

Le solaire thermique : principes, technologies et enjeux pour la transition énergétique

Et si la clé de la souveraineté énergétique se trouvait sur nos toits, non pas seulement sous forme de lumière, mais de chaleur ? Alors que l'Europe cherche à décarboner massivement son économie, la chaleur représente encore plus de la moitié de notre consommation d'énergie finale.

Souvent resté dans l'ombre du photovoltaïque, le solaire thermique opère aujourd'hui une mue technologique spectaculaire et constitue l'une des technologies les plus matures et efficaces de valorisation directe de l'énergie solaire.

Des systèmes hybrides PVT aux couplages intelligents avec les pompes à chaleur, cet article propose une synthèse pédagogique du solaire thermique pour comprendre les enjeux techniques, économiques et systémiques de cette technologie.

Table des matières

1. Remplacer la chaleur au cœur de la transition énergétique.....	2
2. Principes physiques du solaire thermique	3
3. Les technologies de capteurs solaires thermiques	8
4. Architecture hydraulique et régulation des systèmes solaires thermiques	11
5. Intégration du solaire thermique dans des systèmes énergétiques complexes	13
6. Panneaux photovoltaïques-thermiques (PVT)	14
7. Pré-dimensionnement des installations solaires thermiques	15
8. Courbes de rendement et performances des capteurs	17
9. Synthèse : comparaison des technologies solaires et thermiques	19
10. Conclusion : Le Solaire Thermique, Pilier d'une Chaleur Souveraine et Décarbonée	20
Bibliographie	21

1. Replacer la chaleur au cœur de la transition énergétique

En Belgique comme dans l'ensemble de l'Union européenne, plus de 50 % de l'énergie finale consommée l'est sous forme de chaleur, principalement pour le chauffage des bâtiments, l'eau chaude sanitaire et les procédés industriels basse et moyenne température. La transition énergétique ne peut donc se limiter à l'électrification et au développement du photovoltaïque : elle implique nécessairement une transformation profonde des systèmes de production et de distribution de chaleur.

Dans ce contexte, le solaire thermique apparaît comme une technologie stratégique. Capable de convertir directement le rayonnement solaire en chaleur utile avec des rendements élevés, il constitue une solution éprouvée, robuste et complémentaire des autres technologies renouvelables, notamment les pompes à chaleur (PAC) et les réseaux de chaleur.

2. Principes physiques du solaire thermique

2.1. RAYONNEMENT SOLAIRE ET BILANS ÉNERGÉTIQUES

Le fonctionnement du solaire thermique repose sur l'établissement d'un bilan énergétique entre le rayonnement solaire incident, les pertes thermiques et l'énergie utile récupérée par le fluide caloporteur (le plus souvent un mélange eau-glycol).

L'irradiance solaire globale reçue par un capteur s'exprime en W/m^2 et dépend de :

- l'orientation et l'inclinaison du capteur,
- la latitude et la saison,
- les conditions atmosphériques.

La puissance thermique utile extraite d'un capteur peut être exprimée par la relation de Hottel-Whillier :

$$\dot{Q}_u = A_c F_R [G(\tau\alpha) - U_L(T_{in} - T_a)]$$

où :

- \dot{Q}_u est la puissance utile (W)
- A_c est la surface du capteur (m^2)
- F_R : **Facteur de transfert (ou d'évacuation) de chaleur** du capteur. Il représente l'efficacité du transfert de chaleur vers le fluide.
- G l'irradiance solaire ou rayonnement solaire incident sur le capteur (W/m^2)
- $\tau\alpha$ le **produit transmission-absorption** :

Lorsqu'un capteur solaire thermique reçoit la lumière du soleil, seule une partie de cette énergie lumineuse est réellement convertie en chaleur utile. Deux phénomènes optiques se succèdent avant que l'énergie atteigne l'absorbeur du capteur :

- **La transmission (τ)** : c'est la proportion de lumière solaire qui parvient à traverser le vitrage. Une fraction est toujours perdue par réflexion, comme sur n'importe quelle vitre.
- **L'absorption (α)** : c'est la part de la lumière transmise qui est effectivement captée par la surface noire du capteur, appelée *absorbeur*.

Le produit ($\tau\alpha$) représente donc la fraction du rayonnement solaire incident qui est réellement transformée en chaleur dans le capteur. Il constitue un paramètre optique central du capteur solaire. Il dépend directement :

- des propriétés spectrales du vitrage,
- du revêtement sélectif appliqué sur l'absorbeur,
- de l'angle d'incidence du rayonnement solaire.

Ce paramètre influence plusieurs aspects clés de la performance :

- le rendement optique η_0 tel que défini dans la norme EN ISO 9806,

- le comportement du capteur à faible différence de température (ΔT),
- la sensibilité aux salissures, à la poussière et au vieillissement des matériaux.

Un capteur performant cherchera donc à maximiser :

- τ , la transmission du vitrage sur le spectre solaire (0,3-2,5 μm),
- α , l'absorption de l'absorbeur,

tout en minimisant l'émissivité infrarouge qui n'intervient pas dans ($\tau\alpha$) mais joue un rôle essentiel dans la réduction des pertes thermiques.

Pour donner un ordre de grandeur : si 95 % de la lumière traverse le vitrage ($\tau = 0,95$) et que 95 % de cette lumière est absorbée par l'absorbeur ($\alpha = 0,95$), alors ($\tau\alpha$) $\approx 0,90$. Autrement dit, jusqu'à 90 % du rayonnement incident peut être absorbé par l'absorbeur, ce qui explique les rendements utiles élevés (souvent 50 à 75 % en conditions réelles) : l'une des raisons pour lesquelles le solaire thermique affiche des rendements très élevés, bien supérieurs à ceux du photovoltaïque.

- **U_L le coefficient global de pertes thermiques ($\text{W/m}^2\text{K}$)** : Même si un capteur reçoit beaucoup de soleil, il perd aussi de la chaleur vers l'extérieur par l'air, par les parois et par rayonnement.

Le coefficient **UL** indique à quelle vitesse le capteur perd de la chaleur quand il est plus chaud que l'air ambiant.

Plus UL est faible, mieux le capteur est isolé. C'est pour cela que :

- les capteurs plans sont très bons à basse température,
- les tubes sous vide sont meilleurs quand il fait froid ou quand on veut de l'eau très chaude.

UL ($\text{W/m}^2\text{K}$) agrège l'ensemble des flux thermiques sortants que sont la conduction (par l'arrière et les flancs), la convection (naturelle et forcée/vent) et le rayonnement infrarouge. Ce paramètre est quasi constant ¹ pour un capteur donné, déterminant dans la pente du rendement $\eta(\Delta T/G)$, un critère clé pour comparer capteurs plans et tubes sous vide.

