

Webinaires Froid Performant ADEME

Analyser les performances d'une installation
de climatisation vertueuse

19/06/2026

Quels indicateurs pour comparer des solutions techniques ?

- Indicateurs techniques usuels

- SEER (Seasonal Energy Efficiency Ratio) : doit être le plus grand possible

$$SEER = \frac{\text{Energie froide produite sur l'année (kWhf)}}{\text{Electricité consommée sur l'année (kWhe)}}$$

- consommation spécifique : kWhe/m² climatisé/an

➔ **Raisonner en conso globale (machine, auxiliaires, distribution, terminaux), donc en service rendu à l'utilisateur**

- Indicateurs économiques

- €/MWhf

- coût spécifique : €/m² climatisé/an

➔ **Raisonner en coût global (amortissement des investissements + maintenance + électricité)**

Quels indicateurs pour comparer des solutions techniques ?

- Pas d'indicateur universel
 - dépend des objectifs poursuivis
 - limiter la consommation électrique annuelle, diminuer la charge sur le réseau électrique aux heures de pointe, etc.
 - dépend du point de vue (maitre d'ouvrage ≠ institutionnel)
 - nécessité d'avoir recours à plusieurs indicateurs
 - ex: adosser un indicateur économique à un indicateur technique pour évincer les solutions qui seraient vertueuses mais à un coût exorbitant et donc pas exemplaires

	Avantages	Inconvénients
SEER + € HTVA/MWhf	• usuel • caractérise réellement la performance de la technologie	• limites pas toujours bien définies (quelles consommations prises en compte dans le calcul ?) • pas d'éléments concernant l'intensité de la demande de froid
kWhe/m² clim/an + € HTVA/m² clim/an	• facile à appréhender (en lien avec les flux énergétiques/économiques) • facile à transposer à un autre site	• dépend à la fois de la performance technique et de l'intensité de la demande de froid • pertinent uniquement sur des sites ayant une <u>typologie similaire</u>

Exemple sur une installation de climatisation solaire thermique

- Projet Tropiclim¹ (2018-2020) : Green Tech, Enertech
- Site d'étude
 - Bâtiment de stockage de médicaments d'environ **600 m²** situé à St Gilles les Bains
 - Climatisé toute l'année (6h à 19h) entre 24 et 26°C pour assurer la conservation des médicaments
 - Equipé en 2017 d'une climatisation solaire thermique hybride de **42 kWf**
 - **machine à adsorption** permettant la production de froid à partir de la chaleur solaire (12 kWf)
 - appoint assuré par un **compresseur électrique** (30 kWf)
 - **62 m² de capteurs solaires thermiques**
 - **ballon solaire** de 1500 L
 - **condenseur évaporatif** (évacuation de la chaleur par évaporation de l'eau) pour améliorer les performances

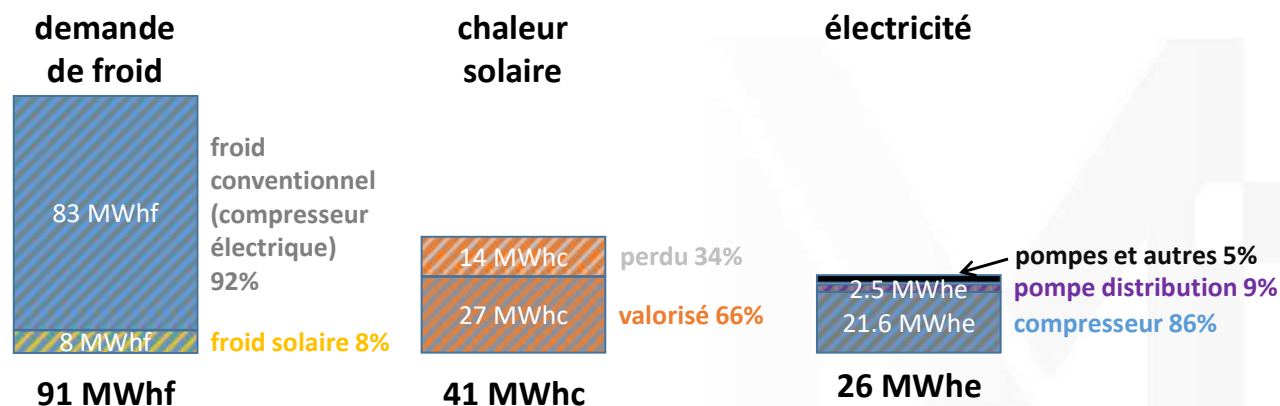


¹Projet Tropiclim, AAP11 PACTE et ADEME et EDF

<https://www.caue974.com/fr/portail/356/observatoire/51329/tropiclim.html>

- Instrumentation
 - Production/demande de froid du bâtiment, consommation électrique des différents éléments, station météo
 - Données de mesure au pas de temps 1 min sur une année complète du 1er janvier au 31 décembre 2019

