

# **Trigénération solaire basse température**

## **,Dimensionnement et performances énergétiques annuelles.**

Il convient à présent de s'intéresser au procédé de trigénération en lui-même et aux moyens à mettre en œuvre pour intégrer les deux procédés CHV3T et ORC, et notamment la gestion des boucles de fluide caloporteur.

À ce stade, il est possible de réaliser un dimensionnement plus fin des différents composants des deux procédés en vue de la conception d'un démonstrateur. Nous nous intéresserons plus particulièrement au dimensionnement des différents composants clés tels que les cylindres de transfert, la pompe de l'ORC où la turbine à vapeur.

Une modélisation de ce procédé de trigénération solaire couplé à un modèle simplifié d'habitation est ensuite développée. La simulation sur une année complète prenant en compte des données météorologiques permettra ainsi d'évaluer les productions de chaleur, de froid et d'électricité réalisées en fonction des différents besoins de l'habitation et des priorités retenues.

### **1. Le procédé de trigénération CHV3T/ORC**

Dans cette section, nous nous intéressons au couplage des procédés CHV3T et ORC pour considérer le procédé de trigénération dans son ensemble. Nous nous intéresserons également aux technologies de captation solaire ainsi qu'aux méthodes de régulation de température et nous verrons que leurs choix impactent également le choix des couples fluides et les performances du procédé. Une fois le couple fluide optimal choisi et les performances du procédé actualisées, les composants seront dimensionnés plus précisément.

#### **1.1. Choix de technologies pour la captation et l'extraction de chaleur**

La plage de température opératoire du procédé au cours de l'année affecte le choix des fluides de travail (voir section Chapitre II.2.3.2). Or, pour définir correctement cette plage de fonctionnement, différents aspects concernant les échanges entre le procédé et les sources ou puits de chaleur doivent être pris en compte.

Il convient de choisir une technologie de captation/extraction de chaleur parmi les différentes technologies existantes. Comme pour les pompes à chaleur classiques, différentes configurations d'échange de chaleur peuvent être utilisées, air/eau, eau/eau ou air/air.

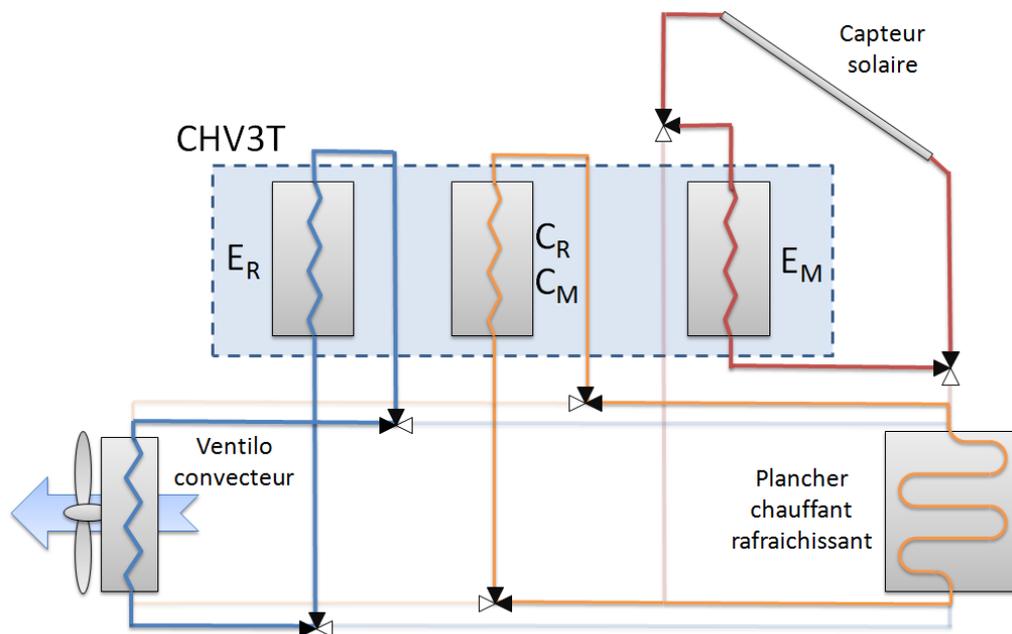
À cela s'ajoutent également les technologies utilisées pour les émetteurs de chaleur dans la maison (plancher chauffant, convecteurs, radiateurs, etc.).

Cependant, à la différence des pompes à chaleur traditionnelles pour lesquelles la commutation entre les deux modes de fonctionnement chaud ou froid s'effectue en changeant le sens de circulation du fluide frigorigène (c'est-à-dire que l'évaporateur devient condenseur, et vice versa), dans le cas du procédé CHV3T les composants gardent leur fonction à tout moment ; et c'est donc via le fluide caloporteur que la chaleur est transportée entre le lieu de production de froid (en été) ou de chaleur (en hiver), (respectivement l'évaporateur et les deux condenseurs) et soit l'intérieur, soit l'extérieur de l'habitat en fonction du mode choisi. Dans le cas d'une

application CHV3T-PAC eau/eau, cela ne pose pas de problèmes. Dans le cas d'une application CHV3T-PAC air/eau ou air/air, cela nécessite une boucle d'eau secondaire afin de relier l'évaporateur et les condenseurs aux ventilo-convecteurs intérieur et extérieur.

Une autre solution consiste à installer le procédé CHV3T à l'extérieur et d'avoir un réseau aéraulique pour distribuer l'air chaud ou froid à l'intérieur comme le font les centrales de traitement de l'air. Mais les débits d'air élevés imposent des gaines de diamètre élevé peu esthétiques et qui ne sont pas toujours possibles à installer.

Par la suite, la configuration CHV3T-PAC air/eau, de par sa simplicité de mise en œuvre, est plus particulièrement étudiée. Un plancher chauffant ou rafraîchissant est utilisé pour l'échange thermique avec l'intérieur de l'habitat ; celui-ci permet notamment le chauffage et le rafraîchissement avec un fluide caloporteur à une température proche de la température de confort désirée et ainsi d'améliorer les performances thermodynamiques du procédé CHV3T. Tandis que le rejet ou la captation des calories avec l'extérieur se feront grâce à un ventilo-convecteur (Figure V-1). De plus, une boucle secondaire de caloporteur (eau) est ajoutée afin de permettre l'échange de chaleur entre les condenseurs et évaporateurs avec chacun de ces émetteurs ou collecteurs. Il est à noter que cette distribution impacte négativement les performances de la machine en augmentant l'écart de température entre le puits de chaleur et les condenseurs d'approximativement 10 à 15 °C du fait de l'efficacité moins importante de l'échange de chaleur air/eau et induit également un surcoût du fait de l'utilisation d'électrovannes supplémentaires.



*Figure V-1 : Schéma de principe des boucles caloporteuses (ici en mode chauffage) choisi pour l'évaluation des performances annuelles.*

De ce point de vue il serait préférable d'utiliser une boucle géothermique permettant de s'affranchir des ventilo-convecteurs pour l'extraction des calories à l'extérieur. En effet en plus de diminuer le pincement de température, cette technologie permet de stabiliser les températures du puits de chaleur au cours de l'année. Néanmoins cette solution n'est pas toujours applicable et son coût peut être important.

La mise en œuvre de cette boucle fluide secondaire, indispensable au bon fonctionnement du procédé de trigénération, altère la plage de température de fonctionnement de ce procédé. Par conséquent, le choix optimal des couples de fluides de travail à utiliser, réalisé dans la section II.2.3.2, doit être réactualisé pour en tenir compte. Ainsi en considérant toujours une plage de température interne de l'évaporateur  $E_R$  et des condenseurs  $C_R$  ou  $C_M$  comprise entre  $-10\text{ °C}$  et  $+40\text{ °C}$ , la nouvelle liste de couples fluides disponible est donnée dans le Tableau V.1. Le couple préalablement choisi, R1234yf/R1233zd, qui arrivait alors en 16<sup>ème</sup> position du point de vue des performances, reste valide et arrive maintenant en 6<sup>ème</sup> position.

**Tableau V.1 : Classement des couples fluides en fonction de la surface de collecteur solaire nécessaire pour assurer l'ensemble des besoins de chauffage et de rafraîchissement par le procédé CHV3T.**

Classement	Fluide récepteur	Fluide moteur
1	R1234ze(E)	Isopentane
2	n-Propane	2-Butene
3	R161	R1234ze(E)
4	R161	Neopentane
5	Propylene	n-Butane
6	R1234yf	R1233zd

Si ce couple fluide reste valide, il faut toutefois rappeler que les performances du procédé (en chaud et en froid) seront toutefois inférieures à celles annoncées dans la section II.2.3.2 du fait de l'augmentation de l'écart de température entre les puits/source de chaleur et les fluides de travail dans les évaporateurs/condenseurs. Ces performances actualisées (voir eq.7, 8, 52 et 53 pour la définition des COP et COA) sont données dans le Tableau V.2 dans des conditions d'évaluations similaires à celles définies dans la section II.2.3.2.

**Tableau V.2 : Tableau récapitulatif des performances du CHV3T-WGS avec le couple de fluides R1234yf/R1233zd. Ces valeurs sont obtenues avec une irradiation de  $800\text{W/m}^2$  et des capteurs solaires sous vide de type VIESSMAN-Vitosol-300T SPA3 en tenant compte des écarts de température qu'implique l'utilisation d'un fluide caloporteur entre les échangeurs de chaleur et l'extérieur.**

		$T_{\text{ext}}$	-7 °C	-2 °C	2 °C	7 °C	15 °C	25 °C	35 °C	45 °C
		$T_{\text{calo}}$								
COP <sub>th</sub>	17 °C		-	-	-	-	-	0,42	0,34	0,26
COA <sub>th</sub>	30 °C		1,13	1,16	1,21	1,26	1,36	-	-	-
$\eta_{\text{coll}}$			57,1%	57,6%	58,6%	59,7%	61,6%	64,9%	64,6%	64,3%
COP <sub>sol</sub>	17 °C		-	-	-	-	-	0,27	0,22	0,17
COA <sub>sol</sub>	30 °C		0,64	0,67	0,71	0,75	0,83	-	-	-

On remarque qu'à des températures extérieures très faibles, l'intérêt de l'amplification s'amenuise. À ces niveaux de température, l'utilisation directe de la chaleur produite par les capteurs solaires (sans amplification) sera probablement plus profitable économiquement. Cependant, les nouvelles performances estimées restent toujours intéressantes. Il convient maintenant de procéder au dimensionnement des divers composants des sous-systèmes CHV3T et ORC, et de

prévoir comment ces composants doivent être raccordés pour estimer l'encombrement global du système complet.

## 1.2. Dimensionnement et assemblage du prototype

Le couple fluide R1234yf/R1233zd est le meilleur candidat en termes de compromis performance énergétique / sécurité. Il convient maintenant de tenir compte des enseignements des chapitres précédents pour déterminer l'architecture finale du procédé de trigénération dans son ensemble.

