



Du soleil dans les réseaux thermiques

Retour d'expérience d'une installation solaire thermique sous vide de 800m² connectée à un CAD des SIG

Alexis Duret, S. Pauletta, S. Lasvaux, M. Frossard, X. Jobard & G. Demonchy

Séminaire Energie-environnement, UNIGE – 21.03.2024



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Bundesamt für Energie BFE
Office fédéral de l'énergie OFEN

Agenda



© Magalie Girardin, SIG

1. L'Institut des Energies et le solaire thermique
2. Rappel solaire thermique: technologie et marché
3. Potentiel du solaire thermique en Suisse (SOLCAD)
4. CADSIG et installation SolarCADII
5. Campagne de suivi des performances
6. Modélisation et optimisation
7. Analyse financière et environnementale
8. Conclusions et perspectives



GTHC Systèmes électriques

- Réseaux électriques, énergies renouvelables,
- machines & entraînements électriques,
- électronique de puissance, mécatronique...



GTHC Intégration énergétique et Durabilité

- Intégration des infrastructures de production d'énergies (hydrogène, gaz renouvelable, captage et valorisation du CO2)
- Méthodes, outils et mesures pour l'énergétique/physique du bâtiment
- Ecobilan des énergies, écobilan dans le secteur du bâtiment / construction



GTHC Systèmes thermiques

Optimisation d'énergie thermique dans l'industrie
Bioénergie, Pompe à chaleur (PAC), Chauffage à distance (CàD)
Solaire thermique (industriel, CàD, bâtiments), etc.

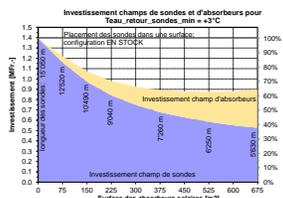
Deux axes de recherche et d'activité:

Axe 1 – Couplage solaire thermique avec d'autres technologies

Projet SondeHX (SIG & fond SIG NER,)



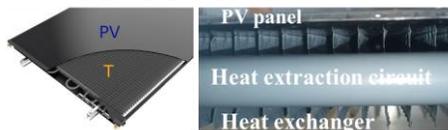
- Recharge de champs de sondes avec aéroconvecteur/solaire thermique
- Grâce à recharge avec chaleur solaire: **-50% longueur sondes et -35% investissement**



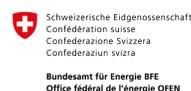
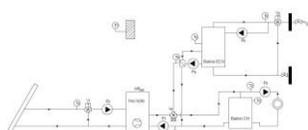
Projet TriSolHP (OFEN & SIG, 2021/23)



- Utilisation collecteur PVT basse température comme source froide
- Système alternatif au PAC air/eau avec COP intéressant



<https://www.consolar.de/fr/solink-le-captteur-de-pac>

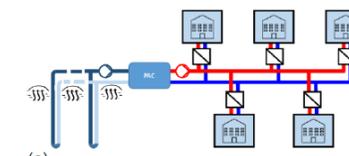
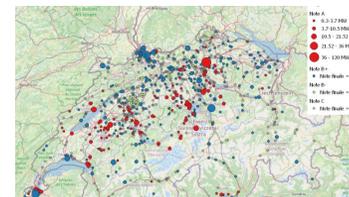
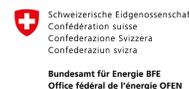


Axe 2 – Grands champs solaires pour réseau thermique/industrie avec/sans stock thermique

Projet SoICAD (OFEN, 2019/21)



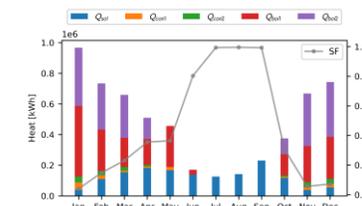
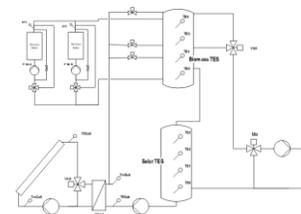
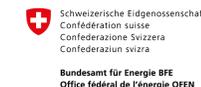
- Potentiel de la chaleur solaire dans les CAD en Suisse (voir résultat plus bas)
- Etude de cas avec CAD existants



Projet OptiCADSol (OFEN, 2022/26)



- Chaleur solaire pour les «petits» CAD bois
- Schéma hydraulique et régulation



Rappel solaire thermique: technologie et marché

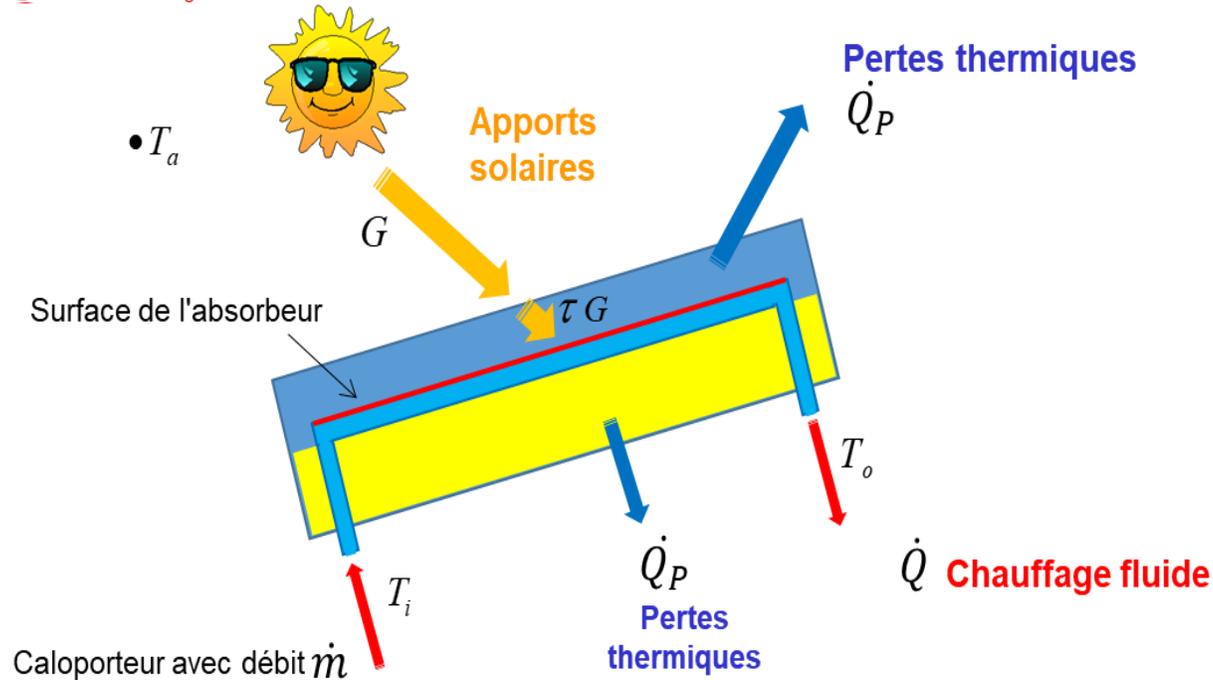


Photo d'un absorbeur solaire

Energie : Q [J]	Puissance : \dot{Q} [W]	Puissance surfacique : \dot{q} [W/m ²]
-------------------	---------------------------	--

Source : www.minergie.ch

Bilan à l'équilibre:

Apports solaires = Pertes thermiques + Chauffage fluide

Rappel solaire thermique: technologie et marché

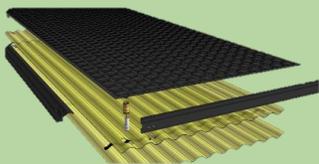
Différentes technologies de collecteur (<150°C):

• Capteurs plan non vitrés

- 20-55°C
- Bon marché

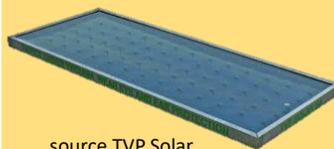
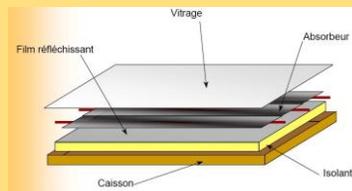


source Energie Solaire SA



• Capteurs plan vitrés

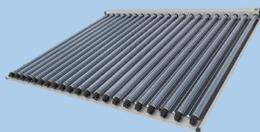
- 30-90°C
- Version sous-vide (>100°C)



source TVP Solar

• Capteurs à tubes

- 70-130°C



source Ritter XL



• Capteurs hybrides (PV-T)

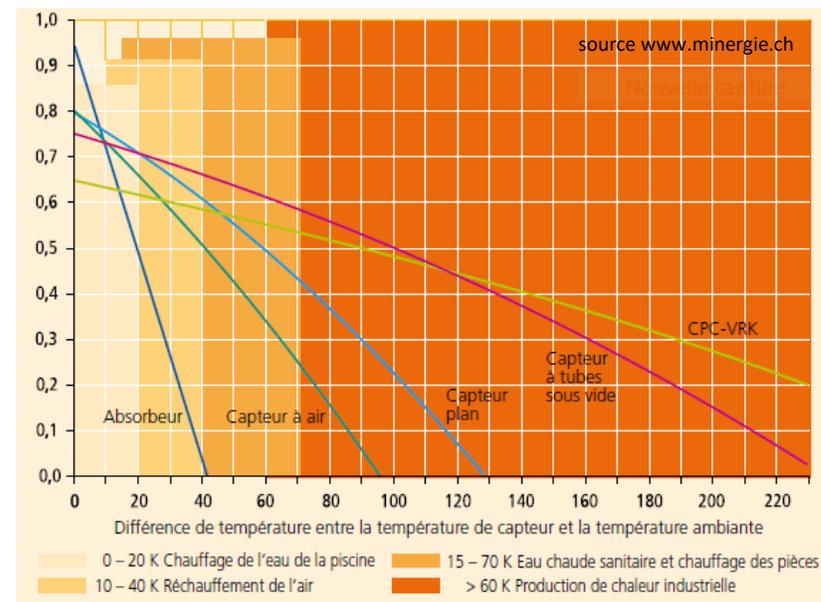
- Chaleur + électricité
- 20-50°C



© Batirama

Rendement de conversion:

$$\eta = \frac{\dot{q}}{G} = C_0 - C_1 \frac{(T_m - T_a)}{G} - C_2 \frac{(T_m - T_a)^2}{G}$$



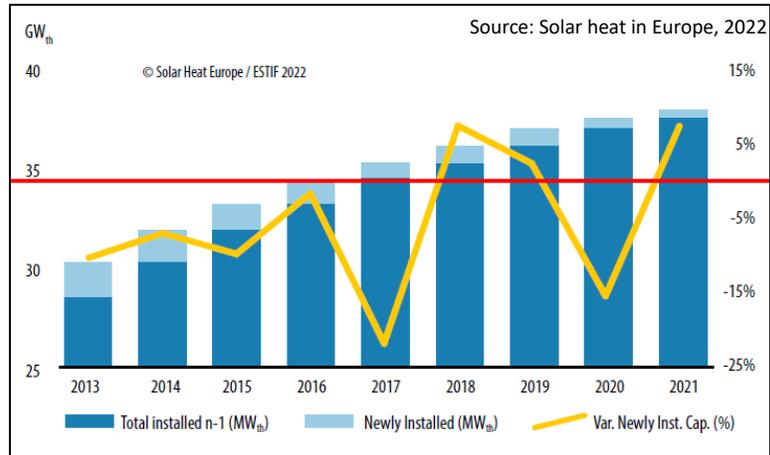
Rendement influencé par:

- Technologie
- Intensité rayonnement
- Température de fonctionnement

Productivité spécifique: Production cumulée de chaleur sur une année / surface (kWh/m²/an)

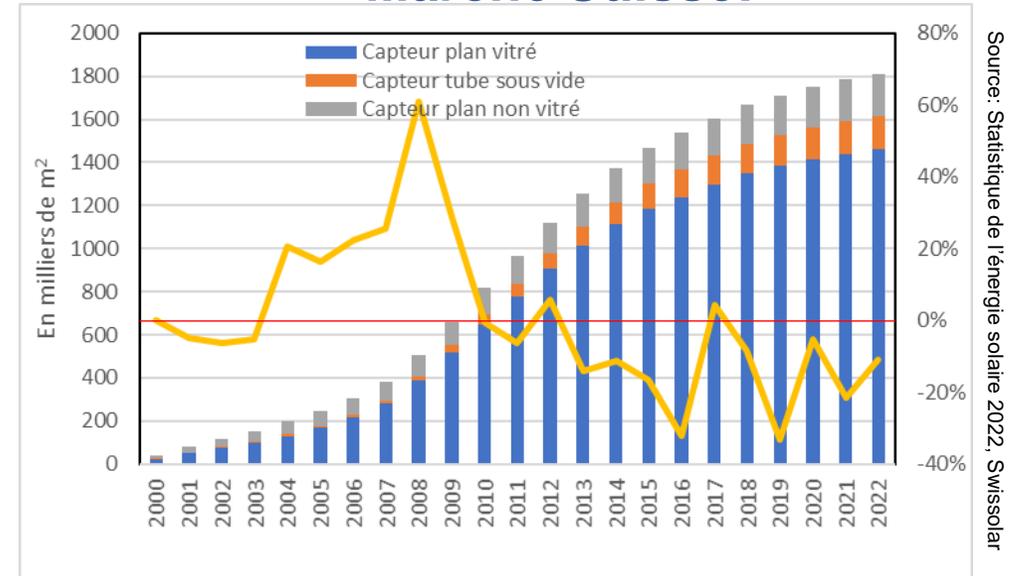
Rappel solaire thermique: technologie et marché

Marché Européen (EU+CH):



- En baisse de 2010-18 puis Croissance à partir de 2018 (excepté 2020, COVID)
- **Forte croissance grandes installations (>500m²)**
 - ✓ Meilleure productivité et économie d'échelle
 - ✓ Coûts de la chaleur compétitifs
 - ✓ Nouvelles subventions (All, Aut...)
- Application **CàD et chaleur process**
- Subvention en hausse
- Effet coût augmentation coût gaz + électricité

Marché Suisse:



- **Marché en récession depuis 2010** (crise PV)
- Application essentiellement **petites installations domestiques** (<100m²) → ~99% (2018)
- **Résidentiel** reste marché principal (obligation légale)
- Peu de grandes installations (prix et pas de subvention)
- PV en 2022: ~5'630 milliers de m²

Rappel solaire thermique: technologie et marché

Coût de revient de la chaleur solaire

Type d'application	Prix de la chaleur	Taux de couverture solaire
CAD (80°C/50°C)	7-12 cent/kWh	20-60% (sans stock)
Habitation Indiv (100kWh/m ²) ECS/Chauffage	18-25 cent/kWh	32% (ECS/Chauf.)
Habitation Multi ECS	14-18 cent/kWh	49% (ECS)
Habitation Multi (90kWh/m ²) ECS/Chauffage	10-12 cent/kWh	39% (ECS/Chauf.)

Projet SolTherm 2050, SPF/OST, 2021

Comparaison avec autres technologie de production de chaleur (OPEX)

Technologie	Coût de revient au kWh	Emission de gaz à effet de serre
Solaire thermique	7-25 cent/kWh	15-42 gCO ₂ -eq/kWh
Gaz	20 cent/kWh	234 gCO ₂ -eq/kWh
Mazout	15 cent/kWh	343 gCO ₂ -eq/kWh
PAC Air/eau	8-12 cent/kWh	58 gCO ₂ -eq/kWh
Pellet	12 cent/kWh	50 gCO ₂ -eq/kWh

Seul OPEX «fuel»

Source: KBOB Données écobilans dans la construction, 2009/1:2016, pour applications décentralisées

- Prix de revient du solaire **peut être compétitif**
- Impacts environnementaux du **solaire très faibles**

La chaleur solaire a un rôle important à jouer dans la décarbonation du secteur chaleur...

