites en énergie. Gageons que de nos jours nombreux sont les heureux propriétaires de toits solaires PV ignorant le nom de cet illustre français, dont le petit-fils Henri, a découvert la radioactivité. Quelle famille !

Augustin Mouchot (1835-1912)

Dès 1860, ce professeur de mathématiques présentait que le charbon viendrait inévitablement à manquer un jour en Europe. Il inventa un système de poursuite solaire avec un capteur à concentration, présenté à l'exposition universelle de Paris en 1878. Il expérimenta nombre d'applications de cuisson solaire, et prouva que l'énergie solaire peut être convertie en force motrice.

Arthur Brown (1900-1993)

Cet architecte américain est considéré comme le créateur de l'architecture solaire moderne. Sa maison à Tucson, en Arizona, est quasiment la première maison solaire passive, avec une façade vitrée sud sur un mur plein faisant office de masse thermique, sans oublier un toit prolongé pour se prémunir du soleil en été. Rappelons que le double vitrage a été commercialisé vers 1935 sous le nom de « thermopane ».

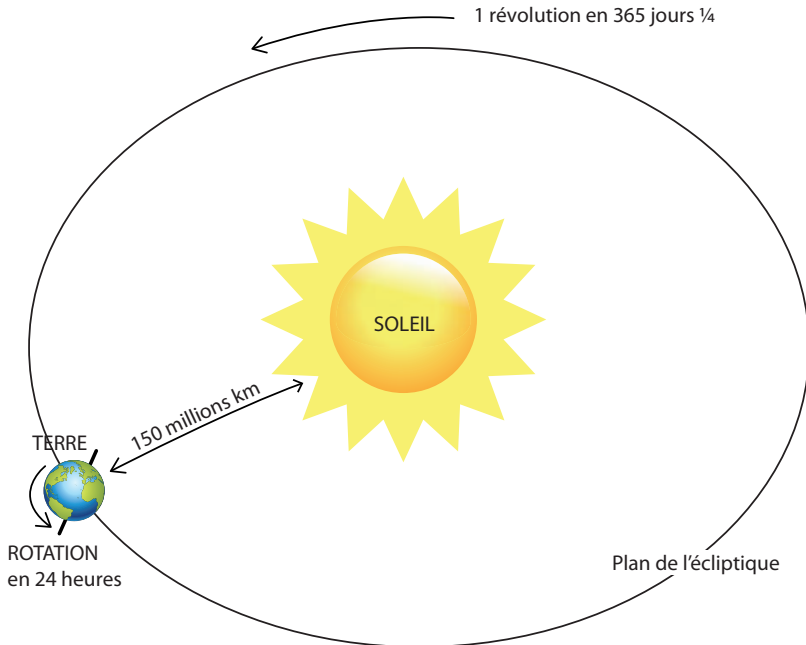
Félix Trombe (1906-1985)

C'est là l'un des pionniers français du solaire et son nom reste souvent associé au mur massif peint en noir, qui derrière un vitrage vertical accumule le rayonnement solaire du jour pour le restituer progressivement la nuit. Il est plus connu encore pour ses travaux sur les très hautes températures liées à l'énergie solaire. Il est à l'origine de plusieurs fours solaires dont celui d'Odeillo à Font-Romeu dans les Pyrénées. D'une puissance de 1000 kW, cette réalisation spectaculaire est utilisée exclusivement à des fins scientifiques sur la résistance des matériaux.

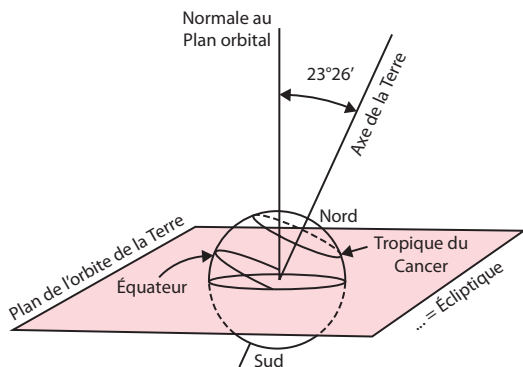
Le soleil et la Terre

Le soleil est l'étoile la plus familière dans notre ciel et il est probablement plus ancien que notre Terre, puisqu'âgé d'environ 4,6 milliards d'années. Sans lui, il est évident que notre planète ne serait qu'un rocher galactique glacé. Et la température de 6000 °K de l'astre éclairé et réchauffe aisément celle-ci et pour de très nombreux millénaires encore.

La Terre effectue donc une révolution autour du soleil, selon une trajectoire assez proche d'un cercle (plan de l'écliptique ou orbite de la terre). La distance Terre-soleil est approximativement de 150 millions de kilomètres, et il faut 8 minutes à sa lumière ou énergie pour nous parvenir ! Ce tour complet dure 365 jours et $\frac{1}{4}$, ce qui correspond bien à notre année. On comprend immédiatement que tous les 4 ans une année bissextile de 366 jours permet de compenser 4 fois le retard de $\frac{1}{4}$ de jour qui s'accumule.



Trajectoire de la terre



Inclinaison de la terre

Cependant, la Terre réalise également une rotation sur elle-même quasiment en 24 heures (jour sidéral), soit une journée formée d'une partie éclairée ou jour et d'une autre partie non éclairée, la nuit. De plus, l'axe de rotation de la Terre n'est pas perpendiculaire au plan de rotation autour du Soleil, mais forme un angle de quelque 23,5 degrés. On peut dire également que le plan équatorial qui coupe notre globe terrestre en deux parties

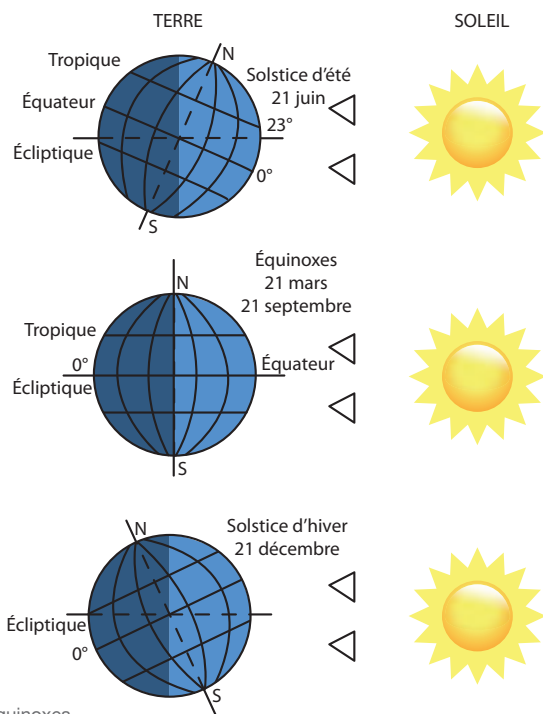
égales est lui aussi décalé de cet angle. Nous résumons cette géométrie spatiale dans la figure suivante :

Cette inclinaison provoque deux phénomènes importants concernant la durée du jour et de la nuit :

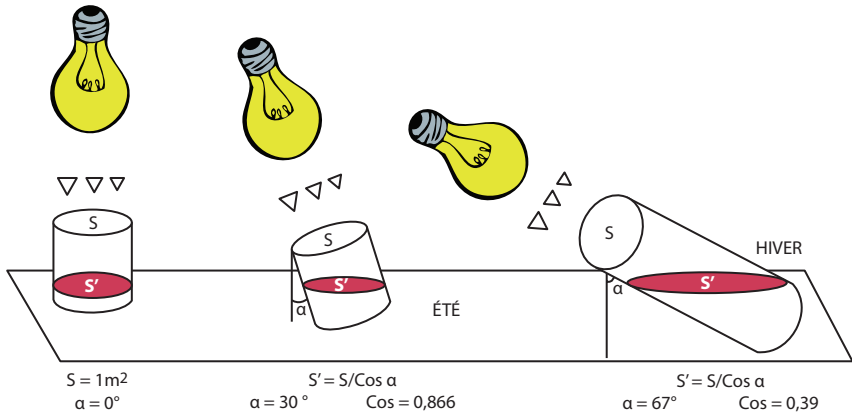
- elle n'est pas régulière,
- elle change au cours de l'année.

Seulement aux équinoxes de printemps (21 mars) et d'automne (21 septembre) à midi, partout sur le globe le jour et la nuit sont de durée égale. Chacun sait bien qu'en été le soleil est présent plus longtemps. A contrario en hiver il fait nuit de bonne heure.

Toujours en raison de l'inclinaison variable des rayons solaires, nous sommes soumis à des saisons : pour un éclairage estival, alors que le soleil est haut, la surface couverte par l'énergie solaire est plus petite, donc il fait bien plus chaud. Inversement en hiver la surface couverte est bien plus grande, et donc le sol terrestre reçoit moins d'énergie par mètre carré. Il fait évidemment plus froid. (Ou encore la densité de chaleur est plus faible !)



Solstices et équinoxes



Hiver et été

Au cours de l'année, pour un observateur sur terre, la direction du lever et du coucher du soleil, ainsi que sa hauteur au zénith (au plus haut dans le ciel) varient constamment. En fait, les trajectoires observées dépendent également pour beaucoup de la latitude du lieu d'observation.

