



4ème matinale « REX couplage solaire thermique/ géothermie »

Animée par :



NRG Conseils

**En partenariat avec Atlansun,
le CRER et NRG Conseils**



Programme de la matinale (1h)

I. Introduction (15 min)

- A. Animation régionale en Bretagne et Pays de la Loire
- B. Principe de la géothermie
- C. Dispositifs d'aide mis en place pour chaque système thermique

II. Couplage de la géothermie de surface et du solaire thermique (NRG Conseils) (30 min)

- A. Opportunités / définitions
- B. Facteurs dimensionnants des sondes géothermiques
- C. Des technologies de couplage possibles
- D. Exemple d'une installation avec recharge

III. Temps d'échange (15 min)



Animation régionale Bretagne

Avec le soutien financier de :



Animation chaleur renouvelable en Bretagne

Une politique commune en faveur de la chaleur renouvelable

Animation régionale



initiatives
énergie
environnement

UniLaSalle
Institut Polytechnique



⊕ Relais locaux

1

Sensibiliser à
l'utilisation des
sources de chaleur
renouvelable

2

Accompagner les
projets de chaleur
renouvelable et les
réseaux de chaleur

3

Suivre le
fonctionnement du
parc et accompagner
l'optimisation

4

Accompagner la
structuration de l'offre
en bois déchiqueté et
promouvoir la gestion
durable des ressources

5

Former et
accompagner les
animateurs locaux
et les professionnels
du bois énergie

Accompagner les territoires dans
une stratégie autour de l'arbre

Prise de poste de l'expert géologie d'UniLaSalle courant octobre-novembre



Animation régionale Bretagne



<https://www.bretagne.bzh/aides/fiches/contrat-chaleur-renouvelable-bretagne/>

Animation des relais et du centre ressource bois énergie et géothermie en Bretagne :
Mylène Alvarez mylene.alvarez@aile.asso.fr

Chaudières collectives et réseau de chaleur géothermie et bois énergie :
Antonin FLAUSSE antonin.flausse@aile.asso.fr
Corentin CAILLIE corentin.caillie@aile.asso.fr

Chaudières collectives, industrielles géothermie et Approvisionnement en bois :
Marc LE TREIS marc.le-treis@aile.asso.fr

Chaudières agricoles et Approvisionnement en bois déchiqueté :
Jacques BERNARD jacques.bernard@aile.asso.fr

Suivi du parc et Optimisation des chaudières bois et géothermie :
Antoine QUEVREUX antoine.quevrex@aile.asso.fr

Installations solaire thermique :
Loïck KALIOUDJOGLOU loick@atlansun.fr

La mobilisation du bois forestier et le bois bûche :
Fibois **Guillaume POUTEAU** : guillaume.pouteau@fiboisbretagne.fr



Animation géothermie Pays de la Loire

Centre Régional des Energies Renouvelables



Référent géothermie :

Edouard CHESNEL

edouard.chesnel@crer.info

05 49 08 24 24 / 06 48 18 84 81

Animatrice géothermie Pays de la Loire :

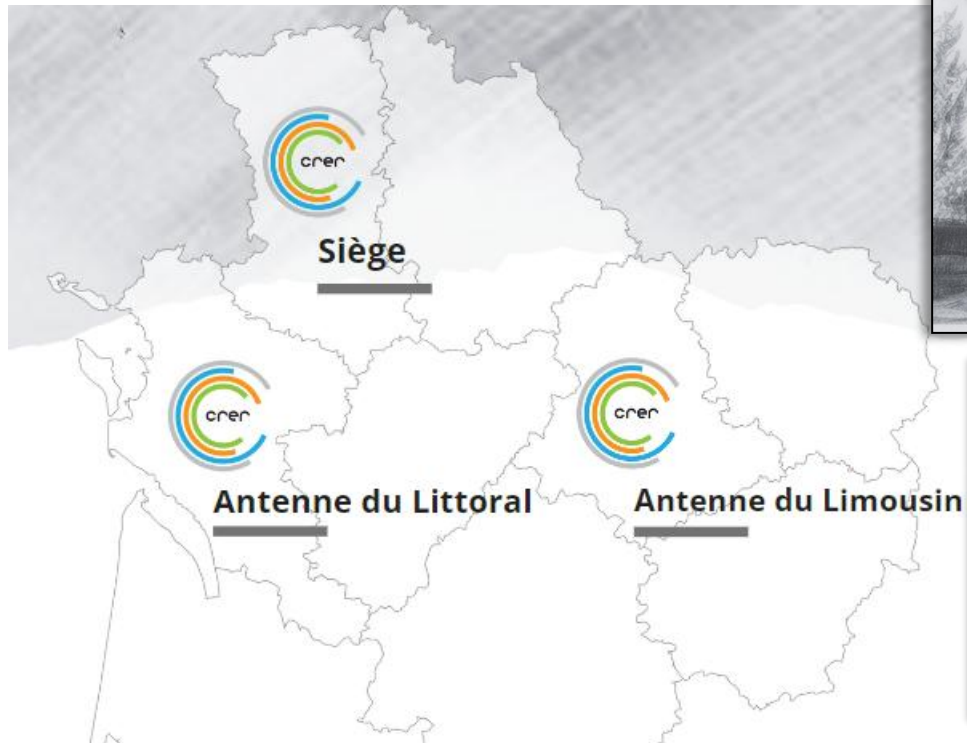
Loriel BRIGNON

loriel.brignon@crer.info

05 49 08 24 24 / 07 68 54 77 51

Le CRER : association d'assistance technique

- Association loi 1901 fondée en 2001
- Une équipe de 25 salariés
- Conseillers France Rénov'
- Formations et plateforme de géothermie en 2027
- Bois énergie, photovoltaïque, solaire thermique, géothermie