- Performances mesurées

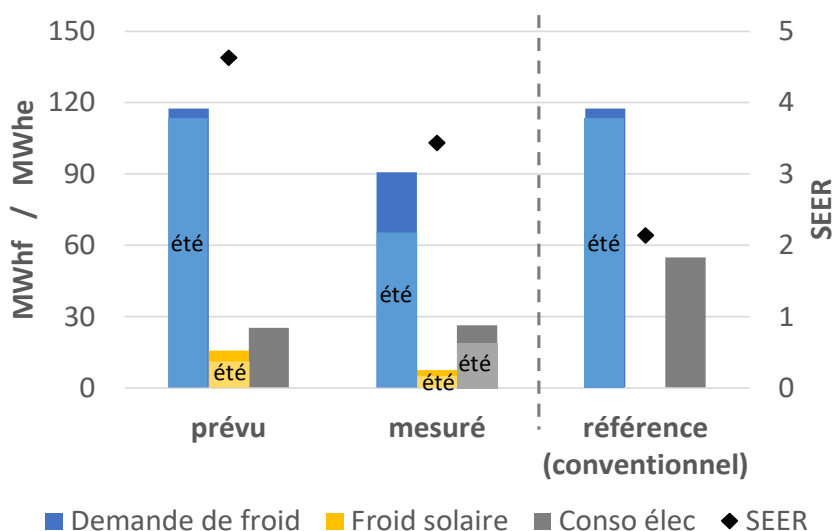


Pour plus de détails, se référer au rapport complet [Tropiclim Tâche 2](#)

- part solaire = 8% ➔ *faible, car le solaire thermique n'est pas adapté au fonctionnement à haute température (>65°C pour que le groupe à adsorption puisse fonctionner)*
- SEER annuel = 3.4 ➔ *correct par rapport aux valeurs obtenues avec des technologies conventionnelles, grâce au condenseur évaporatif*

Performances réelles vs. planifiées

- Comparaison avec les performances planifiées



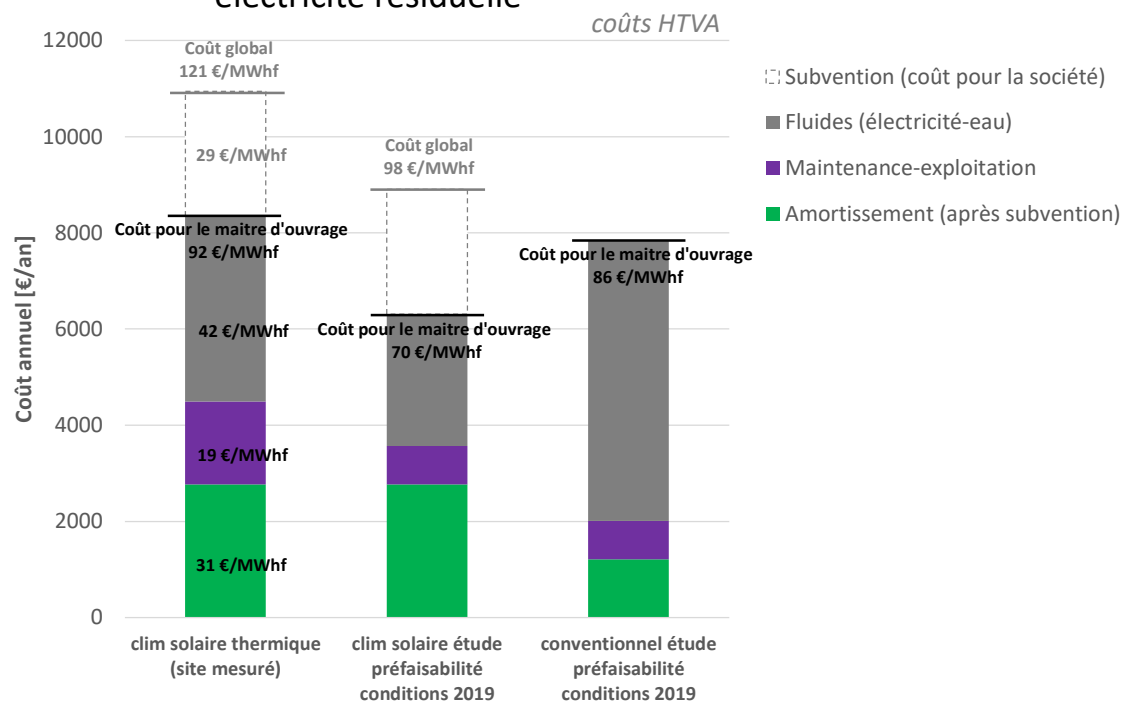
- A l'échelle annuelle, écart dans la demande de froid <30% mais profil très différent
 - prévu : 97% en été (oct-avr)
 - réel : 72% en été / 28% en hiver
- Froid solaire réellement fourni inférieur de moitié à la prévision
- Consommation électrique proche, de manière fortuite
 - production de froid solaire moins élevée conjuguée avec une demande de froid moins élevée (coupure nocturne)
- SEER prévu = 4.6 vs. SEER mesuré = 3.4