La position du soleil au cours de l'année nous intéresse au plus haut point. En effet, en admettant que l'on dispose d'une façade verticale orientée plus ou moins plein sud, c'est sur celle-ci que sera fixé notre capteur aérothermique. Il recevra dès le matin l'énergie solaire qui débute sa course vers l'Est pour s'élever (plus ou moins selon les saisons) et disparaître le soir en direction de l'ouest. La hauteur maximale du soleil est différente en été et en hiver, mais on emploie encore volontiers l'expression « il est midi au soleil » pour le soleil culminant. Sa hauteur se détermine aisément selon la latitude du lieu considéré.

Au solstice d'été, donc le 21 juin, l'angle d'inclinaison de l'axe des pôles est maximal par rapport aux rayons solaires.

Suivons l'exemple

Nous prendrons pour tous nos exemples la latitude de Cholet, en Pays de Loire, à savoir 47 degrés 04 minutes Nord.

Une petite explication s'impose à propos de cette latitude, qui avec la longitude permet de situer tout point sur notre planète (voir coordonnées GPS !). Il s'agit d'un angle mesuré en degrés, minutes et secondes d'arc ; sur le globe terrestre, les lignes de latitude sont en quelque sorte des cercles concentriques à celui de l'équateur, habituellement placé à la latitude 0° comme référence. Ces cercles se réduisent en allant vers les pôles, placés à 90° dans l'hémisphère nord, le notre, et à -90° pour l'hémisphère sud. On peut encore imaginer que la latitude d'un point sur terre représente l'angle (défini par la lettre grecque alpha = α) que forme ce point avec le centre de la terre par rapport au plan de l'équateur.

Dans notre cas

À Cholet toujours, il vaudra donc :

$$H = 90^\circ - (\text{angle de la latitude}) + \text{inclinaison de la terre}$$

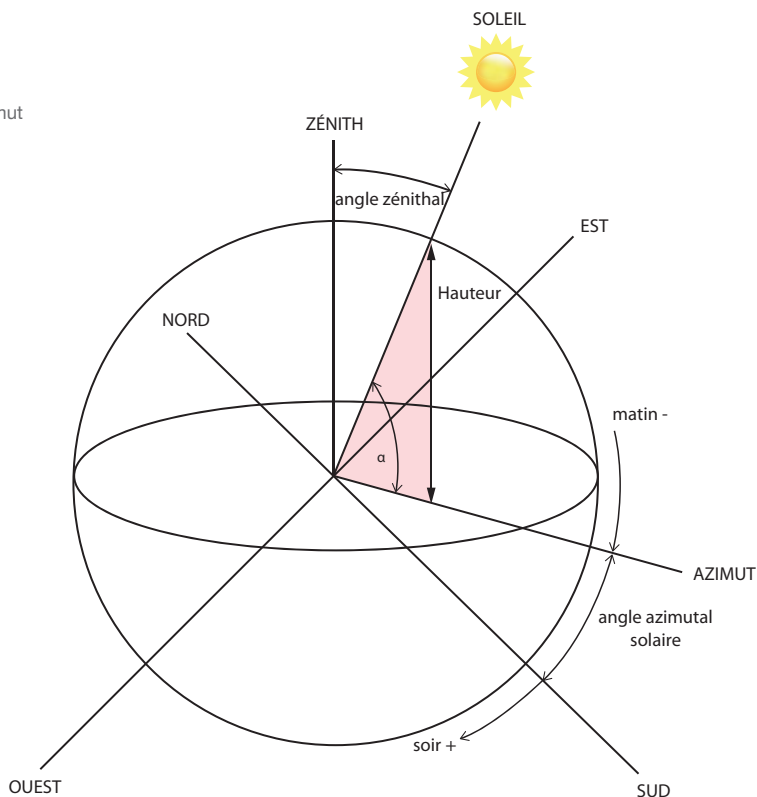
$$H = 90^\circ - 47^\circ + 23,5^\circ = 66,5^\circ. \text{ Le soleil est haut en été.}$$

Au solstice d'hiver, le 21 décembre, l'angle de la terre est inversé, la hauteur maximale vaudra donc :

$$H = 90^\circ - \text{latitude} - \text{inclinaison de la terre}$$

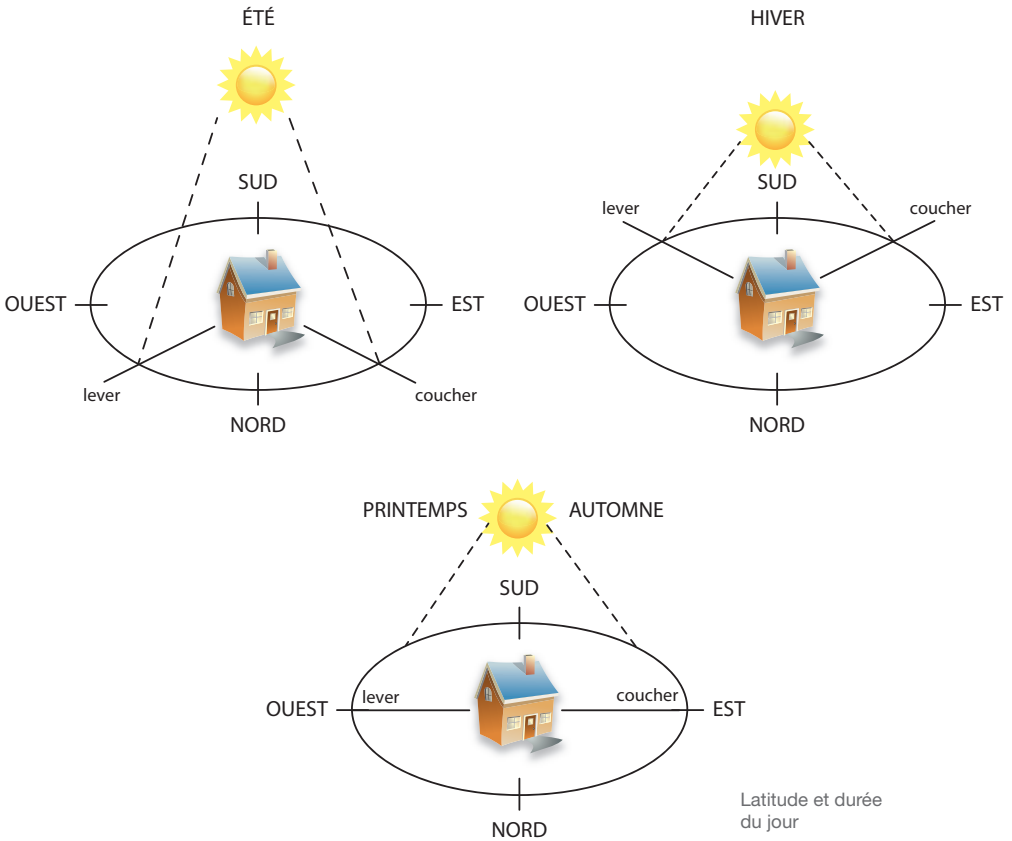
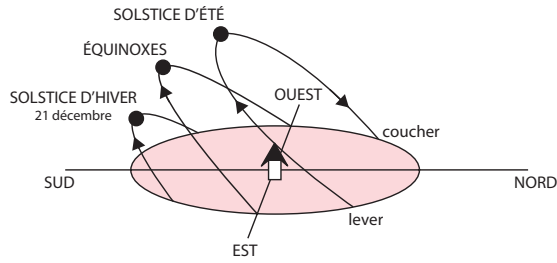
$$H = 90^\circ - 47^\circ - 23,5^\circ = 19,5^\circ. \text{ Le soleil est bas sur l'horizon en hiver.}$$

Zénith et azimut

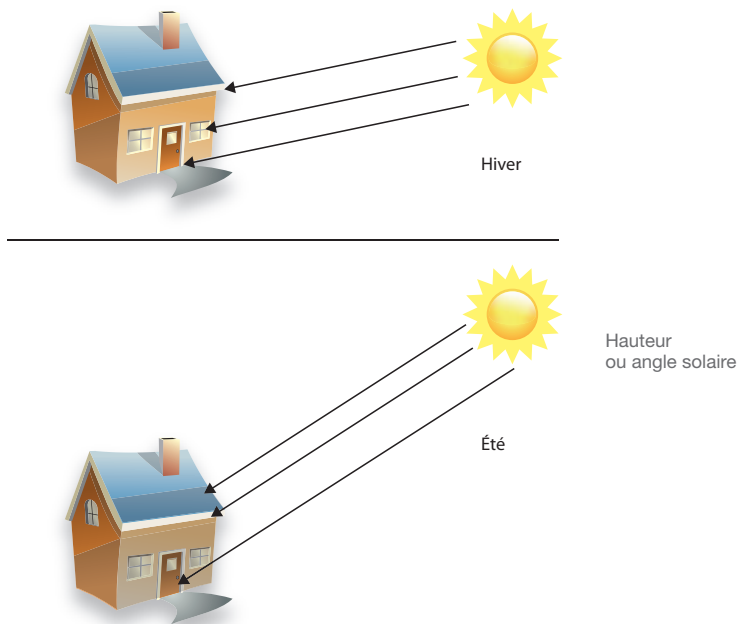


À noter, aux équinoxes de printemps (21 mars) et d'automne (21 septembre), au zénith, le rayonnement solaire est perpendiculaire à l'équateur. La hauteur solaire est donc simplement égale à l'angle complémentaire de la latitude.

$$H = 90^\circ - 47^\circ = 43^\circ$$



Nous exploiterons cette variation angulaire pour capter un maximum d'énergie en hiver, c'est-à-dire en disposant notre insolateur le plus perpendiculairement possible aux rayons solaires, mais pratiquement à la verticale sur la façade Sud. Il va sans dire qu'en été, le capteur devra, autant que faire se peut, être ombragé, et la position haute du soleil lui évitera une surchauffe inutile, avec un pare-soleil ou protection complémentaire si nécessaire.