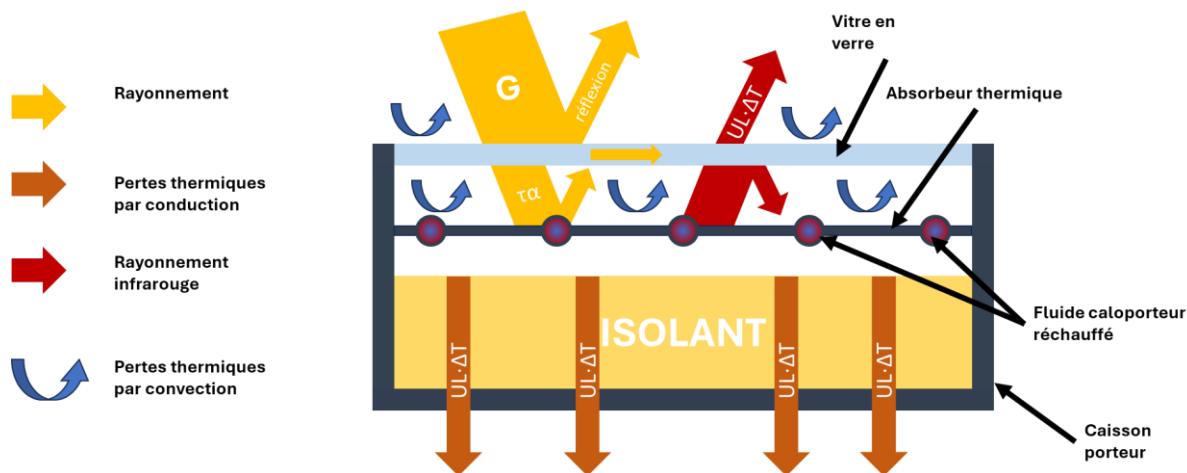
- T_{in} la température moyenne du fluide
- T_a la température ambiante
- $T_{in} - T_a$ peut être abrégé par ΔT (ce qui peut se simplifier en $U_L \Delta T$ dans la formule ci-dessus)

Cette relation met en évidence l'importance du contrôle des pertes thermiques, en particulier lorsque la température de fonctionnement augmente.

2.2. CHAÎNE DE CONVERSION ÉNERGÉTIQUE

La chaîne de conversion du solaire thermique peut être schématisée comme suit :

¹ En pratique, UL dépend légèrement du vent, du rayonnement infrarouge du ciel et de la température absolue.



Le schéma ci-dessus illustre la transformation du rayonnement solaire en énergie thermique exploitable. Ce processus n'est pas intégral et se décompose en trois flux distincts :

- **L'apport d'énergie (G)** : Le rayonnement incident traverse le vitrage (transmission τ) avant d'être capté par l'absorbeur noir (absorption α). Le produit ($\tau\alpha$) représente la fraction maximale d'énergie transformable en chaleur, qui peut atteindre environ 90 % sur les capteurs modernes.
- **Les pertes optiques** : Une fraction du rayonnement ne parvient jamais à l'absorbeur à cause de la réflexion sur le vitrage ou de l'absorption par le verre lui-même.
- **Les pertes thermiques ($U_L \Delta T$)** : C'est le défi majeur de la technologie. Dès que l'absorbeur chauffe, il cherche à dissiper cette chaleur vers l'air ambiant plus froid. Ces pertes s'échappent par :
 - **Convection et rayonnement infrarouge** à travers la vitre avant.
 - **Conduction** à travers l'isolant et le caisson porteur (flèches brunes sur le schéma)

L'énergie utile (\dot{Q}_u) est donc le solde restant : c'est la chaleur que le fluide caloporteur parvient à "voler" au panneau pour l'emmener vers le ballon de stockage ou l'utilisation. Comme l'indique la relation de Hottel-Whillier, plus la température du fluide (T_{in}) est élevée, plus les flèches de pertes (U_L) grossissent, réduisant mécaniquement l'énergie utile finale.

2.2.1. Le rayonnement solaire et la conversion thermique

Le solaire thermique repose sur un principe simple : l'absorption du rayonnement solaire par une surface absorbante, qui élève sa température et transfère cette chaleur à un fluide caloporteur. Contrairement au photovoltaïque, où seule une fraction du spectre lumineux est convertie en électricité, une large part du spectre solaire incident peut être valorisée sous forme de chaleur².

Les rendements énergétiques instantanés des capteurs solaires thermiques peuvent dépasser 70 %, ce qui explique leur pertinence pour les usages thermiques directs.

2.2.2. Composants fondamentaux

Un système solaire thermique se compose généralement des éléments suivants :

² Le rayonnement **réfléchi** et **transmis** vers l'arrière ne sont pas valorisés.

- **Capteurs solaires thermiques** (plans vitrés, plans non vitrés ou tubes sous vide) qui servent à convertir le rayonnement solaire en chaleur avec un minimum de pertes optiques et thermiques. Ils procèdent à une absorption sélective et réalisent un transfert thermique au fluide caloporteur. Ces capteurs ont une longue durabilité de plus de 25 ans et une grande tenue à la stagnation (capacité à **résister sans dommage** aux conditions extrêmes qui apparaissent lorsque le fluide caloporteur **ne circule plus** et que le capteur continue à recevoir du soleil.)
- **Fluide caloporteur**, souvent un mélange eau-glycol pour éviter le gel (compromis thermodynamique et opérationnel), vise à transporter la chaleur, la stocker et la redistribuer. Le fluide a comme rôle le transfert thermique efficace, la protection antigel, limiter la corrosion et doit disposer d'une stabilité chimique à long terme.
- **Circuit hydraulique** avec pompe de circulation sert à contrôler le flux de chaleur et garantir la sécurité en permettant la maîtrise de la circulation, d'absorber les dilatations et protéger contre les surpressions et ébullition. Cela inclut pompe, vase d'expansion, soupape, purgeurs, vannes.
- **Échangeur de chaleur** sépare le circuit solaire (liquide caloporteur) du circuit utilisateur.
- **Ballon de stockage thermique :**

Le soleil ne chauffe pas forcément au moment où l'on a besoin d'eau chaude. Le ballon sert donc à « *mettre de côté* » la chaleur produite quand le soleil brille, pour pouvoir l'utiliser plus tard, quand on en a réellement besoin.

Sur le plan technique, on dit qu'il assure un **découplage temporel** : la production et la consommation ne doivent plus être synchrones. Grâce à ce stockage, une installation solaire peut couvrir une part beaucoup plus importante des besoins quotidiens. C'est ce qu'on appelle **le taux de couverture solaire**.

Un bon ballon ne se contente pas de stocker de l'eau chaude. Il gère aussi la **stratification thermique**, c'est-à-dire la superposition naturelle de couches d'eau à différentes températures. Cette stratification est essentielle : elle permet au capteur solaire de travailler dans de bonnes conditions (en envoyant l'eau la plus froide possible vers le capteur) et d'optimiser l'usage de l'eau chaude disponible.