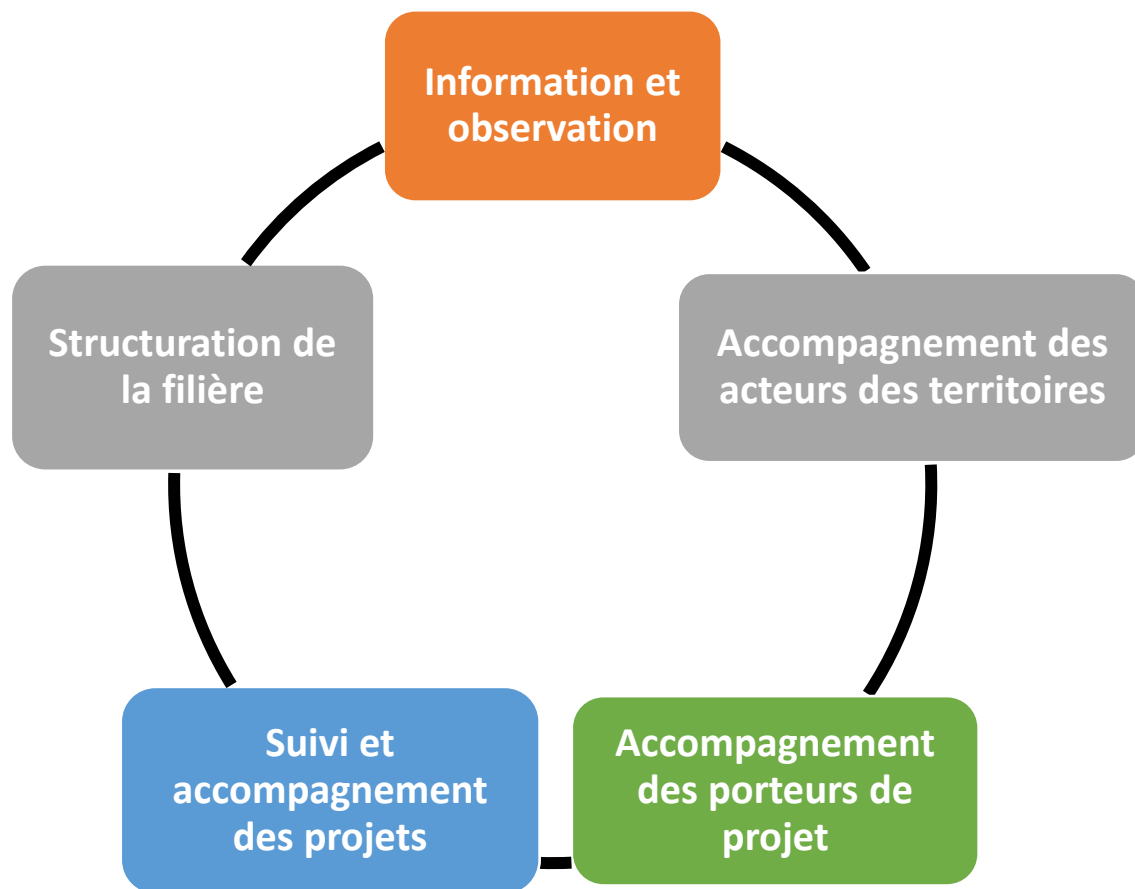


www.crer.info

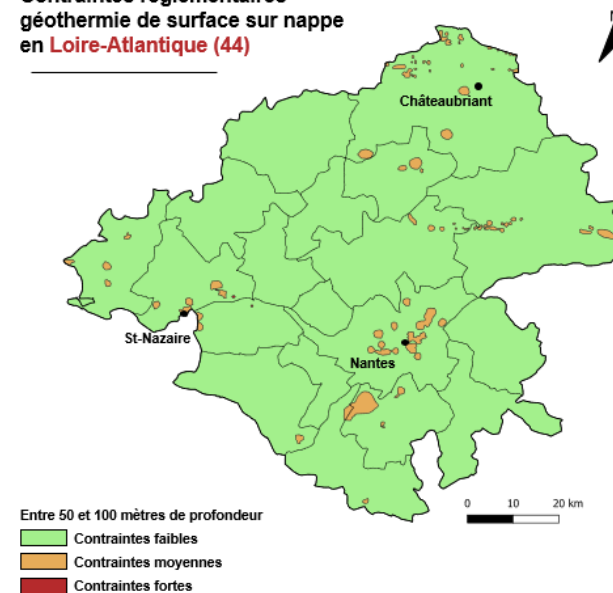


Les missions de l'animateur géothermie

5 axes de travail pour développer la filière



Cartographie simplifiée
Contraintes réglementaires
géothermie de surface sur nappe
en Loire-Atlantique (44)

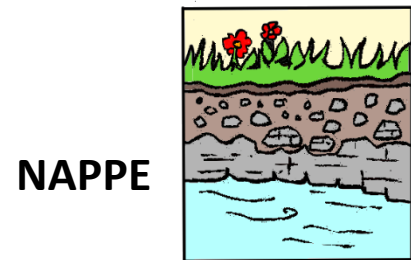
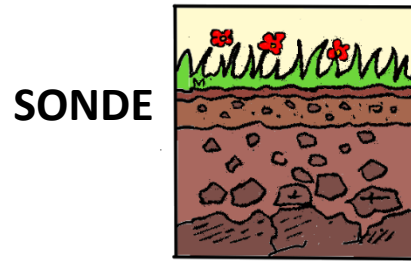


Principe de la géothermie

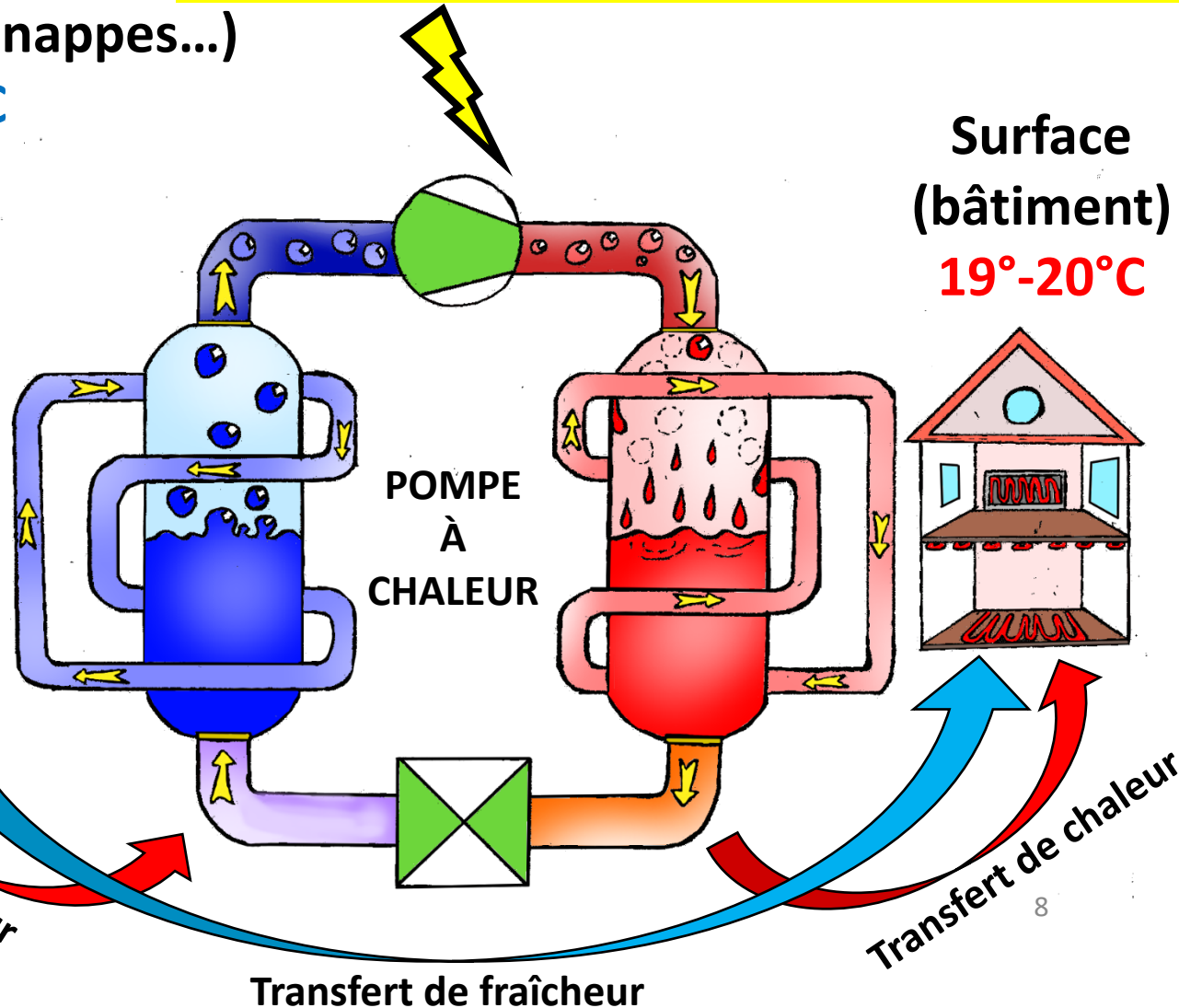
**1 kW d'électricité = 3-5 kW de chaleur
=> Coefficient de Performance COP**

Sous-sol (sondes, nappes...)