➔ ***En général, écart important entre les performances planifiées et réelles***

- *peu de données à disposition pour réaliser l'étude de faisabilité*
- *conditions d'utilisation différentes (planning d'utilisation, température de consigne)*
- *données de performances théoriques (constructeurs ou valeurs de référence)*

- Analyse économique
 - en coût global, incluant les 3 familles de coût :
 - amortissement des investissements (incluant subventions)
 - maintenance
 - électricité résiduelle

Pour plus de détails, se référer au rapport complet [Tropiclim Tâche 2](#)



– Coût réel : 92 €/MWhf

- 1/3 amortissements
- 20% maintenance
- 45% électricité

– Coût prévisionnel (étude de faisabilité) :

- 70 €/MWhf pour la solution solaire
- 86 €/MWhf pour la solution conventionnelle

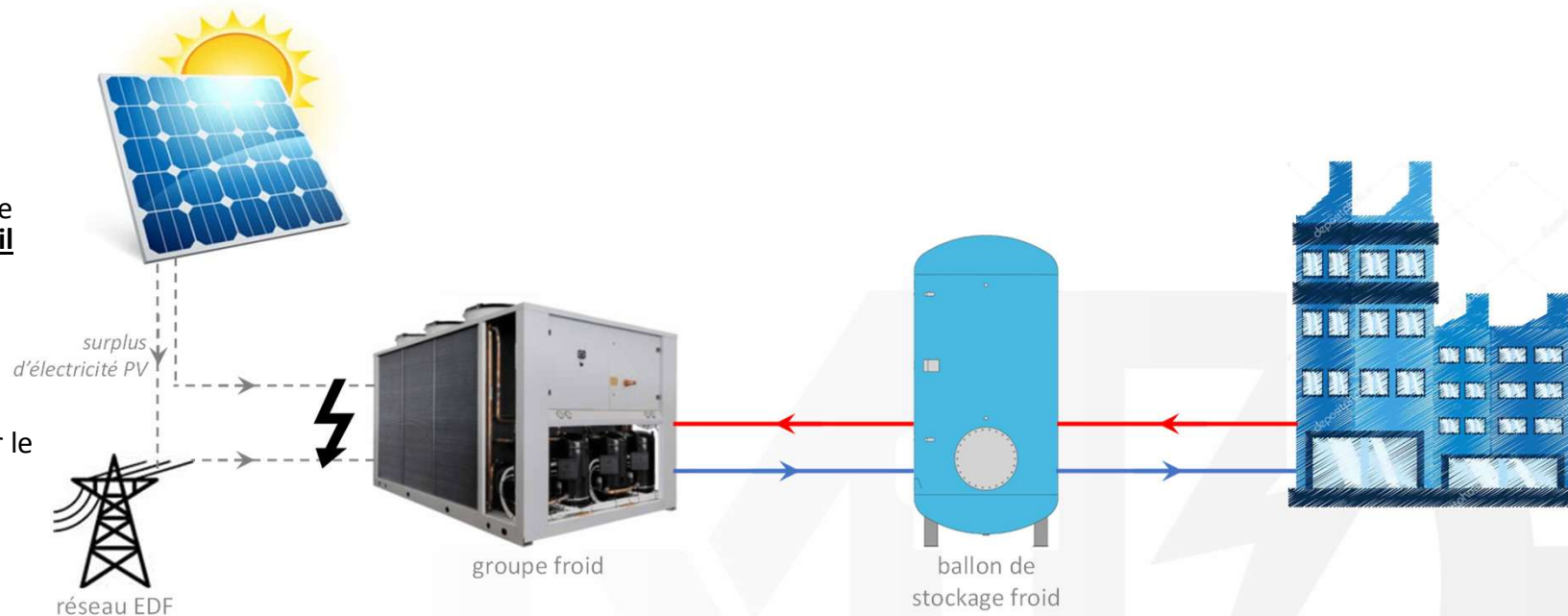
Coût réel (après subvention) supérieur au coût prévisionnel et à la solution conventionnelle
 ➔ **pas de rentabilité**