La durée du jour est simplement l'intervalle qui sépare le lever et le coucher du soleil ; cette durée dépend bien entendu de la latitude du lieu considéré et du jour de l'année. On trouve approximativement pour nous une durée de jour de 15 heures 55 minutes autour du 21 juin, alors que celui-ci ne dure que 8 heures et 30 minutes le 21 décembre.

Toujours à Cholet, aux équinoxes où le jour et la nuit sont sensiblement de même durée, on calcule 12 heures et 16 minutes. On pourra constater lors des bulletins météorologiques journaliers le gain ou la perte de temps, en minutes, dans l'éphéméride.



Un outil incontournable

Nous vous proposons de consulter et d'exploiter un petit logiciel canadien épatant, disponible gratuitement sur le Web, en n'hésitant pas à rentrer les coordonnées exactes de votre recherche avant de faire apparaître les résultats et la courbe correspondante. (www.ptaff.ca/soleil)

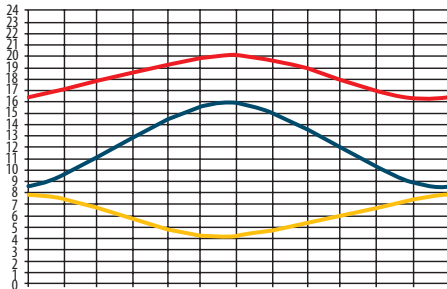
Choisir un pays ; Compléter les spécifications, surtout si votre ville ne figure pas dans la liste et si vous connaissez la latitude et longitude de votre ville :

Pour Cholet latitude = 47 ° 03 ' 36 " Nord et longitude = 0 ° 52 ' 42 " Ouest

Et lancez les calculs. Vous obtiendrez des courbes annuelles magnifiques...

Lever, coucher du soleil et durée du jour

Heures pour Cholet



Cholet

Coordonnées : 47° 03' 36" N 0° 52' 42" O

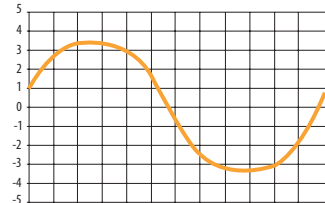
Fuseau horaire : 0 UTC

- Lever du soleil (aujourd'hui 7h48)
- Coucher du soleil (aujourd'hui 16h34)
- Durée d'éclairement (aujourd'hui 8h46)

(01/10/2011)

Variation quotidienne de la durée du jour

Minutes pour Cholet



JANV. FÉV. MARS AVRIL MAI JUIN JUIL. AOÛT SEPT. OCT. NOV. DÉC.

Cholet

Coordonnées : 47° 03' 36" N 0° 52' 42" O

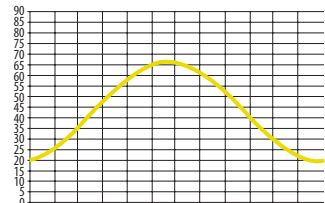
Fuseau horaire : 0 UTC

— Différence (aujourd'hui 1.58 minutes)

(01/10/2011)

Altitude maximale du soleil

Degrés pour Cholet



JANV. FÉV. MARS AVRIL MAI JUIN JUIL. AOÛT SEPT. OCT. NOV. DÉC.

Cholet

Coordonnées : 47° 03' 36" N 0° 52' 42" O

Fuseau horaire : 0 UTC

— Altitude du soleil (aujourd'hui 20°9)

(01/10/2011)

L'énergie solaire

L'atmosphère ou enveloppe gazeuse qui entoure la terre joue plusieurs rôles :

- Elle contient l'air que nous respirons, et permet en général à la vie de se développer sur la planète bleue (avec l'eau).
- Certains de ses composants nous préservent, à la manière d'un écran, des rayons nocifs du soleil (ultraviolets = UV).
- Elle se laisse traverser par les rayons solaires, mais retient une bonne part de la chaleur captée et produite par la terre sous la forme d'infrarouges (= IR).

En fait, la couche « utile » de notre atmosphère se nomme la Trososphère, et se situe entre 0 et 17 kilomètres d'altitude. Tous les phénomènes météorologiques s'y créent et s'y développent, pour restituer notre climat et ses nombreuses variantes. Si la terre ne possédait pas cette couche protectrice, les rayons IR s'échapperaient à nouveau dans l'espace, et la température moyenne au sol serait de -18 °C ! Elle est actuellement de 15 °C et permet à la vie humaine de s'y maintenir.

Constitution de l'atmosphère

On trouve principalement de l'azote et de l'oxygène, pour 99 % du volume. D'autres constituants sont présents, en faible quantité mais jouant un rôle primordial dans notre survie.

Composition de l'air sur terre

	Gaz	Symbole	Proportion en %	Observation
Gaz principaux	Azote	N ₂	78	
	Oxygène	O ₂	21	
Gaz inertes	Argon	Ar	0,93	
	Néon	Ne	0,02	
	Krypton	Kr		
	Xénon	Xe		
Gaz à effet de serre	Vapeur d'eau	H ₂ O	variable	
	Gaz carbonique	CO ₂	0,03	Énergies fossiles ↗
	Oxyde d'azote	N ₂ O	traces	↗
	Ozone	O ₃	traces	Diminue aux pôles = trou

L'énergie solaire nous parvient sous forme de rayonnement électromagnétique, dont la lumière visible ne représente qu'une partie. Le spectre solaire est très vaste et s'étend de l'ultraviolet à l'infrarouge en passant par le rayonnement perceptible par l'œil humain, la lumière du jour en somme. On peut définir ces rayonnements par leur longueur d'onde, qui précise également les différentes couleurs perçues.

Les ultraviolets représentent environ 5 % du spectre, et leur longueur d'onde va de 280 à 380 nanomètres. Ils sont invisibles pour l'œil humain, mais leurs effets sur la peau l'été est bien réelle... et douloureusement colorée !

Les infrarouges, vecteurs essentiels de l'énergie thermique, couvrent environ 45 % de l'ensemble ; leur longueur d'onde s'étend de 780 à 2500 nm environ. Ils restent eux aussi invisibles, comme on peut le vérifier sur les nombreuses télécommandes dont nous disposons chez nous.

Quant à la partie visible des rayons solaires, elle couvre les 50 % restant, entre 380 et 780 nm. Par ailleurs, les couleurs de l'arc-en-ciel constituent un bon exemple pour matérialiser les constituants du spectre stimulant le nerf optique humain.

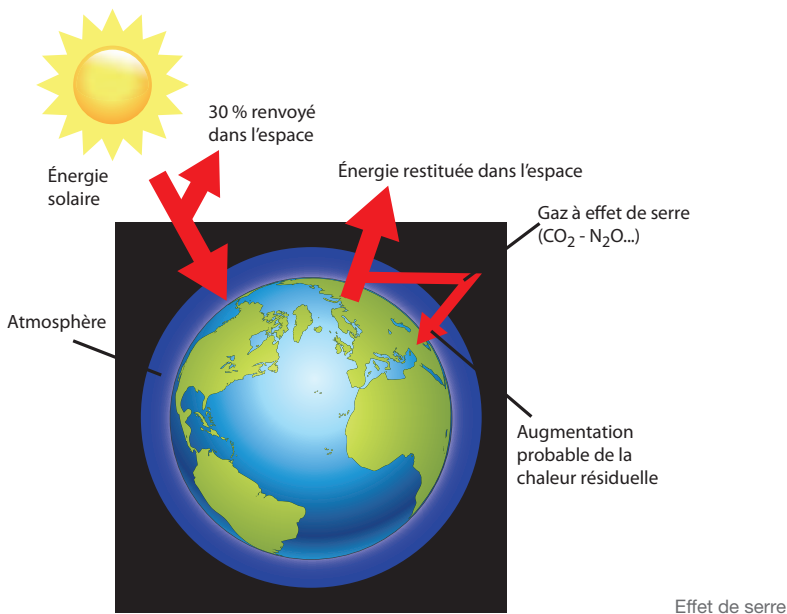


Tableau : spectre visible

Ondes ultraviolet	
380 nm	violet
430 nm	indigo
470 nm	bleu
530 nm	vert
580 nm	jaune
600 nm	orange
680 nm	rouge
Ondes infra rouges	

On estime à 1350 W/m² l'énergie totale atteignant une surface perpendiculaire aux rayons solaires, dans les hautes couches de l'atmosphère : on parle dans ce cas de la Constante solaire. La totalité du rayonnement solaire ne parvient évidemment pas sur notre planète, car on estime à 30 % la portion de l'énergie directement renvoyée dans l'espace par les nuages. Le reste est plus ou moins bien absorbé par la surface de la terre, sous forme directe, diffuse ou réfléchi. Cette énergie solaire est réémise, pour faire simple, sous forme de rayonnement infrarouge que notre atmosphère retient en partie seule-

ment grâce ou à cause des gaz à effet de serre (GES). Mais il ne faudrait pas que ceux-ci retiennent davantage ces IR, sous peine d'un réchauffement climatique catastrophique, et qui semble d'ailleurs déjà amorcé ! On pense que notre utilisation des énergies fossiles depuis près de 200 ans a provoqué cette augmentation inexorable de la concentration des GES (surtout le CO₂), avec pour conséquence d'altérer l'équilibre fragile du système climatique terrestre.