Définition de **critères d'héliocompatibilité** pour CAD existant¹:

- **CAD:** Température, conso chaleur été
- **Ressource solaire:** surface à disposition/irradiation
- **Chaufferie:** coût production de la chaleur (OPEX)

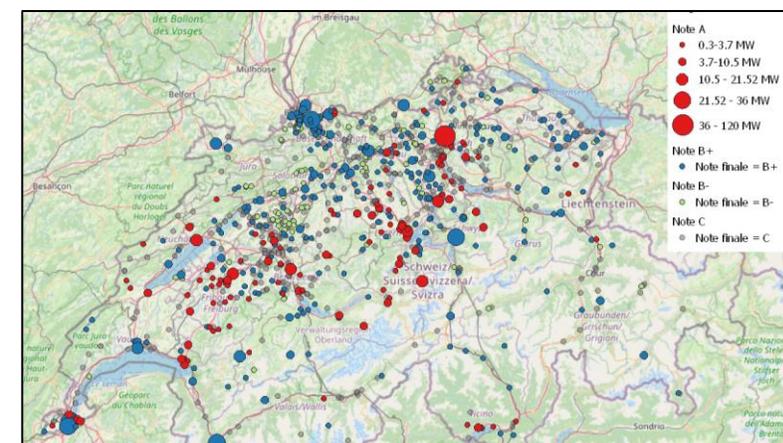
Screening SIG CAD existant pour définir **potentiel actuel**¹:

- Essentiellement petit CAD bois
- Potentiel entre **0.5 et 1TWh/an** (~10% de la chaleur avec taux de couverture de <20%)

Potentiel futur:

- Suivant les scénarios¹: entre **1 et 2.5TWh/an**
- Selon Swissolar²: **3TWh/an** (25% de la chaleur)

- **Grand potentiel pour la chaleur solaire** pour les CAD existants et à venir
- Nécessaire d'**augmenter le soutien et la promotion** pour réaliser ce potentiel (pas de subvention pour grande installation)



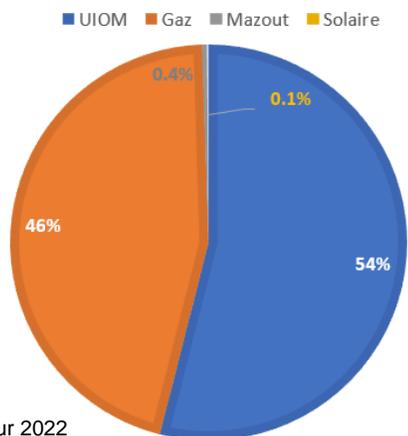
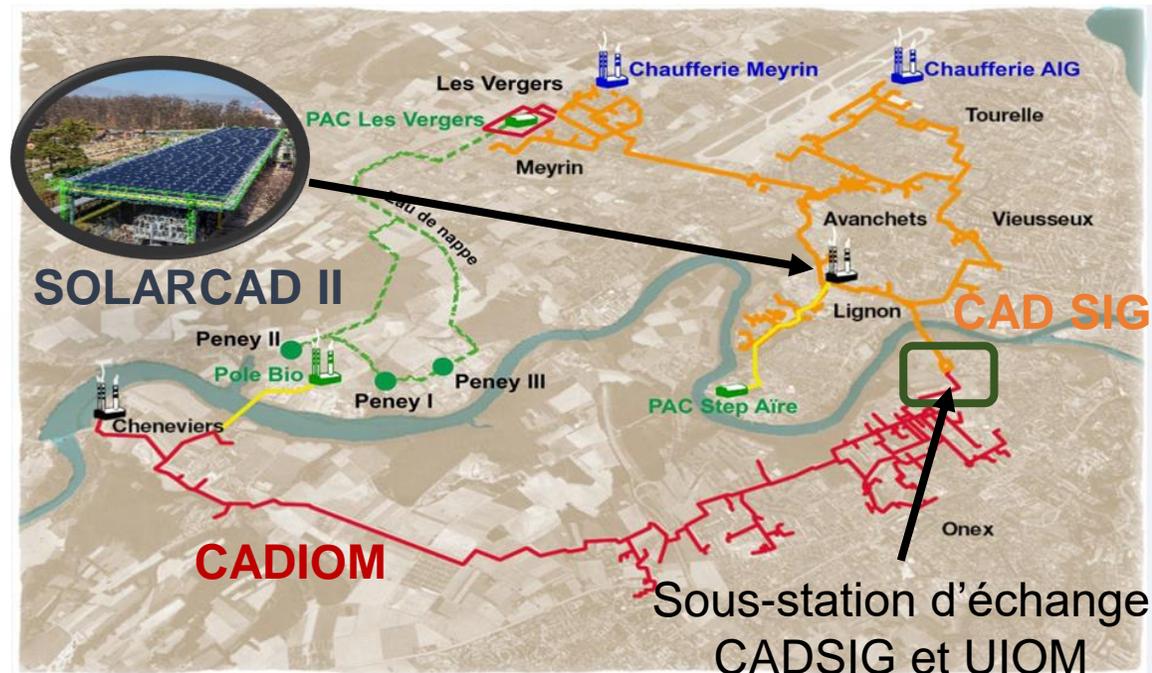
¹ Source : Von Gunten, D., Rager, J., Puthod, L., Dériaz, T., Deschaintre, L., Robineau, J.-L., Nguyen, T.-V., Kämpf, J., Jobard, X., Duret, A., Guillaume, M., Olivier Masset, 2022. SolCAD – Potentiel du solaire thermique dans les chauffages à distance en Suisse, OFEN, Bern.

² Source : Rittman-Frank, M., Perch-Nielsen, S., Stickeberger, D., Deschaintre, L., 2023, Feuille de route chaleur solaire Suisse 2050, Swissolar

Caractéristiques CADSIG

CADSIG: in operation since 1964

Caractéristiques	Description
Température aller	90°C (été), 115°C (hiver)
Température retour	75°C (été), 70°C (hiver)
Chaleur fournie	468 GWh (2022)
Perte	10.3% (2022)
Longueur	48.4 km
Densité linéaire	~9 MWh/ml/yr



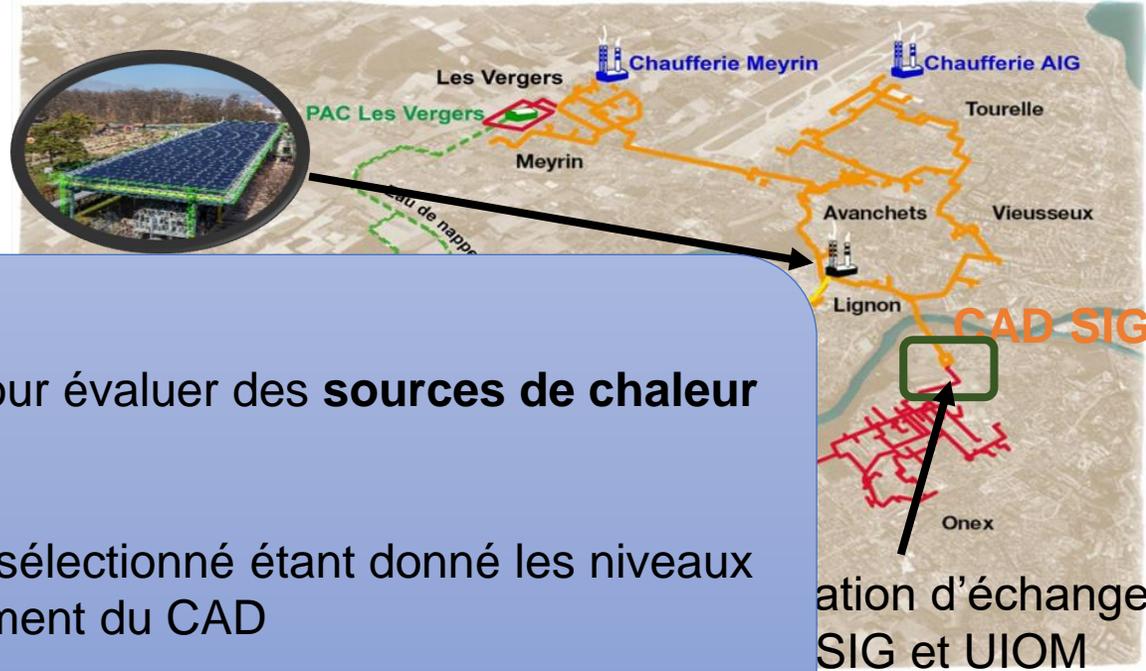
Grand CAD avec une température d'opération élevée (2G) et une part couverte par énergie fossile

- Décarbonation en cours avec essentiellement géothermie
- Autres sources de chaleur renouvelable: chaleur solaire!??

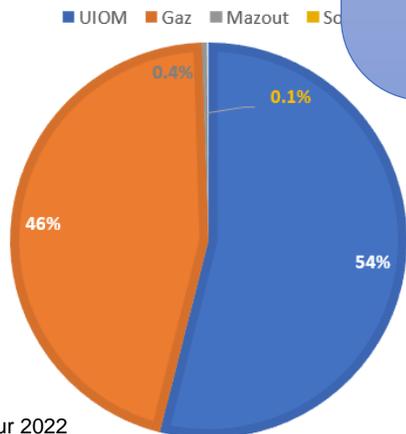
Caractéristiques CADSIG

CAD SIG: in operation since 1964

Caractéristiques	Description
Température aller	90°C (été), 115°C (hiver)
Température retour	75°C (été), 70°C (hiver)
Chaleur fournie	
Perte	
Longueur	
Densité linéaire	



- Le projet SOLARCADII a été lancé pour évaluer des **sources de chaleur renouvelables alternatives**
- La technologie de TVP SOLAR a été sélectionné étant donné les niveaux élevés de température de fonctionnement du CAD

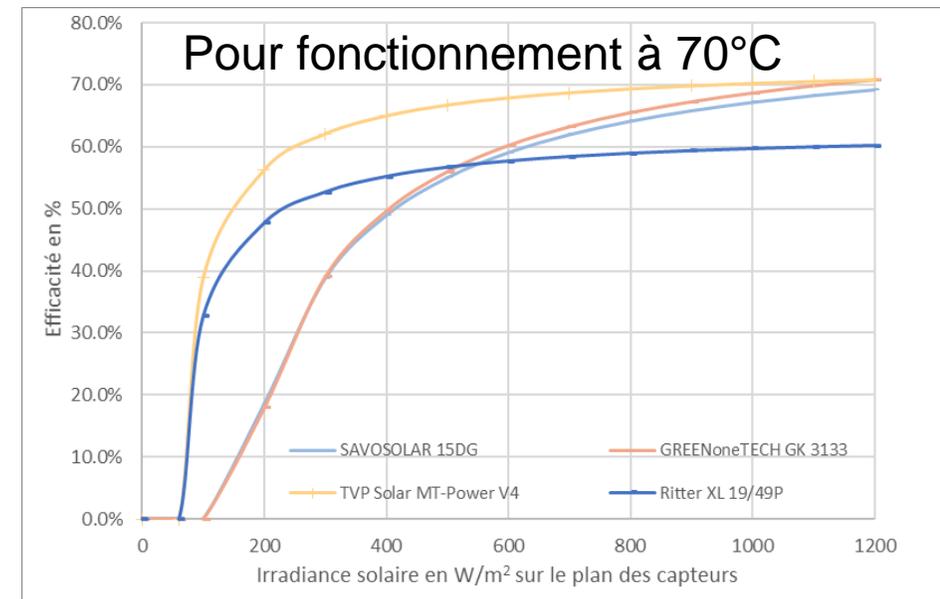
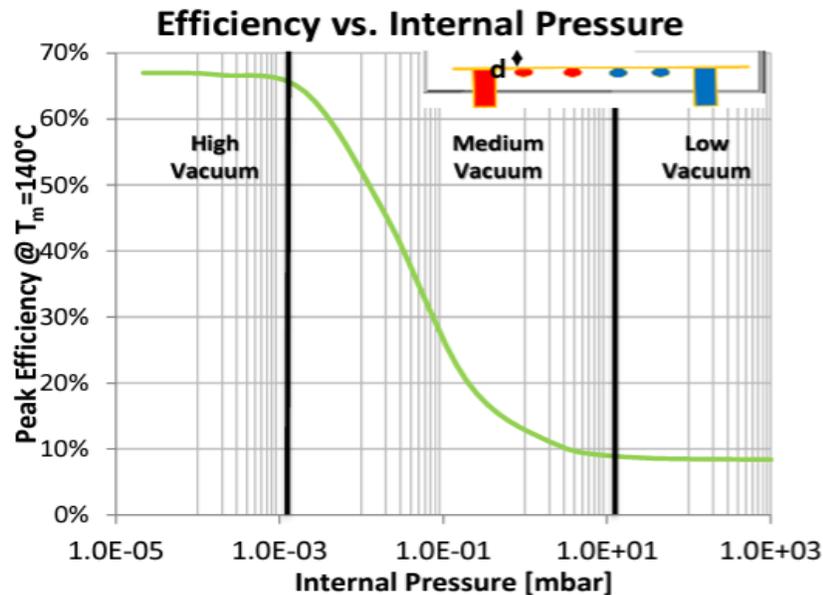
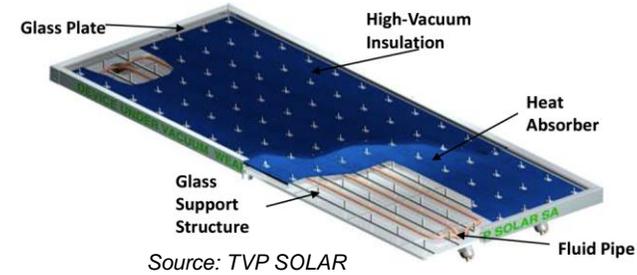


Grand CAD avec une température d'opération élevée (2G) et une part couverte par énergie fossile

- Décarbonation en cours avec essentiellement géothermie
- Autre source de chaleur renouvelable: chaleur solaire!??

Caractéristiques du collecteur solaire thermique:

- plan vitré sous vide – 1.96m² surface d'ouverture.
- Isolation par vide poussé (<10⁻⁶ bar).
- Haute efficacité à bas valeur d'irradiance
- Maintient vide avec pompe Getter



→ **Conversion efficace** du rayonnement solaire pour des **irradiances <400W/m²** (rayonnement diffus)

→ **Intégrité du vide** pendant toute la durée de vie du collecteur (25ans)!?



- **Objectifs globaux:**

- Efficacité et fiabilité de la technologie TVP solar pour des applications CàD
- Démontrer compétitivité et fiabilité de la chaleur solaire pour les CàD en Suisse

- **Objectifs techniques:**

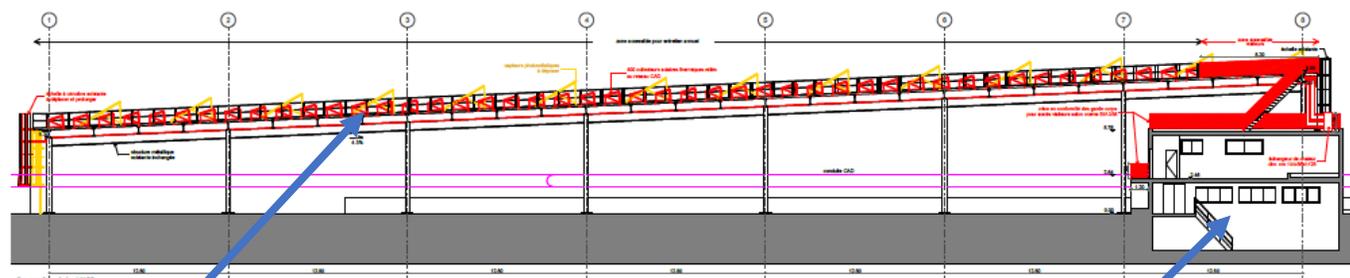
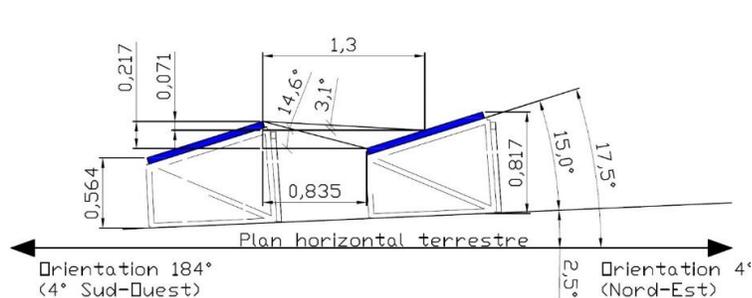
- Mise en place d'un système de monitoring (Solaire et CàD)
- Mesurer la productivité et l'efficacité du champs Solaire et de la station d'injection de chaleur dans le CàD
- Développement d'un modèle numérique de l'installation ST & de la station d'injection dans le CàD (Polysun & Trnsys) et comparaison avec performances mesurées
- Optimisation des performances de l'installation
- Réaliser l'ACV et analyse financière de la chaleur solaire injectée dans le CàD



CADSIG et installation SolarCADII

Caractéristiques champ solaire

Nom central solaire	SOLARCAD II
Solar plant engineering company	TVP Solar SA
Champ solaire – Caractéristiques	
Modèle collecteur solaire thermique	EFP MT-POWER v4.3
Nombre de collecteurs	400 (50 lignes x 8 collecteurs)
Surface totale	784 m ²
Température nominale d'opération	75-95°C
Pic de puissance thermique à 85°C (T _a =25°C ; G=1000 W/m ²)	537 kW
Localisation	46° 208' N, 6° 102' E
Inclinaison collecteur	17.5°
Rayonnement global (2021)	1382 kWh/m ² /an