(hypothèses disponibles en annexe)

Comparaison avec quelques alternatives

- Alternative ENR possible : **Solaire PV + production de froid conventionnelle**

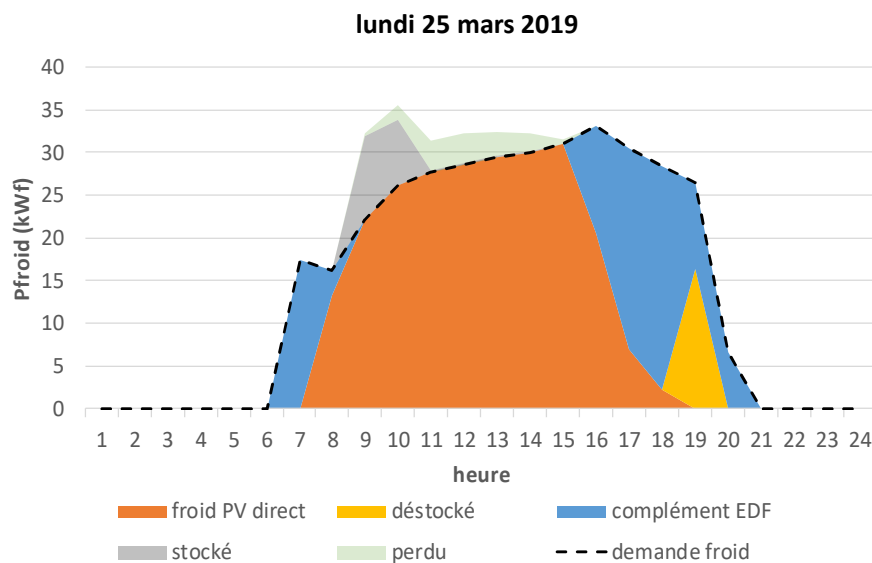
- alimentation directe du groupe froid par les panneaux PV au fil du soleil
- couplage au bâtiment via un ballon de stockage froid pour valoriser les surplus de production PV
- complément au fil de l'eau par le réseau EDF



- **Nécessité d'un stockage** pour découpler la ressource solaire et la demande de froid, **sinon simple autoconsommation PV**
→ **pas de plus value par rapport à de la revente totale, et même moins performant si pas d'injection du surplus**
 - stockage par batteries **pas pertinent** sur réseau électrique
 - **stockage de froid directement** → **compatible avec GEG uniquement (hors VRV et split systems)**
- Modèle horaire annuel simplifié pour quantifier les différents flux énergétiques et dégager les grands enjeux
(non validé sur un cas réel)

Comparaison avec quelques alternatives

- Résultats du modèle sur un beau jour d'été



NB: les aires de couleur représentent l'énergie froide fournie des différentes manières