12°-15°C



Transfert de chaleur



Surface
(bâtiment)

19°-20°C

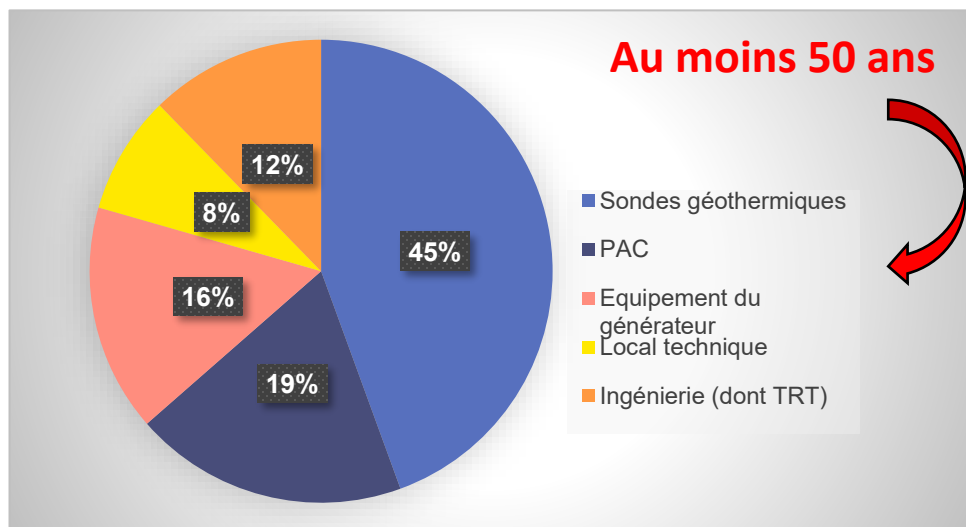
POMPE
À
CHALEUR

Transfert de chaleur

Transfert de fraîcheur

Aide Géothermie

Exemple de répartition des coûts d'investissement



Les certificats
D'ÉCONOMIES
D'ÉNERGIE
*Ministère de la Transition
écologique et solidaire*

- Froid (sondes) : 20 €/MWh EnR sur 20 ans
- Depuis 2026 => Fonds Chaleur et CEE cumulables
- Coup de pouce => aide CEE × 5 en géothermie si suppression d'une chaudière au fioul / au gaz

CONSUMATION 2022 ET OBJECTIFS DE PRODUCTION EN TWh	2022	2030	2035 seuil bas	2035 seuil haut
GÉOTHERMIE DE SURFACE	3,2	10	15	18
GÉOTHERMIE PROFONDE	2,2	6	8	10

1) Pour les installations de PAC « géothermiques » et aérothermiques dont la production globale de chaleur et de froid renouvelable est inférieure ou égale à 2 000 MWh EnR/an

Table 1 : Forfaits d'aide chaud appliqués à la production de chaud lorsque la production totale est inférieure à 2000 MWhEnR/an

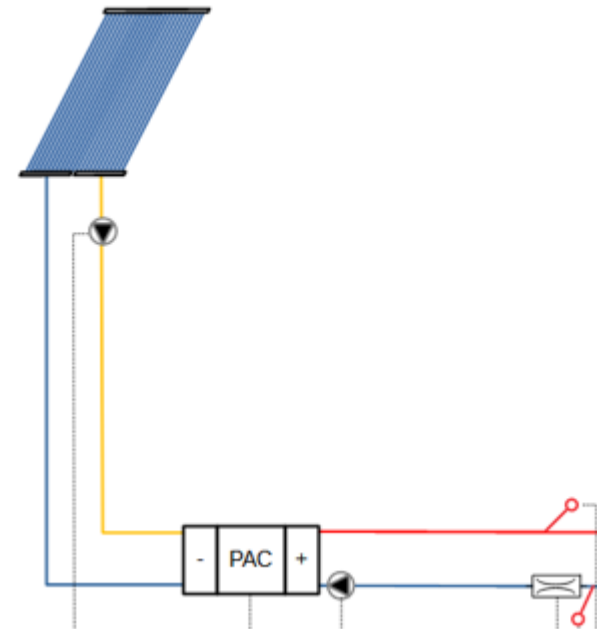
25 ≤ Production d'EnR&R CHAUD ≤ 2000 MWh/an	Aides forfaitaires CHAUD en €/MWhEnR/an (sur 20 ans)
Technologies	
PAC/TFP sur sondes et géostructures énergétiques	50 €/MWh EnR chaud
PAC/TFP sur échangeurs compacts et horizontaux géothermiques	44 €/MWh EnR chaud

PAC solaire définition :

SOLAIRE (à raccordement solaire « direct ») :

PAC utilisant comme source froide la chaleur du rayonnement solaire et de l'air ambiant, avec des capteurs solaires thermiques ou hybrides, à circulation de liquide (eau ou eau glycolée), sensibles au vent et aux infrarouges selon la définition de la norme NF EN ISO 9806,

pouvant fonctionner avec une température élevée de source froide, supérieure ou égale à 50°C, et n'ayant pas besoin de dispositif de gestion de la température en entrée d'évaporateur ; un montage « direct » entre les capteurs solaires et l'évaporateur est possible.