### 1.2.1. Architecture du trigénérateur

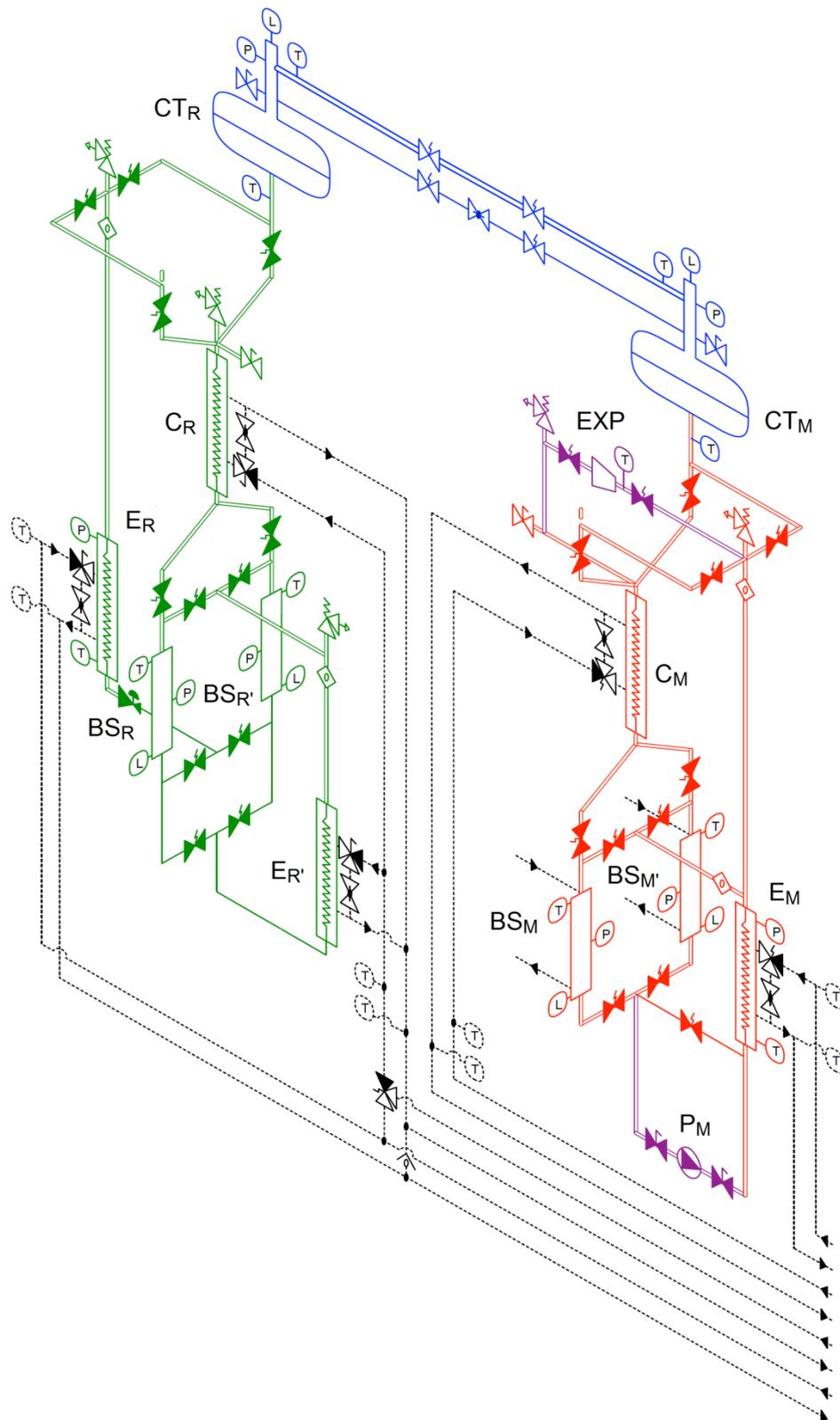
Comme vu aux chapitres II, III et IV, l'agencement spatial des composants est soumis à différentes contraintes telles que la hauteur relative des différents composants, le NPSH requis de la pompe, la gestion des condensats, etc. Ces points sont essentiels au bon fonctionnement des procédés CHV3T et ORC.

La Figure V-2, présente le schéma détaillé en vue isométrique du trigénérateur dans son ensemble. Ce schéma comprend les principaux composants des sous-systèmes CHV3T et ORC, mais également les liaisons aux boucles fluides qui permettent l'échange de chaleur avec le plancher chauffant et les ventilo-convecteurs ainsi que les organes de sécurité et l'instrumentation nécessaire à l'évaluation des performances du prototype.

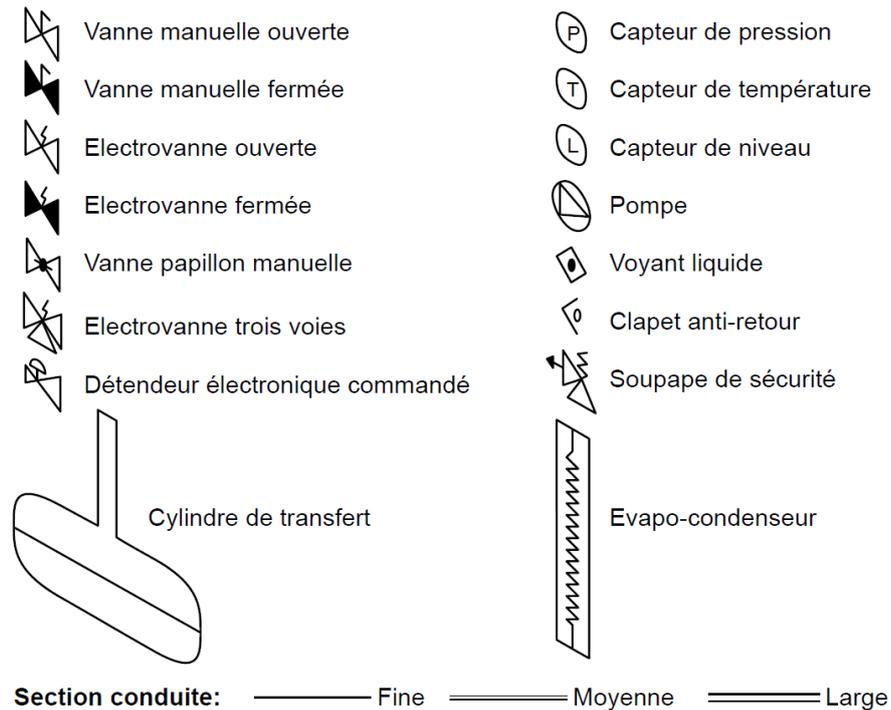
Les codes couleur correspondent aux cycles moteur (en rouge) et récepteur (en vert) du sous-système CHV3T. La partie bleue représente la conduite hydraulique permettant l'échange de travail entre les deux parties motrice et réceptrice de ce sous-système. Toutefois pour plus de clarté, les cylindres de transfert  $CT_R$  et  $CT_M$  ne sont pas représentés ici. Enfin la partie violette représente les composants spécifiques de l'autre sous-système, à savoir l'ORC.

Les différents composants sont agencés sur 4 étages visibles sur la vue isométrique de la Figure V-2 et les différents organes dessinés dans cette figure sont explicités dans la Figure V-3.

À l'étage le plus élevé, on retrouve les 4 cylindres de transfert (2 CT seuls représentés) ainsi que la turbine à vapeur de l'ORC. Un étage en dessous, afin de pouvoir récupérer par gravité les éventuels condensats formés dans les CT, se trouvent les condenseurs des cycles récepteur et moteur. En dessous encore sont positionnées les 4 bouteilles séparatrices. Enfin, à l'étage le plus bas se trouvent les 3 évaporateurs, cette position leur permettant d'être noyés et ainsi d'améliorer l'efficacité de l'échange thermique. Enfin la pompe de l'ORC doit être placée le plus bas possible afin d'augmenter le NPSH disponible pour éviter la cavitation dans cette pompe.



*Figure V-2 : Schéma détaillé de l'architecture du procédé de trigénération (CHV3T+ORC) tenant compte de la hauteur relative des différents composants.*



**Figure V-3 : Légende des organes composant le système CHV3T pour les représentations en vue isométrique ou plane.**

### 1.2.2. Dimensionnement des principaux composants du trigénérateur

Le dimensionnement des cylindres de transfert et des bouteilles séparatrices a été défini préalablement dans les sections III.1.2 et III.1.3.3 respectivement. Les échanges prolongés entre le laboratoire et des industriels chaudronniers et fabricants de membranes ont permis de définir un cahier des charges précis pour élaborer un prototype de cylindre de transfert respectant les contraintes que nous avons fixées. Les plans ainsi que les caractéristiques techniques de ce prototype sont donnés en annexe (Annexe 1).

Les évaporateurs et condenseurs sont dimensionnés via les méthodes utilisées par Martins dans le cadre de sa thèse [53]. Les conditions de fonctionnement dans le cadre de ce prototype étant proches de celles de ces travaux antérieurs, on obtient logiquement des échangeurs similaires dont les caractéristiques sont données en annexe (Annexe 6).

Le dimensionnement et le choix technologique de la pompe dépendent de plusieurs contraintes de fonctionnement. Cette pompe a deux fonctions principales, d'une part remonter en pression (de  $P_b$  à  $P_h$ ) le liquide contenu dans les bouteilles séparatrices  $BS_M$  et  $BS_{M'}$  et, d'autre part, de réguler le débit de réfrigérant au sein du cycle afin de garantir la surchauffe nécessaire en entrée de la turbine (ou expandeur Scroll). Le choix de cette pompe est délicat pour deux raisons :

- L'ordre de grandeur des débits de fluide frigorigène est relativement faible, quelques litres par minute, tandis que la différence de pression entre  $P_h$  et  $P_b$ , fixée par la température des sources chaude et froide est relativement importante, de l'ordre de la dizaine de bars.

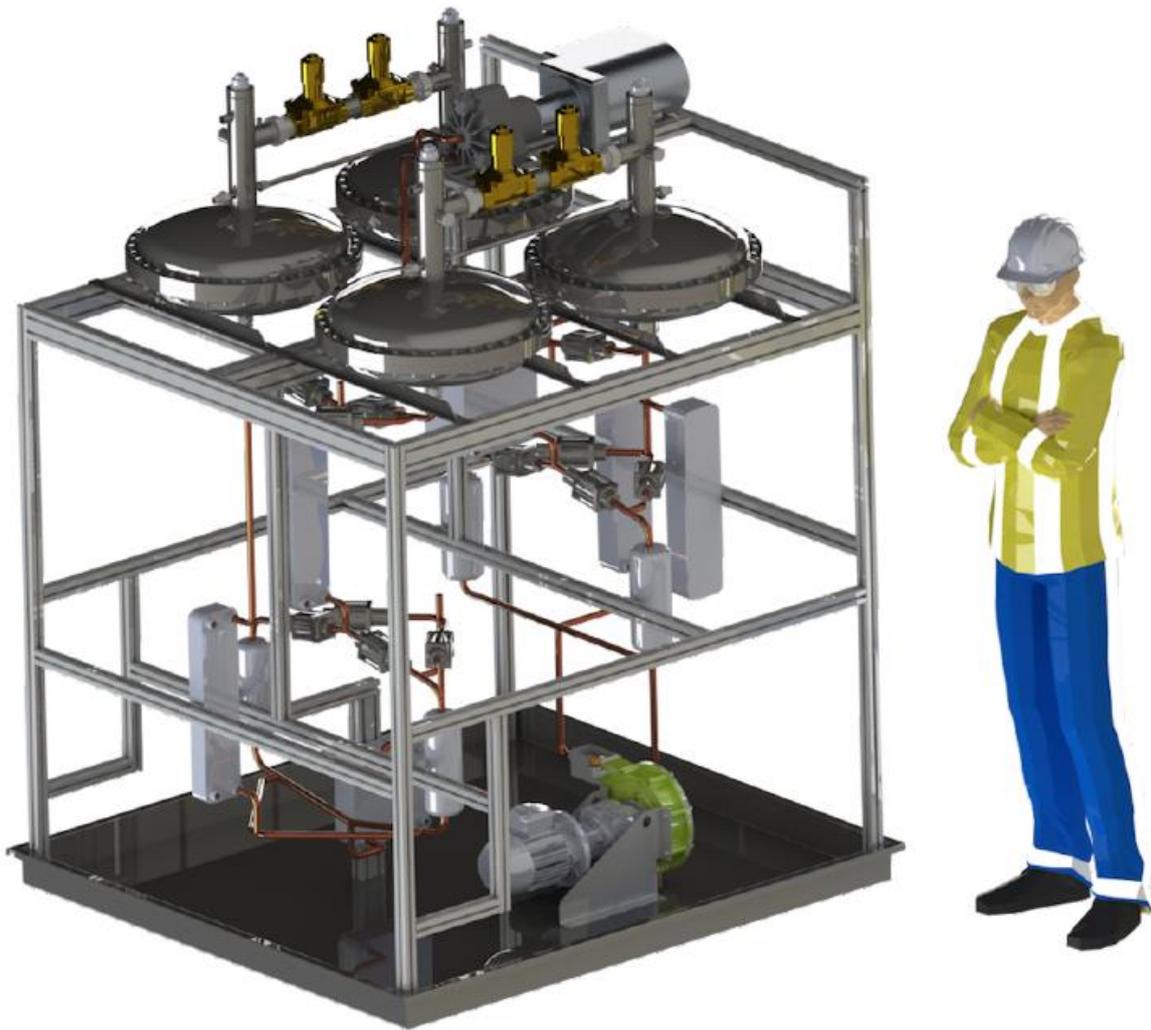
- La bouteille séparatrice contient un liquide légèrement sous-refroidi dont l'état thermodynamique se situe quasiment sur la courbe de saturation. En d'autres termes, dans ces conditions proches de la saturation, le phénomène de cavitation dans la pompe est quasiment inévitable et donc son NPSH "requis" représente une grandeur critique pour son choix.