Installation PV 25 kWc

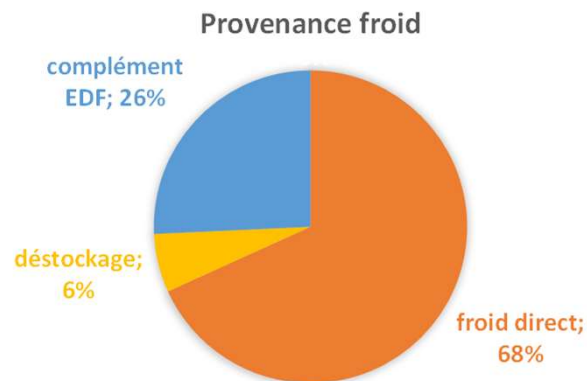
- 67% du froid est produit « en direct » grâce à l'électricité PV (orange)
- 5% de l'énergie est stockée/déstockée au cours de la journée (gris et jaune)
- 4% de l'électricité PV est perdue ou revendue à EDF (vert)
- 28% du froid doit être produit par l'électricité résiduelle puisée sur le réseau EDF (bleu)

(le matin et le soir lorsque le rayonnement solaire n'est plus suffisant et que le stock est vide)

Part solaire de 72% (direct + déstocké) sur cette journée

Comparaison avec quelques alternatives

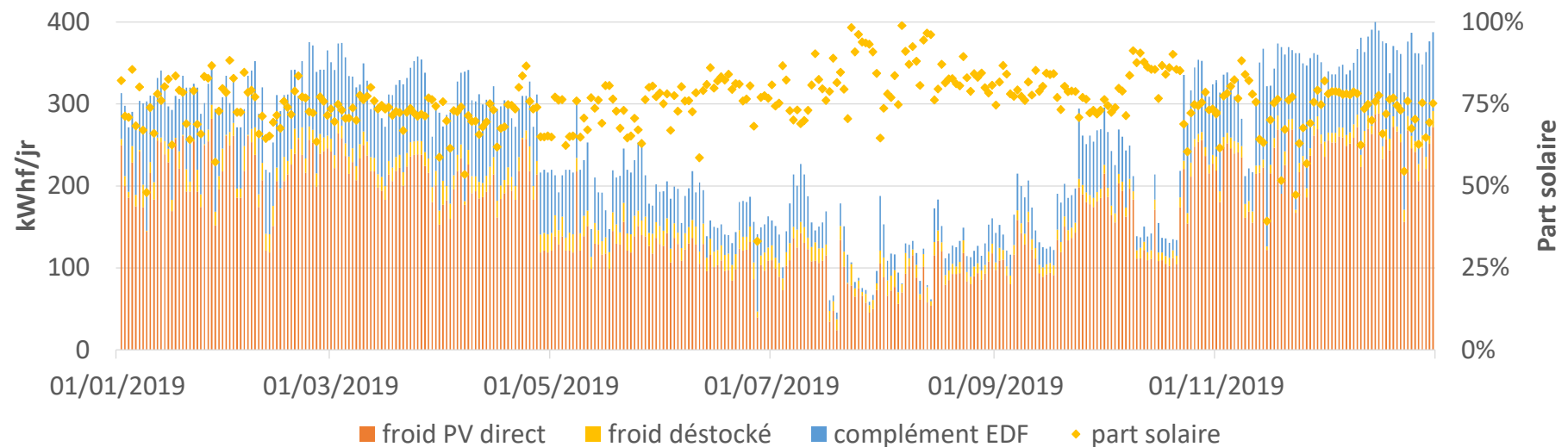
• Bilan sur une année



Installation PV 25 kWc

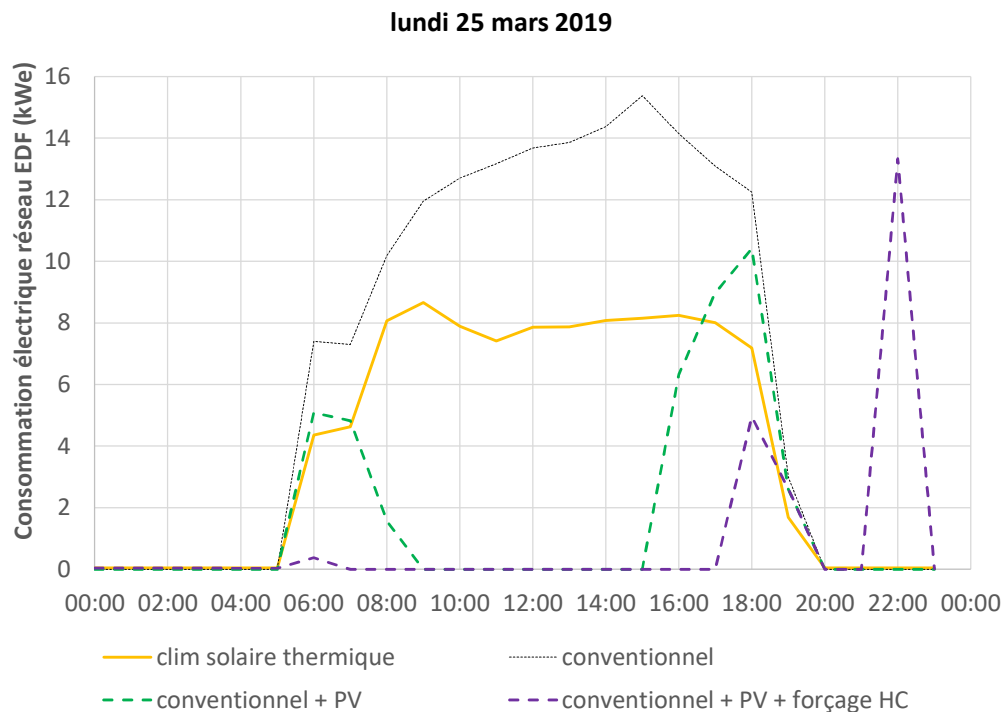
- part solaire 74% (68+6), stable sur l'année (légèrement supérieure en hiver)
- 36% de l'électricité PV ne peut être valorisée pour la climatisation du site (perdu ou revendu à EDF)

/!\ Potentiel MAX, sera inférieur dans la réalité à cause des simplifications du modèle



Comparaison avec quelques alternatives

• Consommation électrique résiduelle