En résumé, le ballon de stockage est bien plus qu'un simple réservoir. **C'est l'élément qui transforme l'énergie solaire, intermittente par nature, en une chaleur réellement utile et disponible au bon moment.** Sans un stockage bien conçu, le rendement global d'une installation solaire thermique s'effondrerait.

- **Système de régulation** assurant l'optimisation des flux énergétiques. Dans une installation solaire thermique, la régulation joue un rôle absolument essentiel. Sans elle, le système fonctionnerait mal... et pourrait même devenir dangereux. Son objectif est simple : **optimiser en permanence les flux d'énergie** pour tirer le meilleur parti du soleil tout en protégeant l'installation.

Concrètement, la régulation compare en continu la température du capteur solaire et celle du ballon de stockage. Dès que le capteur devient plus chaud que l'eau du ballon, elle met en route la pompe pour transférer la chaleur. À l'inverse, si le capteur est plus froid, elle empêche toute circulation inutile. Cela évite les **circulations parasites**, qui refroidiraient le ballon au lieu de le chauffer.

Mais son rôle ne s'arrête pas là. La régulation assure aussi la **sécurité** de l'installation. En cas de très forte chaleur, elle gère les situations de **stagnation** pour éviter les surchauffes. En hiver, elle peut activer des stratégies de **protection antigel** pour préserver le circuit solaire.

D'un point de vue technique, la régulation maximise donc :

- l'**énergie utile** réellement récupérée,
- la **durée de vie** des composants,
- la **stabilité** du système dans toutes les conditions climatiques.

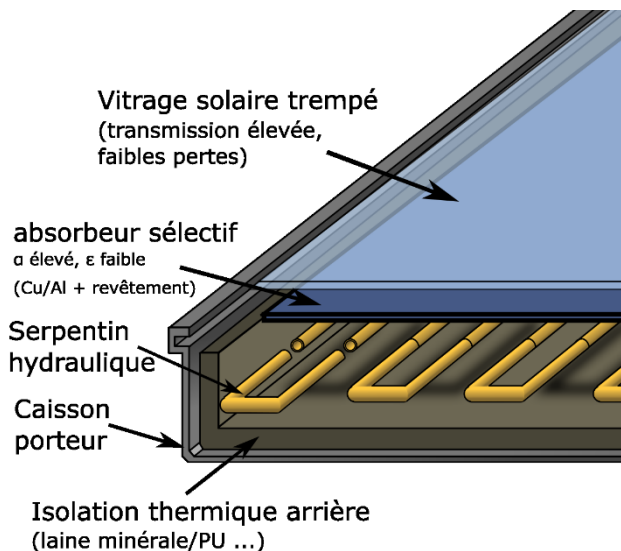
En résumé, la régulation est le cerveau du solaire thermique. **C'est elle qui transforme un simple capteur en un système performant, fiable et durable.**

3. Les technologies de capteurs solaires thermiques

3.1. CAPTEURS PLANS VITRÉS : COMPOSITION DÉTAILLÉE ET FONCTIONNEMENT

Les capteurs plans vitrés constituent la technologie la plus répandue pour les applications résidentielles et tertiaires basse température.

Un capteur plan vitré est constitué des couches suivantes (de l'avant vers l'arrière) :



- un vitrage solaire
- un matériau absorbeur thermique sélectif
- un circuit caloporteur constitué de tube (serpentin) pour transporter le fluide caloporteur
- une couche isolante
- et un cadre rigide

Le revêtement sélectif joue un rôle clé : il maximise l'absorption du rayonnement solaire ($\alpha \approx 0,95$) tout en minimisant l'émissivité infrarouge ($\epsilon \approx 0,05$), réduisant ainsi les pertes radiatives.

Les capteurs plans vitrés présentent :

- un excellent rendement pour des écarts de température modérés ($\Delta T < 40$ K),

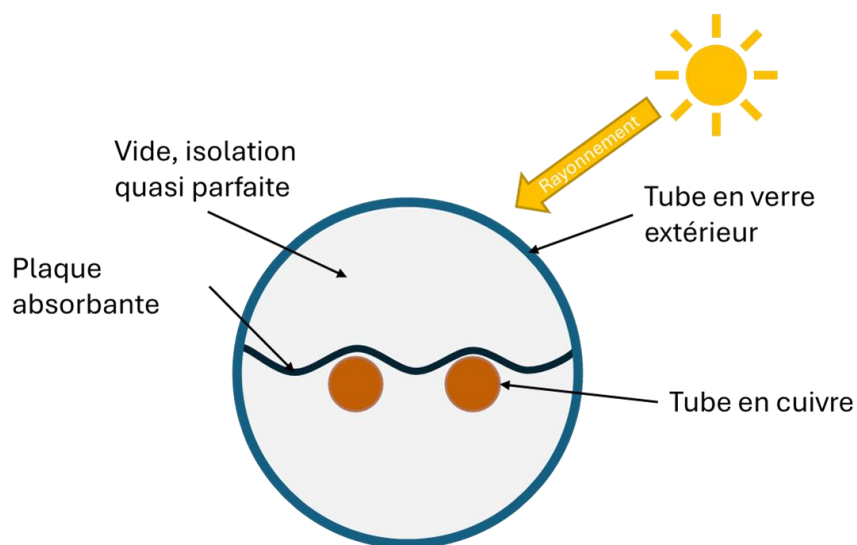
illustration : source wikipedia

- une décroissance progressive des performances lorsque la température du fluide augmente.

Ils sont donc particulièrement adaptés à la production d'eau chaude sanitaire (ECS) et au préchauffage de réseaux basse température.

3.2. CAPTEURS À TUBES SOUS VIDE : FONCTIONNEMENT ET SPÉCIFICITÉS

Les capteurs à tubes sous vide sont conçus pour réduire drastiquement les pertes thermiques par convection et conduction, qui sont les points faibles des capteurs plans en conditions difficiles. Le principe repose sur une série de tubes en verre double paroi à l'intérieur desquels on a fait le vide, créant une isolation thermique quasi parfaite, similaire à celle d'une bouteille isotherme. À l'intérieur de ces tubes, une plaque absorbante capte le rayonnement pour chauffer un tube en cuivre.