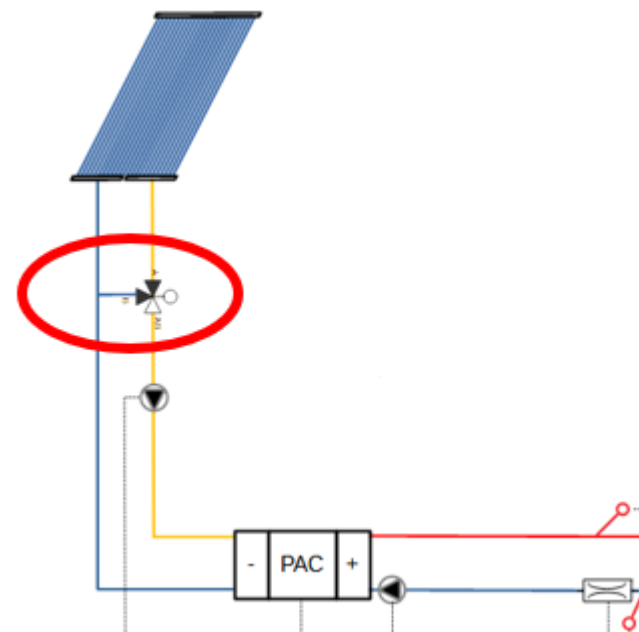


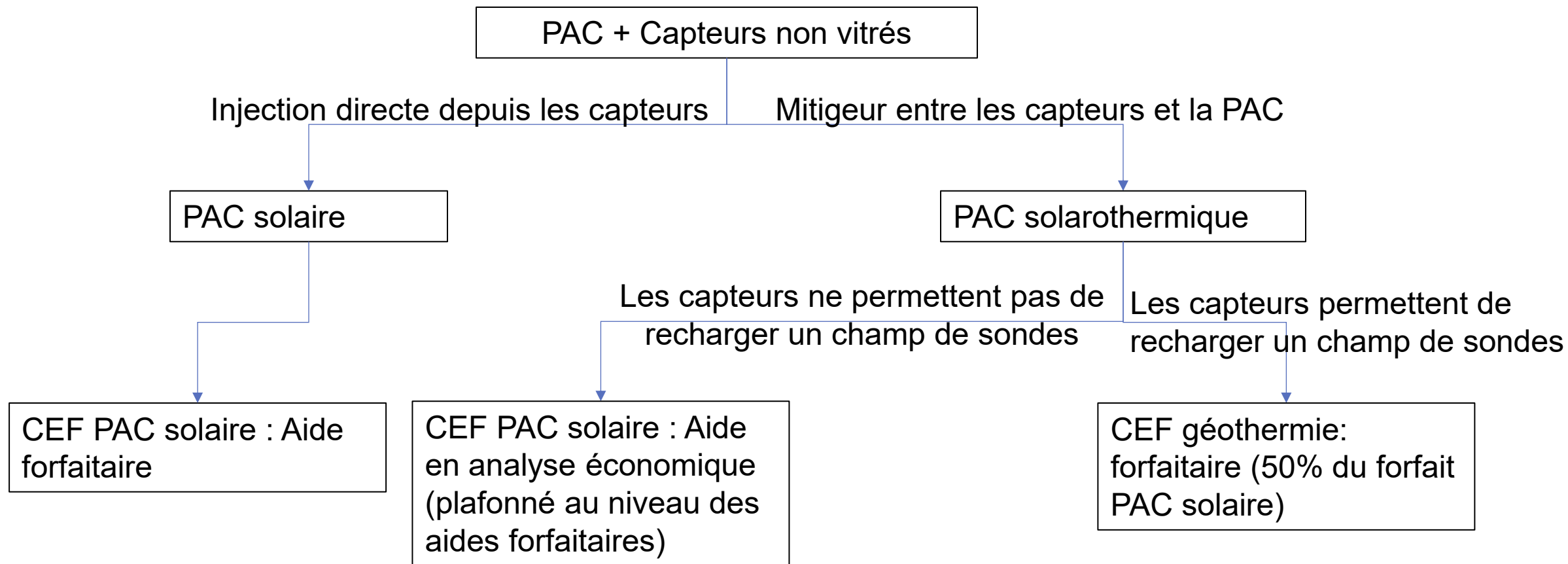
PAC SOLAROTHERMIQUE définition :

SOLAROTHERMIQUE (à évaporateur « protégé »)

- PAC généralement conçue pour fonctionner avec une source froide géothermique,
- utilisant comme source froide la chaleur du rayonnement solaire et de l'air ambiant, avec des capteurs solaires thermiques ou hybrides, à circulation de liquide (eau ou eau glycolée), sensibles au vent et aux infrarouges selon la définition de la norme NF EN ISO 9806,
- intégrant ou étant associée à un dispositif de gestion de la température en entrée d'évaporateur permettant d'assurer un fonctionnement sous sa limite maximale de température de source froide (souvent inférieure à 25°C), par exemple avec une vanne de mélange entre les capteurs solaires et la PAC.

Nouveauté 2026 en analyse éco

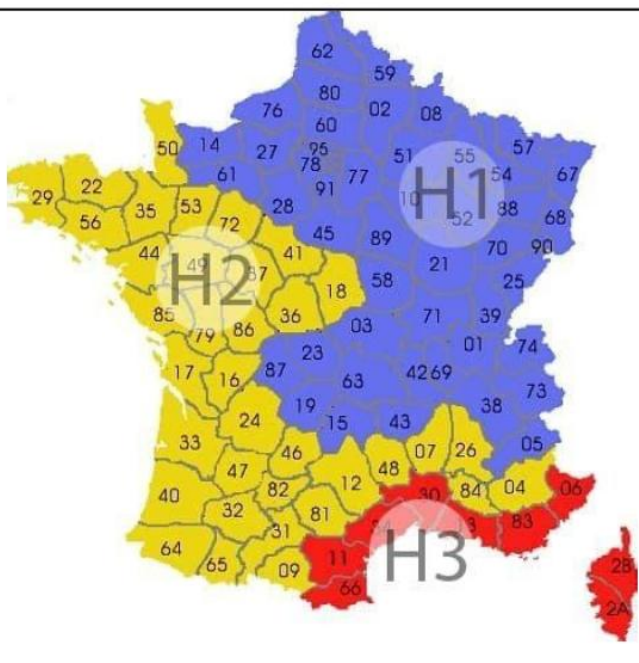




Aide PAC solaire

Aide forfaitaire calculée sur 20 ans (€/MWh_EnR)		
Zone climatique		
H1	38	
H2	30	
H3	25	

Aide PAC solarothermique

Aide forfaitaire calculée sur 20 ans (€/MWh_EnR)		
Zone climatique	(T _i)	
H1	19	
H2	15	
H3	12	

COUPLAGE DE LA GÉOTHERMIE DE SURFACE AVEC LE SOLAIRE THERMIQUE

15 septembre 2026

Contact :
Romain GENET
rgenet@nrg-conseils.com
06.76.83.78.89

NRG Conseils

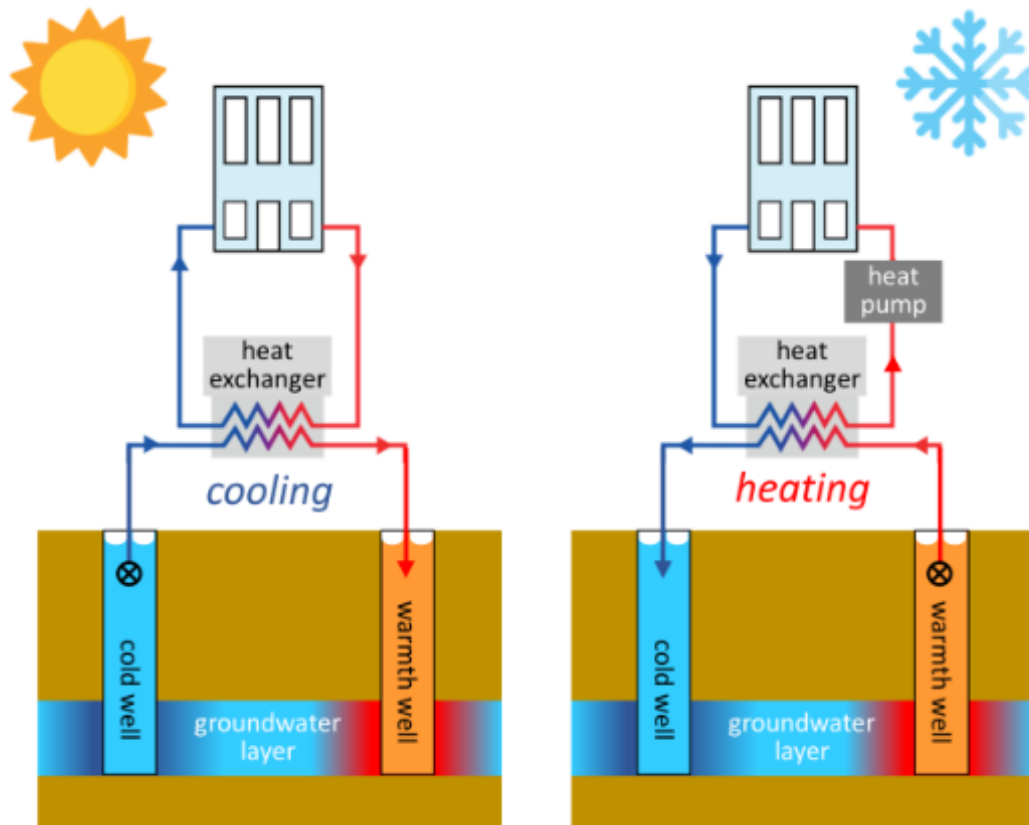
Sous-sol = « réservoir d'énergie »