Une fiche de spécification a été constituée sur la base des informations issues de la simulation numérique du cycle ORC effectuée dans la section IV.5. En complément de ces spécifications, il a été nécessaire de caractériser avec précision le NPSH disponible en amont de la pompe, c'est-à-dire de déterminer précisément la pression statique en amont de la pompe ainsi que les pertes de charge (linéaires et singulières) entre les bouteilles séparatrices et l'aspiration de la pompe. Le choix de la pompe devient en particulier dépendant de la technologie et du modèle des vannes sur la ligne d'aspiration de la pompe, et plus exactement de leurs coefficients de débit Kv respectifs. Plusieurs études ont montré qu'il était nécessaire d'utiliser des vannes au coefficient de débit le plus important possible. Un choix provisoire de compromis s'est porté sur une pompe péristaltique, notamment en raison du faible NPSH requis par cette technologie (voir les autres caractéristiques techniques de cette pompe en annexe (Annexe 7)).

Par ailleurs, le bon dimensionnement de la turbine à vapeur (ou de l'expandeur Scroll) est primordial pour maximiser le rendement électrique de l'ORC ; ce point a déjà été étudié dans la littérature [76, 77]. Cependant la conception d'une turbine sur mesure peut être excessivement coûteuse ; notre choix s'est donc porté sur un modèle "sur étagère" respectant le cahier des charges défini suite aux simulations dynamiques réalisées dans la section IV.5, et également utilisé dans le cadre d'ORC aux conditions de fonctionnement similaires [78]. Les caractéristiques techniques de cette turbine peuvent également être consultées en annexe (Annexe 5).

Enfin, le démonstrateur étudié ici est particulièrement exigeant sur le volet des composants coupe-circuits, avec 32 électrovannes et 18 vannes manuelles nécessaires à son fonctionnement et à ses opérations de maintenance. Leur dimensionnement a été effectué en tenant compte des sections de passage, de la nature du fluide et de leur compatibilité, des débits ainsi que des pertes de charge. À ce titre, la règle de conception définie est la suivante : des électrovannes de type coaxiales, avec un Kv important, sont utilisées sur les circuits vapeur, tandis que des électrovannes à pointeau moins onéreuses, avec un Kv plus faible, sont utilisées pour les circuits liquides. Une exception est cependant faite dans le cas de l'ORC pour ne pas dégrader inutilement le NPSH disponible de l'installation. Le détail du dimensionnement de l'ensemble de ces électrovannes est également donné en annexe (Annexe 8). Il sera intéressant d'étudier dans un second temps, l'éventuel remplacement de certaines électrovannes par des distributeurs de façon à réduire leur nombre et ainsi diminuer le coût de l'installation.

Une fois chaque composant bien identifié, il est alors possible de dessiner le procédé dans son ensemble selon l'architecture définie dans la Figure V-3, tout en tenant compte de l'encombrement des composants. La Figure V-4, rend compte du rendu final à l'échelle qu'aurait le prototype du procédé de trigénération CHV3T-WGS/ORC.



*Figure V-4 : Dessin CAO du trigénérateur (CHV3T+ORC)*

Enfin, connaissant le couple fluide et les performances du trigénérateur en conditions opératoires fixes, il devient possible de réaliser une simulation pour estimer la production de chaud, de froid et d'électricité sur une année complète de fonctionnement. Toutefois cette simulation doit prendre en compte le choix de la méthode de régulation de température. Les avantages et inconvénients des principales méthodes utilisées sont décrits ci-après.

### **1.3. Régulation de température**

Le choix de la méthode de régulation de température n'impacte pas directement les performances intrinsèques du procédé, néanmoins, celle-ci peut influencer les performances annuelles en réduisant par exemple la température du fluide caloporteur. Il existe trois principales méthodes de régulation de température, la régulation TOR, ou "tout ou rien", la régulation PID et la régulation par sonde extérieure ou "loi d'eau". Les avantages et inconvénients de ces trois technologies du point de vue de leur incidence sur le trigénérateur sont discutés ici.

#### **1.3.1. La régulation "tout ou rien"**

Solution la plus basique, le thermostat d'ambiance « tout ou rien » régule la température ambiante par déclenchement/arrêt du procédé en fonction d'une température de consigne réglée

par l'utilisateur : si la température dans la pièce où se trouve le thermostat descend en dessous de celle programmée, le système de chauffage se met en route. Quand la température est atteinte, il coupe le chauffage. Ce système simple à mettre en place et peu coûteux n'est pas optimal en termes d'économie d'énergie et de confort, et souffre de plusieurs inconvénients :

- Possible variation de la température intérieure autour de la température de consigne du fait de l'hystérésis du thermostat.
- Les températures d'eau de chauffage ou de rafraîchissement sont fixes, car réglées en fonction des déperditions maximales du logement qui arrivent lors de températures extérieures extrêmes. Ceci implique un COP ou un COA annuels inférieurs à ceux qui pourraient être atteints par des régulations plus perfectionnées.
- Les déclenchements/arrêts fréquents peuvent accélérer le vieillissement de l'installation.
- La sonde de température intérieure est en général placée dans la pièce de vie, ce qui peut entraîner une surchauffe ou un manque de chauffage au sein des autres pièces de l'habitation. L'utilisation de vannes thermostatiques dans chaque pièce peut pallier éventuellement ce problème.

### **1.3.2. La régulation PID**

Les thermostats d'ambiance PID ou « modulants » permettent d'ajuster en permanence la température de l'eau circulant dans le réseau de chauffage afin d'être toujours au plus près de la température de consigne. La régulation module la température du fluide caloporteur proportionnellement à l'écart de température entre l'ambient et la consigne et stabilise ainsi la température intérieure, ce qui permet en général une meilleure efficacité de l'appareil de chauffage (meilleur COP sur des pompes à chaleur et meilleur rendement sur les chaudières à condensation par exemple).

Certains thermostats numériques peuvent également permettre de mémoriser les comportements énergétiques du foyer pour anticiper les besoins pour un meilleur confort. En moyenne, les régulateurs modulants permettent de gagner jusqu'à 10% d'efficacité énergétique sur le chauffage comparativement à une régulation basique de "type tout ou rien".

Le seul défaut imputable à cette technique de régulation est lié à l'inertie thermique de la maison qui peut entraîner un temps de réponse trop long du régulateur à la baisse des températures extérieures le soir venu, et de ce fait une consigne difficile à respecter.

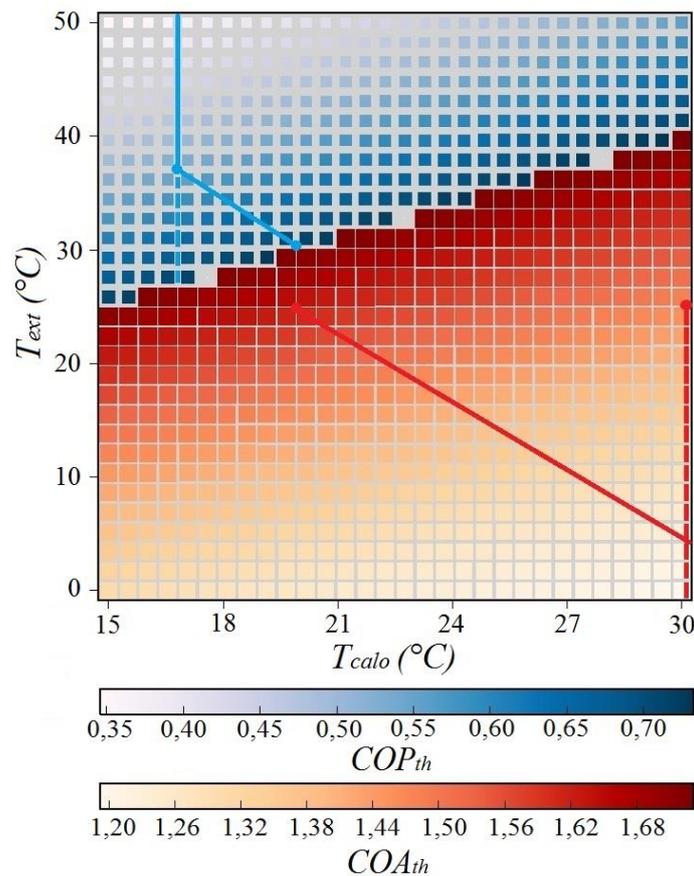
### **1.3.3. La régulation par sonde extérieure ou "loi d'eau"**

La régulation par sonde extérieure est la plus performante thermiquement parlant, une sonde de température est placée à l'extérieur du bâtiment pour y mesurer les variations de température. De cette façon, la température du fluide caloporteur destinée au chauffage est modulée en fonction des variations de la température extérieure de façon à ce que la consigne soit toujours respectée à l'intérieur de l'habitation.

Cependant, la pente de la courbe de chauffe (courbe qui fixe la température du caloporteur proportionnellement à la température extérieure) doit être correctement définie, celle-ci doit tenir compte des déperditions thermiques de l'habitat ainsi que de son inertie thermique. Cette courbe est soit calculée via une méthode fournie par le fournisseur, soit de façon automatique à l'aide de thermostats auto adaptatifs. La détermination des différents paramètres peut prendre plusieurs jours ou semaines dans ce dernier cas. Cette technique de régulation permet à la fois un confort

thermique optimal, et des économies d'énergie de l'ordre de 15 à 20% comparativement aux régulateurs les plus basiques.

La Figure V-5 indique les performances associées aux plages de fonctionnement de deux méthodes de régulation différentes, la méthode "tout ou rien" en pointillé, et la méthode "loi d'eau" en trait plein. On distingue très clairement que pour une même température extérieure, les performances du procédé CHV3T seront meilleures en utilisant une régulation par loi d'eau, qu'une régulation TOR.



**Figure V-5 : Plage de fonctionnement et performances du procédé CHV3T en fonction des systèmes de régulation, régulation par loi d'eau (—) ou régulation tout ou rien (- -).**

Toutefois, par simplification dans le cadre de cette étude, c'est la méthode de régulation TOR qui a été utilisée pour la simulation annuelle.

## 2. Estimation des performances annuelles

Cette section vise à mettre en œuvre les modèles quasi-statiques développés au sein des chapitres précédents afin de simuler le fonctionnement du procédé de trigénération au cours d'une année complète. Avant de procéder à ce type de simulation, il est nécessaire de définir quelles seront les conditions de fonctionnement du procédé, c'est-à-dire préciser les méthodes employées pour déterminer le rayonnement solaire et les températures annuelles d'un lieu donné, mais aussi il est nécessaire de définir une stratégie de contrôle du système complet, comprenant

les sous-systèmes CHV3T et ORC, c'est-à-dire préciser dans quelles conditions le processus doit basculer d'un mode vers l'autre.

Ces informations nous permettront d'évaluer les performances du procédé en mode chauffage, production de froid et production d'électricité tout au long de l'année, mais aussi d'estimer en quelles proportions ces énergies seront produites selon la surface de collecteur utilisé.

## 2.1. Données climatiques

Une composante clef pour simuler les performances d'un système thermodynamique repose sur la connaissance des données météorologiques caractérisant l'environnement dans lequel celui-ci évolue. En particulier, pour une première approche, deux paramètres sont essentiels : la connaissance du rayonnement solaire collecté par les capteurs et la température extérieure de l'air. Cette section fournit des détails sur la façon dont ces données ont été modélisées et intégrées au modèle général.

### 2.1.1. Rayonnement solaire

La modélisation du rayonnement solaire éclairant les panneaux repose sur la décomposition du flux solaire reçu par le capteur en trois composantes, le flux solaire direct, diffus et réfléchi. L'évaluation classique [79] de ces trois composantes ne sera pas détaillée ici et les valeurs numériques découlent de corrélations issues de la librairie python PySolar, dédiée à la modélisation du rayonnement pour des applications solaires.