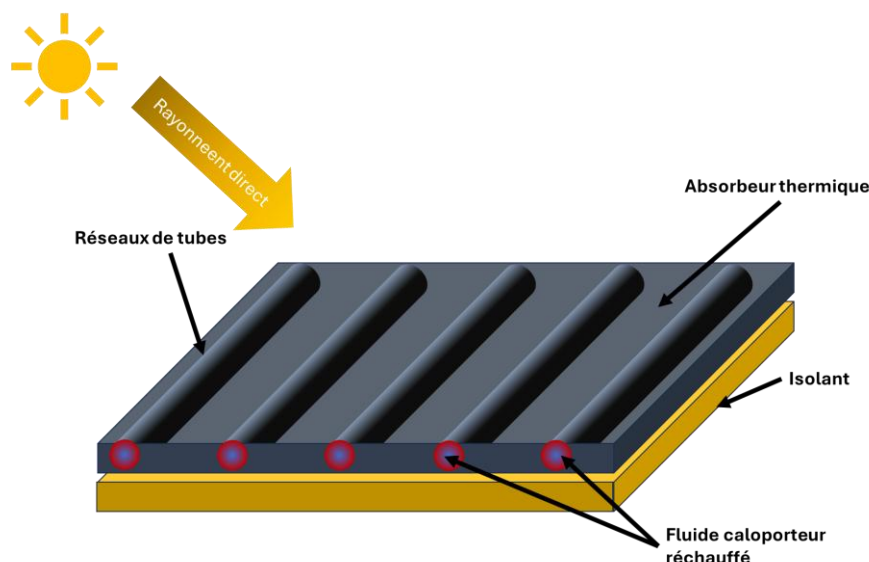
Deux architectures technologiques dominent ce marché :

- les tubes à « circulation directe », où le fluide caloporteur parcourt l'intégralité du tube,
- les tubes à « caloduc » (*heat pipe*), où un fluide intermédiaire s'évapore et se condense pour transférer la chaleur de manière extrêmement rapide et efficace.

Grâce à cette capacité à conserver la chaleur même lorsque l'écart de température avec l'extérieur est important, ces capteurs sont particulièrement adaptés aux climats froids, aux installations nécessitant de l'eau à haute température, ainsi qu'aux applications industrielles et collectives exigeantes. Ils conservent ainsi une courbe de rendement plus stable que les capteurs plans lorsque la température de fonctionnement augmente.

3.3. CAPTEURS NON VITRÉS ET SOURCES BASSE TEMPÉRATURE

Les capteurs non vitrés, souvent constitués de réseaux de tubes en polymère noir (EPDM ou polypropylène) ou de plaques métalliques simples, fonctionnent sans isolation ni vitrage de protection.



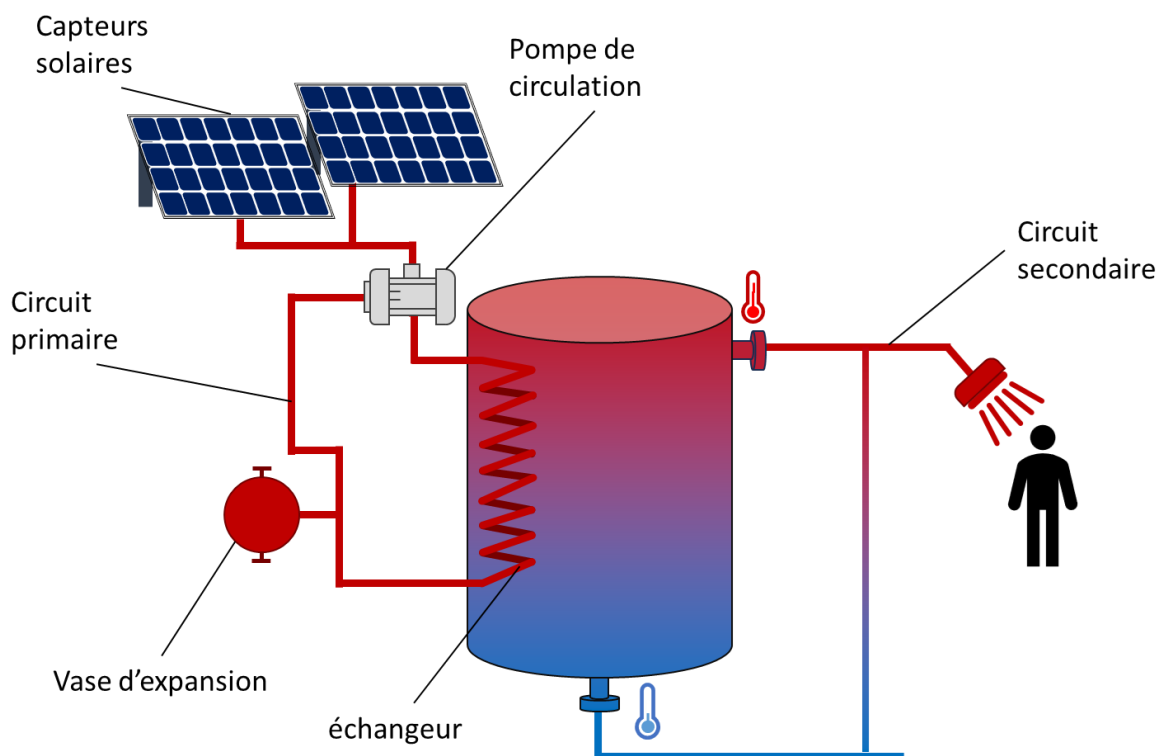
Cette absence de barrière thermique les rend extrêmement sensibles au vent et aux variations de température extérieure, limitant leur usage à des applications où le fluide doit être chauffé à une température très proche de celle de l'air ambiant. Ils excellent ainsi dans le chauffage de piscines de plein air durant la période estivale, où les besoins de montée en température sont modérés. Au-delà de cet usage classique, ils connaissent un regain d'intérêt technologique majeur en tant que sources thermiques pour les pompes à chaleur (PAC) ou au

sein de réseaux de chaleur de « cinquième génération » à ultra-basse température. Dans ces configurations, le capteur agit comme un échangeur d'énergie environnementale, captant non seulement le rayonnement solaire direct, mais aussi les calories de l'air ambiant et de la pluie, offrant ainsi une source de chaleur plus performante et stable que l'air extérieur seul pour le cycle thermodynamique de la PAC.

4. Architecture hydraulique et régulation des systèmes solaires thermiques

4.1. CIRCUIT PRIMAIRE ET CIRCUIT SECONDAIRE

Un système solaire thermique performant repose sur l'interaction de deux boucles hydrauliques distinctes, reliées par un échangeur de chaleur qui assure le transfert thermique sans mélange des fluides.



Le **circuit primaire**, situé entre les capteurs et l'échangeur, fonctionne en boucle fermée et utilise généralement un mélange d'eau et de glycol pour prévenir le gel et limiter la corrosion. Ce circuit est le cœur battant de l'installation : il intègre des organes de sécurité critiques, tels qu'un vase d'expansion pour absorber les variations de volume dues à la dilatation du fluide, une pompe de circulation (circulateur), et des soupapes de protection contre les surpressions.