Captage géothermique = « échangeur de puissance » dans un réservoir d'énergie

Ce réservoir d'énergie (sous-sol) peut être préservé par :

- Le **délestage** : moins solliciter la PAC géothermique grâce à la présence du solaire thermique
 - La **recharge** : envoyer de la chaleur dans le sous-sol (via le captage géothermique) pour améliorer la « régénération » du réservoir grâce à la présence du solaire thermique
- ⇒ Ces deux actions ont des effets semblables sur le captage géothermique dans le sous-sol :
réduire la perturbation thermique (décharge si extraction > injection) pour stabiliser les températures dans le sous-sol
- Le **stockage** : envoyer une quantité importante de chaleur dans le sous-sol pour la « stocker » et la « récupérer » pour un usage ultérieur :
augmenter sensiblement la température du sous-sol afin de pouvoir extraire la chaleur à une température plus élevée (supérieure à la température initiale du sous-sol)

Captage sur nappe ATES (Aquifer Thermal Energy Storage)



Installation de puits réversibles :

- Été : on pompe dans le forage de gauche et on injecte de l'eau plus chaude dans le forage de droite (soit chaleur du bâtiment, soit solaire par exemple)
- Hiver suivant : on pompe l'eau (plus chaude) dans le forage de droite et on a réinjecte plus froide dans le forage de gauche (extraction par la PAC pour chauffer le bâtiment)

On obtient un forage avec une bulle « froide » à gauche et l'autre avec une bulle « chaude »

Contrainte : le déplacement de l'eau dans le sous-sol
Difficilement envisageable sur des aquifères de surface

Non développé dans la présentation

Captage sur sondes

BTES (Borehole Thermal Energy Storage)

La recharge ou stockage se fait par circulation d'eau chaude dans le champ de sondes qui va permettre de « réchauffer » le sol environnant.

Installation « classique » avec réversibilité (chaud / froid bâtiment) et/ou source de chaleur tierce (ex : solaire)

En **recharge (ou délestage)**, on réduit la perturbation thermique du sous-sol à long terme et ainsi on peut espérer :

- Réduire le nombre de sondes
- Faciliter leur implantation
- Améliorer le COP de la PAC

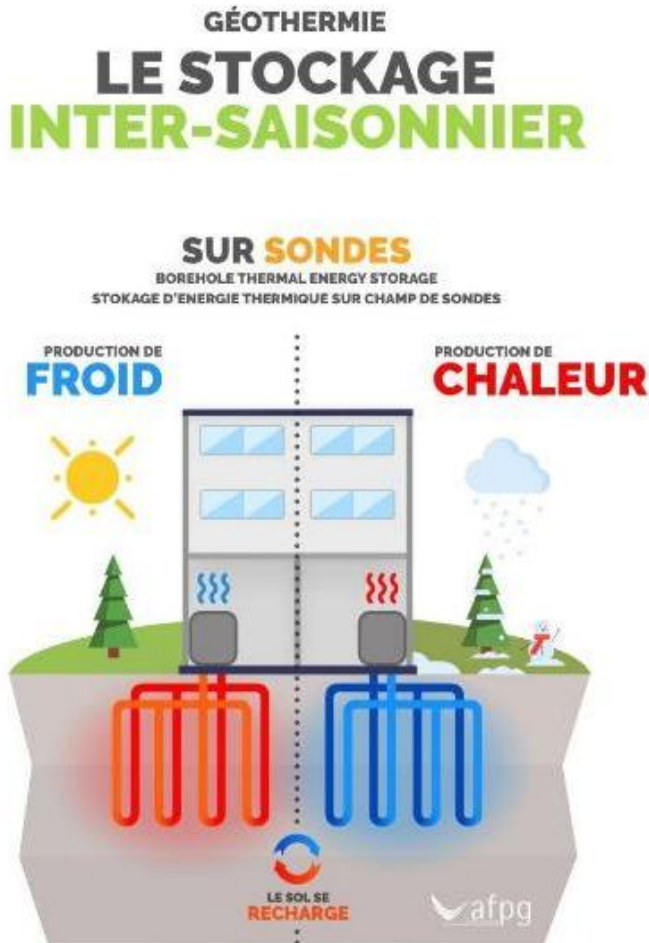
En **stockage**, on augmente (beaucoup) la température du sous-sol et on peut espérer :

- Stocker une énergie disponible (fatale ou ENR non délocalisable)
- Récupérer une partie de cette énergie sans utiliser de PAC
- Et/ou améliorer le COP de la PAC

Contraintes : pas (peu) d'eau qui se déplace dans le sous-sol : effet « lavant » de l'eau

Maîtriser tous les facteurs impactant le comportement du champ de sondes (T° , conductivité, implantation des sondes) pour justifier de la recharge => géomodélisation

Stockage : Perte de température dans le stockage



FACTEURS DIMENSIONNANTS DE LA GEOTHERMIE

Contact :
Romain GENET
rgenet@nrg-conseils.com
06.76.83.78.89

NRG Conseils

Sollicitation :

Puissances extraite/injectée et Energie extraite/injectée

Propriétés thermiques du sous-sol :

Température, conductivité thermique, Capacité Thermique Volumique et éventuellement déplacement eau

Propriétés des sondes et du champ :

débit dans les sondes, type de sondes, ciment, fluide ET implantation des sondes entre elles

⇒ Nécessite une géomodélisation (simulation dynamique du champ de sondes et du sous-sol prenant compte des paramètres)

⇒ Connaitre les ordres de grandeurs

La capacité de production d'une sonde géothermique dépend de nombreux paramètres :

Conductivité et Température du sol / caractéristiques physiques des sondes (type, cimentation, débit) / disposition géographique des sondes (interférences) / ...

Question 1 :

Quelle serait la productivité énergétique annuelle (en kWh/m.an) pour une sonde seule avec un sous-sol à 13°C et 2 W/m.°C (hyp : fonctionnement à 1 800 heures équiv. Pleine Puissance / uniquement du prélèvement) ?