- conventionnel (noir) *GEG 40 kWf*
- clim solaire thermique hybride + condenseur évaporatif (jaune) : installation mesurée
42 kWf, 62 m² capteurs solaires
 - conso résiduelle >50%
- conventionnel + PV (vert) *GEG*
40 kWc + 25 kWc + ballon d'eau froide 1500 L
 - conso en journée nulle
 - reste un pic de consommation le matin et le soir
- scénario « forçage » (=remplissage de ballon en heures creuses (violet)) *ballon d'eau froide 3000 L*
 - effacement de la quasi-totalité de la pointe du matin
 - division par 2 de la consommation résiduelle entre 18h et 20h (heures de pointe EDF), reportée en heures creuses

Comparaison avec quelques alternatives

- Performances techniques des différentes alternatives

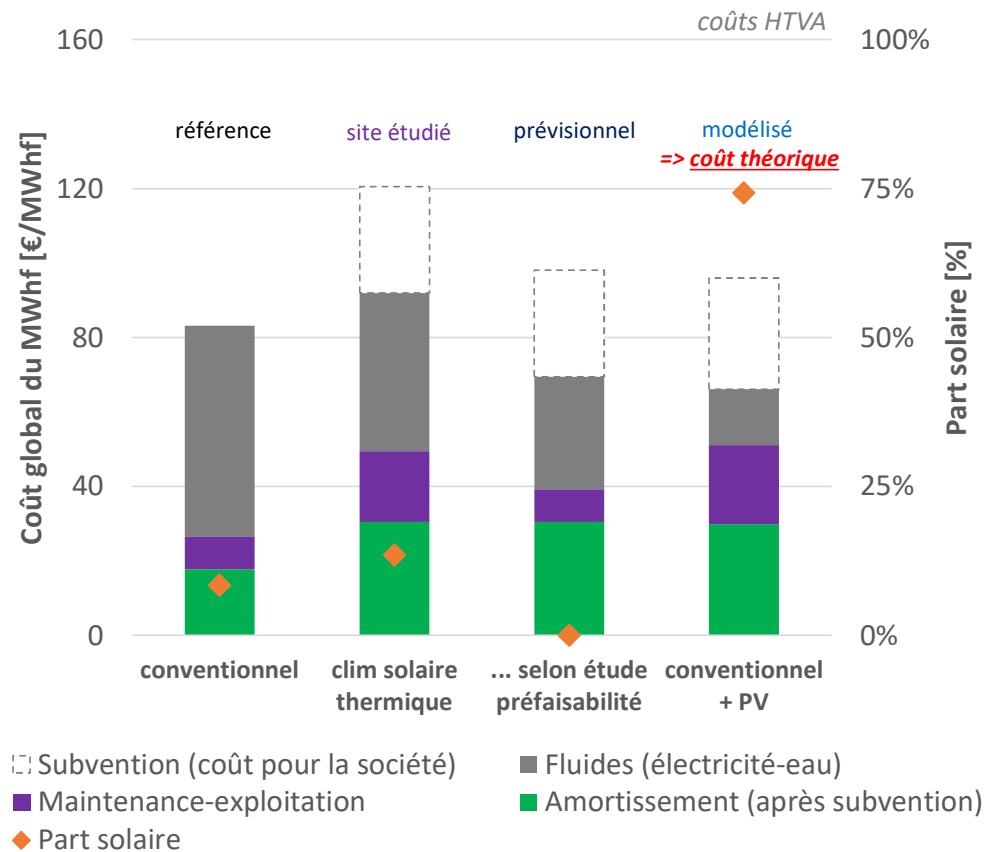
	conventionnel	clim solaire thermique hybride + condenseur évaporatif		conventionnel + PV
	40 kWf	42 kWf + 62 m ² capteurs solaires		40 kWf + 25 kWc
	REX (mesuré)	+40% planifié	mesuré	modélisé
SEER	2.4	4.6	3.4	10.5
part solaire	0%	13%	8%	74%
conso eau	-	non évalué	1.1 L/kWhf	-