Une fois la chaleur transportée vers l'échangeur, elle est transférée au **circuit secondaire**, qui distribue l'énergie vers les usages finaux comme l'eau chaude sanitaire ou le réseau de chauffage. Cette séparation garantit que l'eau consommée par l'utilisateur reste sanitaire et protégée des composants chimiques du circuit de captage.

4.2. RÉGULATION DIFFÉRENTIELLE : LE PILOTAGE INTELLIGENT DES FLUX

La régulation différentielle constitue le centre décisionnel de l'installation solaire thermique, garantissant que le transfert de calories ne s'opère que lorsqu'il est réellement bénéfique. Son principe repose sur une comparaison constante, via des sondes de précision, entre la température en sortie des capteurs (T_{capteur}) et celle du bas du ballon de stockage (T_{ballon}).

Le système active le circulateur uniquement lorsqu'un écart positif suffisant est détecté (typiquement $\Delta T_{on} \approx 6$ à 10 degré), ce qui assure que l'énergie solaire récupérée est supérieure à la consommation électrique de la pompe et aux pertes thermiques du réseau de tuyauterie.

À l'inverse, la pompe est coupée dès que cet écart descend sous un seuil critique ($\Delta T_{off} \approx 2$ à 4 degré) pour éviter les « circulations parasites » qui auraient pour effet inverse de refroidir le ballon vers l'extérieur durant la nuit ou par temps très couvert.

Au-delà de cette gestion de flux, la régulation moderne intègre des fonctions de sécurité avancées, comme le mode « vacances » (refroidissement nocturne du ballon pour prévenir la stagnation le lendemain) ou la protection antigel, prolongeant ainsi considérablement la durée de vie des composants et du fluide caloporteur.

4.3. GESTION DE LA STAGNATION

La gestion de la stagnation est le défi critique de toute installation solaire thermique, survenant lorsque le ballon de stockage est saturé alors que l'ensoleillement reste maximal. Dans cet état, le fluide caloporteur cesse de circuler et peut se transformer en vapeur, soumettant les composants à des pressions et températures extrêmes (pouvant dépasser 180°C , voire 250°C pour certains capteurs à tubes sous vide). Pour garantir la pérennité du système, les concepteurs privilégient des stratégies de « sécurité intrinsèque » : l'utilisation de vases d'expansion largement dimensionnés pour absorber tout le volume de liquide vaporisé, le choix de fluides haute température ou encore l'inclinaison optimale des capteurs pour favoriser une vidange naturelle du serpentin par gravité (systèmes drain-back). Une régulation intelligente peut également anticiper ces phases en activant un refroidissement nocturne, faisant circuler le fluide une fois la nuit tombée pour dissiper l'excédent de chaleur du ballon via les capteurs vers le ciel étoilé.

5. Intégration du solaire thermique dans des systèmes énergétiques complexes

Le solaire thermique ne doit plus être perçu comme une solution isolée, mais comme un module flexible s'insérant dans des architectures énergétiques multi-sources. Son rôle est de fournir une base thermique décarbonée, dont la valeur est maximisée par des couplages intelligents.

5.1. SYNERGIE SOLAIRE THERMIQUE – POMPE À CHALEUR (PAC)

Le couplage avec une pompe à chaleur permet de surmonter les limites de température de chaque technologie.

Dans un système combiné, le solaire thermique peut agir de deux manières :

- **En appoint direct** : Le soleil préchauffe l'eau du stockage. La PAC n'intervient que pour fournir le complément de température nécessaire, réduisant ainsi son temps de fonctionnement et l'usure de son compresseur.
- **En source froide assistée** : Les capteurs solaires (notamment les modèles non vitrés ou PVT) servent à stabiliser ou réchauffer la source froide de la PAC (air ou géothermie). En augmentant la température à l'évaporateur, on améliore drastiquement le Coefficient de Performance (COP) saisonnier, permettant des économies d'électricité substantielles même lors des journées froides mais ensoleillées.

5.2. RÉSEAUX DE CHALEUR SOLAIRE ET STOCKAGE INTERSAISONNIER

À l'échelle d'un quartier ou d'une collectivité, le solaire thermique devient un pilier des réseaux de chaleur de nouvelle génération.

- **Mutualisation et stockage de masse** : L'utilisation de ballons de stockage de très grande capacité, voire de stockages géothermiques (BTES), permet de conserver la chaleur excédentaire produite en été pour la redistribuer durant l'automne ou l'hiver.
- **Réseaux basse température** : En s'intégrant dans des réseaux dits "à basse température", le solaire thermique minimise les pertes en ligne et permet l'utilisation de capteurs plus simples et moins coûteux, tout en garantissant une intégration harmonieuse avec d'autres sources comme la récupération de chaleur fatale industrielle.

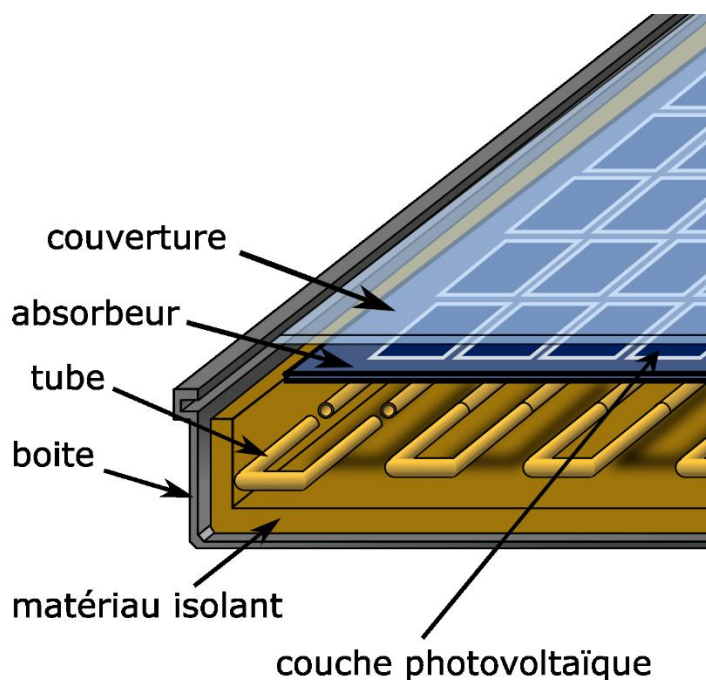
5.3. VERS DES COMMUNAUTÉS D'ÉNERGIE THERMIQUE

L'intégration complexe débouche naturellement sur une gouvernance collective de l'énergie. En partageant une surface de captage optimisée et un stockage commun, les utilisateurs bénéficient d'un coût de la chaleur réduit et d'une résilience accrue face aux fluctuations des prix de l'énergie fossile ou électrique. Cette approche transforme le bâtiment d'un simple consommateur en un maillon actif d'un écosystème énergétique territorial.