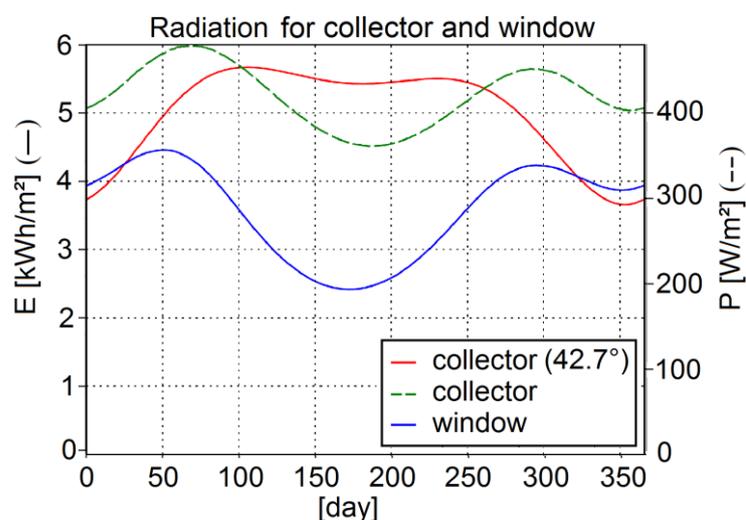
La modélisation du rayonnement solaire requiert de pouvoir repérer la position du soleil par rapport à celle du capteur plan. Le soleil y est repéré par sa hauteur angulaire et son azimut, tandis que le capteur solaire y est repéré par son inclinaison par rapport à l'horizontale et par son orientation (angle entre le plan vertical contenant la normale au capteur et le plan du méridien local). Bien entendu, la position du soleil varie en fonction du lieu, de la date et de l'heure d'observation.

A contrario par raison de simplicité, la position du capteur est fixée de façon définitive lors de son installation. Dans le cas du procédé étudié, l'énergie solaire collectée est utilisée quotidiennement pour produire de la chaleur, de l'électricité ou du froid. Le positionnement optimal qui maximise l'énergie collectée par le capteur sur une année est déterminé par :

- Une inclinaison du capteur égale à la latitude du lieu,
- Une orientation du capteur plein Sud.

Cette position optimale est celle retenue par défaut dans la suite de cette étude, sauf mention contraire.

La Figure V-6 présente les résultats issus de ce modèle de rayonnement solaire. Dans un premier temps, la densité de flux solaire global instantané, notée  $I$  (en  $W/m^2$ ), est simulée pour chaque journée, indépendamment des conditions climatiques et de l'atténuation due à l'obscurcissement du ciel par les nuages. Cette densité de flux instantané  $I$  est ensuite intégrée sur la journée complète afin d'estimer (par excès puisque sans nuages) la ressource énergétique annuelle disponible par  $m^2$  de capteur (en  $kWh/m^2$ ).



**Figure V-6 : Énergie et puissance solaire reçues (sans nuages) par  $m^2$  de panneau solaire situé à Perpignan (latitude :  $42,70^\circ$ , longitude :  $2,90^\circ$ ) pour l'année 2015**

La Figure V-6 indique les tendances annuelles de trois grandeurs différentes :

- La courbe rouge représente l'énergie quotidienne collectée par le capteur pour chaque jour de l'année en  $kWh/m^2$ . La moyenne journalière de la région de Perpignan est d'approximativement  $5 kWh/m^2$ .
- La courbe bleue représente l'énergie journalière reçue par une surface verticale de  $1m^2$  orientée plein Sud en kWh. Cette quantité permet, entre autres, d'établir les apports solaires par les baies vitrées d'une maison au cours de l'année.
- La courbe verte en pointillé représente la puissance moyenne journalière reçue par  $m^2$  de capteur, qui varie entre  $350$  et  $500W/m^2$ . Cette puissance sert à évaluer le rendement moyen des collecteurs au cours de l'année.

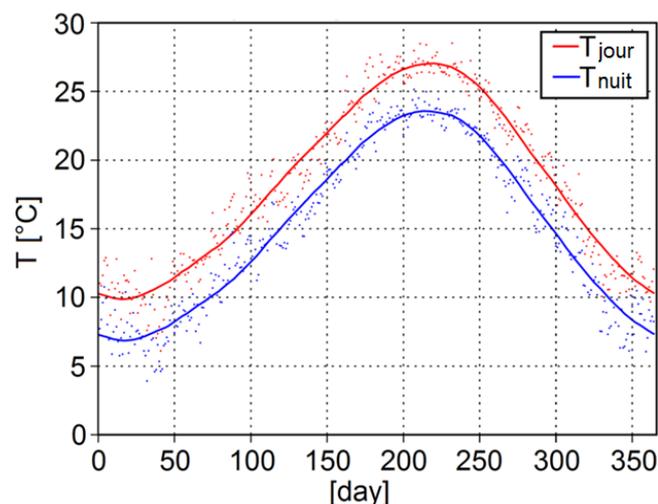
En plus de l'irradiation solaire, les températures extérieures sont également nécessaires pour caractériser les besoins de l'habitat, ainsi que pour évaluer les performances du procédé de trigénération et des capteurs solaires.

### 2.1.2. Température extérieure

L'évolution des températures en un lieu donné ne saurait être reconstruite précisément à partir d'un quelconque modèle, à l'instar de la démarche présentée dans le cas du rayonnement. Pour chaque site d'étude, l'historique des températures est donc téléchargé sur cinq ans depuis la base de données Weather Underground [80], et est ensuite traité en deux étapes.

1. Les données brutes contiennent les températures par pas de 30 minutes pour chaque jour de l'année. À partir de celles-ci, ainsi que des heures de lever et de coucher du soleil, il est possible de déterminer pour chaque jour :
  - La température journalière moyenne,
  - Les températures journalières minimales et maximales,
  - Les températures moyennes nocturnes et diurnes, qui sont des données fondamentales pour le dimensionnement d'un système thermohydraulique solaire.
2. Dans un second temps, ces valeurs sont moyennées afin d'obtenir une année type de variation de température. Ces moyennes sont finalement filtrées avec l'algorithme de Savitsky-Golay [81], pour dégager les grandes tendances.

La Figure V-7 présente les températures extérieures nocturnes et diurnes pour la ville de Perpignan.



**Figure V-7 : Températures extérieures nocturnes et diurnes à Perpignan moyennées (·) et filtrées (-) sur cinq années consécutives.**

La connaissance des températures extérieures annuelles ainsi que de l'irradiation solaire va permettre de réaliser un modèle simplifié d'habitat afin d'en déterminer les besoins énergétiques dans le but de tester le procédé de trigénération sur celui-ci.

### **2.1.3. Modélisation de l'habitat**

Afin de dimensionner correctement le procédé de trigénération, il est nécessaire de connaître les besoins énergétiques de l'habitat envisagés afin d'en assurer son confort thermique. La modélisation des besoins en chauffage ou en rafraîchissement d'une habitation standard peut être effectuée sur la base du modèle simplifié dit « GV ». Ce modèle est approximatif dans la mesure où l'inertie thermique du bâtiment n'est pas prise en compte ; en revanche il tient compte des apports solaires par les baies vitrées.

Les besoins de chauffage pendant la journée sont calculés selon l'équation suivante :

$$Q_{\text{chaud,jour}} = \min(0, GV(T_{\text{ext,jour}} - T_{\text{set,jour}})\Delta t_{\text{jour}} + A_{\text{ws}}\Phi_{\text{ws}}) \quad (61)$$

Les besoins de chauffage pendant la nuit sont calculés selon l'équation suivante :

$$Q_{\text{chaud,nuit}} = \min(0, GV(T_{\text{ext,nuit}} - T_{\text{set,nuit}})\Delta t_{\text{nuit}}) \quad (62)$$

Enfin, les besoins de rafraîchissement, uniquement considéré pendant la journée, sont calculés à partir de l'équation :

$$Q_{\text{froid,jour}} = \max(0, GV(T_{\text{ext,jour}} - T_{\text{set,jour}})\Delta t_{\text{jour}} + A_{\text{ws}}\Phi_{\text{ws}}) \quad (63)$$

où les différents termes sont :

- G, le coefficient de déperdition thermique volumique considéré égal à 1W/(m<sup>3</sup>. K) (valeur typique d'une maison construite dans les années 1990),
- V, le volume de la maison (100m<sup>2</sup> × 2,8m de hauteur sous plafond),
- T<sub>ext,jour</sub> et T<sub>ext,nuit</sub>, les températures extérieures diurnes et nocturnes,
- T<sub>set,jour</sub> et T<sub>set,nuit</sub>, les températures intérieures de consigne diurnes et nocturnes,
- Δt<sub>jour</sub> et Δt<sub>nuit</sub>, les durées de jour et de nuit,
- A<sub>ws</sub> la surface équivalente de vitrage plein Sud,
- Φ<sub>ws</sub> les apports solaires sur une paroi verticale exposée plein Sud. Par rapport aux modèles « GV » classiques, celui présenté au travers des équations précédentes diffère sur deux points :

- Le terme «A<sub>w</sub>Φ<sub>w</sub>» intègre les apports énergétiques par rayonnement au travers des fenêtres, évalué à partir de la modélisation présentée dans la section V.2.1.1;

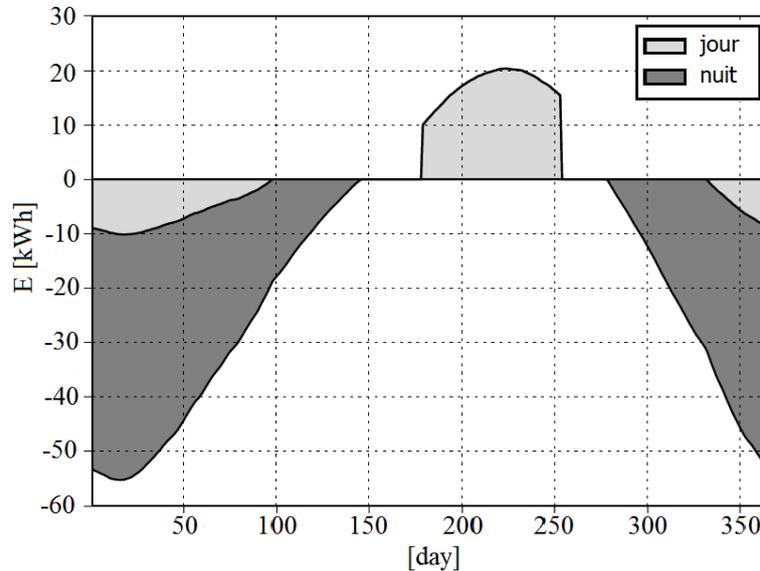
- Dans le cadre de la fonction chauffage, l'énergie à fournir à l'habitation pendant la journée est la valeur absolue de la grandeur négative Q<sub>chaud,jour</sub>. Ainsi, lorsque les apports solaires par les baies vitrées sont supérieurs à l'énergie brute requise pour compenser les déperditions thermiques (GV.(T<sub>ext,jour</sub> - T<sub>set,jour</sub>).Δt<sub>jour</sub>), cette définition évite de mettre le rafraîchissement solaire en fonctionnement alors qu'il est simplement nécessaire de ventiler les locaux avec l'air extérieur.

Les températures de consigne utilisées pour le calcul des besoins thermiques sont indiquées dans le Tableau V.3.

**Tableau V.3 : Température de consigne utilisée pour déterminer les besoins thermiques d'une habitation standard.**

	Mode chauffage	Mode rafraîchissement
Phase diurne	T <sub>set,jour</sub> = 20 °C	T <sub>set,jour</sub> = max(25 °C, T <sub>ext,jour</sub> - 7 °C)
Phase nocturne	T <sub>set,nuit</sub> = 18 °C	n.a.

Une fois ces températures de consigne définies, il est possible de déterminer les besoins thermiques en chauffage et rafraîchissement. La Figure V-8 illustre les résultats du modèle pour une habitation située dans la région de Perpignan. Les besoins annuels en chauffage (par m<sup>2</sup> de l'habitation) sont évalués à près de 70 kWh/(m<sup>2</sup>.an), les besoins de rafraîchissement à 16 kWh/(m<sup>2</sup>.an) et les DJU<sub>18</sub> sont de 1323 °C.j.