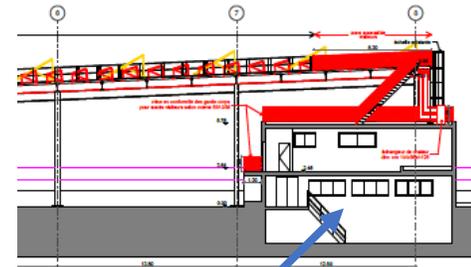
Champ Solaire (50 x 8)

Local technique (pompes, HX, MCR)

CADSIG et installation SolarCADII

Caractéristiques champ solaire

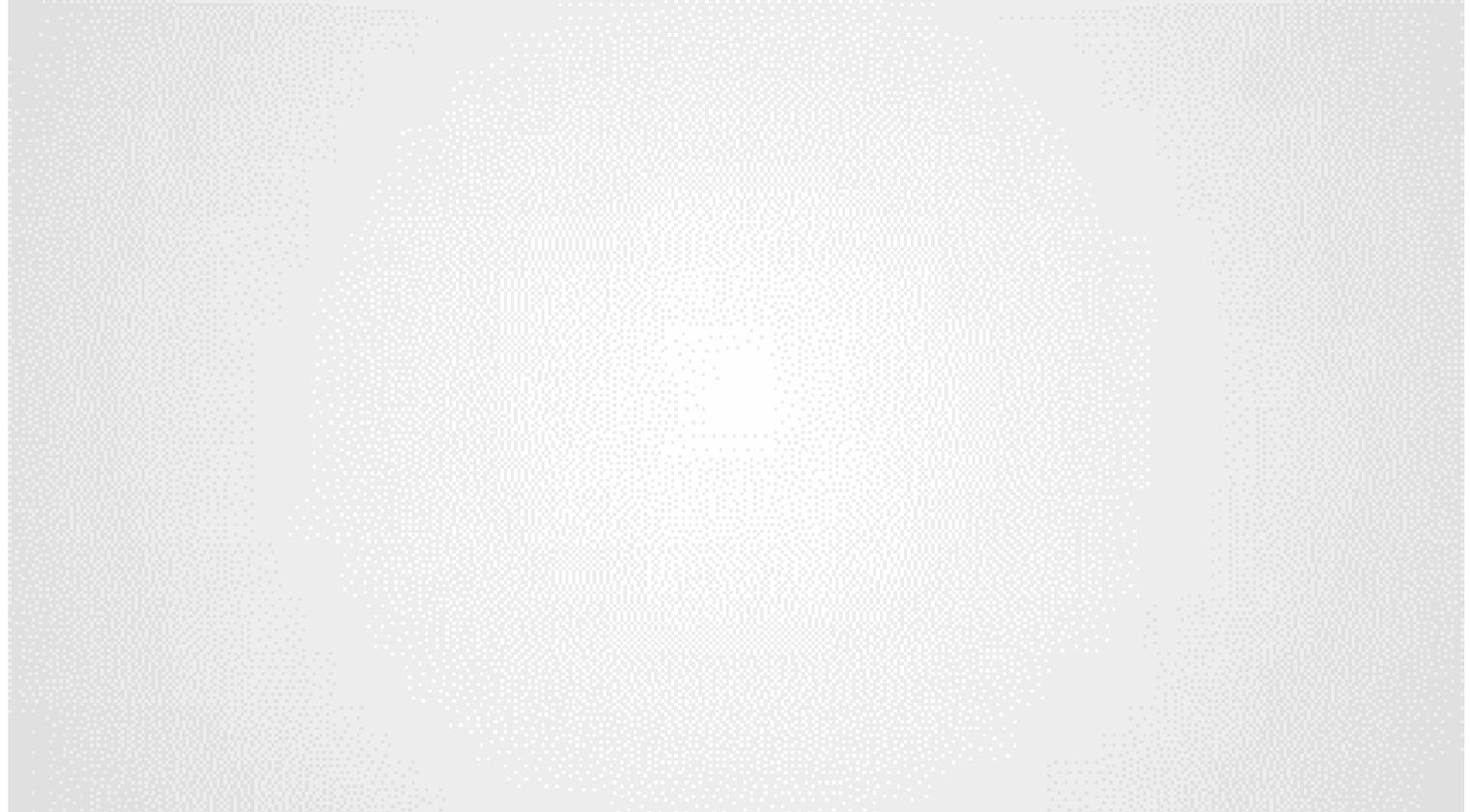
Nom central solaire
Solar plant engineering
Cha
Modèle collecteur solaire
Nombre de collecteurs
Surface totale
Température nominale
Pic de puissance thermique ($T_a=25^\circ\text{C}$; $G=1000 \text{ W/m}^2$)
Localisation
Inclinaison collecteur
Rayonnement global (G_{global})



Local technique (pompes, HX, MCR)

Séquences de construction de la centrale:

1. Démantèlement de la centrale PV SIG SOLAR II
2. Piquages sur CAD SIG.
3. Modifications de la structure (caillebotis et gardes corps)
4. Pose du champ solaire et hydraulique.
5. Agencement du local technique (HX, pompes, remplissage automatique, tableau puissance et MCR).
6. Mise en route



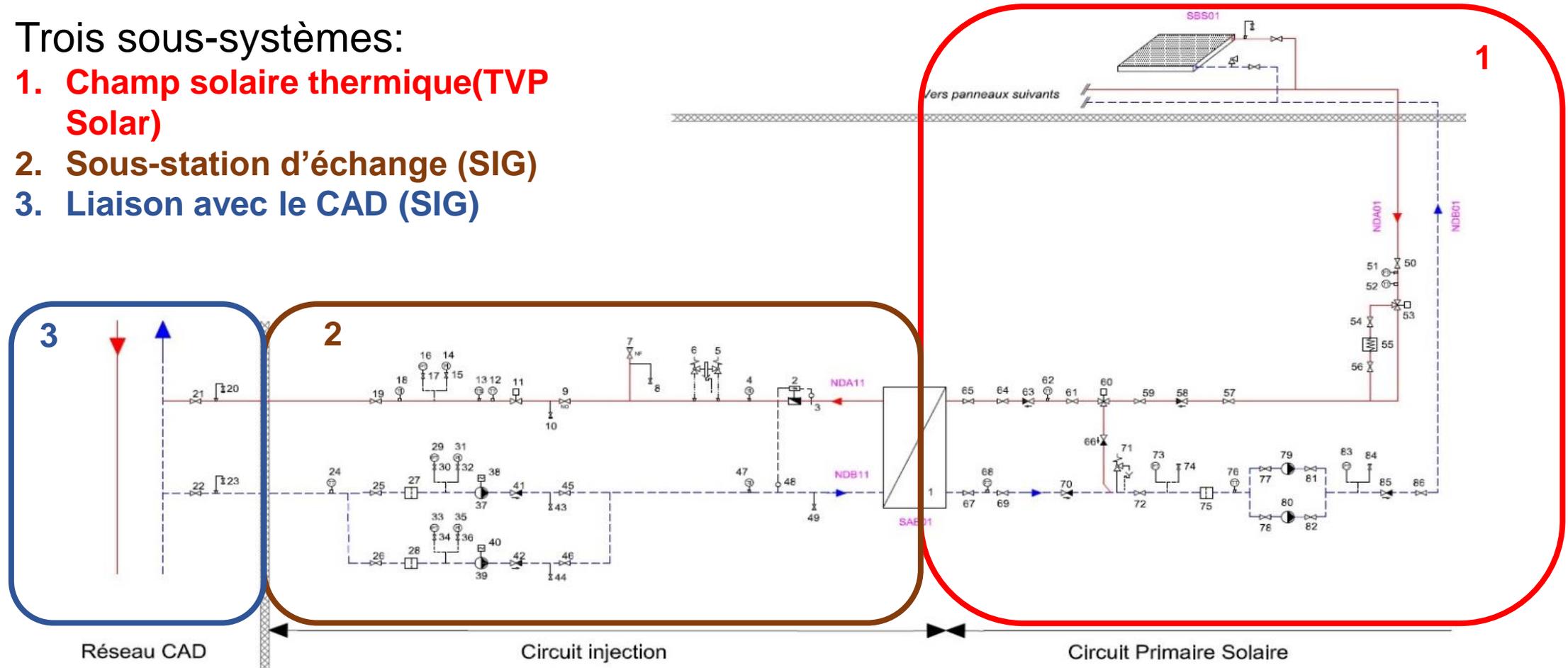
De fin 2019 à fin 2020 (COVID)

CADSIG et installation SolarCADII

Caractéristiques centrale solaire

Trois sous-systèmes:

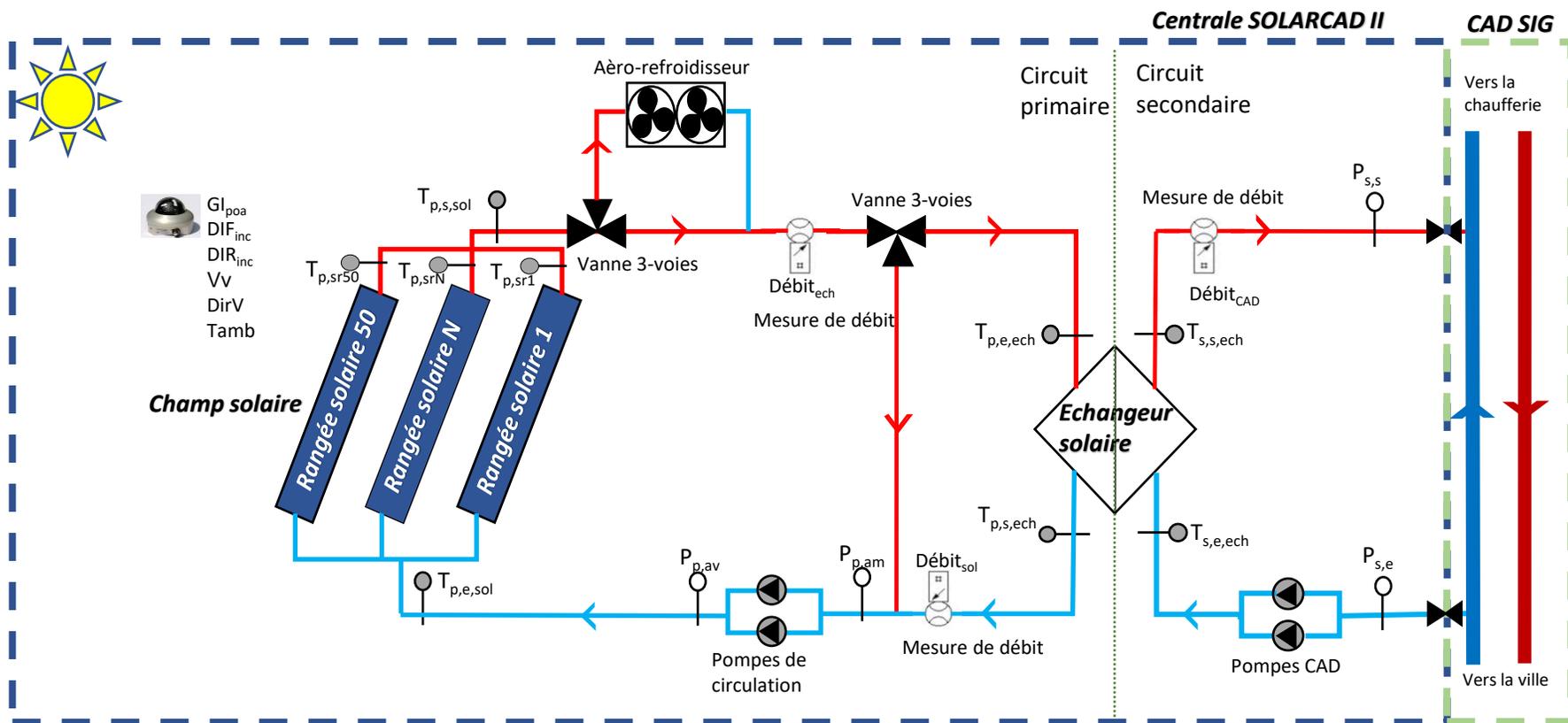
1. **Champ solaire thermique(TVP Solar)**
2. **Sous-station d'échange (SIG)**
3. **Liaison avec le CAD (SIG)**



- Connection au **CAD retour/retour**: fonctionnement à plus basse température
- **Injection à 75°C +/-5°C**
- Taux de couverture solaire: 0.1-0.2% → **pas de stockage thermique**

CADSIG et installation SolarCADII

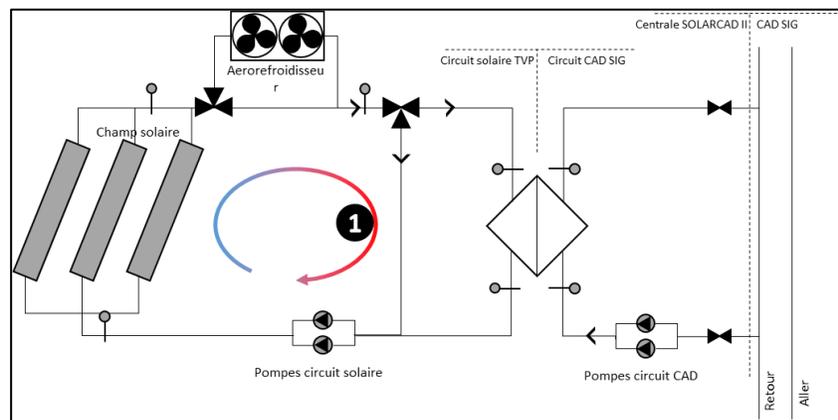
Caractéristiques système monitoring



Nomenclature:

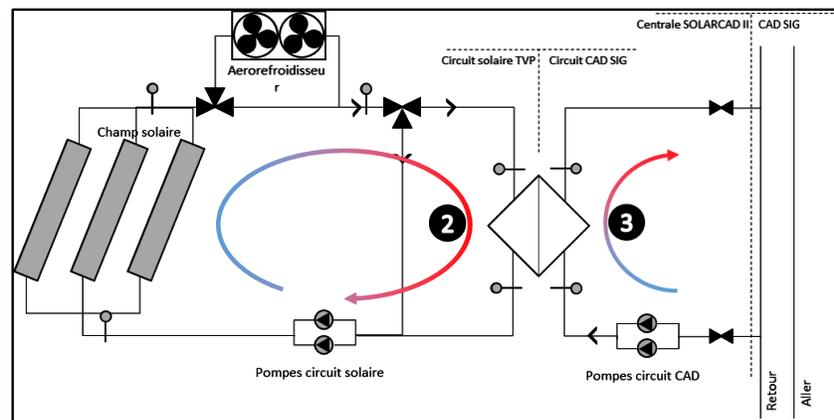
- ☐ Circuit
 - Circuit primaire (solaire): [p]
 - Circuit secondaire (CAD): [s]
- ☐ Mesure
 - Température (T)
 - Pression (P)
 - Débit (Débit)
 - Energie (E)
 - Heures (h)
- ☐ Position par rapport à l'équipement:
 - Entrée (e) & sortie (s)
 - Champ solaire (sol)
 - Echangeur de chaleur (ech)
- ☐ Station Météo:
 - Irradiance globale, GI_{poa}
 - Irradiance diffuse, DIF_{inc}
 - Irradiance directe, DIR_{inc}
 - Température ambient, Tamb

- **Station météo précise:** irradiance (global et diffus), température, vent
- **Suivi des flux de chaleur** dans le champ solaire et autour de l'échangeur (température et débit)
- **Mesure de la consommation d'électricité** des pompes pour déterminer COP
- Fréquence d'acquisition à la minute



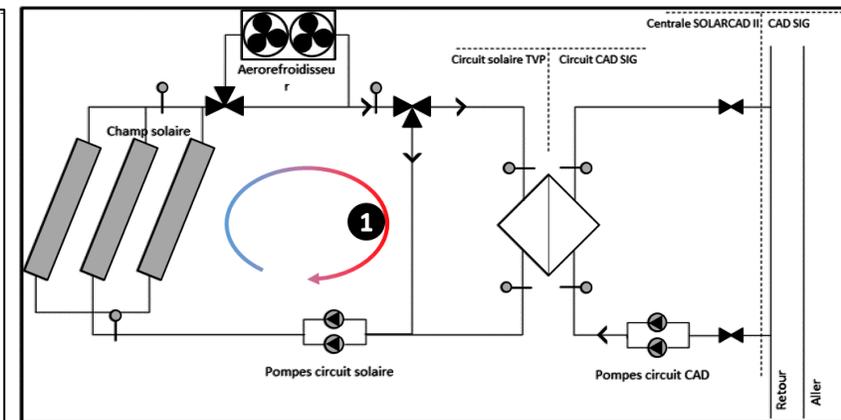
Mise en route et préchauffage

1. Pompe solaire en marche si irradiation $>200\text{W/m}^2$ pour $>5\text{min}$
2. Préchauffage circuit solaire pour $>80^\circ\text{C}$