6. Panneaux photovoltaïques-thermiques (PVT)

6.1. STRUCTURE MULTICOUCHE D'UN PANNEAU PVT

Un panneau photovoltaïque-thermique (PVT) est une pièce d'ingénierie complexe qui superpose plusieurs couches fonctionnelles pour transformer un seul module en cogénérateur d'énergie. Sa structure se décompose généralement comme suit :



1. La face avant vitrée (optionnelle) :

Comme sur un panneau thermique classique, elle protège les cellules et crée un effet de serre. Si elle améliore le rendement thermique, elle peut légèrement réduire le rendement électrique par réflexion.

2. La couche photovoltaïque :

Composée de cellules au silicium (monocristallin ou polycristallin), elle capte les photons pour générer un courant continu. Cependant, 80 % de l'énergie solaire reçue par ces cellules est normalement perdue sous forme de chaleur, ce qui diminue leur efficacité.

3. L'interface thermique (encapsulant) :

C'est une couche critique de transfert. Elle doit être à la fois isolante électriquement pour protéger les cellules et très conductrice thermiquement pour évacuer la chaleur vers

l'absorbeur.

4. **L'absorbeur métallique** : Généralement en cuivre ou en aluminium, cette plaque est intimement liée à un réseau de tubes (serpentins ou canaux parallèles). Elle récupère la chaleur des cellules PV pour la transmettre au fluide caloporteur.
5. **L'isolation arrière** : Une couche de laine de roche ou de mousse polyuréthane haute densité limite les pertes de chaleur vers l'arrière du panneau, garantissant que l'énergie thermique est bien dirigée vers le circuit hydraulique.

En circulant à l'arrière des cellules, le fluide (eau glycolée) joue le rôle de "refroidisseur". En abaissant la température des cellules de quelques dizaines de degrés, il empêche la chute de tension liée à la chaleur, augmentant ainsi la production électrique tout en collectant une énergie thermique précieuse qui serait autrement gaspillée.

Cette récupération de chaleur permet simultanément :

1. **D'augmenter le rendement énergétique global par mètre carré**, en exploitant le spectre solaire plus largement que le photovoltaïque seul.

2. **De stabiliser la température des cellules photovoltaïques**, les maintenant dans une plage de fonctionnement optimale pour maximiser leur efficacité électrique.
3. **De réduire les contraintes thermomécaniques sur les modules**, limitant les cycles de dilatation/contraction qui peuvent, à terme, endommager les cellules et les connexions électriques.

6.2. PVT COMME SOURCE POUR POMPE À CHALEUR

Le couplage entre panneaux photovoltaïques-thermiques (PVT) et pompe à chaleur constitue une synergie technologique majeure pour l'autoconsommation totale. Dans cette configuration, le panneau PVT joue un double rôle : il produit de l'électricité pour alimenter le compresseur de la PAC et sert simultanément de source de chaleur pour l'évaporateur. En récupérant les calories à basse température derrière les cellules photovoltaïques, le fluide caloporteur stabilise la source froide à un niveau de température souvent plus élevé et plus constant que l'air extérieur en hiver. Ce mécanisme permet d'augmenter significativement le COP (le Coefficient de Performance) saisonnier de la PAC tout en refroidissant les cellules photovoltaïques, ce qui améliore leur rendement électrique de l'ordre de 3 à 8 % par rapport à un panneau conventionnel qui surchauffe au soleil (5% est courant ; ~10 % dans des conditions optimales).

7. Pré-dimensionnement des installations solaires thermiques

7.1. PRINCIPES GÉNÉRAUX

Le dimensionnement d'une installation solaire thermique ne cherche pas l'autonomie totale, qui conduirait à un surdimensionnement coûteux et ingérable en été. L'objectif est de trouver le point d'équilibre économique et technique pour maximiser la **fraction solaire**³, c'est-à-dire le pourcentage des besoins annuels couverts par le soleil. Un dimensionnement rigoureux repose sur la méthode historique F-Chart ou des outils de simulation dynamique modernes, qui croise les besoins thermiques mensuels, le profil de consommation (souvent plus élevé le matin et le soir) et les données météorologiques locales (irradiation sur plan incliné).

7.2. ORDRES DE GRANDEUR POUR L'EAU CHAUDE SANITAIRE

Pour une installation résidentielle individuelle en Europe tempérée, le système est dimensionné pour couvrir 60 % à 80 % des besoins en été, et environ 20 % à 30 % en hiver.

Besoin ECS : On estime la consommation à environ 30 à 50 litres d'eau à 60 °C par personne et par jour (soit 800 à 1 000 kWh/an/personne).

Surface de captage : On compte généralement 0,8 à 1,2 m² de capteurs plans vitrés par personne. Une famille de 4 personnes nécessitera donc entre 4 et 6 m² de panneaux.

Volume de stockage : Le ratio de stockage est crucial pour stabiliser le système. On préconise 50 à 75 litres de stockage par m² de capteur. Ce volume permet de créer un "effet tampon" permettant de lisser un à deux jours de faible ensoleillement selon les usages, sans solliciter l'appoint.

³ La fraction solaire, souvent notée f , désigne le rapport entre l'énergie thermique utile fournie par l'installation solaire et la demande ou charge thermique totale du bâtiment (besoin en eau chaude sanitaire et chauffage). Elle est au cœur de la méthode F-Chart, développée par Duffie et Beckman, qui permet de prédire les performances d'un système en croisant les apports solaires absorbés et les pertes thermiques des capteurs. Un indice f de 0,6 signifie que 60 % des besoins annuels sont couverts par le soleil, les 40% restants étant assurés par l'appoint.

7.3. DIMENSIONNEMENT POUR LE CHAUFFAGE ET LE COLLECTIF

Dès que l'on intègre le soutien au chauffage ou des besoins collectifs, la complexité du dimensionnement augmente.

- **Chauffage (SSC)** : La surface de captage est souvent multipliée par 2 ou 3 par rapport à l'ECS seule (environ 10 à 15 m² pour une maison individuelle). Pour éviter la surchauffe estivale, on privilégie une **inclinaison forte (60°)** : cela favorise la captation du soleil bas en hiver (besoin de chauffage) et limite l'exposition au soleil vertical en été.
- **Applications collectives (logements, hôpitaux)** : La surface solaire est souvent limitée à **10-30 % de la surface de toiture disponible**. Le stockage joue un rôle central, non seulement pour le lissage quotidien, mais aussi pour la gestion des pointes de soutirage.
- **Intégration systémique** : L'efficacité est décuplée lorsque le système est couplé à des émetteurs **basse température** (planchers chauffants ou radiateurs surdimensionnés), car plus la température de retour du circuit de chauffage est basse, meilleur est le rendement des capteurs solaires (réduction du terme de l'équation de Hottel-Whillier).