**Figure V-8 : Modélisation des besoins thermiques nécessaires à une habitation classique située dans la région de Perpignan. La partie négative représente l'énergie à fournir pour assurer la fonction chauffage, tandis que la partie positive représente l'énergie à évacuer pour assurer le rafraîchissement de l'habitat. Les besoins thermiques durant les périodes diurnes sont représentés en gris clair, tandis que les besoins durant les périodes nocturnes sont représentés en gris foncé.**

Ces résultats sont cohérents et typiques d'une habitation correctement isolée qui serait classée entre B et C selon le diagnostic des performances énergétiques actuel (DPE). Toutefois, une des faiblesses de cette approche est qu'on ne prend pas en compte l'inertie thermique du bâtiment. Ignorer ce phénomène qui tend à réduire les besoins en froid notamment peut conduire à surdimensionner légèrement l'installation. Autre conséquence pour le chauffage, l'inertie thermique du bâtiment joue le rôle de stockage thermique passif en accumulant la chaleur dans les murs et les planchers la journée pour les restituer la nuit. Les résultats de la Figure V-8 se rapprochent donc d'habitats à faible inertie, de type maison en bois. Sur des bâtiments à inertie plus importante, les besoins nocturnes de chaleur seraient moins importants, et les besoins de chaleur diurnes plus importants, ce qui permettrait notamment une meilleure valorisation de l'énergie solaire et une réduction de la consommation d'énergie auxiliaire.

## 2.2. Stratégie globale de commande du système

Une fois les données climatiques et le modèle d'habitat définis, il convient également d'adopter une stratégie de commande du système, c'est-à-dire de préciser de quelle façon sera répartie la puissance solaire captée pour satisfaire les différents besoins potentiellement simultanés.

Pour cette étude, la stratégie choisie est la suivante :

- La demande en chaleur doit toujours être satisfaite. Cette obligation vise à toujours assurer un confort thermique minimal au sein de l'habitat considéré. Celle-ci sera assurée via l'énergie solaire amplifiée par le procédé CHV3T quand l'ensoleillement le permet ou via l'énergie produite par une source de chaleur auxiliaire également amplifiée par le procédé CHV3T. En cas de température extérieure extrême, en dehors de la gamme de fonctionnement du CHV3T ou lorsque les performances de celui-ci sont trop dégradées, la demande de chaleur sera alors fournie directement par les capteurs solaires ou par la source auxiliaire.
- La production de froid est uniquement assurée à partir de l'énergie solaire et donc pendant la journée. Le choix d'utiliser une chaudière auxiliaire pour produire du froid n'est pas étudié ici ; cela ne s'avère pas être strictement nécessaire sous un climat méditerranéen et apparaîtrait comme un non-sens environnemental, quitte à ce que le confort thermique d'été ne soit pas assuré à certains moments.
- La production d'électricité n'intervient qu'une fois que les besoins de chauffage ou de rafraîchissement sont nuls, et est uniquement réalisée à partir de l'énergie solaire via l'ORC.

Avec cette stratégie, la totalité de l'énergie solaire reçue par les capteurs est valorisée. D'autres stratégies sont aussi possibles, comme accepter une production de froid ou d'électricité à partir de la source de chaleur auxiliaire par exemple, ces choix pouvant être avantageux pour d'autres climats ou pour réduire la consommation d'électricité sur le réseau pendant des pics de consommation par exemple. L'intégration d'un stockage thermique alimenté par énergie solaire pendant la journée permettrait également d'étudier d'autres scénarios.

Une fois la stratégie d'exploitation établie, il est nécessaire d'évaluer les rendements énergétiques associés à chacun des modes. Ceux-ci sont régis par la possibilité d'utiliser ou non le sous-système CHV3T, en fonction des conditions opératoires extérieures. La Figure V-9 présente les relations considérées pour le calcul des performances des fonctions chauffage et rafraîchissement, en fonction des différents scénarios rencontrés.

À titre d'exemple, si les températures extérieures faibles indiquent un besoin de chauffage, avec un ensoleillement suffisant, alors le procédé CHV3T pourra fonctionner en valorisant la chaleur captée par les capteurs solaires et ses performances seront calculées selon la relation :

$$COA_G = COA_{th} \cdot \eta_{coll} \quad (64)$$

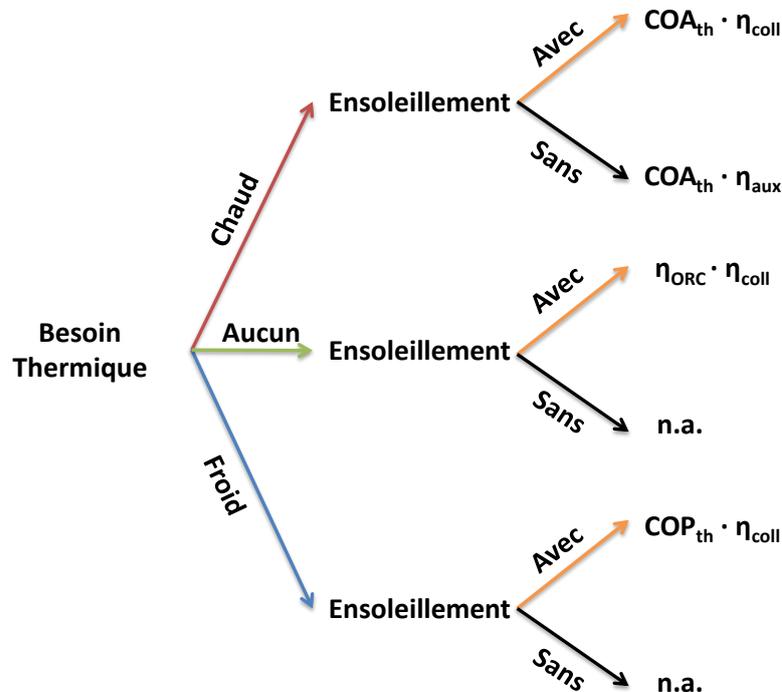
À l'inverse, si l'ensoleillement n'est pas suffisant, le CHV3T fonctionnera en amplifiant la chaleur produite par la source de chaleur auxiliaire et la relation utilisée pour le calcul des performances sera :

$$COA_G = COA_{th} \cdot \eta_{aux} \quad (65)$$

De même en mode rafraîchissement, qui ne fonctionne lui que quand la ressource solaire est suffisante :

$$\text{COP}_G = \text{COP}_{\text{th}} \cdot \eta_{\text{coll}} \quad (66)$$

Quand les besoins thermiques sont nuls, et que l'ensoleillement le permet, c'est le mode production d'électricité qui prendra le relais, selon l'équation ( 60 ).



*Figure V-9 : Choix des différents scénarios de production.*

Ainsi, en connaissant les besoins énergétiques de l'habitat, les apports solaires et les performances du procédé qui sont fonction des données climatiques, il est possible de déterminer pour une surface de captation donnée l'énergie journalière produite en chaleur, en froid et en électricité puis de les cumuler sur une année complète de fonctionnement.

Quatre cas de figure peuvent être rencontrés :

- un sous dimensionnement de la surface de collecteur solaire,
- un surdimensionnement,
- un dimensionnement adapté à la production de chauffage seulement,
- un dimensionnement adapté pour assurer l'ensemble des besoins thermiques (chauffage et rafraîchissement).

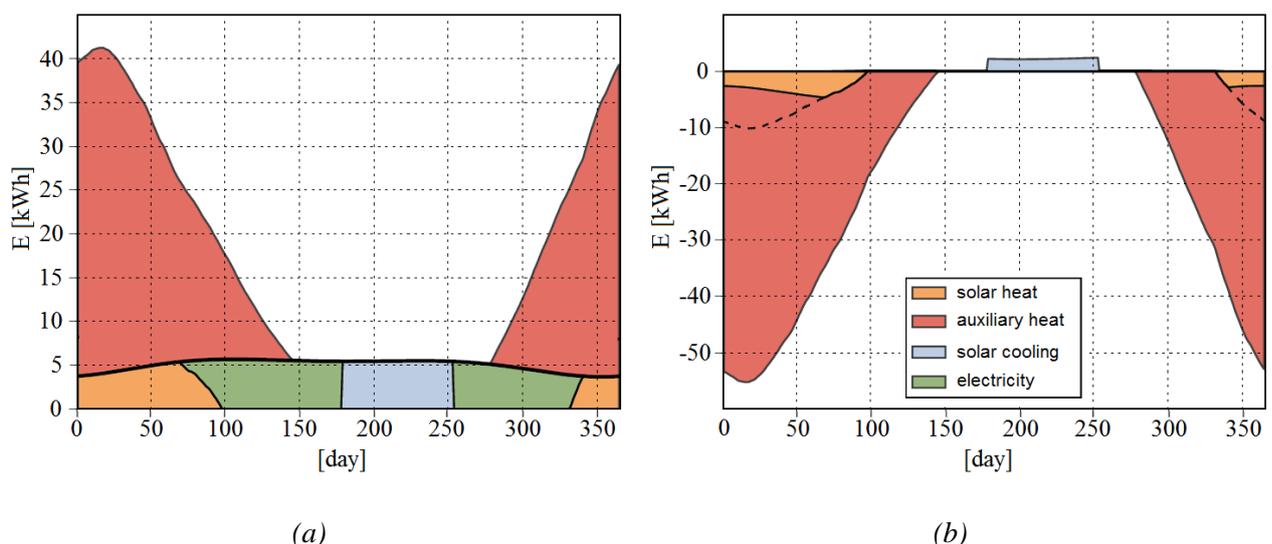
Les figures V-10 à V-13 traitant de ces 4 cas présentent l'énergie captée et restituée par le procédé de trigénération au cours des 365 jours de l'année.

Ces figures se décomposent en deux représentations graphiques complémentaires :

- La figure de gauche (a) montre l'énergie **entrante** dans le système, avec l'aire **sous** la courbe épaisse qui représente l'énergie solaire et l'aire **au-dessus** de cette courbe qui représente les apports d'énergie issus de la source auxiliaire. Par ailleurs, un code couleur complète l'information en permettant de déterminer la fonction remplie par cette énergie :
  - La surface rouge représente l'énergie apportée par la source auxiliaire à destination du chauffage.
  - La surface orange représente l'énergie solaire à destination du chauffage.
  - La surface verte représente l'énergie solaire à destination de la production électrique.
  - La surface bleue représente l'énergie solaire à destination de la production de froid.
- La figure de droite (b) montre l'énergie produite ou **sortante** du procédé de trigénération. La part négative du graphe concerne l'énergie dédiée au chauffage, tandis que la part positive celle dédiée au rafraîchissement ou à la production électrique avec le même code couleur que ci-dessus.

Ces paires de figures donnent une appréciation qualitative et quantitative de l'énergie captée et restituée ; elles servent en première lecture à mieux comprendre la stratégie de commande décrite précédemment au travers des 4 cas de figure pouvant être rencontrés. Ces courbes ont été tracées dans le cas du couple de fluides R1234yf/R1233zd. Pour d'autres couples, les valeurs seraient différentes, mais les tendances générales seraient identiques.