Injection dans le CAD

1. Dès que température $>80^\circ\text{C}$ \rightarrow circulation fluide dans le HEX
2. Régulation du débit pour une température de 90°C dans circuit solaire
3. Pompe injection CAD activée et modulé pour gain de 3°C côté HEX CAD

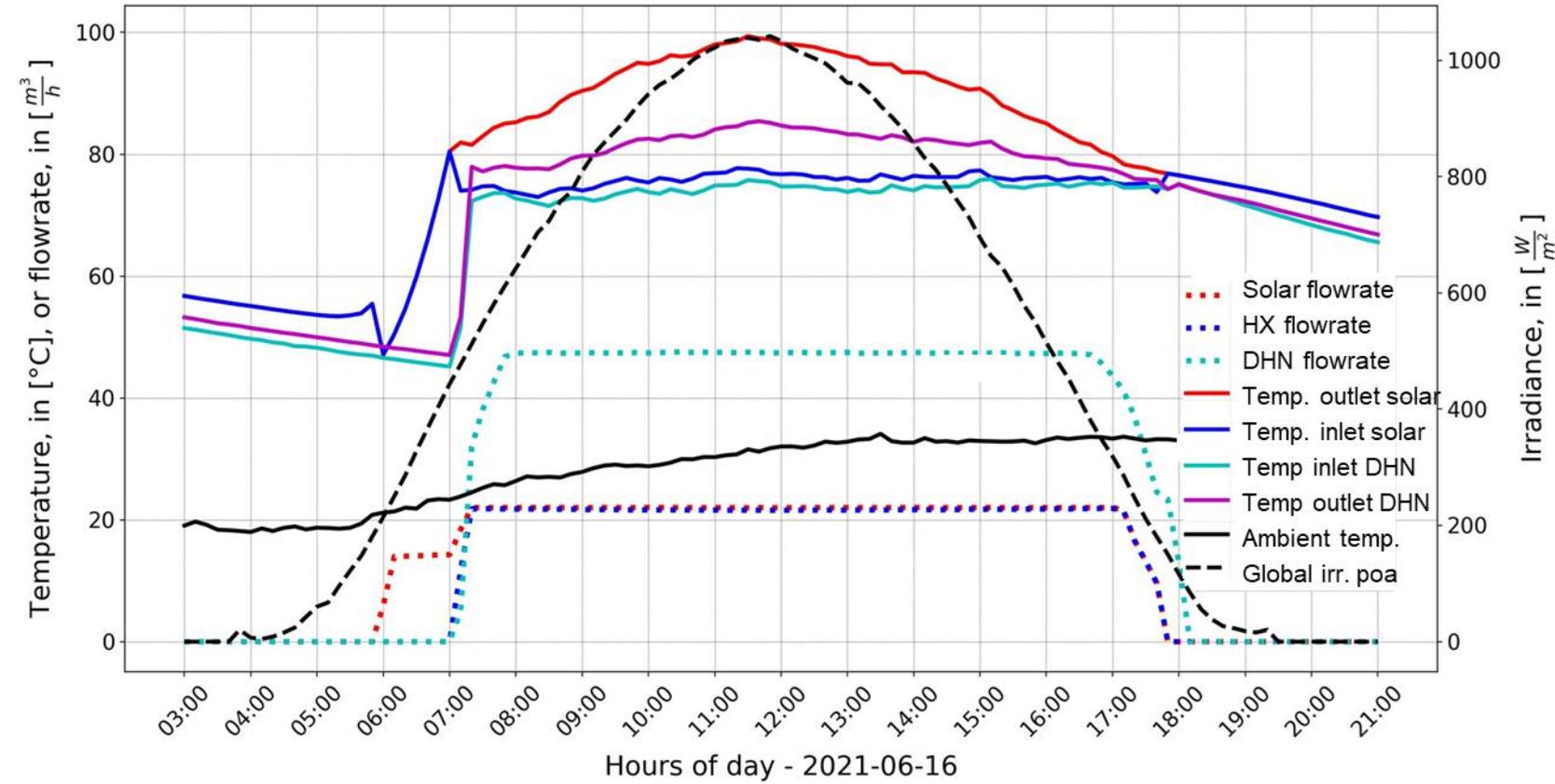


Standby et extinction

1. Dès que température $<80^\circ\text{C}$, circulation dans champ solaire
2. Pompe côté CAD stoppée après 120s
3. Puis installation stoppée

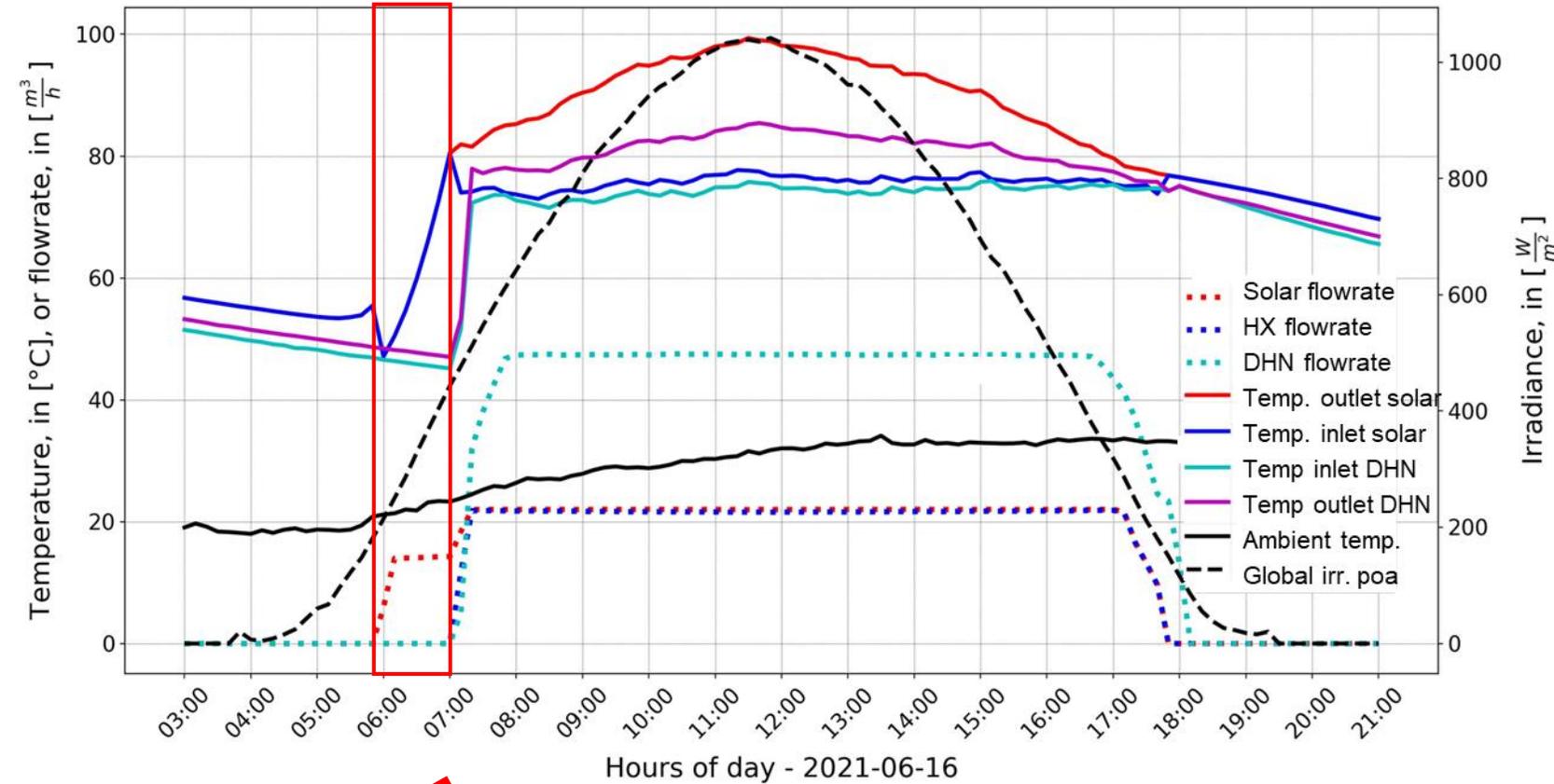
CADSIG et installation SolarCADII

Principe de régulation



CADSIG et installation SolarCADII

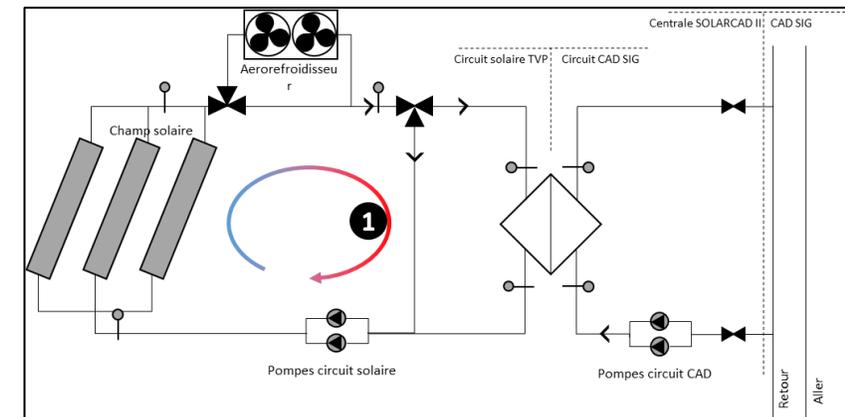
Principe de régulation



Preheating

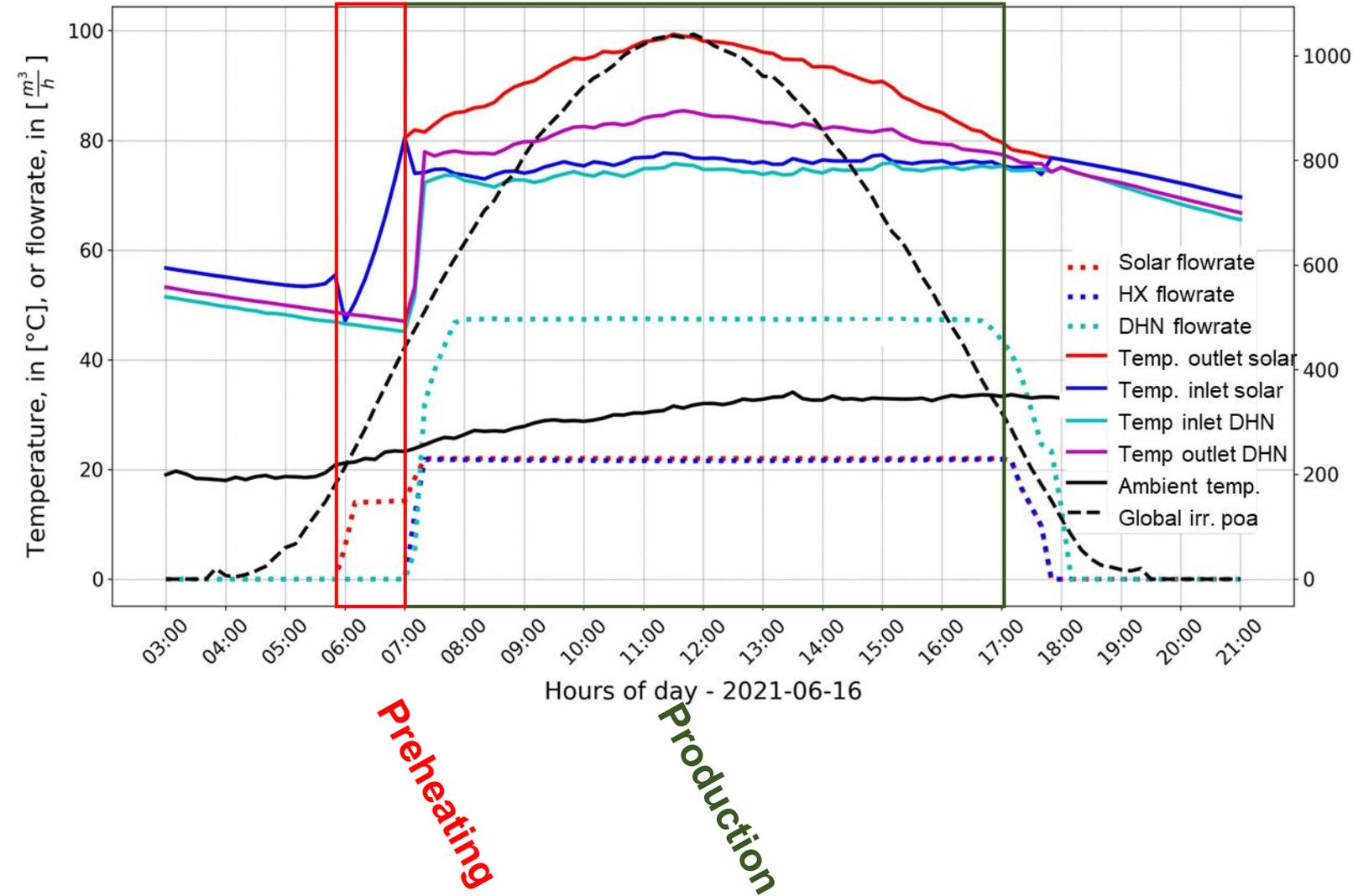
1. Preheating phase:

- $> 200\text{W/m}^2$ for more than 5 min
- Switch to production phase when solar field temperature $> 80^\circ\text{C}$



CADSIG et installation SolarCADII

Principe de régulation

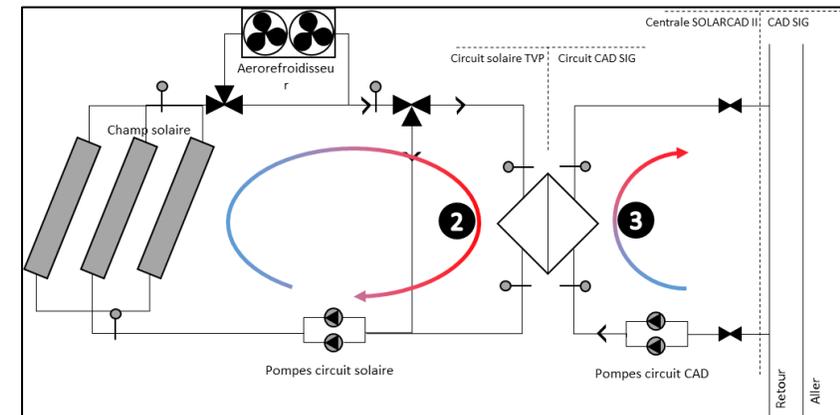


1. Preheating phase:

- $> 200W/m^2$ for more than 5 min
- Switch to production phase when solar field temperature $> 80^\circ C$