Au niveau géographique mondial, l'énergie solaire est inégalement répartie. Une région dite chaude du globe pourra produire jusqu'à 2300 kWh/m² et par an. En Europe centrale cette valeur est bien moindre ; et pour la France, il y a une importante différence d'ensoleillement entre le Nord et le Sud du territoire. Pourtant, l'exploitation de l'énergie solaire est possible et rentable quasiment partout, il suffit simplement d'augmenter la surface des capteurs et de soigner leur orientation. Rappelons que l'Allemagne dispose de bien plus de capteurs solaires que la France (on estime son parc 5 fois plus important que le nôtre !) malgré une irradiation solaire bien moins généreuse.

On pourra être intéressé également par les heures d'ensoleillement annuelles selon les régions. Il faut savoir que Météo France a défini un seuil d'insolation de 120 W/m², à partir duquel on peut considérer qu'il y a du soleil. Au cours d'une journée, la présence de nuages

Le gisement solaire

Voici quelques chiffres du gisement solaire en France :

À Lille, latitude 50°38 N, 1100 kWh/m²/an.

À Lyon, latitude 45°45N, 1400 kWh/m²/an.

À Marseille, latitude 43°18N, 1900 kWh/m²/an.

ou un ciel couvert peuvent effectivement réduire à peu de chose la puissance émise par le soleil, et donc susceptible d'être captée et exploitée sous forme de chaleur ou de courant pour les cellules PV. Nous vous proposerons de construire un appareil capable de mesurer cette puissance solaire, dans le chapitre consacré aux réalisations électroniques (voir p. 86) : il s'agit d'un solarimètre à affichage digital, directement étalonné en W/m^2 .

Si la zone nord ne dispose en moyenne que de 1750 heures de soleil, il est clair que la région PACA sera très favorisée avec plus de 2750 heures par an. Dans cette région, l'exploitation solaire se contentera de surfaces plus réduites... pour le solaire thermique s'entend. On trouve facilement bon nombre de cartes précisant les valeurs liées à l'énergie solaire de votre région. Voici un tableau de quelques villes en France, leur latitude, leur ensoleillement annuel et l'énergie solaire moyenne par m^2/an pour une orientation optimale (plein sud, tenant compte de la latitude du lieu en inclinaison).



VILLE	LATITUDE N	ENSOLEILLEMENT en nombre d'heures	IRRADIATION en $KWh/m^2/an$
Perpignan	42° 42	2392	1699
Marseille	43° 18	2801	1809
Nice	43° 42	2668	1775
Pau	43° 18	1852	1535
Montauban	44° 01	2029	1510
Nîmes	43° 50	2588	1712
Bordeaux	44° 50	1992	1486
Aurillac	44° 55	2084	1511
La Rochelle	46° 10	2055	1504
Limoges	45° 50	1860	1457
Lyon	45° 45	1932	1453
Poitiers	46° 35	1867	1449
Angers	47° 29	1690	1403
Bourges	47° 05	1787	1346
Besançon	47° 15	1797	1287
Brest	48° 24	1492	1335
Melun	48° 32	1731	1283
Strasbourg	48° 35	1633	1203
Cherbourg	49° 39	1460	1314
Rouen	49 ° 27	1518	1228
Metz	49° 08	1605	1191
Abbeville	50° 06	1624	1152

L'aérothermies olaires

Un peu d'histoire...

Les précurseurs : il semblerait que ce soit Horace Bénédicte de Saussure, physicien suisse, qui inventa et expérimenta en 1767 (déjà) la « boîte chaude », ancêtre de notre capteur à air ou capteur plan vitré. Passionné par l'alpinisme qu'il pratiquait et fasciné par le Mont Blanc, il voulait comprendre pourquoi il faisait plus froid en montagne qu'en plaine. Il disait : « (...) je voulais voir si les rayons directs du soleil auraient, sur la cime d'une haute montagne, la même efficacité que dans la plaine, lorsque le corps sur lequel ils agiraient, serait de manière à ne pouvoir être que peu ou point refroidi par l'air environnant (...). »

Il réalise donc le premier capteur solaire qu'il nomma « héliothermomètre », en précisant l'origine de son idée : « (...) c'est un fait connu et sans doute depuis longtemps, qu'une chambre, un carrosse, une couche, sont plus fortement réchauffés par le soleil, lorsque ses rayons passent au travers de verres ou de châssis fermés, que quand ces mêmes rayons entrent dans les mêmes lieux ouverts et dénués de vitrages. On sait même que la chaleur est plus grande dans les chambres dont les fenêtres ont un double châssis (...) ». Songez un peu à la chaleur importante qui règne dans l'habitacle de nos véhicules fermés, sous le soleil sur un parking, après plusieurs heures ! Une étuve assurément, et le simple contact sur le revêtement sombre des sièges ou sur le tableau de bord est quasiment impossible.

Cette amplification de la chaleur solaire a donc été testée et mesurée par H.-B. de Saussure, à l'aide d'une boîte dont il nous donne une description précise, faute d'avoir pu récupérer son appareil original : « (...) Je fis donc faire une caisse en sapin d'un pied de longueur (= 32 cm) sur 9 pouces (= 24 cm) de largeur et profondeur hors d'œuvre ; cette caisse de ½ pouce d'épaisseur (= 1,3 cm) était doublée intérieurement d'un liège noir d'un pouce (= 2,7 cm). J'avais choisi cette écorce comme une matière légère et en même temps très coërcente ou très peu perméable à la chaleur. Trois glaces entrant à coulisse dans l'épaisseur du liège et placées à un pouce et demi de distance l'une de l'autre (= 4 cm) fermaient cette boîte de manière que les rayons du soleil ne pouvaient parvenir au fond de la boîte qu'après avoir traversé ces trois glaces.

« Pour que le soleil frappât toujours perpendiculairement ces glaces, qu'il fit par cela même la plus grande impression sur elles, et souffrît le moins de réflexion possible, j'avais soin dans mes expériences de faire suivre à ma caisse le mouvement du soleil, en la retournant régulièrement toutes les 20 minutes, de sorte que le soleil éclairât exactement la totalité du fond de la caisse. La plus grande chaleur que j'ai obtenu par ce moyen a été de 87,7, c'est-à-dire de près de 8 degrés au-dessus de la chaleur de l'eau bouillante (...). »

À noter qu'à l'époque, de Saussure utilise l'échelle de température dite de Réaumur, conçue en 1731 par un inventeur français du même nom. Le degré R valant 1,25 degré Kelvin ou Celsius, et avec le même degré O du point de congélation de la glace, il aura atteint dans sa cuisine une température maximale de $87,7 \text{ }^\circ\text{R} \times 1,25 = 109,6 \text{ degrés C}$. Notre physicien suisse parvient à prouver avec sa « boîte chaude » que pour des conditions identiques d'ensoleillement, on observe une même élévation de température intérieure. Le rayonnement solaire est donc indépendant de l'altitude.

Nous avons bien là l'ancêtre de nos capteurs solaires modernes, qu'ils utilisent l'eau ou l'air comme fluide caloporteur d'ailleurs. On retrouve sans surprise le vitrage, le fond noir absorbant et l'isolation thermique de l'ensemble.