► Premier cas de figure : comportement énergétique en cas de sous-dimensionnement de la surface de collecteur solaire ( $S=1 \text{ m}^2$ ) (Figure V-10)



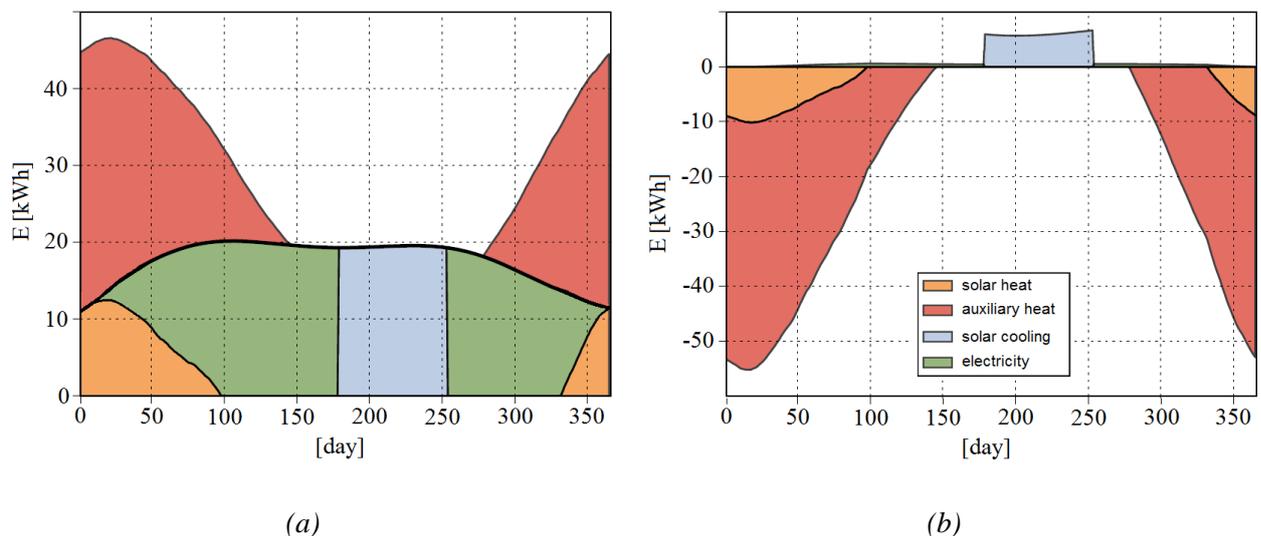
**Figure V-10 : Énergies entrante (a) et sortante (b) du procédé de trigénération, ainsi que leur utilisation, dans le cas d'un sous dimensionnement de la surface de collecteurs solaires ( $S = 1 \text{ m}^2$ )**

Dans ce cas, ni les besoins de chauffage ni les besoins de rafraîchissement ne sont convenablement assurés. C'est alors la source de chaleur auxiliaire qui prend le relais pour assurer les besoins de chauffage pendant la nuit, ainsi que pendant certaines journées d'hiver en soutien aux collecteurs solaires (aire rouge au-dessus de courbe en pointillé dans Figure V-10b).

Dans ce cas de figure, la production d'électricité est marginale, le faible rendement de conversion cumulé à la faible quantité d'énergie solaire dédiée à la production électrique, ne permet qu'une très faible production électrique à peine perceptible sur le graphe de la Figure V-10.b. Toutefois, même dans ce cas de figure particulièrement défavorable, le procédé CHV3T permet une amplification de la chaleur produite par la source auxiliaire et donc la réduction de la consommation de combustible. Par exemple pour le 100<sup>ème</sup> jour durant lequel le chauffage ne fait appel qu'à la source d'énergie auxiliaire, la consommation de cette énergie est de 12,5 kWh (18 kWh-5,5 kWh dans Figure V-10a) tandis que la restitution, amplifiée grâce au sous-système CHV3T, atteint 17 kWh (Figure V-10b) dans la maison. En 2<sup>ème</sup> exemple, le 200<sup>ème</sup> jour, la ressource solaire de 5 kWh environ est entièrement affectée pour le rafraîchissement diurne (environ 1,1 kWh) alors que les besoins ce même jour auraient été de 18 kWh (non représentés sur la figure V-10b, mais visibles à la figure V-12b)

► Deuxième cas de figure : les collecteurs solaires sont dimensionnés ( $S= 4,12 \text{ m}^2$ ) de façon à assurer l'ensemble des besoins de chauffage de l'habitat uniquement pendant la journée.

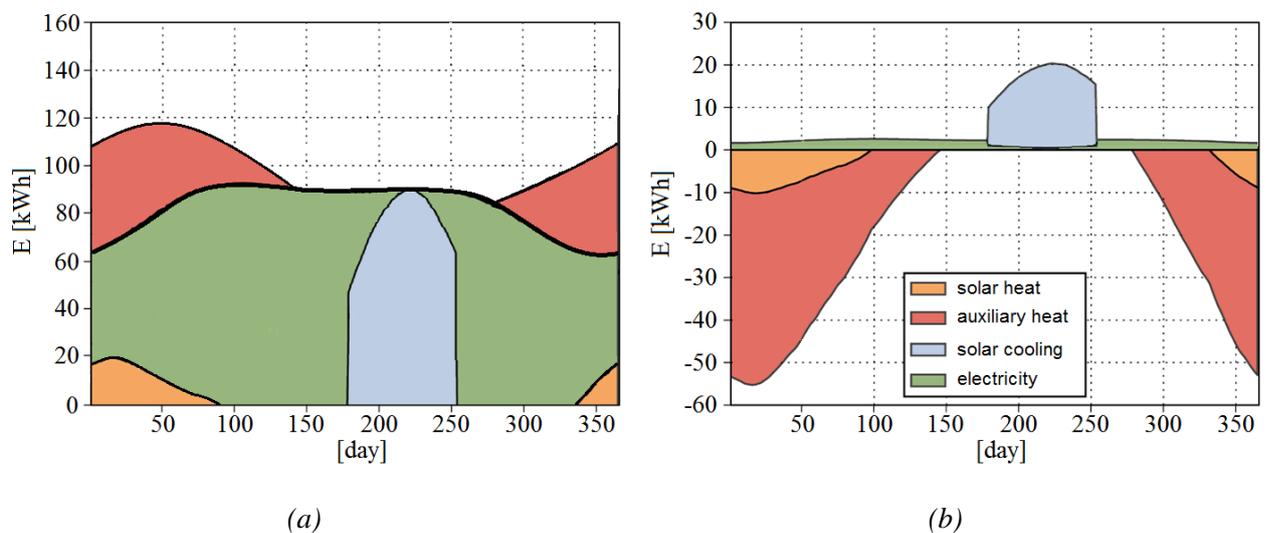
Dans ce cas présenté sur la Figure V-11, les besoins de chauffage diurne (en orange) sont intégralement assurés par les collecteurs solaires, en profitant de l'amplification fournie par le procédé CHV3T, tandis que les besoins de chauffage nocturne sont toujours assurés par la source auxiliaire et amplifiés par le procédé CHV3T. Une plus grande surface de captation permet de capter davantage de chaleur solaire incidente (environ 20 kWh le jour 200) et de produire plus de froid pendant l'été (environ 4,2 kWh le jour 200). Cependant, cette surface de captation n'est pas suffisante pour couvrir l'ensemble des besoins sur l'année, bien que la production d'électricité ait été améliorée (cependant toujours à peine visible sur la figure V-11b)



**Figure V-11 : Énergies entrante (a) et sortante (b) du procédé de trigénération, ainsi que leur utilisation, dans le cas d'un dimensionnement visant à assurer l'ensemble des besoins de chauffage pendant la journée. ( $S=4,12 \text{ m}^2$ ).**

► Troisième cas de figure : la surface de collecteur solaire est dimensionnée ( $S=17,9 \text{ m}^2$ ) de façon à subvenir à l'ensemble des besoins thermiques diurnes, en chauffage comme en refroidissement.

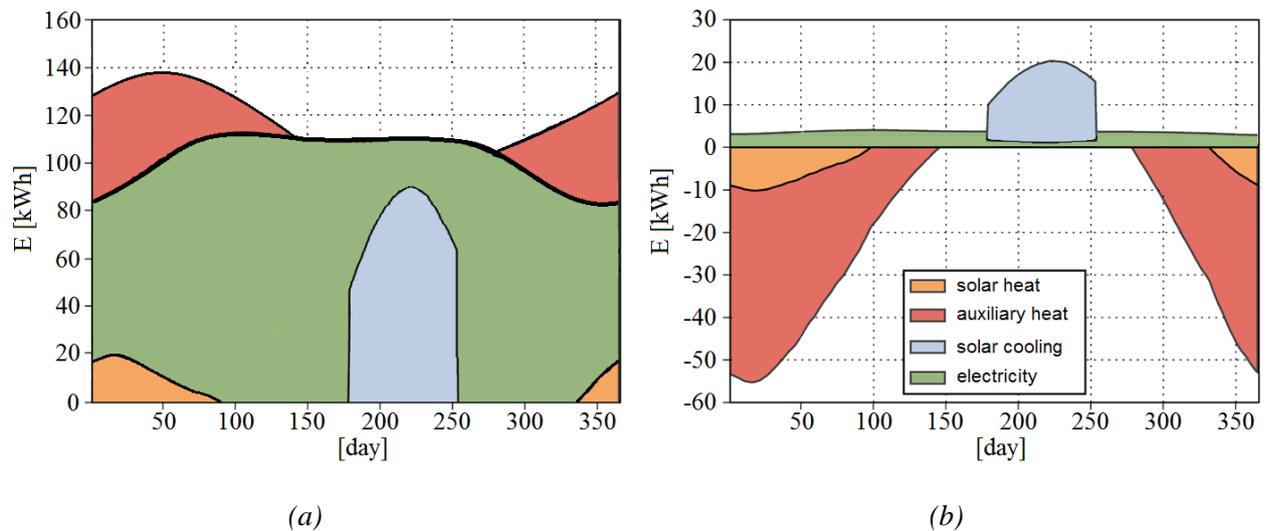
C'est ce que l'on constate sur la Figure V-12, les besoins en rafraîchissement (en bleu) sont cette fois intégralement assurés par le procédé CHV3T, lui-même alimenté par les collecteurs solaires. Le besoin le plus important en rafraîchissement (20 kWh) intervient le 220<sup>ème</sup> jour (le 8 août) et conditionne la surface de capteur nécessaire, soit  $17,9 \text{ m}^2$ . Il en résulte que l'installation est surdimensionnée pendant l'hiver pour la fonction chauffage, et de ce fait le procédé CHV3T laisse place au procédé ORC chaque fois que la demande de chauffage est satisfaite afin de valoriser en électricité (par exemple environ 3,52 kWh au jour 150) l'excédent d'énergie solaire thermique reçue (respectivement 88 kWh au jour 150).



**Figure V-12 : Énergies entrante (a) et sortante (b) du procédé de trigénération, ainsi que leur utilisation, dans le cas d'un dimensionnement visant à assurer l'ensemble des besoins thermiques diurnes (chauffage et rafraîchissement). ( $S=17,9 \text{ m}^2$ ).**

► Quatrième configuration : la surface de collecteur solaire est surdimensionnée ( $S=23,8 \text{ m}^2$ ),

Cette configuration pourrait être rencontrée si l'utilisateur décidait d'occuper la totalité de sa toiture. Dans ce cas présenté dans la Figure V-13, l'ensemble des besoins de chauffage diurnes est fourni par les collecteurs solaires et amplifié par le procédé CHV3T ; de même les besoins en rafraîchissement sont intégralement couverts par le procédé CHV3T. Cette surface de collecteur permet en outre tout au long de l'année une production quotidienne d'électricité (4,32 kWh d'électricité au jour 150), une fois les autres besoins satisfaits.



**Figure V-13 : Énergies entrante (a) et sortante (b) du procédé de trigénération, ainsi que leur utilisation, dans le cas d'un large dimensionnement de la surface de collecteur solaire). ( $S = 23,8 \text{ m}^2$ ).**

Ce large dimensionnement de la surface de captation n'entraîne cependant aucune perte ou montée en température au sein des collecteurs solaires, étant donné que l'énergie excédentaire est intégralement convertie en électricité. Cependant le faible rendement de conversion électrique (3 à 5%) implique qu'une autonomie électrique totale nécessiterait soit des surfaces de captation très importantes, soit de réaliser la production électrique par l'ORC à partir de la source de chaleur auxiliaire.

### 2.3. Analyse du rendement annuel

La détermination des modes et des plages de fonctionnement du système permet d'effectuer une simulation annuelle du procédé de trigénération dans son ensemble, en se basant à la fois sur les données météorologiques et sur la modélisation des besoins thermiques de l'habitat. Afin de fixer une surface de collecteur, l'objectif fixé dans le cadre de cette étude est d'assurer l'ensemble des besoins en chauffage diurne et de rafraîchissement sans recours à la source de chaleur auxiliaire. Cet objectif correspond au 3ème cas de figure envisagé ci-dessus.