- a. Environ 50 kWh/m².an
- b. Environ 75 kWh/m².an
- c. Environ 100 kWh/m².an
- d. Environ 150 kWh/m².an



Energie extraite par m de sondes (en kWh/m.an) pour <u>une sonde seule</u> (hyp : Fctt PP de 1800 h / Rb = 0,11 m.°C/W / T° mini = -3°C / pas de recharge)																		
Température du sous-sol	17°C	81	84	87	90	93	95	96	98	100	102	104	106	109	111	113	115	117
	16°C	77	80	82	85	87	89	91	93	95	97	99	101	102	105	107	109	111
	15°C	74	76	78	80	82	84	86	88	90	92	93	95	96	99	101	103	105
	14°C	70	72	74	76	78	80	82	84	86	87	87	88	89	92	94	96	99
	13°C	66	68	70	72	74	76	77	79	81	81	81	82	82	85	87	90	93
	12°C	62	64	66	68	70	71	73	74	76	76	77	77	78	80	82	85	87
	11°C	58	60	61	63	65	67	68	70	71	72	72	73	74	75	77	79	81
	10°C	53	55	56	58	59	61	62	64	66	67	68	68	69	71	72	73	75
	9°C	48	49	51	52	53	55	57	58	60	61	63	64	65	66	67	68	69
		1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3,0	3,1	3,2
Conductivité thermique du sous-sol (W/m.°C)																		

b. Environ 75 kWh/m.an

⇒ Poids conductivité : entre +2% et + 3% de productivité par dixième de conductivité

⇒ Poids Température : entre +5% et +10% de productivité par °C en plus

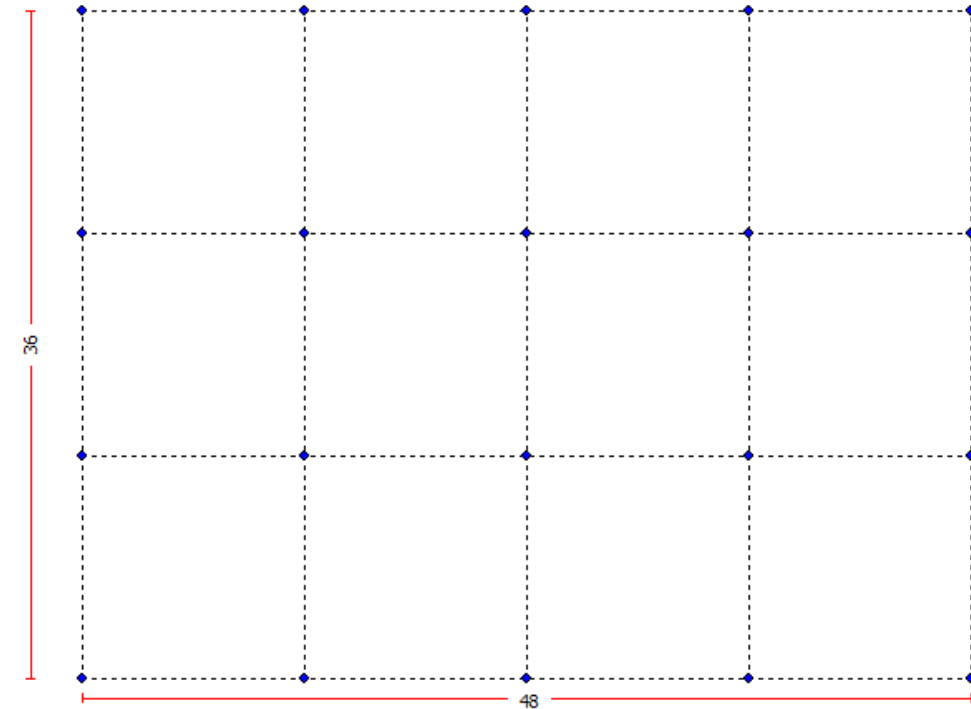
Impact des sondes les unes sur les autres

Question 2 :

Impact sur la productivité par ml de sonde avec 20 sondes en rectangle 5x4 espacées de 12 mètres ?

(Hyp : sol à 13°C et 2 W/m.°C / fonctionnement à 1 800 heures équiv Pleine Puissance / uniquement du prélèvement)

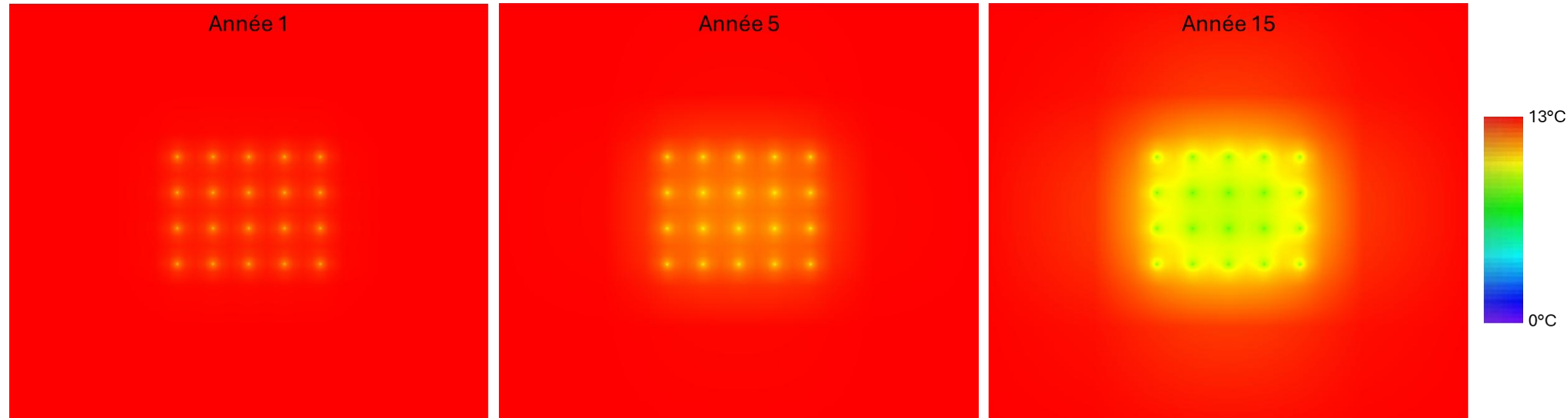
- a. Presque aucun impact
- b. Environ -10%
- c. Environ -15%
- d. Environ -25%