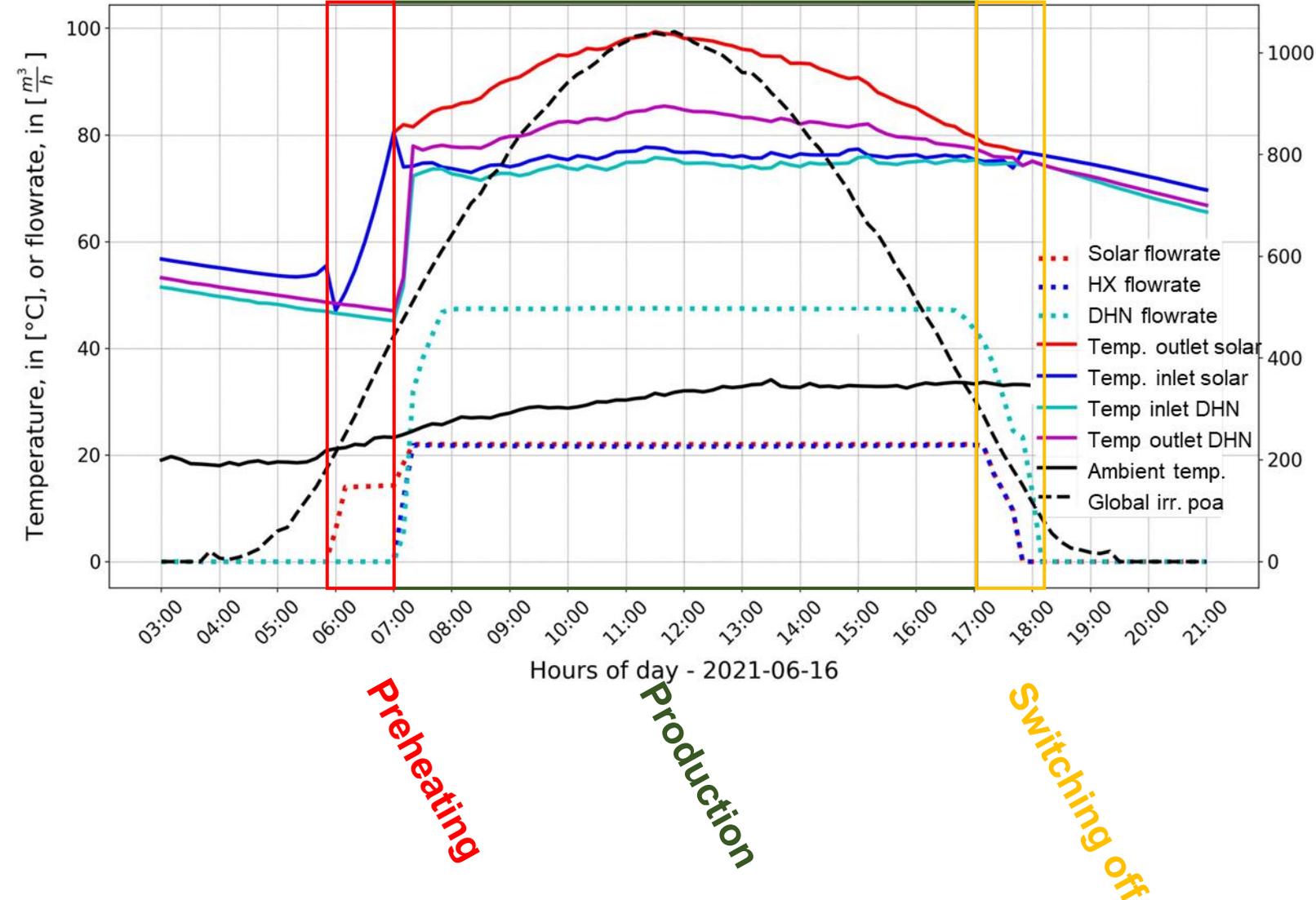
2. Production phase:

- Solar field temperature $> 80^\circ C$



CADSIG et installation SolarCADII

Principe de régulation



1. Preheating phase:

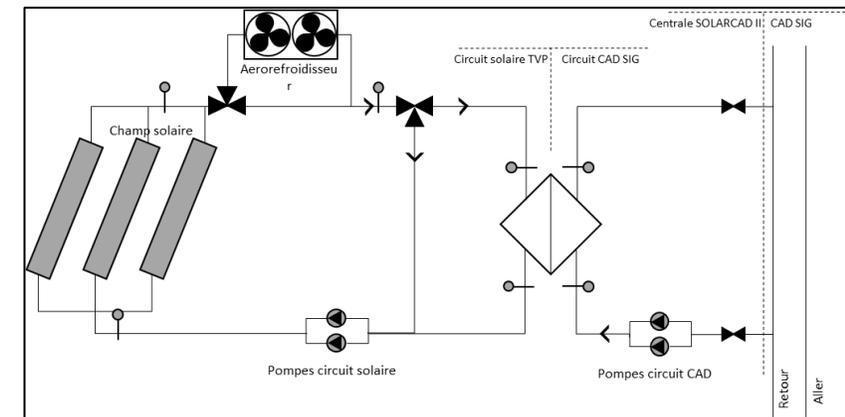
- $> 200W/m^2$ for more than 5 min
- Switch to production phase when solar field temperature $> 80^\circ C$

2. Production phase:

- Solar field temperature $> 80^\circ C$

3. Switching off phase:

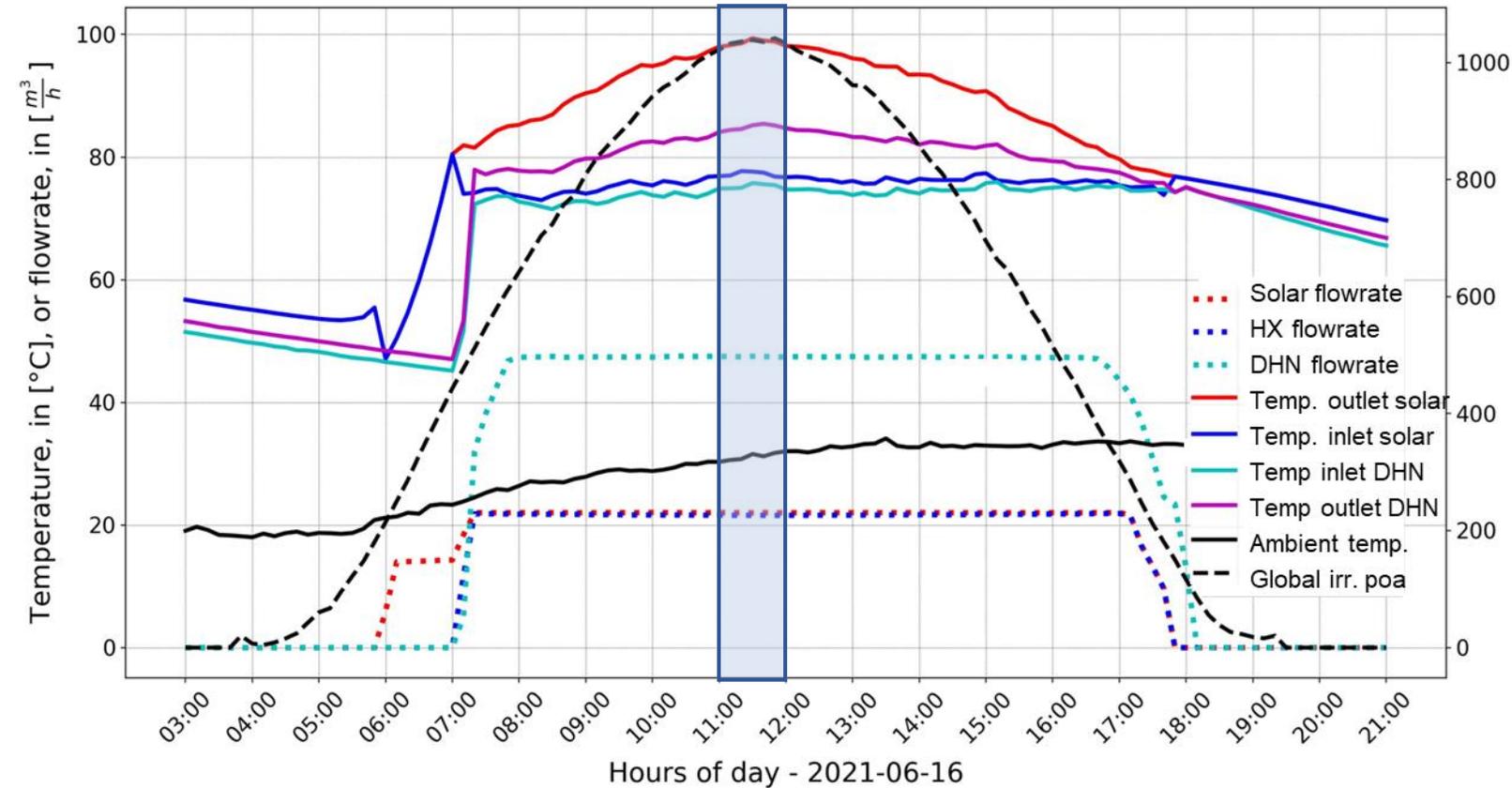
- Solar pump switched off $< 200W/m^2$
- DHN pump switched off when $dT < 3^\circ C$



Campagne de suivi des performances

Suivi dynamique et efficacité pic

Entre 11:00-12:00:



- $T_{air} \sim 28.5^{\circ}\text{C}$, $T_{Solaire\ moy} > 85^{\circ}\text{C}$
- $G_{i\ poa} \sim 1034 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$
- Efficacité du champs solaire 65%
- Efficacité centrale solaire 64%
- Efficacité théorique 69% (selon Solar Keymark)
- Pic de puissance 618 kW_p

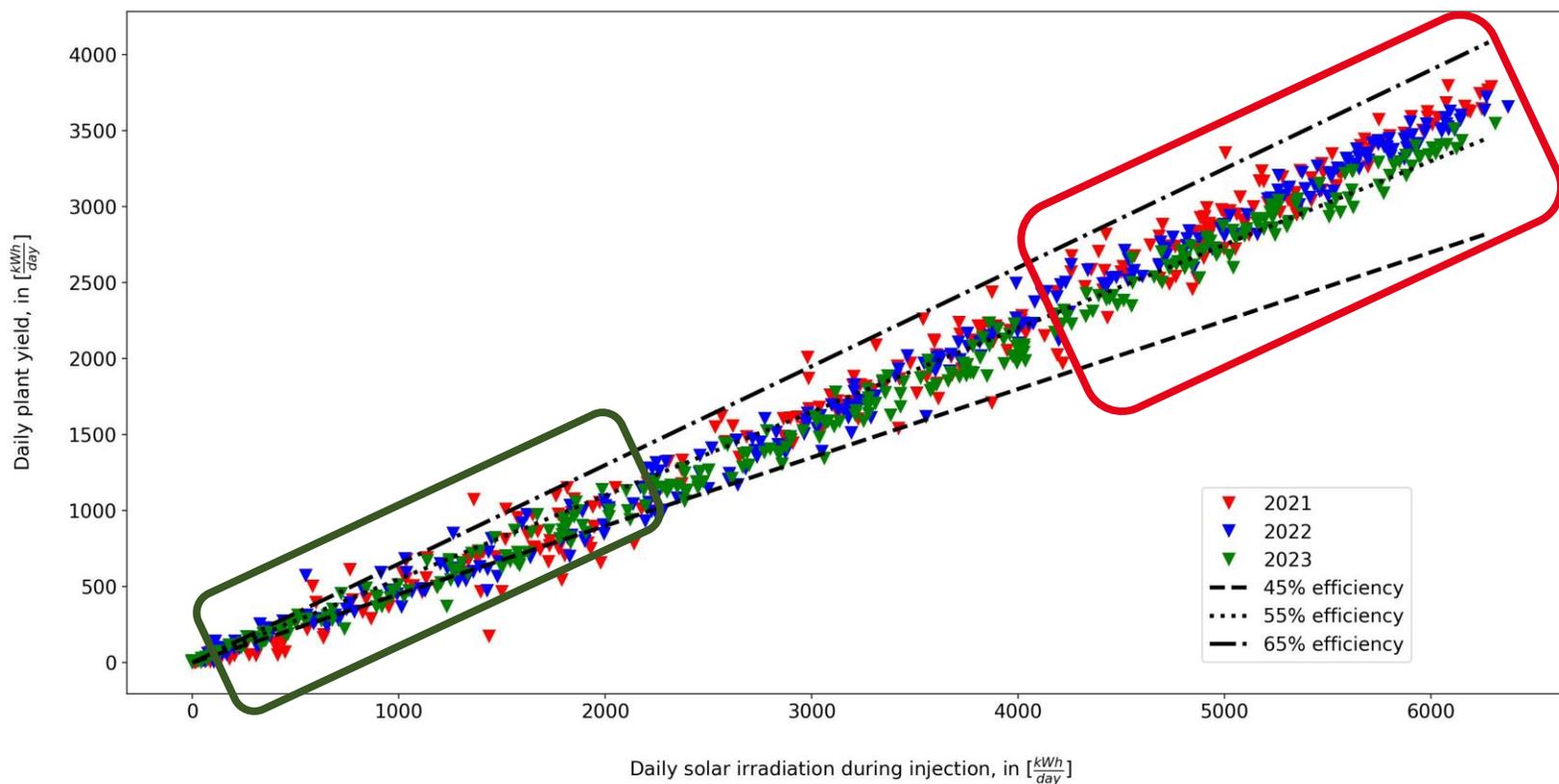
Débit & dT:

- CAD: $47 \text{ m}^3/\text{h} - 9.6^{\circ}\text{C}$
- Circuit solaire: $22 \text{ m}^3/\text{h} - 21.4^{\circ}\text{C}$

- Confirmation **intérêt de la technologie collecteur plan vitré sous-vide**: 65% de rendement à $>85^{\circ}\text{C}$
- Rendement champ solaire proche de celui d'un collecteur
- Dimensionnement installation pas optimal: **large différence de débit entre CAD et circuit solaire** → le champ solaire poussé à opérer à haute température

Campagne de suivi des performances

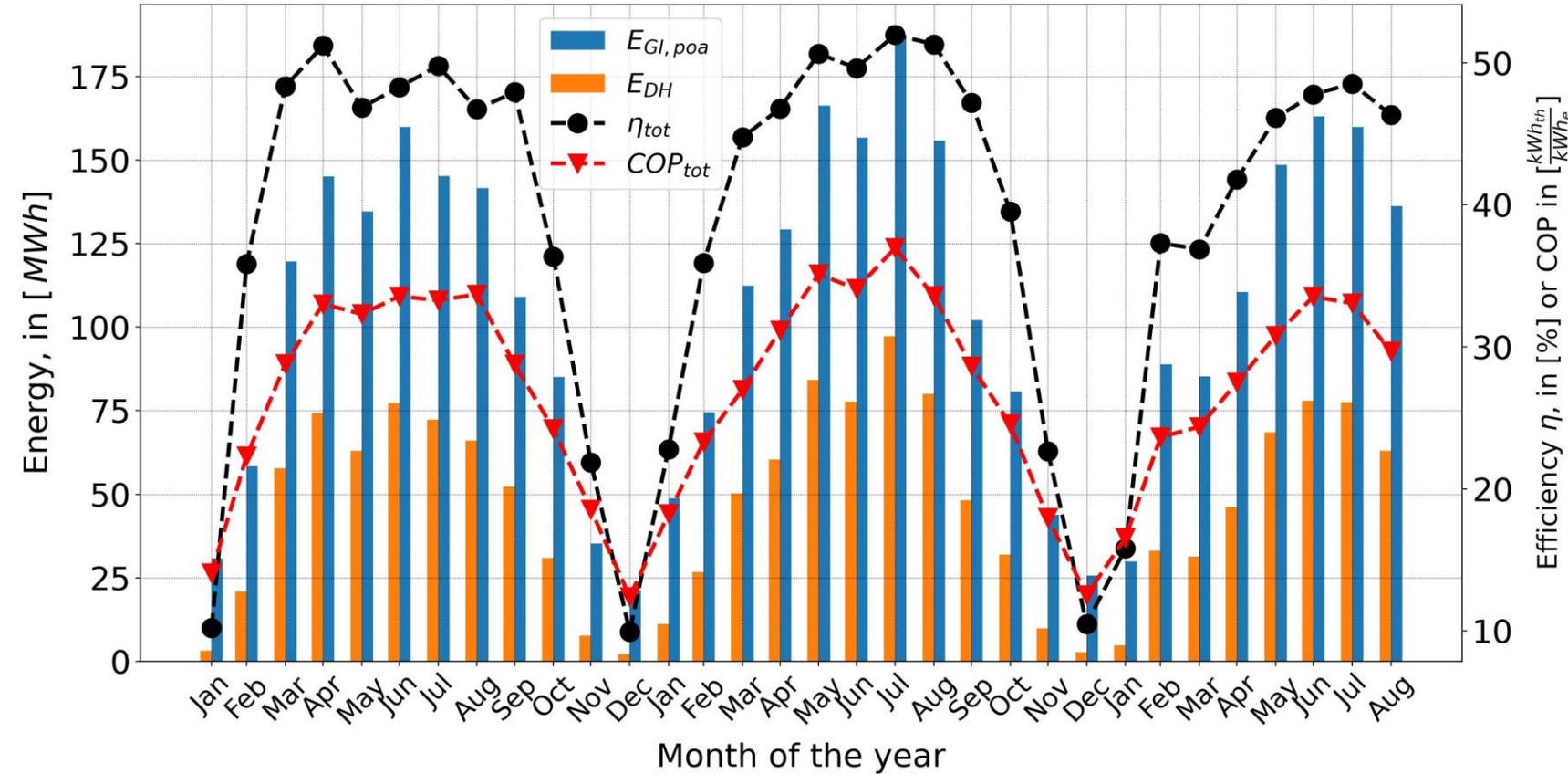
Production journalière et influence de l'irradiation



- Pour les journées avec haute irradiation: ~55-60% d'efficacité
- Pour les journées avec faible irradiation: ~45% d'efficacité
- Pas de dégradation de performance entre 2021, 2022 et 2023