Ce choix impose une surface de collecteur minimum, fonction des performances thermodynamiques obtenues pour chaque couple fluide. Ces surfaces sont indiquées dans le Tableau V.4. Comme précisé précédemment, nous excluons l'emploi de fluide inflammable, ce qui rend l'emploi du couple fluide R1234yf/R1233zd, le plus intéressant en termes de performances, avec une surface minimum de collecteur de  $17,9 \text{ m}^2$ . Il faut toutefois rappeler que ce choix de fluides est conditionné à la plage de fonctionnement considérée (climat méditerranéen) ainsi qu'à l'emploi de la variante CHV3T-WGS.

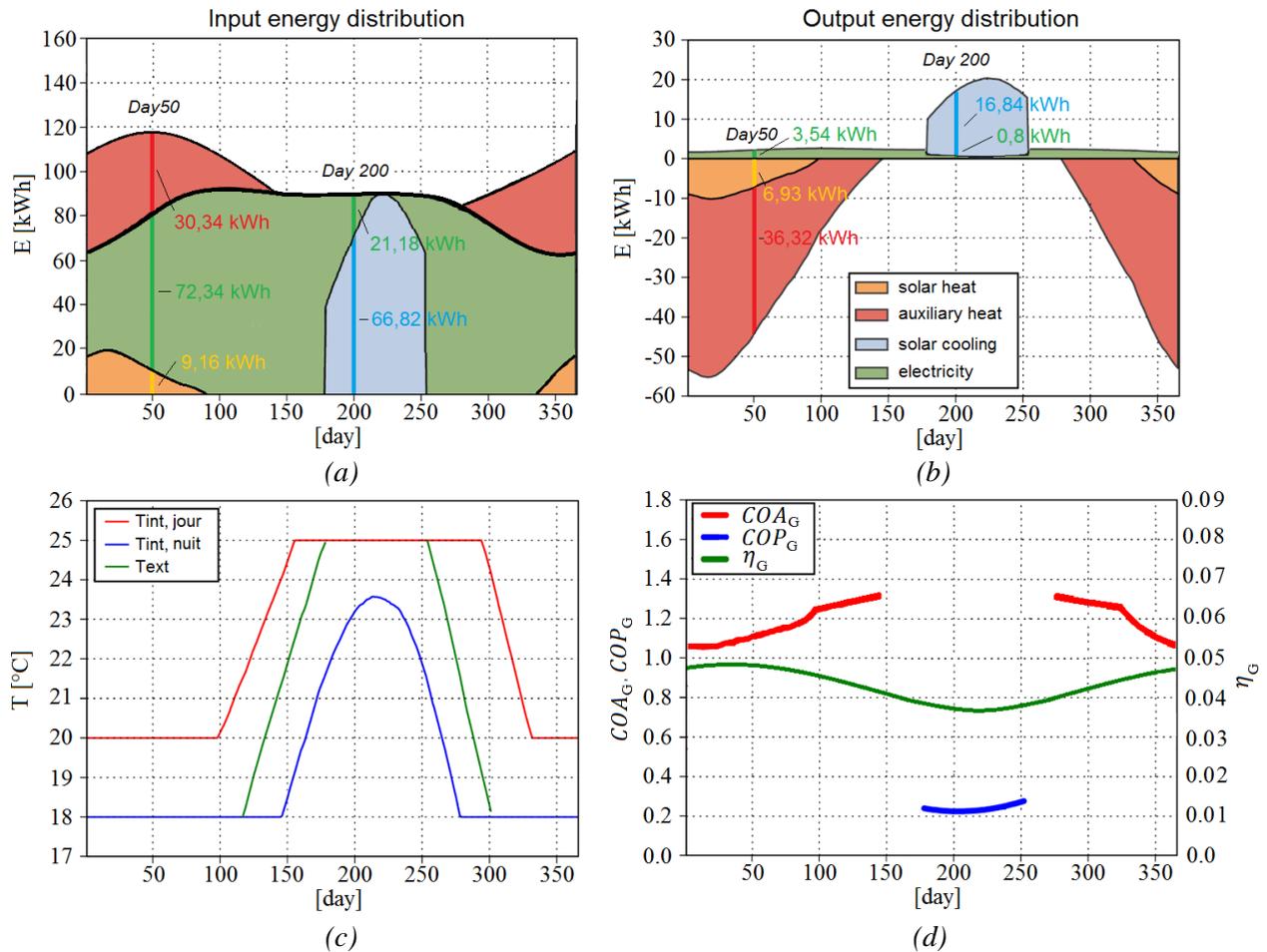
À titre comparatif, dans les mêmes conditions opératoires, l'emploi de la variante W0 à la place de la WGS, impliquerait une surface de collecteur minimum d'approximativement  $25 \text{ m}^2$ , notamment due à un  $\text{COP}_{\text{sol}}$  relativement faible. Toutefois, au vu de la complexité technique qu'engendre la variante WGS, seule une étude technico-économique approfondie pourra justifier l'avantage concurrentiel que procure la variante WGS par rapport à la variante basique W0.

**Tableau V.4 : Classement des couples de fluides en fonction de la surface de collecteur solaire nécessaire pour assurer les besoins de chauffage et de rafraîchissement d'une habitation de 100m<sup>2</sup> avec un coefficient  $G = 1W/(m^3.K)$ , à Perpignan**

Classement	Fluide récepteur	Fluide moteur	$A_{coll}$ (m <sup>2</sup> )
1	R1234ze(E)	Isopentane	16,22
2	n-Propane	2-Butene	16,34
3	R161	R1234ze(E)	17,64
4	R161	Neopentane	17,65
5	Propylene	n-Butane	17,80
<b>6</b>	<b>R1234yf</b>	<b>R1233zd</b>	<b>17,91</b>

Ainsi, en fixant le modèle d'habitat, les conditions climatiques, le couple fluide et la surface de collecteur, il est désormais possible d'analyser l'évolution des performances journalières du procédé de trigénération, en termes de production de chaud, de froid et d'électricité sur une année complète. La Figure V-14, présente les résultats d'une telle simulation et complète la Figure V-12 en considérant les paramètres suivants :

- Modèle d'habitat décrit dans la section V.2.1.3 (incluant les apports solaires par les baies vitrées) avec  $G = 1W/(m^3.K)$ ,  $V = 280 m^3$ .
- Irradiation solaire et température extérieure déterminée pour la ville de Perpignan.
- Couple fluide : R1234yf/R1233zd.
- Surface de collecteur : 17,9 m<sup>2</sup>, pour garantir les besoins diurnes de chauffage et de rafraîchissement.



**Figure V-14 : Modélisation annuelle des énergies entrantes et sortantes du procédé de trigénération CHV3T-WGS/ORC et évaluation des performances au cours de l'année. Cas d'une maison individuelle située à Perpignan pour une surface de capteurs solaires de 17,9m<sup>2</sup>**

Cette figure peut être interprétée de la façon suivante :

Les premiers graphes (a) et (b) présentent l'énergie entrante et sortante du procédé de trigénération de la même façon que les graphes présentés dans la section V.2.2. Le code couleur associé permet de rendre compte pour chaque jour de l'année de la quantité d'énergie dédiée à une fonction spécifique.

Deux jours de référence ont été sélectionnés et sont plus amplement détaillés dans le Tableau V.5 pour les énergies entrantes dans le système et dans le Tableau V.6 pour les énergies produites par le système de trigénération.

**Tableau V.5 : Tableau récapitulatif des flux énergétiques entrants dans le système.**

Jour	Conversion de... (en kWh)			
	solaire en chaleur	auxiliaire en chaleur	solaire en froid	solaire en électricité
Jour 50	9,16	30,34	-	72,34
Jour 200	-	-	66,82	21,18

L'énergie finale présentée dans le Tableau V.6 correspond donc à l'énergie entrante dans le système présenté dans le premier graphe, multipliée par les efficacités correspondantes aux besoins considérés et telles que détaillées dans la Figure V-9.

**Tableau V.6 : Tableau récapitulatif des flux énergétiques sortant du système.**

Jour	Production de... (en kWh)			
	chaleur par le solaire	chaleur par l'auxiliaire	froid par le solaire	électricité par le solaire
Jour 50	6,93	36,32	-	3,54
Jour 200	-	-	16,84	0,80

Le troisième graphe (c), présente l'évolution des températures à l'intérieur et à l'extérieur de l'habitation. Il permet de confirmer que les températures de consigne préalablement fixées dans le Tableau V.3 sont bien respectées.

Enfin le quatrième graphe (d), présente l'évolution des performances des différentes fonctions du procédé de trigénération au cours de l'année :  $COA_G$ , pour la fonction chauffage,  $COP_G$ , pour la fonction rafraîchissement et  $\eta_G$  pour la fonction production d'électricité. Ces dernières fluctuent en fonction de l'évolution des températures externes ainsi que de l'évolution du rendement des capteurs solaires. Le  $COA_G$  moyen sur 24h est plus complexe à analyser car il combine le  $COA_{sol}$  et le  $COA_{aux}$  respectivement pendant le jour et la nuit de la date considérée.

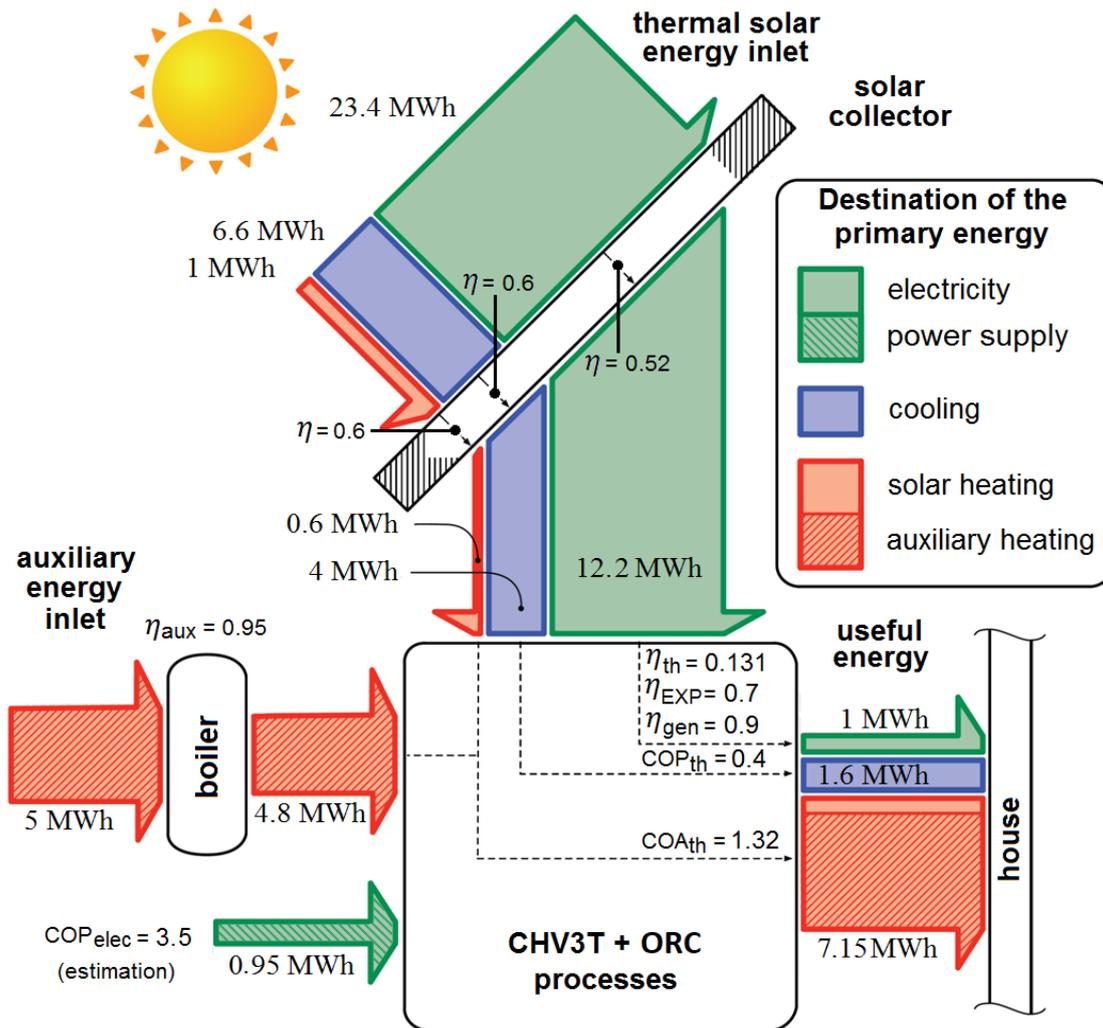
Pour faciliter la compréhension de la Figure V-14, deux jours de références sont détaillés, le 19 février (Jour 50) soit une journée d'hiver classique et le 19 juillet (Jour 200), journée représentative d'été.