Cette démonstration plutôt expérimentale sera complétée d'une manière plus scientifique par Joseph Fourier, bien connu pour ses travaux mathématiques. Nous nous intéressons plus à son mémoire paru en 1824 sous le titre « remarques générales sur les températures du globe terrestre et des espaces planétaires ». Fourier reprend l'idée de H.-B. de Saussure, mais se place au niveau d'une échelle plus vaste, intégrant la terre entière, l'atmosphère et les océans. Les formulations sont plus précises encore, et l'on devine dans ses lignes les notions fondamentales de ce que nous appelons aujourd'hui l'effet de serre. En parlant de l'héliothermomètre, il écrit : « (...) La théorie de cet instrument est facile à concevoir. Il suffit de remarquer :

1 – que la chaleur acquise se concentre, parce qu'elle n'est point dissipée immédiatement par le renouvellement de l'air ;

2 – que la chaleur émanée du Soleil a des propriétés différentes de celles de la chaleur obscure. Les rayons de cet astre se transmettent en assez grande partie au delà des verres dans toutes les capacités et jusqu'au fond de la boîte. Ils échauffent l'air et les parois qui le

contiennent : alors leur chaleur ainsi communiquée cesse d'être lumineuse ; elle ne conserve que les propriétés communes de la chaleur rayonnante obscure. Dans cet état, elle ne peut traverser librement les plans de verre qui couvrent le vase ; elle s'accumule de plus en plus dans une capacité enveloppée d'une matière très peu conductrice, et la température s'élève jusqu'à ce que la chaleur affluente soit exactement compensée par celle qui se dissipe (...) »



H.-B. de Saussure



Joseph Fourier

Avec lui, le rôle du vitrage est quasiment élucidé, et la chaleur obscure représente bien entendu ce que nous appelons rayonnement infrarouge de nos jours. Le verre est donc transparent à la lumière solaire, et devient un obstacle pour le rayonnement calorifique IR. On voit bien que la température intérieure de la boîte, donc du capteur, résulte de l'équilibre entre la chaleur reçue et la chaleur émise ou perdue. La conception de nos capteurs est entièrement basée sur ce concept simple. L'effet de serre où l'atmosphère joue le rôle du vitrage est parfaitement compris ; les bases sont jetées pour une compréhension plus globale des phénomènes climatiques qui risquent de modifier quelque peu le climat terrestre dans les années à venir.

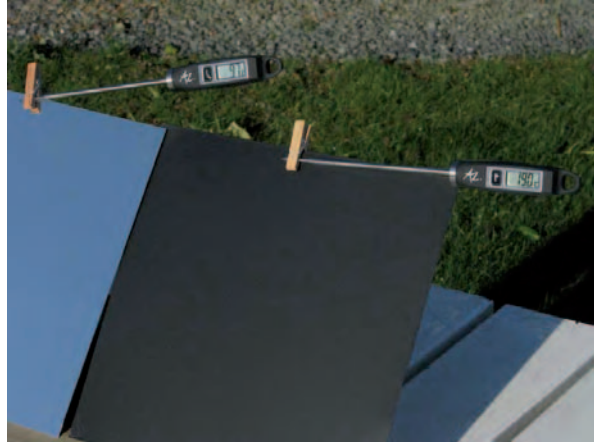
Quelques expérimentations...

Pour mieux vous convaincre encore que l'énergie solaire est facile à capter et avec peu de moyens, nous nous sommes amusés à construire en quelque sorte une réplique de la boîte chaude de M. de Saussure, un jour d'hiver, alors qu'au petit matin la température extérieure était encore négative. C'était le 19 janvier 2011.

On disposera une table de jardin à l'extérieur orientée au sud, en veillant à pouvoir recevoir la lumière solaire dès le matin, et le plus longtemps possible dans la journée. On pourra faire pivoter ce plan de travail régulièrement pour capter le soleil le plus perpendiculairement possible (angle azimutal)...

Première expérience : découvrir le coefficient d'absorption

Il s'agit de vérifier qu'une tôle très fine en aluminium poli, à la façon d'un miroir, capte bien moins de chaleur qu'une plaque d'aluminium identique, et de même surface, mais recouverte d'une très fine couche de peinture noire mate (peinture en bombe résistant à la chaleur). Les deux surfaces sont exposées côte à côte selon la même inclinaison, sur un support rudimentaire facile à déplacer. On pourra fixer une sonde de température sur le haut de chacune des plaques, pour relever la valeur atteinte au bout d'une heure environ. On constatera sans surprise que la surface noire conserve plus de chaleur, son coefficient d'absorption étant supérieur, un peu à la manière d'un corps noir ; nous aurons d'ailleurs l'occasion de préciser plus loin les caractéristiques d'un tel corps. L'air ambiant très froid capte très facilement les calories stockées dans l'aluminium et contribue à refroidir constamment nos absorbeurs, surtout par leur face arrière orientée au nord.



Absorbeur noir

Deuxième expérience : limiter les pertes thermiques

Sur cette face arrière de la tôle peinte en noir, nous allons disposer un carré isolant rigide, en « styrofoam » nommé aussi polystyrène extrudé, réputé très bon isolant thermique. Il s'agit d'empêcher ou de réduire le plus possible le refroidissement du capteur, et la perte de l'énergie solaire captée. On constatera très vite une élévation substantielle de la température, qui laisse présager un rendement supérieur du dispositif ainsi constitué.



Isolation arrière

Troisième expérience : tester l'effet de serre

Une boîte fermée constituée de 4 côtés en bois, d'une face avant vitrée et d'une plaque arrière recevra la tôle noire et son isolant solidaire, pour une exposition prolongée au soleil. Nous veillerons à irradier la totalité de la surface de l'absorbeur noir en orientant convenablement l'ensemble. Un thermomètre « alimentaire » est inséré dans le haut de la boîte pour mesurer la température atteinte par l'air ainsi confiné. Après une heure d'exposition, on constate une très forte augmentation des degrés.



Absorbeur aluminium sous vitrage



Absorbeur ardoise sous vitrage

Quatrième expérience : choisir un matériau absorbeur naturel

Nous allons finalement remplacer le carré d'aluminium par la même surface d'une fine ardoise (3 mm d'épaisseur), oui, celle habituellement destinée à nos toitures, et dont la couleur noire et l'aspect rugueux devrait rivaliser avec les absorbeurs métalliques du commerce !

L'ardoise

Le site de Trélazé, à proximité d'Angers, est le plus grand producteur français d'ardoises de qualité, très recherchées pour la restauration des monuments historiques et des châteaux très nombreux en Pays de Loire, faut-il le rappeler.

Le poète angevin Joachim du Bellay écrivait déjà en 1558 :

(...) Plus me plait le séjour qu'ont bâti mes aïeux,

Que des palais Romains le front audacieux

Plus que le marbre dur me plait l'ardoise fine ...

Plus mon Loir gaulois que le Tibre latin

Plus mon petit Liré, que le mont Palatin

Et plus que l'air marin la douceur angevine.

(Heureux qui comme Ulysse, a fait un beau voyage)

Il ne faudra pas bien longtemps non plus pour lire sur l'afficheur du thermomètre une température très élevée, 82,2 degrés C pour nous ce jour-là.

La preuve est faite que le matériau absorbeur pour nos capteurs aérothermiques pourra être réalisé à l'aide de surfaces d'ardoises, qui apporteront d'ailleurs une certaine inertie thermique ; l'ardoise est réputée pour stocker facilement la chaleur et la restituer progressivement plus tard. Nous vous présentons ci-après un graphique émanant des relevés de ce jour sur 2 capteurs vitrés opérationnels, l'un avec de l'aluminium noirci, l'autre avec un assemblage d'ardoises fines, d'une surface de 2 m² environ chacun.

	A	B	C	D	E	F
1	relevés	extérieur	chauffé	aluminium	non chauffé	ardoises
2	9h30	-0,5	16	15,8	11,4	10,8
3	10h	0,3	16,5	23,7	12,3	24,5
4	10h30	1,2	17	42,6	13,1	39
5	11h	1,9	17,5	50,5	13,6	46,5
6	11h30	3,1	18	59,1	14,3	55,3
7	12h	4,3	19	66,2	15	58,4
8	12h30	5,1	19,5	73,8	15,7	67,4
9	13h	5,4	20	75	16,2	73,3
10	13h30	5,9	20,5	75,5	16,6	75
11	14h	6,1	20,5	70,5	17,1	75,7
12	14h30	6,4	21	72,9	17,5	74,9
13	15h	6,3	21	66	17,3	72,4
14	15h30	6,1	21	57,1	17	65,1
15	16h	5,9	21	52,1	16,8	61,1
16	16h30	5,7	21	46,5	16,5	55,7
17	17h	5,3	20,5	38,6	16	46,4
18	17h30	4,5	20,5	28,1	15,7	36,9
19	18h	3,9	20	21,3	15,2	24,4

Remarque

Le capteur avec absorbeur en aluminium peint en noir est affecté à une pièce dont le convecteur est réglé à 15 °C, celui équipé avec des ardoises réalise le chauffage d'une pièce sensiblement identique, mais non chauffée.

Orientation plein sud, capteurs verticaux.