- **solaire thermique + condenseur évaporatif** → **+40% sur le SEER** p/r à une installation conventionnelle
(NB : le condenseur évaporatif compte pour 80% dans l'augmentation de performances)
- **conventionnel + PV** → **SEER x4** avec une part solaire proche des 3/4
(NB : en ne comptabilisant que l'électricité prélevée sur le réseau EDF dans le calcul du SEER)

/!\ Données mesurées vs. théoriques (=POTENTIEL MAX, la réalité sera entre les deux)

Comparaison avec quelques alternatives

• Performances économiques



- Coût compris entre 66 et 92 €/MWhf après subvention
- Solution conventionnelle avec aérocondenseur (référence) ~ 80 €/MWhf
- Subventions
 - obtenu pour l'installation de clim solaire thermique : 60% du surcoût p/r à une solution conventionnelle
→ **47% de l'investissement total**
 - mêmes conditions appliquées à la clim solaire PV (/\ pas le cas à l'heure actuelle)
→ **49% de l'investissement total**
- Après subvention, climatisation conventionnelle + PV moins onéreuse que la climatisation conventionnelle (/\ coût théorique !!)
→ **Pour un niveau de subvention pas extravagant**

Pour plus de détails, se référer au rapport complet [Tropiclim Tâche 2](#)

- Choisir **les bons indicateurs** pour comparer les solutions de manière pertinente
 - un indicateur unique n'est pas suffisant
 - performances : attention au périmètre considéré
 - économique : raisonner en coût global
- **Ecart inévitable entre valeurs prévisionnelles et valeurs réelles** (souvent pas dans le bon sens...)
 - hypothèses d'utilisation
 - performances réelles vs. théoriques
 - ➔ *Données théoriques à considérer comme un potentiel max*
- Retour d'expérience sur **clim solaire thermique à adsorption**
 - part solaire faible (<10%) car le solaire thermique n'est pas adapté au fonctionnement à haute température
 - pas de rentabilité sur l'installation étudiée
- **Couplage clim conventionnelle/PV :**
 - **POTENTIEL THEORIQUE : part solaire jusqu'à 75%**
 - le PV produit de l'énergie valorisable dès les 1ers rayons de soleil (contrairement au solaire thermique)
 - rentabilité possible avec des taux de subvention acceptables
 - ➔ *Retour sur une installation réelle (Elodie CORTES, EDEX)*

MERCI DE VOTRE ATTENTION

N'hésitez pas à me contacter en cas de question
ou si vous avez besoin d'un accompagnement

Hypothèses utilisées dans l'analyse économique

- **/!\ Données 2019**
- Amortissement des investissements
 - durée de vie : 15 ans ou 25 ans selon les éléments, taux d'intérêt : 2.5%
 - GEG : 500 € HTVA/kWf fourni posé
 - PV : 2 € HTVA/Wc fourni posé
- Maintenance
 - GEG : 800 € HTVA/an
 - PV : 50 € HTVA/kWc/an
- Electricité résiduelle
 - Tarif Bleu 2019 : 14 c€ HTVA/kWh