8. Courbes de rendement et performances des capteurs

Les performances d'un capteur solaire thermique ne peuvent pas être résumées par un simple pourcentage affiché sur une brochure commerciale. Elles sont décrites, dans les modèles physiques fondamentaux, par la relation de Hottel-Whillier exprimant la puissance utile. Contrairement à de nombreuses technologies énergétiques, **le rendement d'un capteur solaire dépend directement de ses conditions de fonctionnement**, en particulier de la température à laquelle il opère et de l'ensoleillement disponible.

Pour permettre une comparaison objective entre capteurs, les performances sont mesurées selon la norme **EN ISO 9806** et décrites par une relation de rendement instantané :

$$\eta = \eta_0 - a_1 \cdot \frac{(T_m - T_a)}{G} - a_2 \cdot \frac{(T_m - T_a)^2}{G}$$

Dans cette expression, η_0 représente le rendement optique du capteur, c'est-à-dire sa capacité à absorber le rayonnement solaire lorsque sa température est proche de celle de l'air ambiant. Les coefficients a_1 et a_2 traduisent quant à eux les pertes thermiques, respectivement linéaires et radiatives, qui augmentent lorsque le capteur fonctionne à une température plus élevée. Le terme $(T_m - T_a)/G$ synthétise ainsi l'écart thermique avec l'environnement et l'intensité du rayonnement solaire.

Cette formulation met en évidence un point fondamental : **le rendement d'un capteur solaire n'est jamais constant**. Il diminue progressivement à mesure que la température de fonctionnement augmente, car les pertes thermiques deviennent plus importantes.

À faible écart de température entre le capteur et l'air ambiant, le rendement reste proche de son maximum. C'est dans ce régime que le solaire thermique exprime tout son potentiel, notamment pour la production d'eau chaude sanitaire, le chauffage de piscines ou l'alimentation de réseaux basse température. Lorsque la température demandée augmente, les pertes thermiques s'accroissent et le rendement décroît de manière progressive. À très haute température, ce sont principalement les pertes radiatives qui dominent, entraînant une chute plus rapide des performances.

Cette évolution est représentée par les **courbes de rendement**, qui permettent de comparer objectivement les différentes technologies de capteurs. Les capteurs plans vitrés présentent généralement un excellent rendement optique initial, ce qui les rend particulièrement performants à basse et moyenne température. En revanche, leurs pertes thermiques augmentent plus rapidement lorsque la température du fluide s'élève. À l'inverse, les capteurs à tubes sous vide, grâce à leur isolation renforcée, limitent fortement ces pertes et conservent de meilleures performances lorsque l'écart de température avec l'extérieur devient important.

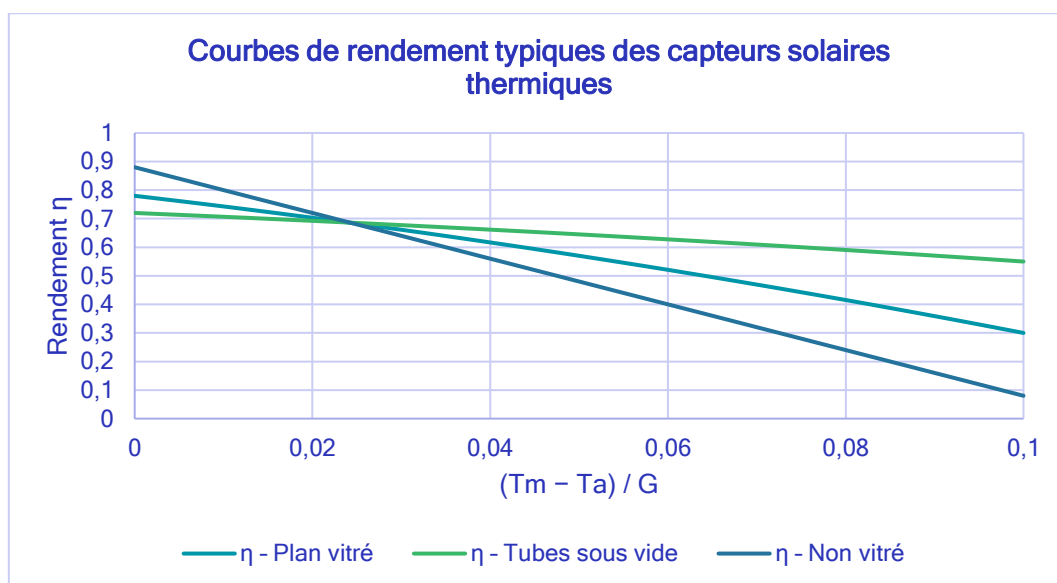
Il n'existe donc pas de « meilleur capteur » en valeur absolue. **La pertinence d'une technologie dépend avant tout du régime de température du système** dans lequel elle est intégrée. Un capteur plan correctement dimensionné sera souvent plus efficace et plus économique pour une installation d'eau chaude sanitaire, tandis qu'un capteur à tubes sous vide prendra l'avantage pour des applications nécessitant des températures plus élevées ou dans des climats froids.

Au-delà des caractéristiques propres aux capteurs, les performances réelles dépendent fortement des conditions d'exploitation. La température de retour vers le capteur joue un rôle déterminant : plus le fluide qui revient est froid, meilleur est le rendement. C'est pourquoi les systèmes solaires thermiques sont

particulièrement performants lorsqu'ils sont associés à des émetteurs basse température et à des ballons de stockage bien stratifiés. L'orientation, l'inclinaison, l'exposition au vent ou encore la qualité de la régulation hydraulique influencent également la production utile annuelle.

Il est enfin essentiel de distinguer le **rendement instantané du capteur**, mesuré en laboratoire, du **rendement global du système** sur une année complète. Le stockage, les pertes dans les canalisations, la stratégie de régulation et l'adéquation entre production solaire et besoins réels pèsent souvent davantage sur la performance finale que le choix d'un capteur légèrement plus performant sur le papier.

Cette lecture des courbes de rendement rappelle une réalité souvent sous-estimée dans les politiques énergétiques : **lorsque le besoin final est de la chaleur, la production directe de chaleur solaire est thermodynamiquement plus efficace que toute conversion indirecte via l'électricité**. C'est précisément dans ces usages, à température modérée et bien intégrés dans un système cohérent, que le solaire thermique révèle tout son potentiel pour la transition énergétique.



Courbes de rendement typiques de capteurs solaires thermiques (cas belge). Les courbes illustrent l'influence du régime de température sur les performances de différentes technologies de capteurs. Les coefficients sont représentatifs d'installations courantes en Belgique et visent une comparaison qualitative des domaines d'excellence thermique.

Comment lire cette courbe ?

À gauche du graphique, lorsque le terme $(T_m - T_a) / G$ est faible, le capteur fonctionne à une température proche de celle de l'air ambiant. Dans cette zone, **tous les capteurs affichent des rendements élevés**, avec un avantage marqué pour les capteurs non vitrés et les capteurs plans vitrés. Ce régime correspond aux applications basse température, comme le chauffage de piscines, l'eau chaude sanitaire ou les réseaux de chaleur très basse température.