Colonne A : heure des relevés

Colonne B : température extérieure, ce 19 janvier 2011

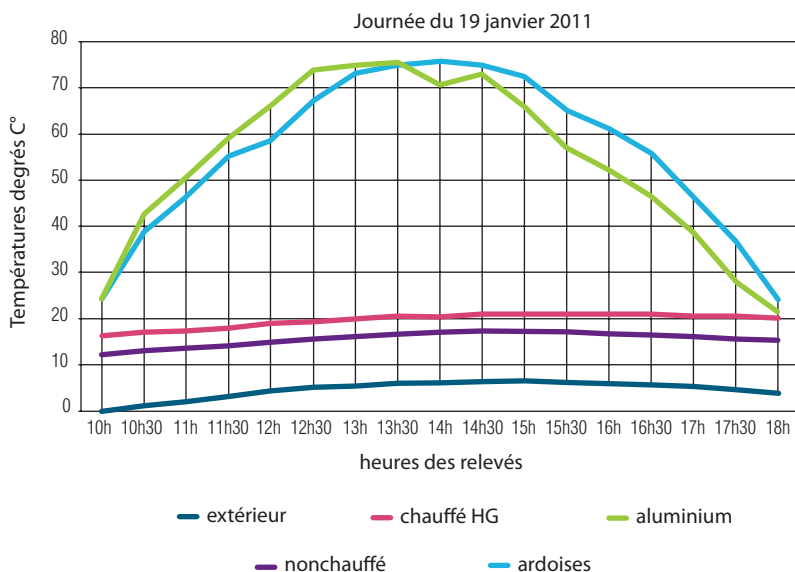
Colonne C : température ambiante dans la pièce chauffée

Colonne D : température de l'air en sortie du capteur avec aluminium noir

Colonne E : température ambiante dans la pièce NON chauffée

Colonne F : température de l'air en sortie du capteur avec les ardoises

Et voici les courbes correspondantes :

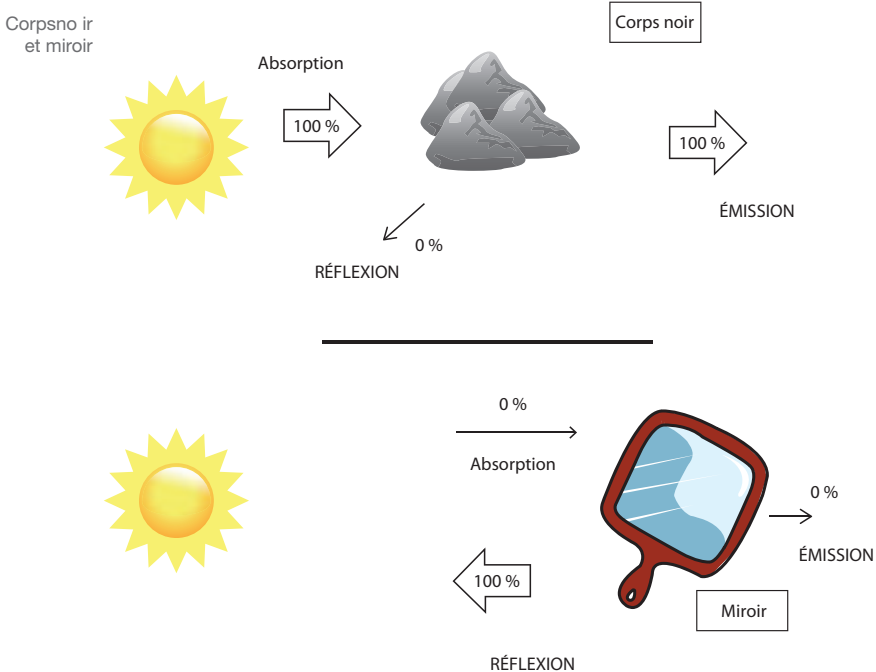


On constate sans peine une forte élévation de température sur les deux absorbeurs, malgré une température extérieure qui plafonne à 6,1 °C. L'aluminium est bien entendu plus rapide à réagir, mais l'ardoise atteint les mêmes valeurs maximales un peu plus tard et introduit donc un décalage bénéfique en soirée. À noter que vers 14h un refroidissement partiel de l'aluminium par manque de soleil n'a pas d'incidence sur la température de l'ardoise qui reste « chaude » !

Notre capteur angevin va pouvoir prendre forme et solutionnera d'une manière économique et élégante le choix d'un absorbeur efficace. Nous éviterons également ainsi les risques d'émanations plus ou moins toxiques dans l'air réchauffé, risques liés à la confrontation de la forte chaleur produite avec les produits chimiques ou peintures utilisées pour noircir une surface d'absorption métallique.

Du corps noir à l'absorbeur

L'absorbeur est le cœur du capteur solaire, car c'est précisément lui qui doit emmagasiner la plus grande portion possible du rayonnement solaire qui lui parvient à travers le vitrage, convertir celle-ci en chaleur avec le moins de pertes possible dans le registre infrarouge. L'absorbeur idéal ou parfait serait ce que l'on nomme un corps noir, c'est-à-dire un matériau qui récolte toute l'énergie électromagnétique qu'il reçoit sous forme de lumière visible, sans en réfléchir aucune partie, tout en étant capable de réémettre la totalité du flux reçu. Et les longueurs d'onde du rayonnement reçu et du rayonnement émis ne seraient pas forcément les mêmes. Dans le cas de la lumière solaire visible, la restitution se ferait sous forme de chaleur, donc par des infrarouges. Un tel absorbeur reste fictif, et peu de matériaux présentent toutes les qualités requises.



Ainsi le corps noir parfait et le miroir parfait présentent des caractéristiques complètement opposées.

L'absorbeur idéal n'existant pas, on fait de nos jours de plus en plus souvent appel à des surfaces de captage dites « sélectives », c'est-à-dire qui présentent un coefficient d'absorption α élevé (de 0 à 100 %, l'idéal étant 100 %) et simultanément un coefficient d'émission ϵ le plus faible possible (de 0 à 100 %, l'idéal étant 0 %). De telles surfaces offrent des rendements élevés, moyennant par contre un coût de fabrication important. Les couleurs foncées sont naturellement privilégiées, et l'utilisation de la peinture aérosol noire reste une solution économique, mais peu recommandée quant aux pertes radiatives. Pourtant, il existe un produit à base de silicone, sous forme de spray, résistant aux hautes températures et offrant un résultat relativement satisfaisant (Thermalox). On utilisera le plus souvent des métaux sous forme de feuilles minces et légères, comme l'aluminium, le zinc ou l'acier, parfois avec des profils particuliers pour offrir plus de surface au soleil et piéger ses rayons.

Dans le tableau suivant, nous avons regroupé quelques matériaux ou procédés différents et leurs caractéristiques moyennes :

Matériau	Réflexion en %	Absorption en %	Émission en %
Tinox = cuivre sélectif	5	95	5
Black chrome	5	95	12 à 18
Spray Thermalox	4	96	52
Métal poli	70	30	10
Peinture Noire mate	10	90	95
Noir de fumée	4	96	90
Ardoise	11	89	97

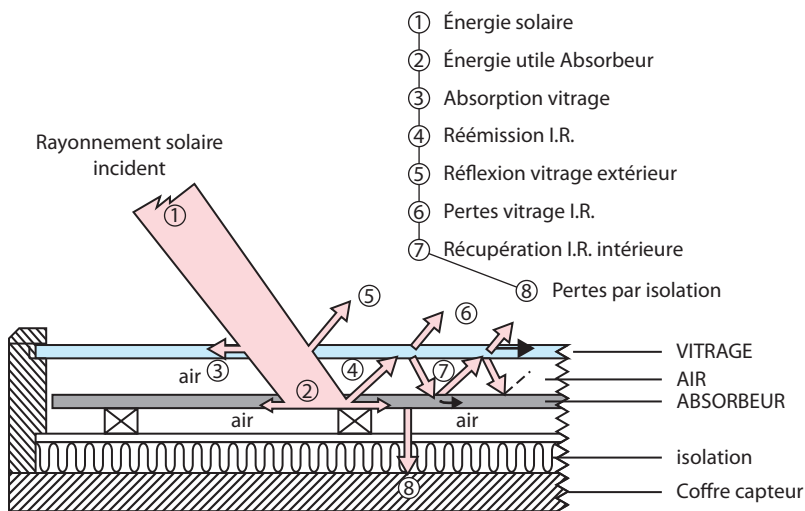
Noircir ou patiner des surfaces de zinc, d'acier ou d'aluminium exige de manipuler des produits chimiques souvent dangereux et nécessite parfois de mettre en œuvre des procédures complexes. Ayant opté pour un absorbeur en feuilles d'ardoises, nous n'aurons plus à nous préoccuper de sa couleur sombre naturellement. Malgré une valeur d'émissivité élevée (qui dépend également de la température, de la direction du rayonnement, de l'état de surface), l'ardoise de 3 mm semble un choix raisonnable, et sa masse ne représente pas une inertie de mise en température gênante, comme nous avons pu le constater lors de nos essais. En outre, ce décalage thermique devient un avantage pour restituer plus tardivement le soir les calories solaires captées dans la journée. Précisons également qu'il est plutôt bénéfique que la face arrière des ardoises soit fortement émissive, cette énergie étant renvoyée sur l'ardoise par un film réflecteur, renforçant ainsi l'effet thermique et accumulateur.

À propos de l'ardoise

Les terrains argileux et sédimentaires comprimés lors du plissement des montagnes produisent du schiste. Lorsqu'il peut être fendu en feuilles, on parle d'ardoise. Sa principale qualité est d'être facilement fissile, c'est-à-dire que l'on parvient à séparer cette roche selon le plan de clivage, perpendiculaire à celui des pressions subies lors de la formation de la roche. L'ardoise naturelle est non poreuse, inaltérable à l'air, imperméable à l'eau et dotée d'une durée de vie plus que centenaire parfois. Sa couleur peut varier selon la région de production, et va du gris clair au noir, en passant par des rouges sombres et des verts. On parle parfois du gris-bleu de l'ardoise. Celle de Trélazé présente une belle teinte noire, compatible avec une absorption solaire optimale. Ne l'appelle-t-on pas l'or noir de l'Anjou ?