Campagne de suivi des performances

Production et efficacité mensuelle – Comparaison (2021-23)



- Haute efficacité mensuelle >50% @ >80-85°C
- Efficacité >40% pendant 6-7 mois/an
- Faible COP → perte de charge!!?
- Trois mois en hiver avec faibles efficacité (10-25%)

1. Technologie de capteur plan vitré sous vide → haute efficacité et production toute l'année
2. Faible COP → Importante consommation d'électricité dû à de fortes pertes de charge

Campagne de suivi des performances

Production et efficacité annuelle - Comparaison

Indicateur de performance	2021	2022	2023 (Nov)
Irradiation globale annuelle poa [kWh/m ² /an]	1512	1636	1485
Chaleur injectée dans CAD [MWh/an]	535	580	501
Efficacité champ solaire [%]	44.5	45.2	44.1
Efficacité centrale solaire [%]	44.7	45.0	43.1
Production de chaleur annuelle spécifique [kWh/m ² /year]	673	740	639
COP circuit solaire [-]	50	50	48
COP centrale solaire [-]	30	30	29

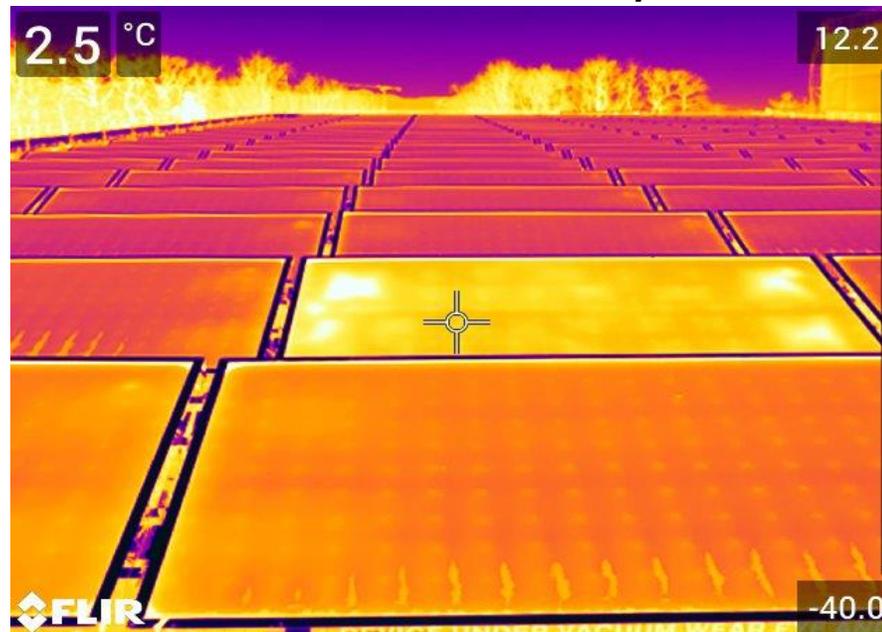
- Performances stables sans dégradation des performances pour 3 ans
- Rendement de conversion annuel élevé à 45% à 80-85°C (collecteur plan vitré classique 30-35% → +45-50%)
- Productivité spécifique annuelle élevée: intéressant si surface limitée
- COP limité : pertes de charge importante dues à des diamètres tubes trop faibles

Campagne de suivi des performances

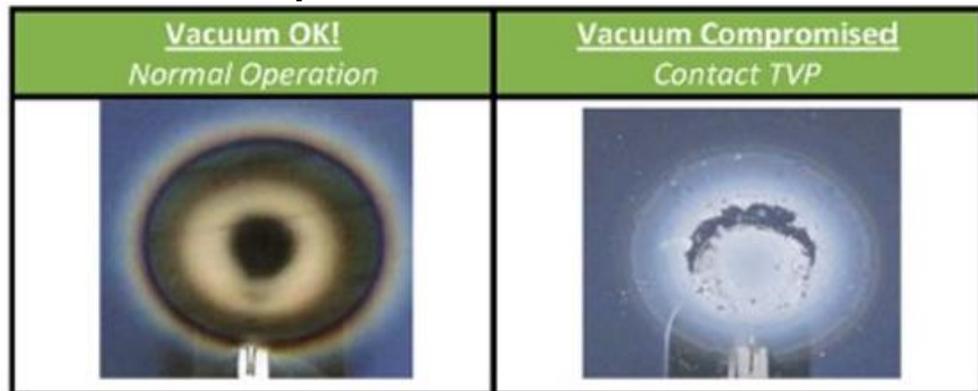
Vérification intégrité du vide

Mesures intégrité du vide des collecteurs réalisés à trois niveaux

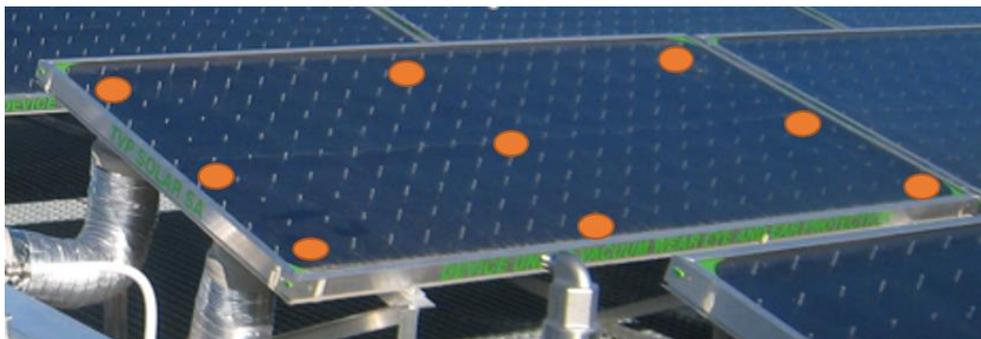
Niveau 2: avec caméra thermique



Niveau 1: Spot Check™ de TVP



Niveau 3: mesure de température de surface

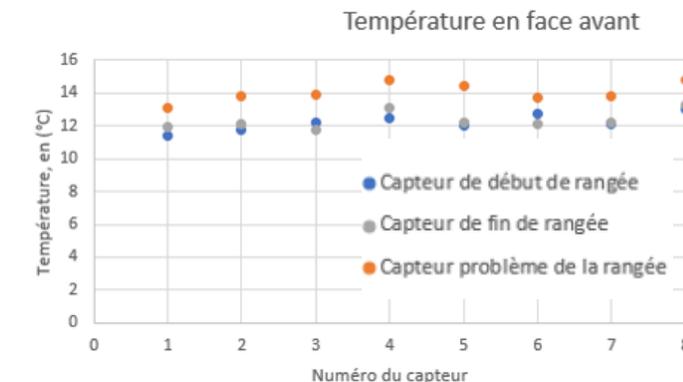
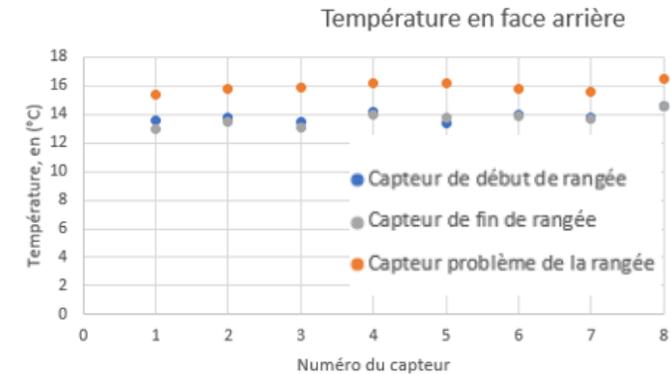
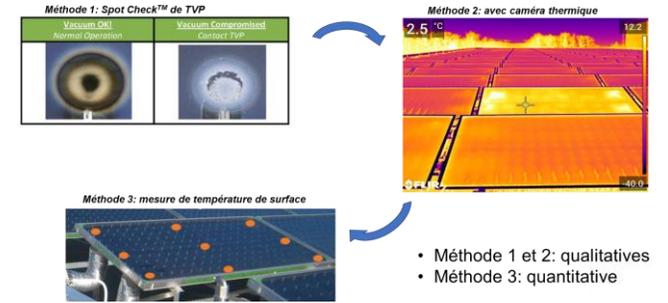


- Repérage collecteurs douteux avec analyse niveau 1 et 2
- Niveau 3 sur les collecteurs douteux et quelques collecteurs de référence
- Campagne de vérification en 2021, 2022 et 2023

Campagne de suivi des performances

Vérification intégrité du vide

- 8 collecteurs identifiés avec un vide moins poussés: température de surface +2°C en moy.
 - Collecteurs plus “chauds”: identiques entre les campagnes 2021, 2022 et 2023
 - Un collecteur changé car Spotchek endommagé alors que collecteur pas forcément problématique → défaut Spot Check™
 - Difficile d’estimer l’impact sur les performances du champ solaire
 - ...mais globalement champ solaire a des performances cohérentes avec les performances d’un collecteur selon Solar Keymark
- Campagne de mesure à reproduire en 2024
 → Pas de collecteur ayant complètement perdu le vide mais 8 collecteur ont un vide moins poussé



Modélisation et optimisation

Modélisation de la centrale solaire

Simulation avec deux logiciels: Polysun et Trnsys

Modèle numérique POLYSUN®

Objectifs:

1. Tester l'implémentation de la régulation et comparaison avec mesure sur une base horaire
2. Comparer production de chaleur selon modèle et mesure à l'échelle journalière, mensuelle et annuelle
3. Valider que Polysun est valable pour une pré étude pour centrale solaire thermique couplé à un CAD

POLYSUN®
BY VELA SOLARIS

Modèle numérique Trnsys

Objectifs:

1. Tester l'implémentation de la régulation et comparaison avec mesure sur une base minute
2. Valider modèle pour reproduire les dynamiques du champ solaire et de la centrale solaire
3. Utiliser le modèle validé pour tester différentes stratégie d'optimisation de la régulation



TRNSYS

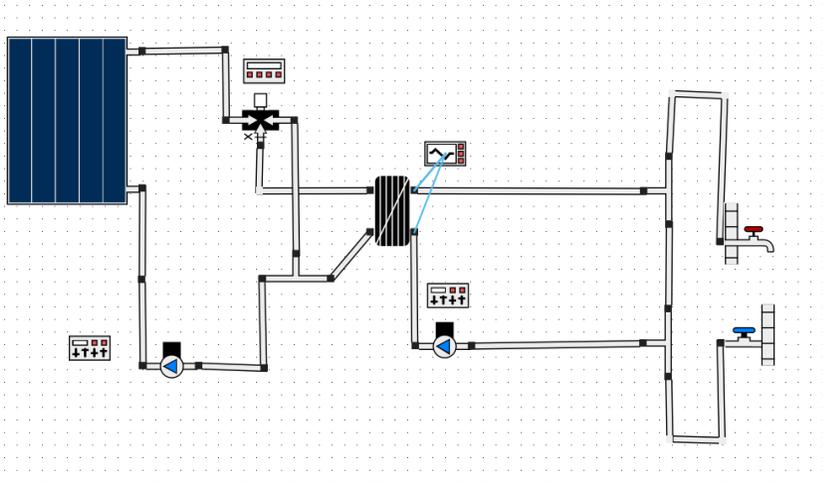
Modélisation et optimisation

Modélisation de la centrale solaire

Modèle sur Polysun

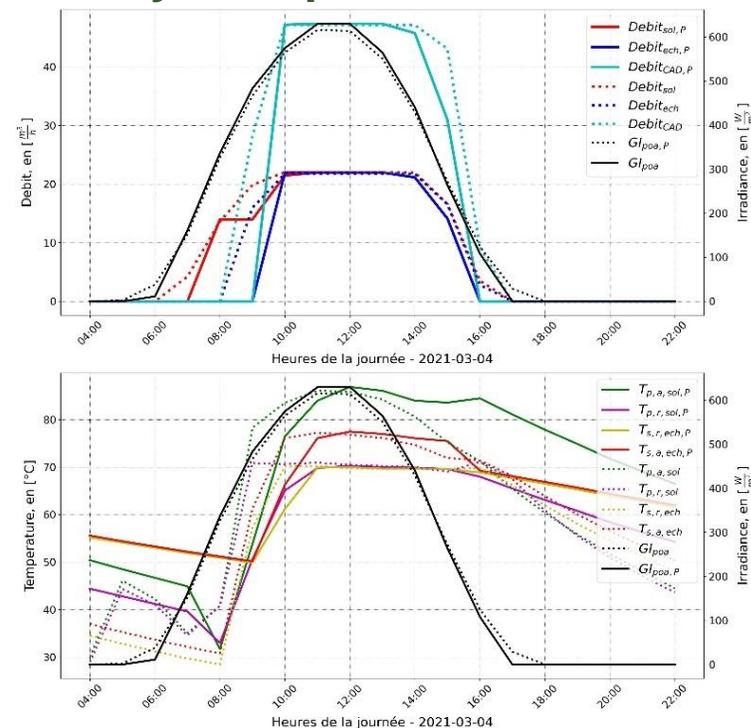
Modèle numérique Polysun

1. Modèle à pas horaire répliquant la régulation avec boucle de préchauffage
2. CAD simulé afin de reproduire les niveaux de températures mesurées sur la conduite retour



Comparaison modèle avec mesures

Comparaison dynamique :



- Reproduction dynamique OK mais quelques déviations
- Pas horaire ne permet pas de valider régulation

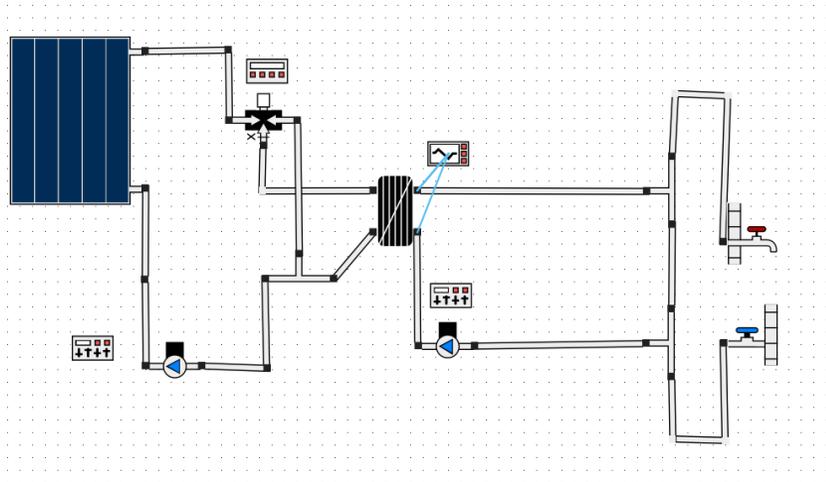
Modélisation et optimisation

Modélisation de la centrale solaire

Modèle sur Polysun

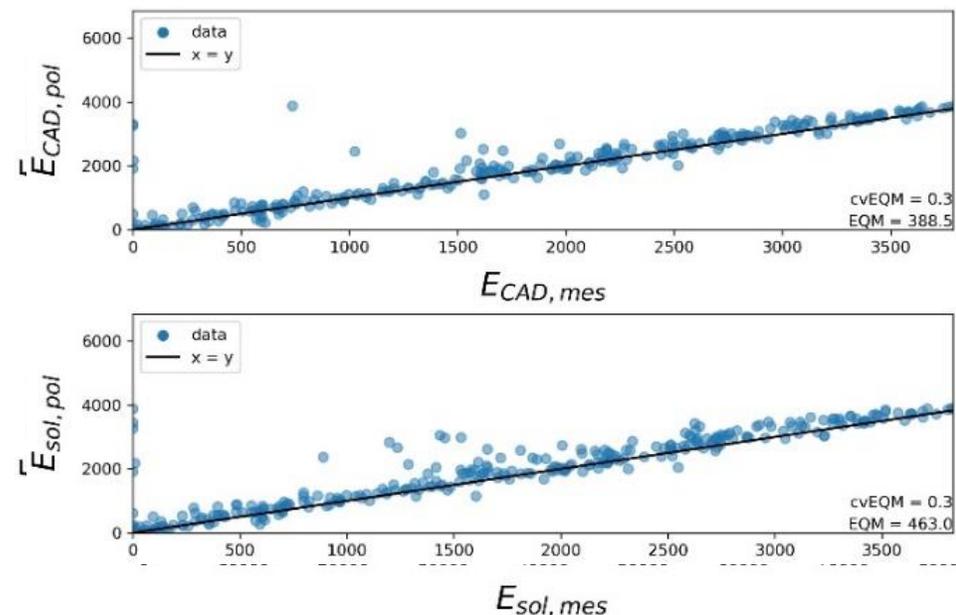
Modèle numérique Polysun

1. Modèle à pas horaire répliquant la régulation avec boucle de préchauffage
2. CAD simulé afin de reproduire les niveaux de températures mesurées sur la conduite retour