- **Pour la journée du 19 février (jour 50)**, le champ solaire reçoit 81,5 kWh (voir Fig. V-14a) sous forme de rayonnement solaire. Une part de cette énergie, 9,2 kWh (Fig. a) est consacrée à assurer les besoins en chauffage diurne soit 6,9 kWh (Fig. a), avec un  $COA_{sol}$  de 0,75 pour l'ensemble collecteur solaire/CHV3T. L'énergie solaire collectée excédentaire (72,3 kWh) est consacrée à la production électrique via l'ORC. Le rendement électrique de ce dernier étant de 4,8% (Fig. d) en moyenne le 19 février, la production électrique est de 3,54 kWh (Fig. b).

Pendant la nuit, la chaudière auxiliaire apporte 30,3 kWh (111,8 - 81,5 lu sur Fig. a) qui sont amplifiés par le procédé CHV3T avec un  $COA_{aux}$  de 1,2 afin de fournir les 36,32 kWh nécessaires pour le chauffage nocturne.

- **Pour la journée du 19 juillet (jour 200)**, l'énergie solaire collectée est principalement dédiée aux besoins de rafraîchissement, ces derniers s'élevant à 16,8 kWh (Fig. b). Le  $COP_G$ , calculé en fonction des températures et de l'irradiation du 19 juillet, vaut 0,25 (Fig. d). De ce fait 66,8 kWh (Fig. a) d'énergie solaire sont nécessaires pour subvenir à ces besoins. L'énergie solaire excédentaire 21,2 kWh (88,0 - 66,8 lu dans Fig. a) permet alors la production de 0,8 kWh d'électricité (à peine visible sur Fig. b).

Finalement, la Figure V-15 donne une autre représentation de ces résultats en permettant de bien visualiser les flux énergétiques entrants et sortants du procédé de trigénération, ainsi que ses performances moyennes annuelles.



**Figure V-15 : Représentation schématique des flux énergétiques annuels assurant le confort thermique d'une résidence standard de 100m<sup>2</sup> équipée de 17,9 m<sup>2</sup> de collecteur solaire à Perpignan par un trigénérateur CHV3T-WGS/ORC. Le couple de réfrigérant considéré est le couple R1234yf/R1233zd.**

Avec cette dernière figure, trois points peuvent être mis en évidence :

- La fonction amplification du procédé CHV3T peut-être intéressante même en l'absence d'énergie solaire. L'amplification de la chaleur produite par la source de chaleur auxiliaire permet ici une réduction d'approximativement 30% de la consommation de la chaudière.
- La fonction de rafraîchissement à partir de l'énergie reçue par les collecteurs solaires permet de subvenir aux besoins de rafraîchissement avec une COP<sub>G</sub> annuelle d'approximativement 0,24.
- L'intégration du procédé ORC permet de produire de l'électricité tout au long de l'année en valorisant l'excédent d'énergie reçue par les collecteurs solaires. La conversion de rayonnement en électricité atteint un rendement global annuel  $\eta_G$  de 4,2% (=1MWh/23,4MWh).

Par ailleurs un bilan énergétique plus précis doit prendre en compte la consommation électrique du procédé et des auxiliaires nécessaires à son bon fonctionnement. Les évaluations du COP<sub>elec</sub> et du COA<sub>elec</sub> sont complexes à faire en l'absence de prototype expérimental, celles-ci dépendent de nombreux choix technologiques, tels que le nombre de vannes, de pompes, de convecteurs,

mais aussi leurs technologies (type de pompe, vannes ou distributeurs hydrauliques notamment). Une première évaluation a été réalisée par Martins [53] sur la variante WL du CHV3T, celle-ci conclut à un  $COP_{elec}$  compris entre 3,5 et 4 durant une journée d'été. Il faut toutefois rappeler que plusieurs différences existent entre ces deux études. La variante WGS devrait permettre un meilleur  $COP_{elec}$  que la variante WL grâce à la pressurisation thermique du fluide de travail. Toutefois, cet avantage est contrebalancé par un nombre plus important de vannes, ainsi que par l'ajout d'une boucle de fluide caloporteur supplémentaire pour les besoins de trigénération.

On remarquera qu'en considérant un  $COP_{elec}$  de 3,5 et une surface de captation de 17,9m<sup>2</sup>, la production électrique suffit à compenser la consommation intrinsèque du procédé de trigénération sur une année complète.

Enfin il faut rappeler qu'aucun prototype n'a été construit pour valider ces résultats à ce jour. L'étude vise ici une évaluation du potentiel de ce nouveau processus thermohydraulique, réalisée sur la base d'hypothèses fortes. Les principales sont discutées ci-dessous.

- **Non prise en compte de la couverture nuageuse :** Les résultats de simulation obtenus précédemment ne tiennent pas compte de la couverture nuageuse, ils représentent donc une estimation haute. Toutefois, il faut rappeler que même en cas de faibles irradiations solaires, la fonction amplification du CHV3T permettrait de réduire la consommation de la source de chaleur auxiliaire.
- **Absence d'inertie thermique de l'habitat :** L'inertie thermique d'un habitat influence fortement la répartition de ses besoins. Du fait de l'absence d'inertie, les besoins en chauffage nocturne et les besoins de rafraîchissement sont certainement surévalués par rapport à une habitation réelle, et donc la consommation d'énergie auxiliaire également. Dans un cas réel, une partie de l'énergie nécessaire au chauffage nocturne serait assurée pendant la journée et stocké dans la dalle et les murs de l'habitation, ce qui veut dire que la production électrique est elle aussi certainement surévaluée, puisqu'une partie de cette énergie consommée servirait à assurer les besoins de chauffage. Enfin, si les besoins de rafraîchissement sont plus faibles en réalité que ce qui est prévu dans la simulation, alors la surface de collecteur minimum nécessaire pour subvenir à ces besoins doit être elle-même inférieure aux 17,9 m<sup>2</sup> annoncés.
- **Efficacité constante :** Les efficacités des différents composants sont considérées constantes alors qu'elles sont influencées par les conditions climatiques elles-mêmes fortement variables au cours de l'année. Toutefois, des valeurs moyennes ont été considérées pour ne tenir compte de ces variations.

Même avec ces réserves, il reste possible de comparer ces résultats à ceux d'autres études de procédés de trigénération réalisées avec des hypothèses simplificatrices similaires. Parmi ces études on retrouve par exemple les procédés ORC/PAC [52] ou les procédés PV/PAC [38]. La comparaison entre différents systèmes de trigénération est complexe, puisque les conditions de fonctionnement sont souvent différentes, comme les températures des sources/puits de chaleur ou encore les modes d'exploitations. De plus les performances ne peuvent être les seuls critères à prendre en compte, l'aspect économique ou encore l'encombrement doivent également être considérés, en particulier dans le cadre d'application résidentielle.

En termes de performances, l'étude d'Immovilli et al. [50] compare différents systèmes de cogénération solaires dont les COP<sub>sol</sub> varient de 0,05 à 0,6 pour la production de froid et des efficacités de 5% à 20% pour la production d'électricité. Le système CHV3T/ORC atteint lui des performances du même ordre de grandeur, avec un COP<sub>sol</sub> variant entre 0,21 et 0,3, mais une efficacité plus faible pour la production électrique (4% à 5%). En comparaison, les procédés de production électrique solaire à basse température atteignent des rendements de l'ordre de 2% à 8% [27]. En termes de chauffage, le procédé CHV3T permet une amplification de la chaleur produite par la source de chaleur auxiliaire de 30% en moyenne.

En termes d'encombrement, la nécessité de mettre en œuvre 4 cylindres de transfert de 40 litres chacun et le grand nombre de vannes qu'implique la variante CHV3T-WGS conduisent à un encombrement supérieur à celui des autres systèmes considérés. Le procédé peut toutefois être déporté à l'extérieur de l'habitat. L'intérêt économique du procédé n'a pas été évalué à ce stade de l'étude. Néanmoins, le nombre de composants laisse présumer un coût d'investissement relativement important.

### **3. Conclusion**

Ce chapitre a permis dans un premier temps de clarifier certains aspects plus technologiques du procédé de trigénération, en précisant notamment les technologies d'extraction/captation des calories, l'intégration et le couplage des procédés CHV3T et ORC, ou encore la stratégie de contrôle et de régulation utilisée dans le cadre de cette étude. Ces choix technologiques ont permis d'affiner le choix des couples de fluides utilisés, de mesurer leurs impacts sur les performances du procédé et en définitive de présenter le dimensionnement final des principaux éléments qui le constituent.

Une simulation de son fonctionnement annuel a été réalisée en compilant les simulations quotidiennes en quasi-statique avec les conditions opératoires variant d'un jour à l'autre (modélisations détaillées dans les chapitres précédents). Cette simulation annuelle permet ainsi d'évaluer pour une surface de captation donnée, l'évolution des performances du procédé de trigénération, c'est-à-dire de quantifier les flux d'énergie produits pour chaque utilité (chauffage, rafraîchissement ou électricité).

Pour obtenir ces résultats, il a fallu dans un premier temps préciser les méthodes d'obtention des données climatiques et élaborer un modèle simple d'habitat afin de déterminer les besoins thermiques d'une maison type de 100m<sup>2</sup>. En combinant ces informations à une stratégie visant à assurer à minima les besoins de chauffage et de rafraîchissement diurnes par voie solaire, il a été possible de déterminer la surface minimale de collecteur solaire nécessaire.

Une fois ce jeu de paramètres défini (modèle d'habitat, conditions climatiques, couple de fluides, surface de collecteur), les simulations annuelles ont pu être réalisées. Il en ressort que le procédé de trigénération permet une amplification d'un facteur de 1,32 en moyenne sur l'année de la chaleur collectée par les capteurs solaires ou produite par la source auxiliaire. En termes de rafraîchissement le COP solaire atteint 0,24. L'intégralité de l'énergie solaire excédentaire est convertie en électricité avec un rendement fluctuant entre 3,8% et 5%. On remarque également qu'une surface de collecteur de 17,9m<sup>2</sup> en plus de permettre théoriquement de couvrir les besoins de chauffage diurne et de rafraîchissement, permet de produire plus d'électricité que le procédé

de trigénération en a consommé pour subvenir aux besoins thermiques de l'habitation. L'estimation d'un  $COP_{elec}$  de 3,5 permet de déduire une consommation intrinsèque du procédé de 0,95 MWh tandis qu'il a permis la production d'1MWh d'électricité sur l'ensemble de l'année. Toutefois ce bilan électrique annuel neutre est seulement théorique étant donné que l'électricité produite ne peut pas l'être au moment où elle est consommée par la machine, une réelle autonomie énergétique nécessiterait un stockage de cette dernière. Il ressort cependant que cette production électrique permet de réduire les besoins électriques de l'habitat dès que la surface de captation excède les 17m<sup>2</sup>. Ces performances restent inférieures à celles de procédés spécialisés à un seul type d'énergie, ou même de procédés de cogénération. Elles restent néanmoins dans les mêmes ordres de grandeur que celles d'autres procédés de trigénération.

Ces résultats méritent toutefois d'être discutés du fait des hypothèses simplificatrices fortes qui ont été prises pour réaliser ces simulations, notamment en termes d'inertie thermique de l'habitat, dont une meilleure prise en compte ferait certainement baisser significativement les besoins de chauffage nocturne et les besoins de rafraîchissement. Il faut également rappeler que ces résultats ne tiennent pas compte de la couverture nuageuse, et représentent par conséquent une estimation haute qu'il sera difficile d'atteindre en conditions réelles. A contrario, le recours à une régulation par "loi d'eau", plutôt qu'une régulation "tout ou rien", permettrait d'améliorer légèrement les performances du procédé CHV3T.