Soleil et vitrage

L'énergie solaire nous parvient principalement sous forme de rayonnement visible, et le vitrage du capteur plan se doit donc d'être le plus transparent possible pour permettre à cette lumière d'atteindre au mieux l'absorbeur situé juste derrière lui. Mais ce n'est pas là sa seule fonction, car outre sa transparence, une autre propriété intéressante du verre consiste à être quasiment opaque au rayonnement infrarouge, celui produit par l'échauffement de

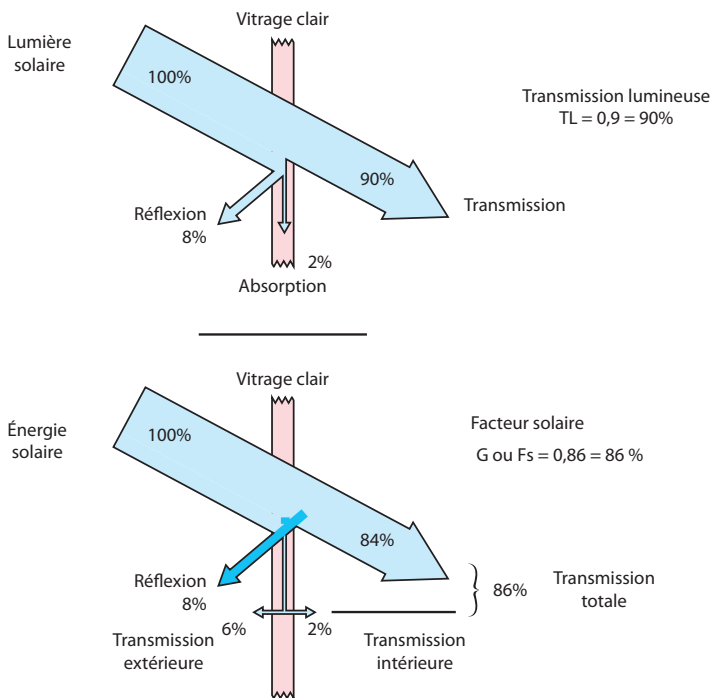


Pertes dans le capteur plan

l'absorbeur noir, du fait de la longueur d'onde plus grande. C'est le phénomène de l'effet de serre observé précédemment et connu depuis fort longtemps. Il est mis à profit dans tous les capteurs solaires vitrés, qu'ils soient à air ou à eau d'ailleurs. Le verre est donc bien un véritable piège à chaleur. Ce processus complexe permet facilement d'obtenir des températures élevées, dont le fluide liquide peut réchauffer indirectement un ballon d'eau chaude sanitaire, soit un chauffage à basse température par l'intermédiaire d'un plancher chauffant adapté (PSD). On parvient également à provoquer l'échauffement de l'air pour le séchage ou le chauffage direct des pièces équipées de tels capteurs aérothermiques. Il va sans dire qu'une source d'appoint est indispensable, pour les journées sans soleil, et du soir au matin en l'absence de stockage de cette énergie calorifique solaire.

Le bilan thermique simplifié du capteur solaire vitré laisse entrevoir des pertes diverses, aussi bien dans le rayonnement visible que dans l'infrarouge. La portion d'énergie réellement captée par l'absorbeur donne une idée du rendement de cet ensemble.

Un vitrage transparent ou clair laisse passer une partie importante de la lumière présente sur sa face exposée au soleil. On parle dans ce cas de la transmission lumineuse ou TL. Pour un simple vitrage tout ordinaire d'une épaisseur de 4 mm, on peut espérer récupérer



Transmission lumineuse et facteur solaire

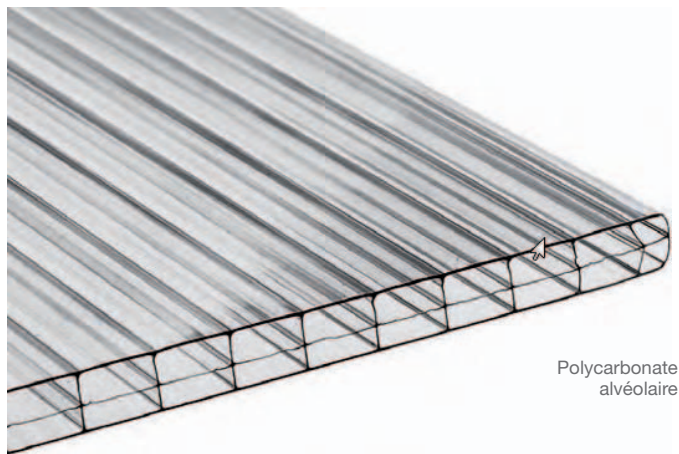
90 % de la lumière reçue, mais plus encore dans le cas de vitrages spéciaux, à faible teneur en oxydes de fer (jusqu'à 99 % selon les fournisseurs). On peut imaginer souhaiter réduire la quantité de lumière utile dans une véranda ou une pièce très éclairée au sud, en optant pour un vitrage réfléchissant (protection solaire). La transmission lumineuse peut descendre autour de 38 %, et même moins encore dans le cas d'un double vitrage. Dans le cas de notre capteur à air, ce ne sera pas justifié, et c'est plutôt la valeur du facteur solaire FS ou g qui nous importe, c'est-à-dire la part d'énergie qui vient atteindre l'absorbeur. Cette valeur est différente de celle de la transmission lumineuse, et reste souvent plus faible. On donne par exemple 85 % pour le verre de 4 mm pris en exemple plus haut. Il n'est pas forcément judicieux de faire usage sur un capteur solaire d'un double vitrage, souvent plus coûteux, plus lourd, plus encombrant, et dont le facteur solaire global risque également d'être moins bon, avec pour seul avantage de réduire quelque peu les déperditions thermiques.

Du fait de l'utilisation d'une grande surface d'ardoises comme absorbeur, une certaine inertie thermique est inévitable et même bénéfique en soirée. Toutefois, dans le cas d'un verre ordinaire, un sérieux risque de casse subsiste, lorsqu'une différence de température égale ou supérieure à 30 °C se présenterait entre les 2 faces du vitrage ! Des ardoises à plus de 75 °C à l'intérieur et une averse de pluie subite sur l'extérieur du capteur auraient vite fait de provoquer des tensions internes et occasionneraient le bris du verre. Sur les conseils d'un professionnel, nous avons donc mis en œuvre du verre trempé pour équiper tous nos capteurs. Le verre trempé (ou verre sécurité) a fait l'objet d'un traitement thermique spécial : il est chauffé **après** découpe aux dimensions requises à plus de 600 °C, avant d'être refroidi très rapidement par des jets d'air plus froid, pour provoquer des efforts de compression dans les couches extérieures du verre. Ce nouveau matériau possède une résistance à la casse par flexion d'environ 200 N/m² pour seulement 40 N/m² pour un verre simple d'épaisseur identique. Il est donc plus résistant aux chocs. Il résistera également à des variations de températures de 200 °C, en supportant une température maximale de 250 °C. Sa densité diminue, mais il ne sera plus possible ni de le couper, ni de le percer au risque de provoquer sa casse. De plus, ses bords sont souvent biseautés pour des raisons de sécurité. En cas de brisure, il se fragmente en de nombreux petits morceaux non tranchants. Ses propriétés lumineuses (TL) et énergétiques (FS) sont conservées et identiques à celles du verre ordinaire.

Pour des verres trop fins, moins de 3 mm d'épaisseur, la trempé thermique n'est guère conseillée ; on procède dans ce cas à une trempé chimique (bain salin à 400 °C pendant 24 heures), plus onéreuse et réservée à des verres spéciaux.

En remplacement du verre trempé, on pourra également faire usage d'une plaque de polycarbonate alvéolaire, qui présente quelques caractéristiques intéressantes : grandes dimensions, poids relativement léger, découpe facile, transmission lumineuse satisfaisante (moyenne en teinte claire 65 %). Sa résistance mécanique et surtout thermique est bien supérieure à celle du verre, en raison des espaces d'air aménagés entre les parois multiples. Des points négatifs subsistent, comme une épaisseur plus importante, et une stabi-

lité dans le temps face aux UV malgré les traitements (jaunissement) avec un risque de fragilité accrue au fil des années. L'aspect esthétique reste un facteur d'appréciation personnel que nous ne jugerons pas ici.



Polycarbonate
alvéolaire

Pour notre réalisation, et compte tenu des températures élevées obtenues dans le capteur, il nous a fallu utiliser en face arrière un matériau isolant capable de supporter à la fois les 90 °C obtenus et ne pas être sensible à l'humidité puisque installé à l'extérieur. La laine de verre et la laine de roche ne pourront convenir étant hydrophiles, et le polystyrène blanc classique non plus puisque commençant à fondre vers 80 °C. Nous avons choisi une bonne épaisseur de styrofoam rigide encore appelé polystyrène extrudé, facile à découper et à poser. De même, le joint d'étanchéité encadrant le vitrage est un élastomère adhésif souple en caoutchouc EPDM, avec une bonne tenue en température entre -40 °C et + 100 °C, et un excellent vieillissement.