Comparaison modèle avec mesures

Comparaison journalière :



→ Prod. de chaleur **journalière et mensuelle bien reproduite**

→ POLYSUN efficace pour **dim. et évaluation production de chaleur** pour des applications

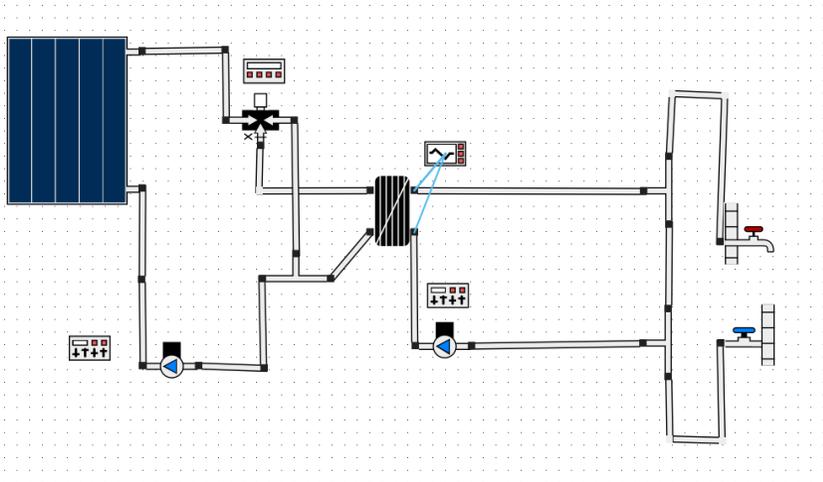
Modélisation et optimisation

Modélisation de la centrale solaire

Modèle sur Polysun

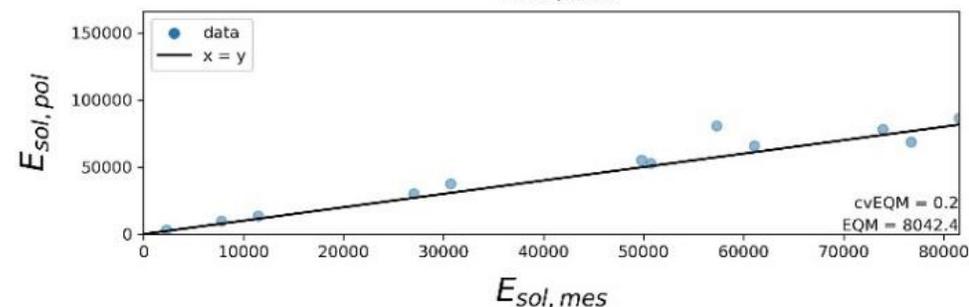
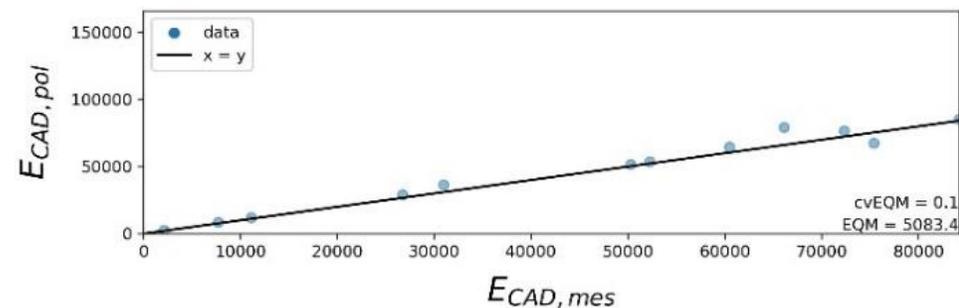
Modèle numérique Polysun

1. Modèle à pas horaire répliquant la régulation avec boucle de préchauffage
2. CAD simulé afin de reproduire les niveaux de températures mesurées sur la conduite retour



Comparaison modèle avec mesures

Comparaison mensuelle :



→ Prod. de chaleur **journalière et mensuelle bien reproduite**

→ POLYSUN efficace pour **dim. et évaluation production de chaleur** pour des applications

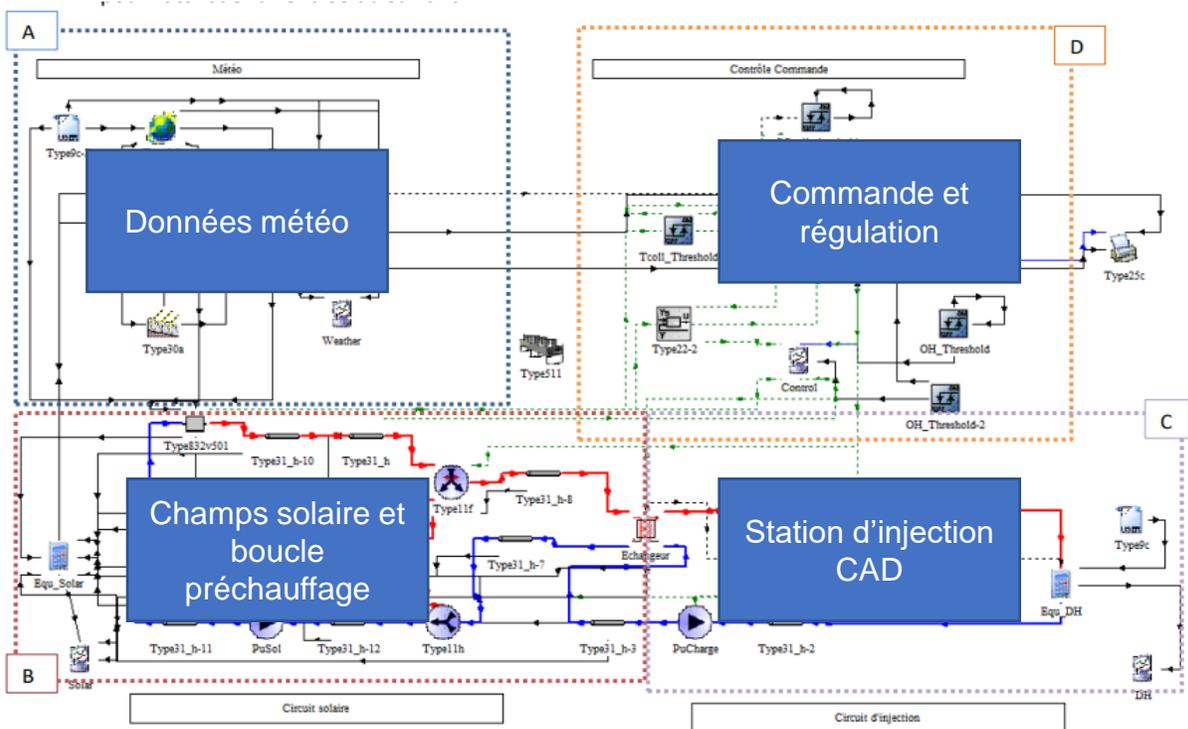
Modélisation et optimisation

Modélisation de la centrale solaire

Modèle sur TRNSYS 17

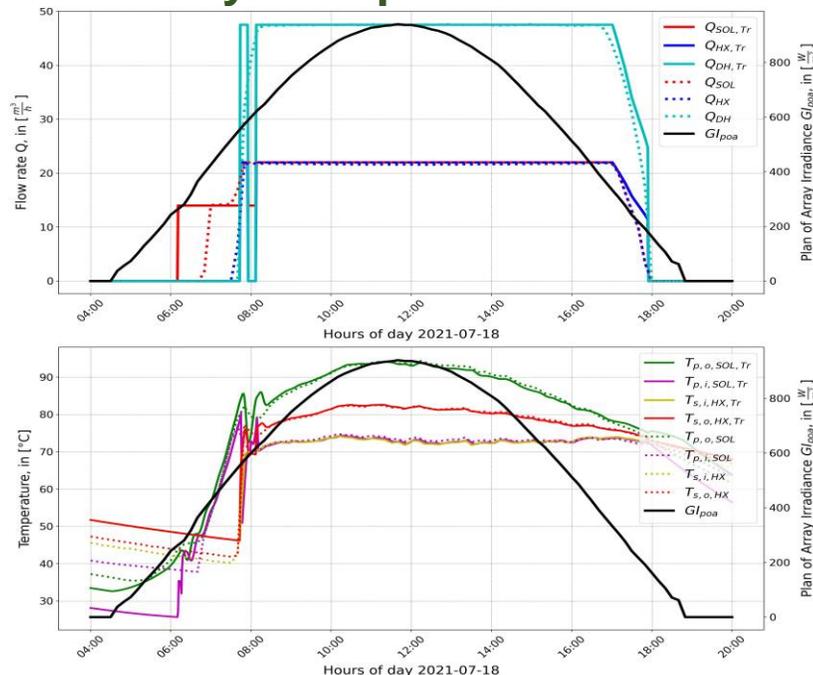
Modèle numérique TRNSYS

1. Pas de temps de une minute (modèle dynamique) avec réplication de la régulation
2. Niveau de température de CAD selon mesures
3. Modèle structuré en 4 sections:



Comparaison modèle avec mesures

Comparaison dynamique :

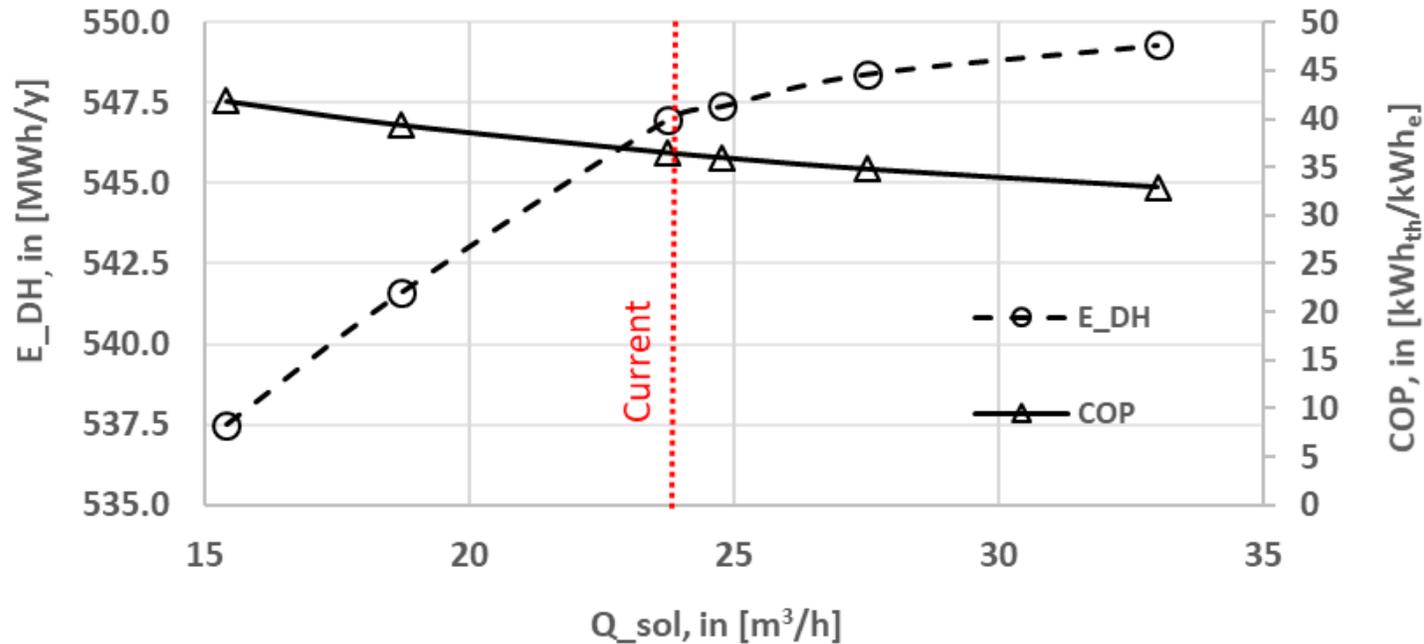


- Excellente reproduction des dynamiques de la centrale
- Modèle suffisamment précis pour valider/optimiser différentes stratégies d'optimisation

Modélisation et optimisation

Optimisation de la centrale solaire

Optimisation no1: augmenter le COP en réduisant le débit dans le champ solaire

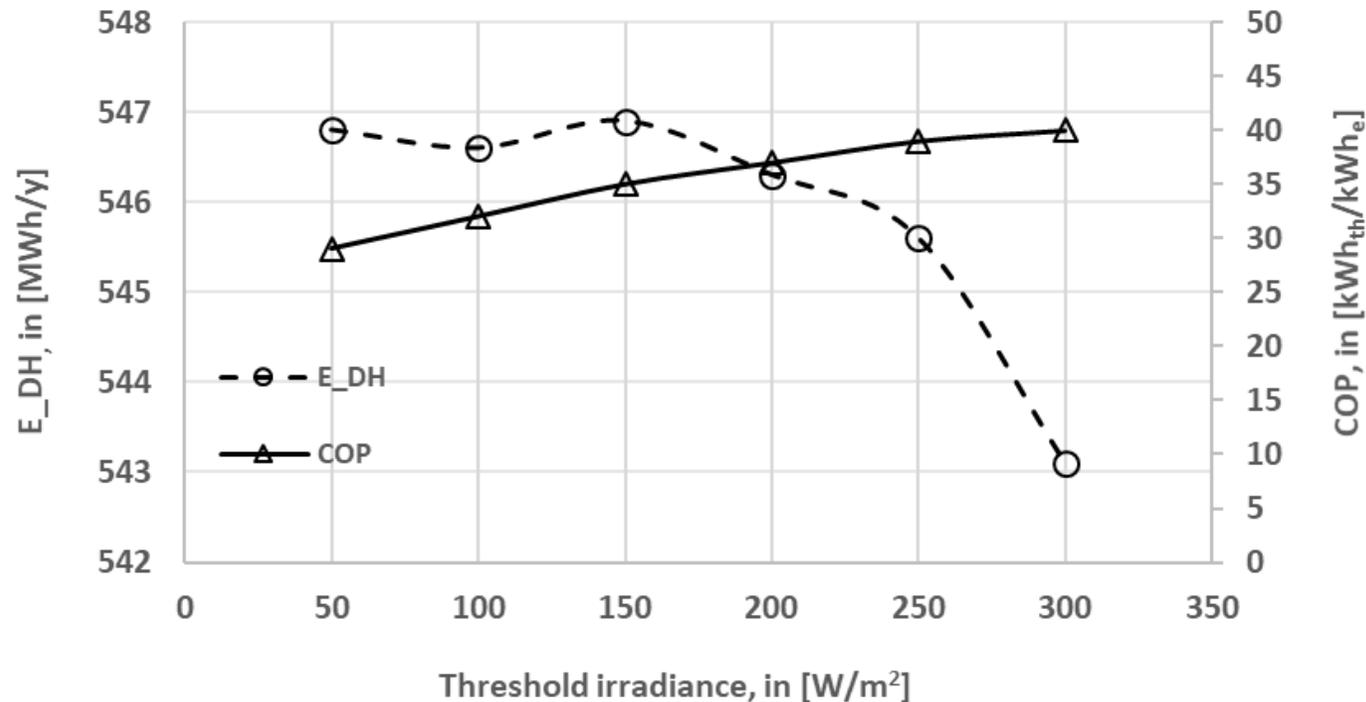


- \searrow débit, \searrow perte de pression et donc la consommation d'électricité
- **COP augmente de 33 à 42** en diminuant le débit de 33 à 15 m³/hr (diminution de 20% de la consommation d'électricité)
- **MAIS** la production de chaleur diminue de 549 à 538 MWh (2% de réduction)
- **Optimum financier autour de 20-25** m³/hr avec les prix actuels d'achat et de vente de l'énergie

Modélisation et optimisation

Optimisation de la centrale solaire

Optimisation no2: ajustement de l'irradiance seuil pour augmenter la production de chaleur solaire