Energie extraite par m de sondes (en kWh/m.an) pour <u>20 sondes en rectangle (5x4) espacées de 12 m</u> (hyp : Fctt PP de 1800 h / Rb = 0,11 m.°C/W / T° mini = -3°C / pas de recharge)																		
Température du sous-sol	17°C	61	63	65	67	69	71	72	73	75	76	78	80	81	83	84	86	87
	16°C	58	60	62	63	65	67	68	70	71	73	74	75	77	78	80	81	83
	15°C	55	57	58	60	61	63	64	66	68	69	70	71	72	74	75	77	78
	14°C	52	54	55	57	58	60	61	63	64	65	65	66	67	68	70	72	74
	13°C	50	51	52	54	55	57	58	59	60	61	61	61	61	63	65	67	69
	12°C	46	47	49	51	52	53	54	56	57	57	57	58	58	60	62	63	65
	11°C	42	44	45	47	49	50	51	52	53	54	54	55	55	56	58	59	60
	10°C	39	40	42	43	44	45	47	48	49	50	50	51	52	53	54	55	56
	9°C	36	37	38	39	40	41	42	44	45	46	47	48	49	49	50	51	51
		1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3,0	3,1	3,2
Conductivité thermique du sous-sol (W/m.°C)																		

d. **Environ -25% : 55 kWh/m.an au lieu de 75 kWh/m.an**

Impact des sondes les unes sur les autres



Les sondes « entourées » d'autres sondes (= les 6 sondes du milieu) produisent très peu d'énergie au bout de quelques années

- ⇒ **L'implantation des sondes est primordiale**
- ⇒ **Réflexion sur l'implantation avant de penser à la recharge tierce (autre que réversibilité)**

Echangeur sur Air (dry-Cooler)



Capteur solaire thermique « simplifié »
(moquette, PV-Thermique)



Chaussées thermoactives



Capteur solaire thermique « classique »



Choix de la technologie de couplage

Question 3 :

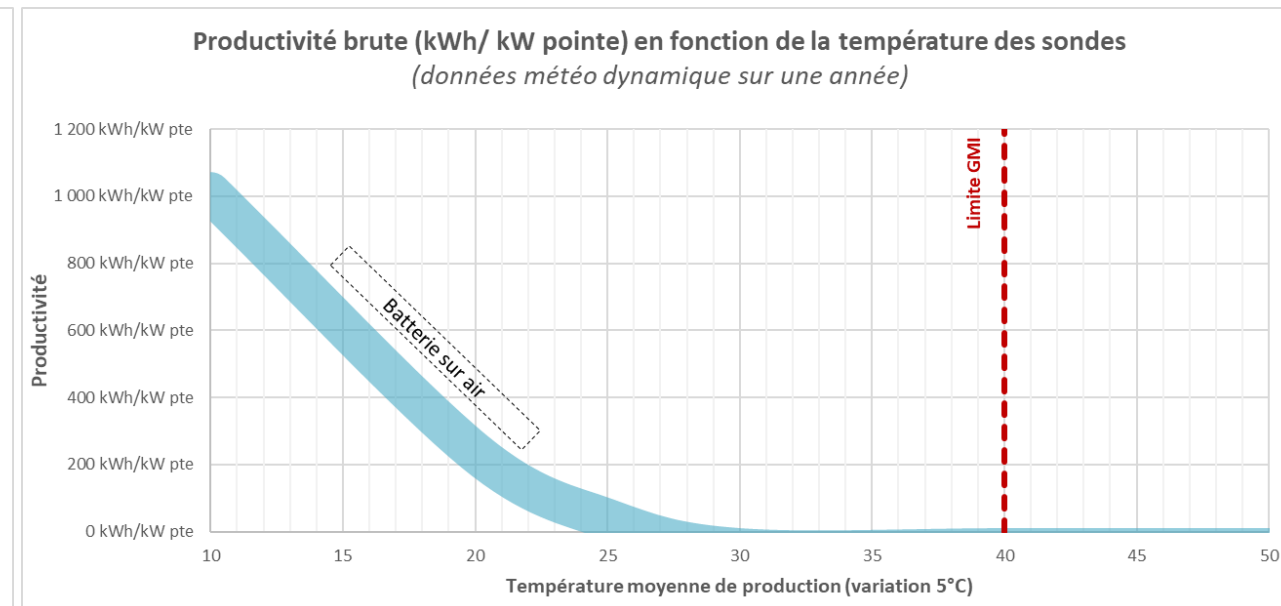
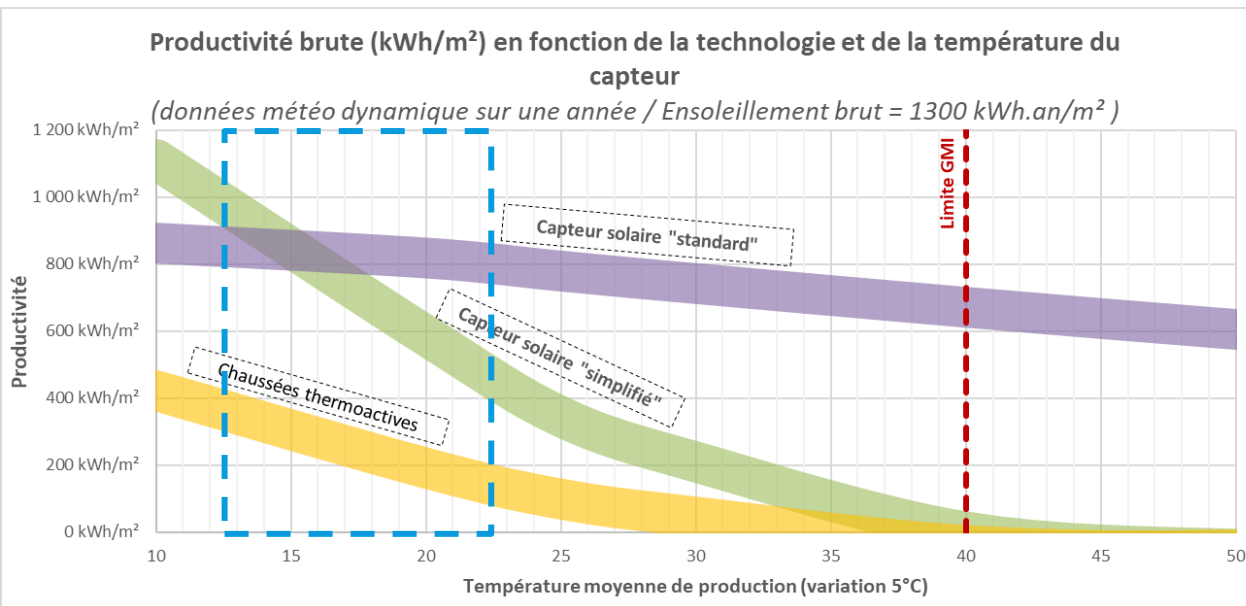
Quelle est la technologie de capteur solaire thermique, a priori, la mieux adaptée pour un projet avec recharge sur sondes ?

(hyp : température moyenne de production de 20°C / invest. prod capteur « simplifié » : 300€/m² - prod capteur « classique » : 1 000€/m²)

- a. Capteur solaire thermique « simplifié »
- b. Capteur solaire thermique « classique »



Exemple de productivités brutes en fonction de la température moyenne de production selon les technologies (*Hyp : solaire : ensoleillement brut de : 1300 kWh/m² / Batterie sur air : condition de puissance eau 15-20°C et air ext : 35°C*)



a. Capteur solaire thermique « simplifié »

⇒ Chaussées thermoactives : système de récupération « continu » pas d'intermittence

⇒ Capteurs solaires : systèmes intermittents, dépendants des conditions extérieures (température / ensoleillement)

15/09/2023 ⇒ Batterie sur air : système intermittent, dépendant de la température extérieure

Technologie

Couplage

de 0 à ~40°C

Capteur solaire (moquette, PV-Thermique)

Chaussées thermoactives
Echangeur sur Air (dry-Cooler)



de ~40°C à ~90°C

Capteur solaire thermique « classique »



Délestage du champ de sondes
Recharge sondes géothermiques

Usage direct chaleur
Stockage sondes géot.