L'aérogel de silice

Pour information, nous vous signalons l'existence d'un matériau révolutionnaire, issu des nanotechnologies, à savoir *l'aérogel de silice*. Il s'agit là du solide le plus léger au monde, avec seulement 3 grammes au litre, puisque composé à 99 % d'air. Il est capable de supporter jusqu'à 2000 fois sa propre masse, et est doté d'une conductivité ou capacité d'isolement exceptionnelle : en théorie 39 fois plus isolant que la laine de verre ! Ce matériau est semi-transparent, et devient même transparent dans le vide. On imagine sans peine ce produit en remplacement futur du vitrage de nos capteurs, s'il n'y avait pour l'heure un gros inconvénient, son prix exorbitant. Il restera encore longtemps dans le domaine de la science fiction, ou du moins réservé à la Nasa pour déjà équiper les combinaisons spatiales des cosmonautes. Plus d'informations sur le site : www.dotapea.com.

L'air, fluide caloporteur

Pour améliorer le rendement de notre insolateur, compte tenu des faibles caractéristiques thermophysiques du fluide caloporteur qu'est l'air, (il a en effet une capacité calorifique quatre fois moindre que celle de l'eau), nous avons développé **sous** l'absorbeur en ardoises un réseau d'obstacles ou chicanes, dont la fonction est de rallonger le parcours de l'air plus froid prélevé dans le bas de la pièce, et de le ralentir pour lui laisser le temps d'être plus longuement en contact avec la face chaude de l'absorbeur. Cet air réchauffé sera ensuite réintroduit dans le local en partie haute. Nous avons pu constater une très nette amélioration de l'échange thermique **air-ardoise**, et d'autant plus si la circulation du fluide se fait en convection forcée à l'aide d'un minuscule ventilateur en partie basse. À cet emplacement, il n'y aura aucun risque de destruction pour excès de chaleur ! Il est vrai que la thermocirculation naturelle de l'air sera fortement contrariée par les obstacles, mais pourra facilement être contrôlée grâce au débit variable du ventilateur dont il suffira de faire varier la vitesse par un dispositif électronique adapté (réglage PWM).

D'autre part, n'oublions pas que le captage de l'énergie calorifique solaire est d'autant plus efficace que la température de l'absorbeur est plus basse. Il s'agira de trouver un juste milieu entre ces exigences apparemment contradictoires.



Disposition des chicanes sous l'absorbeur

Orienter le capteur

Attention : la pose de capteurs solaires sur l'extérieur d'un bâtiment existant doit faire l'objet d'une déclaration préalable adressée en mairie (article R421-7 du code de l'Urbanisme). Cette installation s'apparente en effet à une modification de l'aspect extérieur, au même titre qu'un ravalement de façade ou que la pose de panneaux photovoltaïques d'une puissance crête inférieure à 3 kW. Un locataire peut également faire cette démarche, en accord bien évidemment avec son propriétaire. Après dépôt des pièces constituant le dossier (plan de situation, plan de masse, schéma des façades équipées, matériaux utilisés) il faudra attendre une réponse en principe favorable dans un délai de 1 mois. Si vous résidez dans un secteur protégé (monument historique, site, réserve, parc naturel), on devra s'attendre à des consultations, avis, ou exigences particulières.

La position de l'insolateur sur votre habitation conditionne directement la quantité de chaleur produite et par là la rentabilité du dispositif. Il est clair que seule la production hivernale nous intéresse dans le cas du chauffage des locaux. Aucune contre-indication non plus pour les premiers froids d'automne et les dernières gelées du printemps. Ce ne serait pas le cas d'une application destinée au seul séchage de produits agroalimentaires, qu'il conviendrait d'étudier plus précisément en fonction de la saison de production. Il pourrait même être judicieux dans ce cas de disposer les capteurs sur le toit, pour maximiser l'exposition aux rayons solaires, qui délivreront une plus forte puissance à la verticale de la surface vitrée. En raison de l'encombrement et de la masse d'un capteur solaire (plus de 50 kg), il n'est sans doute pas simple non plus d'envisager un suivi solaire azimutal régulier d'est en ouest.

Dans l'idéal pour notre application de chauffage des pièces d'habitation, une position verticale sera adoptée, avec pour avantage une simplicité de pose et une atténuation automatique de l'ensoleillement lorsque le soleil sera plus haut en été, toujours en raison de l'angle d'incidence des rayons solaires sur le vitrage et sur l'absorbeur. Si vous avez la chance de disposer d'une façade orientée plein sud, il ne vous devrait pas être trop compliqué de trouver entre les fenêtres des emplacements verticaux propres à accueillir un ou plusieurs insolateurs aérothermiques. En principe, on attribue un capteur à chaque pièce, avec une puissance espérée d'environ 1000 W par mètre carré exposé. Ne perdez pas de vue non plus que déplacer de l'air sur une distance de plusieurs mètres exigera des conduits isolés assez encombrants, occasionnant quelques pertes en charge.

Nous avons vu précédemment que la course du soleil est assez réduite en hiver et si votre emplacement présente des masques ou obstacles à l'est (arbres, bâtiments, relief) il sera profitable d'orienter les panneaux plus en direction de l'ouest, sachant que la production sera plus conséquente l'après-midi. Chaque implantation mérite une longue réflexion, au fil des saisons, pour déterminer l'emplacement optimal des capteurs. Des contraintes architecturales peuvent compliquer votre choix, mais il ne faudra jamais négliger l'exposition idéale ou s'en rapprocher le plus possible pour un fonctionnement satisfaisant.



Déclaration préalable à la réalisation de constructions et travaux non soumis à permis de construire portant sur une maison individuelle et/ou ses annexes


N° 13703*01

Formulaire à utiliser si :

- Vous réalisez des travaux sur une maison individuelle (extension, modification de l'aspect extérieur, ravalement de façade...).
- Vous construisez une annexe à votre habitation (piscine, abri de jardin, garage...).
- Vous édifiez une clôture.

Pour vérifier que vos travaux sont bien soumis à déclaration préalable, vous pouvez vous reporter à la notice explicative ou vous renseigner auprès de la mairie.

Cadre réservé à la mairie du lieu du projet

D P
 []
Dpt Commune Année N° de dossier

La présente demande a été reçue à la mairie

le [] *Cachet de la mairie et signature du receveur*
 Dossier transmis : à l'Architecte des Bâtiments de France
 au Directeur du Parc National

1 - Identité et coordonnées du déclarant

- Madame Monsieur

Nom : Prénom :

• Adresse : Numéro : Voie :

Lieu-dit : Localité :

Code postal : [] [] [] [] [] [] BP : [] [] [] [] Cedex : [] [] [] Pays :

Téléphone (facultatif) : []

Adresse électronique (facultatif) : @

J'accepte de recevoir par courrier électronique les documents transmis en cours d'instruction par l'administration à l'adresse ci-dessus. J'ai pris bonne note que, dans un tel cas, la date de notification sera celle de la consultation du courrier électronique ou, au plus tard, celle de l'envoi de ce courrier électronique augmentée de huit jours.

2 - Le terrain

Le terrain est constitué de l'ensemble des parcelles cadastrales d'un seul tenant appartenant à un même propriétaire.

• **Références cadastrales : section et numéro¹** (si votre projet porte sur plusieurs parcelles cadastrales, veuillez indiquer tous les numéros de parcelles) :

• Adresse du terrain

Numéro : Voie :

Lieu-dit : Localité :

• **Superficie du terrain (en m²)** :

Si ce terrain est situé dans un lotissement, cochez cette case

Cette donnée, qui est facultative, peut toutefois vous permettre de faire valoir des droits à construire ou de bénéficier d'impositions plus favorables.

Pour les déclarations portant sur un lotissement ou une division foncière non soumis à permis d'aménager, veuillez utiliser le formulaire cerfa n° 13702*01.
 Pour les déclarations portant sur d'autres constructions et travaux non soumis à permis de construire, veuillez utiliser le formulaire cerfa n° 13404*01.

1 En cas de besoin, vous pouvez vous renseigner auprès de la mairie

Une augmentation de la surface des capteurs peut compenser une orientation moyenne, et une intégration au bâti est parfois nécessaire malgré un rendement plus réduit.

Dans le tableau suivant on trouvera une indication sur les coefficients réducteurs qui s'appliquent sur le rendement en fonction de l'implantation choisie. L'idéal sera bien entendu le sud, avec une inclinaison du capteur selon la latitude du lieu si la pose verticale n'est pas retenue.

Tableau réalisé pour le solstice d'hiver, latitude Cholet 47°, 04 minutes

Orientation du capteur sur la facade	Angle azimutal	Inclinaison capteur selon latitude rendement en %	Capteur vertical	Remarques
sud est	- 45°	71	67	à éviter
	-30°	87	82	moyen
	-20°	94	88	moyen
	-15°	96	90	acceptable
	-10°	98	92	correct
	-5°	99	93	correct
plein sud	0°	max = 100	94	optimal
	+5°	99	93	correct
	+10°	98	92	correct
	+15°	96	90	acceptable
	+20°	94	88	moyen
	+30°	87	82	moyen
sud ouest	+45°	71	67	à éviter