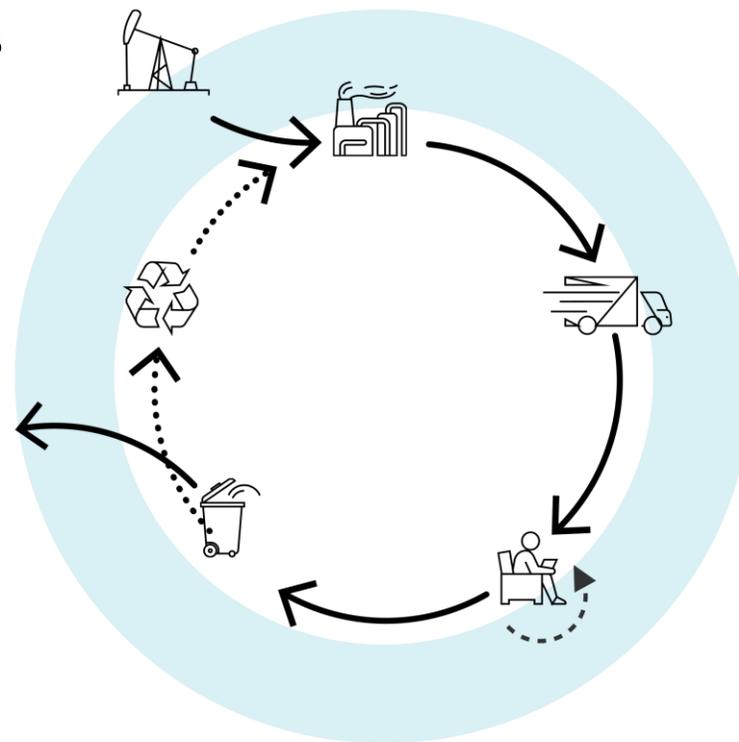
- Température de stagnation de 80°C à 100W/m²
- Diminution du seuil d'irradiance pour augmenter la production de chaleur solaire
- La production de chaleur augmente de 543 to 547 MWh (+0.7%) en réduisant le seuil de 300 à 50 W/m²
- **COP décroît de 40 à 29** (40% de réduction de consommation électrique)
- Optimum financier autour de 150-200 W/m² avec les prix actuels d'achat et de vente de l'énergie

Analyse financière et environnementale

Analyse de cycle de vie de la centrale solaire*

Objectif de l'étude

- **Quantifier les impacts environnementaux** de la centrale solaire en prenant en compte les **impacts avals et amonts des matériaux** et de la **consommation d'électricité**
- L'ACV est mené suivant les recommandations ISO14040-44 and KBOB 2009/1:2022 r
 - Définition de l'objectif et du champ de l'étude
 - Inventaire de cycle de vie (ICV)
 - Evaluation des impacts
 - Interprétation des résultats (analyse de sensibilité et comparaison)



Définition des objectifs et du champ de l'étude

- Unité fonctionnel:** 1kWh de chaleur injecté dans le CAD (exclu perte et réseau thermique) avec 25 ans de durée de vie
- Frontières du système:**
 - Approche "du berceau à la tombe" pour les matériaux de la centrale solaire (extraction, fabrication, transport/assemblage au SIG, maintenance, démantèlement et élimination)
 - Consommation opérationnelle d'énergie (pompes)
- Calcul des différents indicateurs d'impact environnementaux suivant:

$$I_{solar\ heat} = \frac{\sum m_i \cdot I_i + \sum E_{use} I_{electricity\ mix}}{P_{solar,an} \times Lifetime}$$

$I_{solar\ heat}$: environmental impact of the solar heat injected to the DHN [impact/kWh]

m_i : mass of the material i of the solar power plant [kg]

I_i : LCIA of the material i [impact/kg]

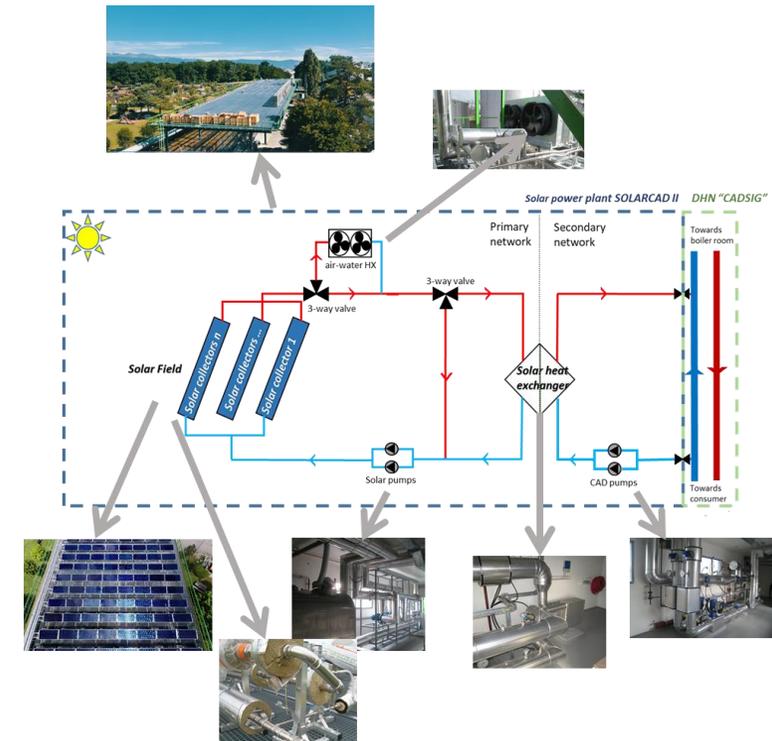
E_{use} : Electricity use during the operation [kWh]

$I_{electricity\ mix}$: LCIA of the electricity mix [impact/kWh]

$P_{solar,an}$: annual production of the solar heat [kWh/an]

Inventaire de cycle de vie (ICV)

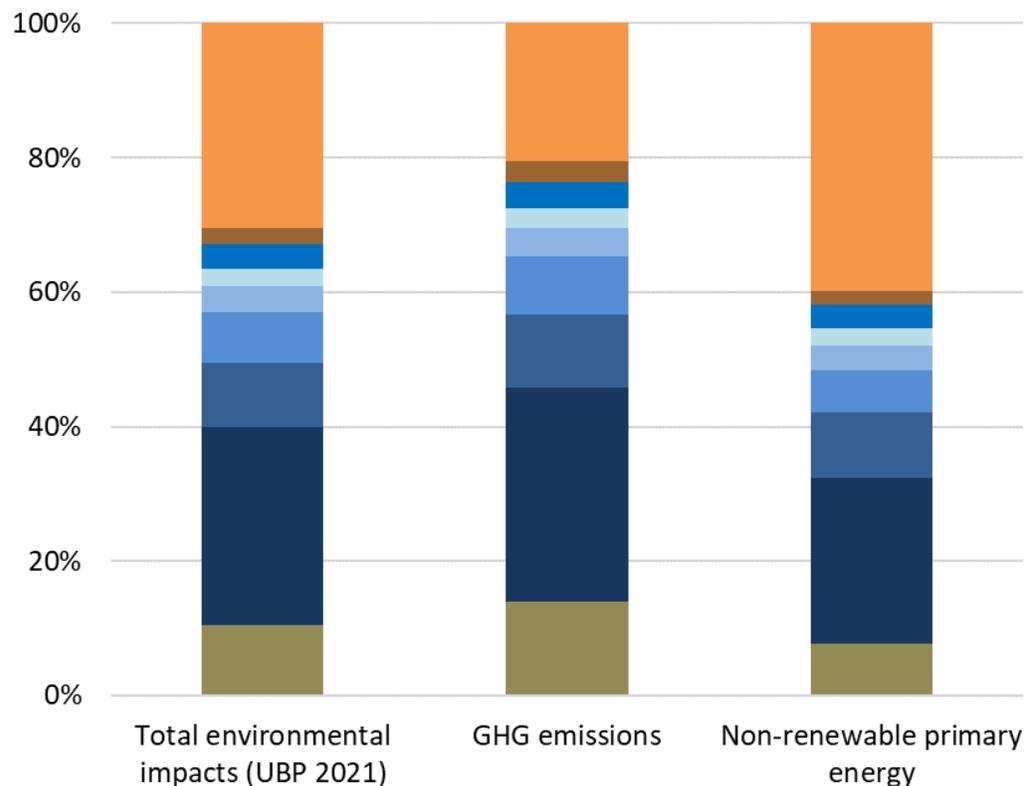
- Bill of material du collecteur** MT-Power de TVP solar
- Bill of material de la centrale solaire** y compris station d'injection côté CAD + installation
- Consommation d'électricité** sur année de référence 2021 (monitoring, ~15MWh)
- Production annuel de chaleur solaire de 536MWh (2021)



Analyse financière et environnementale

Analyse de cycle de vie de la centrale solaire

Evaluation des impacts




~20%-40%



~25%-30%



~25%-30%



~10%

- Importance d'avoir un **COP électrique élevé**
- Poids du **circuit hydraulique et du champ solaire similaire**: éco conception!!

Analyse financière et environnementale

Analyse de cycle de vie de la centrale solaire

Analyse de sensibilité

Nécessaire pour évaluer l'impact de l'incertitude des paramètres d'entrée incertain sur le résultat

Sc.	Description	g CO ₂ - eq/kWh	Variation (%)
1	Reference case	17.7	-
2	No impacts for steel gratings (as it is reused in Solar CAD II from a previous PV installation)	15.2	-14
3	Maintenance : assumed replacement of 1% of the collectors of the solar field per year	19.1	+ 8
4	Electricity mix : European average ENTSO-E	28.4	+ 61
5	Electricity mix : CH, mix of renewable energies	14.7	- 17
6	Power plant lifetime : 20 years	22.1	+ 25
7	Power plant lifetime : 30 years	14.7	- 17

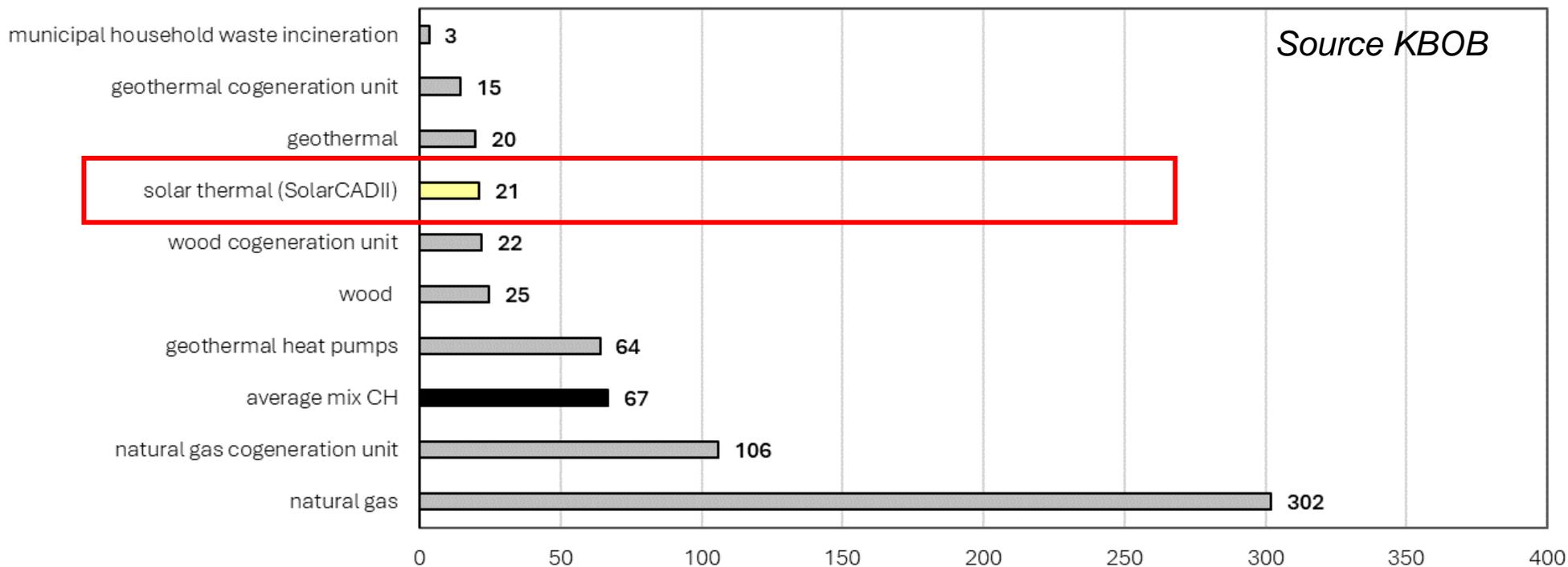
→ En combinant les cas les plus favorable et les pires, les impacts varient de **12 à 35 gCO₂-eq par kWh de chaleur solaire**

Analyse financière et environnementale

Analyse de cycle de vie de la centrale solaire

Comparaison avec d'autre technologie de production de chaleur CAD

Heat from a district heating network, at consumer for different energy carrier [gCO₂-eq/kWh]



En ajoutant les impacts liés au pertes de distribution de la chaleur ainsi qu'au réseau thermique (11%) ont été ajouté (ce qui ajoute ~+3 g CO₂-eq per kWh)

Analyse financière et environnementale

Analyse financière

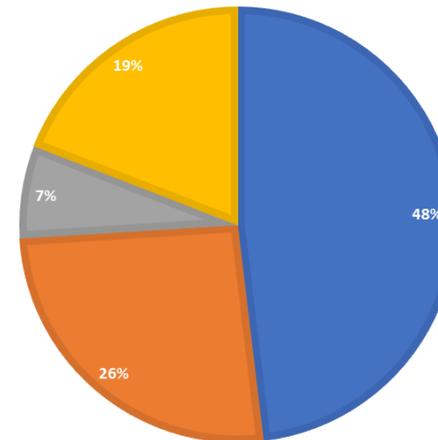
Hypothèses

- Durée de vie du champ solaire de 30 ans
- Taux d'actualisation de 1%
- Augmentation annuelle des coûts d'énergie de 3%
- Pas de dégradation des performances
- Coût annuel de maintenance de 1% de l'investissement initial
- Année de référence: 2021 avec 536 MWh/an injecté dans le CAD et 15MWh de consommation d'électricité

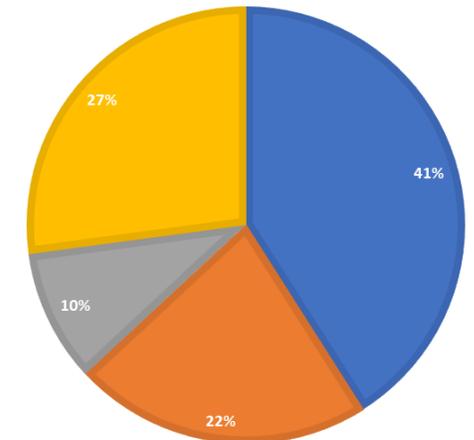
Résultats

- LCOH de 120CHF/kWh sans subvention
 - LCOH de 85CHF/MWh avec subvention (40% de taux de subvention)
 - Part champ solaire ~53%
 - Coût intégration CAD ~26%
- } **CAPEX**
- projet sur-mesure avec surcoût important
 - coût collecteur et circuit solaire: potentiel d'optimisation
 - Coût O&M peu important ~19%

Sans subvention
120CHF/MWh



Avec subvention (40%)
85CHF/MWh



Conclusions

Performances:

- **Haute productivité spécifique** avec ~ 700 kWh/m²/an
 - Efficacité de conversion annuelle de $\sim 45\%$
 - Pas de dégradation de performances observées
 - Faible COP dû à d'importantes pertes de charge
- **Collecteur plan sous-vide adapté pour CAD**

Simulation & Optimisation:

- Modèles sur Polysun et Trsnys validés
- COP \nearrow en \searrow le débit dans le champ solaire
- Seuil d'irradiance peu d'impact sur les performances
- Technologie sous-vide peu sensible aux conditions d'opération

ACV & analyse financière:

- Contenu CO₂ de 15-18g/kWh CO₂ eq.
- Coût chaleur proche d'être compétitive sans subvention
- Subvention nécessaire pour stimuler application CAD en Suisse

Perspectives

- Monitoring des performances → fin 2024
- Extension de l'étude pour le suivi de l'intégrité du vide dans les collecteurs!?
- Validation in situ des performances du champ solaire comparées aux performances suivant Solar Keymark (avec AEE-INTEC)
- Nouveau grande centrale solaire thermique en développement à Groningen avec les collecteurs de TVP Solar (mise en route courant 2024)



Source: TVP solar website

Merci pour votre attention...

... des questions!!

HE^{VD}
IG

HAUTE ÉCOLE
D'INGÉNIERIE
ET DE GESTION
DU CANTON
DE VAUD

Remerciements à:



TVP  SOLAR



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Bundesamt für Energie BFE
Office fédéral de l'énergie OFEN

- Collecteur TVP solar
- CADSIG
- Localisation champs solaire
- Structure centrale solaire avec PID/schéma hydraulique
- Principe de regulation
- Monitoring
- Résultat performance monitoring
- Suivi intégrité vide des collecteurs
- Simulation TRNSYS + Polysun
- Optimisation
- Analyse financière
- Analyse environnementale
- Conclusions et perspectives!!