Lorsque la température de fonctionnement augmente, les courbes se séparent nettement. Le rendement des capteurs non vitrés chute rapidement, car leurs pertes thermiques sont élevées en l'absence d'isolation. Les capteurs plans vitrés conservent de bonnes performances à température modérée, mais leur rendement décroît progressivement à mesure que l'écart de température augmente.

Les capteurs à tubes sous vide se distinguent par une pente beaucoup plus faible : grâce à leur isolation renforcée, ils **limitent fortement les pertes thermiques** et conservent des rendements élevés même à

température de fonctionnement élevée. Cette caractéristique explique leur pertinence pour les climats froids, les applications collectives ou industrielles, et les systèmes nécessitant des températures supérieures à celles de l'eau chaude sanitaire.

Hypothèses retenues (Belgique)

Ces valeurs sont **volontairement représentatives**, ni optimistes ni défavorables :

- **Irradiance de référence** : $G = 800 \text{ W/m}^2$
(valeur courante pour comparer les capteurs en Europe de l'Ouest)
- Capteurs conformes **EN ISO 9806**
- Applications :
 - ECS collective / résidentielle
 - chauffage basse température
 - climat tempéré, vents modérés

9. Synthèse : comparaison des technologies solaires et thermiques

Comparaison synthétique

Technologie	Énergie produite	Rendement typique	Usages principaux	Points forts	Limites
Solaire thermique	Chaleur	50-75 %	ECS, chauffage, industrie	Très efficace, robuste	Besoin de stockage
Photovoltaïque	Électricité	15-22 %	Électricité tous usages	Polyvalence	Faible rendement surfacique
PVT	Chaleur + élec.	Global > 60 %	Surfaces limitées, PAC	Double valorisation	Coût, complexité
Pompe à chaleur	Chaleur	COP 3 à 5	Chauffage, ECS	Très performante	Dépend d'une source

Lecture systémique

Ces technologies ne sont pas concurrentes mais complémentaires. Une stratégie énergétique cohérente combine :

- solaire thermique pour la chaleur directe,
- photovoltaïque pour l'électricité,
- PAC pour l'élévation de température,
- stockage et mutualisation pour l'optimisation collective.

10. Conclusion : Le Solaire Thermique, Pilier d'une Chaleur Souveraine et Décarbonée

Le solaire thermique apparaît comme un pilier sous-exploité de la transition énergétique. Sa forte efficacité, sa maturité technologique et sa complémentarité avec les pompes à chaleur et le photovoltaïque en font une solution centrale pour la décarbonation de la chaleur, en particulier dans des cadres coopératifs et collectifs.

Loin d'être une technologie du passé ou un simple complément au photovoltaïque, le solaire thermique s'impose aujourd'hui comme une solution technologique de pointe, capable de répondre à l'immense défi de la transition thermique. Sa force réside dans sa simplicité physique : convertir directement le rayonnement solaire en chaleur avec des rendements dépassant les 70 %, là où d'autres technologies subissent des pertes de conversion importantes.

Cette mutation technologique est portée par trois leviers majeurs :

- **La maturité des équipements** : Qu'il s'agisse de la robustesse des capteurs plans ou de la performance des tubes sous vide en conditions extrêmes, les solutions actuelles offrent une durabilité supérieure à 25 ans.
- **L'intelligence systémique** : Grâce à une régulation différentielle fine et à des couplages innovants avec les pompes à chaleur (PAC) ou les panneaux hybrides PVT, le solaire thermique ne se contente plus de chauffer de l'eau ; il devient le "cerveau" énergétique qui stabilise et optimise l'ensemble du système de chauffage.
- **Le passage au collectif** : L'avenir de la technologie se dessine à l'échelle des quartiers. À travers les réseaux de chaleur de nouvelle génération et le stockage intersaisonnier, le solaire thermique permet de mutualiser les ressources pour garantir une énergie à bas coût, protégée des fluctuations du marché électrique.

En conclusion, la chaleur solaire est une ressource locale, inépuisable et immédiatement exploitable. Redonner au solaire thermique sa juste place dans le mix énergétique n'est pas seulement un choix technique, c'est une étape indispensable vers une souveraineté énergétique européenne durable et solidaire.

Bibliographie

- Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2013). *Solar engineering of thermal processes* (4th ed.). Wiley. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/9781118671603.fmatter>
- Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE. (n.d.). *Publications on solar thermal and PVT technologies*. <https://www.ise.fraunhofer.de/en/publications.html>
- IEA Solar Heating and Cooling Programme. (2020). *Solar heat worldwide: Global market development and trends*. International Energy Agency. <https://www.iea-shc.org/solar-heat-worldwide>
- IEA Solar Heating and Cooling Programme. (2018-2022). *Task 60: PVT Systems - Application of photovoltaic-thermal solar energy in buildings*. International Energy Agency. <https://task60.iea-shc.org>
- Kalogirou, S. A. (2014). *Solar energy engineering: Processes and systems* (2nd ed.). Academic Press. https://library.uniteddiversity.coop/Energy/Solar/Solar_Energy_Engineering-Processes_and_Systems.pdf
- Liu, M., Saman, W., & Bruno, F. (2018). *Review on storage materials and thermal performance enhancement techniques for high temperature phase change thermal storage systems*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 82, 2739-2763. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.067>
- Nouvenergie. (s.d.). *Rendement des capteurs thermiques*. M2E - Marc Seguin. <https://www.nouvenergie.fr/e-formation/solaire-1/rendement-capteurs/>
- Solar Keymark Network. (n.d.). *Solar Keymark database*. <https://www.solarkeymark.org>
- Van Espen, R. (2025, 2 avril). *Panneaux photovoltaïques-thermiques (PVT) : cette alternative méconnue aux panneaux solaires est-elle adaptée aux particuliers ?* Trends-Tendances. <https://trends.levif.be/immo/panneaux-photovoltaïques-thermiques-pvt-cette-alternative-meconnue-aux-panneaux-solaires-est-elle-adaptee-aux-particuliers/>
- Verein Deutscher Ingenieure. (2014). *VDI 6002 - Solar heating: Fundamentals, system technology and applications*. VDI Verlag. <https://www.vdi.de/en/home> (accès catalogue)
- Weiss, W., & Spörk-Dür, M. (2021). *Solar heat worldwide - Global market development and trends*. IEA SHC Task.
- Wu, H., Lv, X., Zhang, X., Ji, Z., & Zhu, J. (2023). *Research progress of seasonal thermal energy storage technology based on supercooled phase change materials*. Journal of Energy Storage, 68, 107378. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.107378>
- Zondag, H. A. (2008). Flat-plate PV-thermal collectors and systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(4), 891-959. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2005.12.012>