EXEMPLE D'INSTALLATION AVEC COUPLAGE

Contact :
Romain GENET
rgenet@nrg-conseils.com
06.76.83.78.89

NRG Conseils

Exemple : un centre aquatique dans la Loire

Construction d'un centre aquatique

Production de chauffage (bassins, CTAs, radiateurs)

⇒ 2 PAC géothermiques de 90 kW chacune

⇒ 12 sondes de 200 m

⇒ 300 m² de moquette solaire

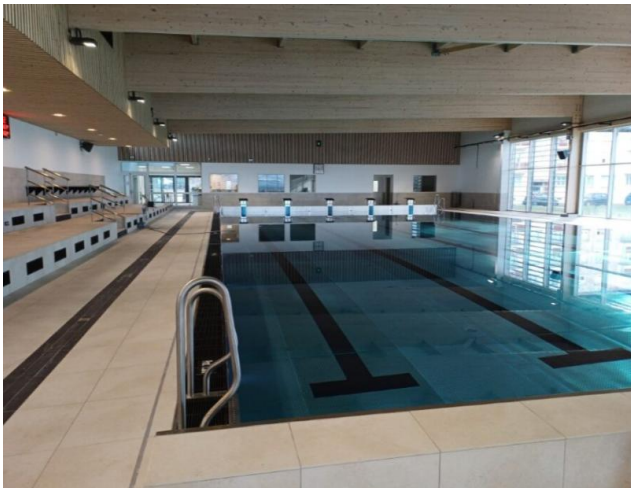
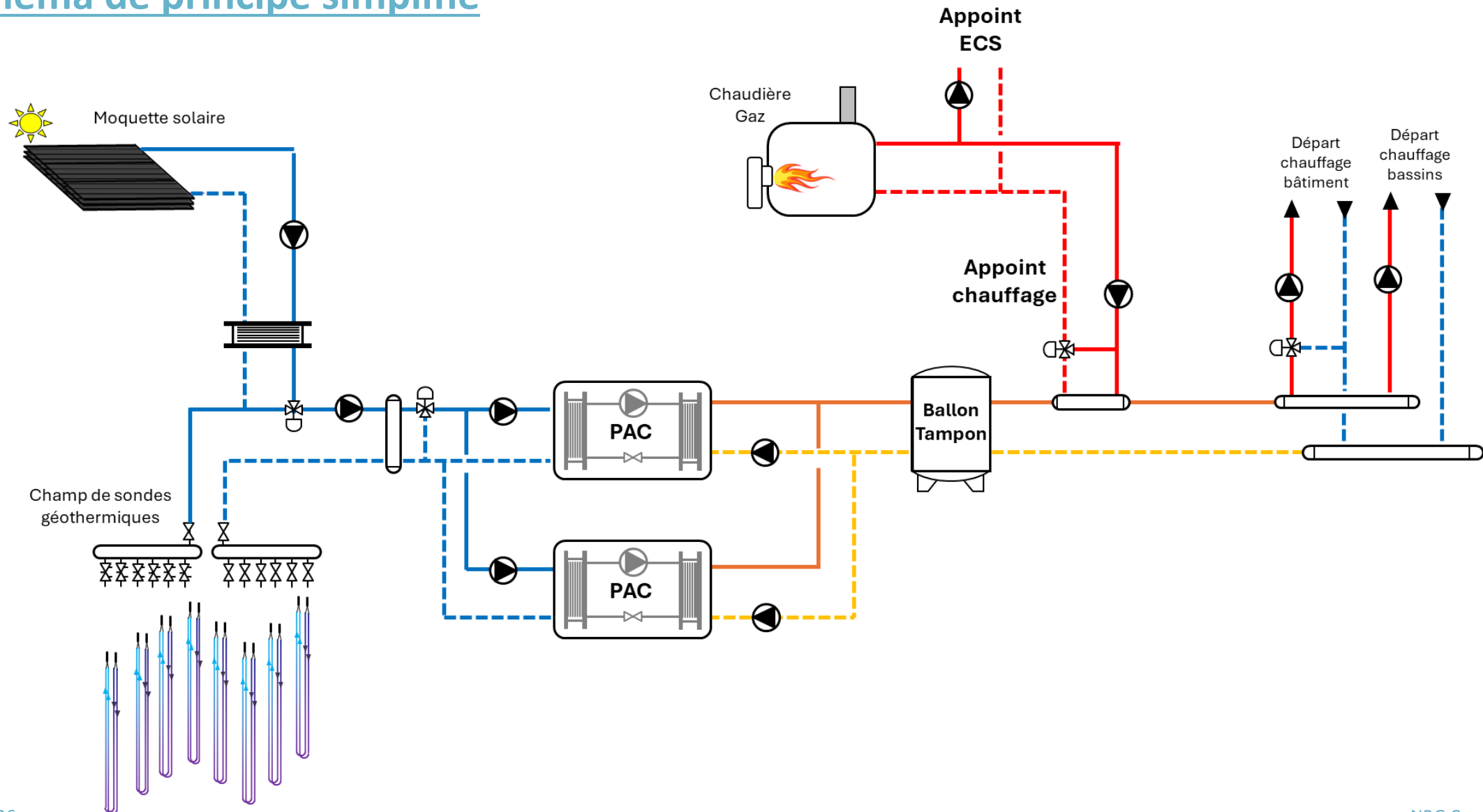


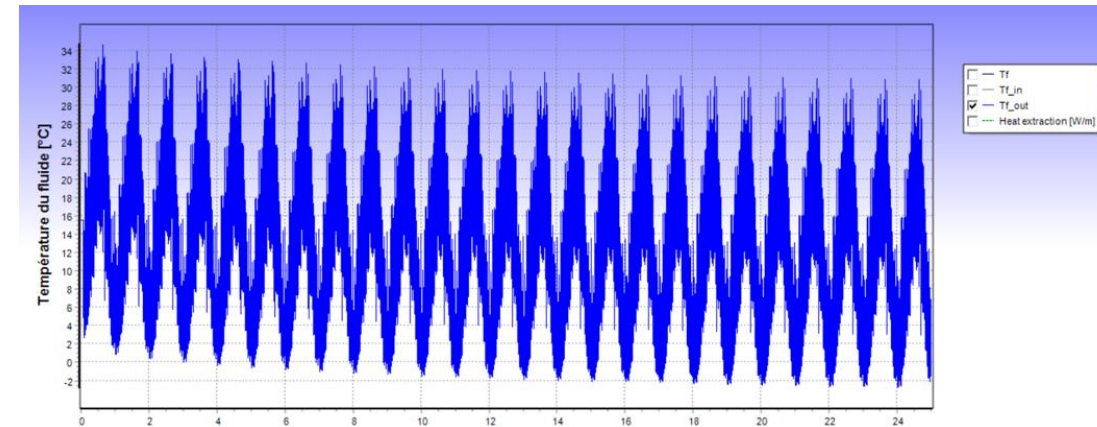
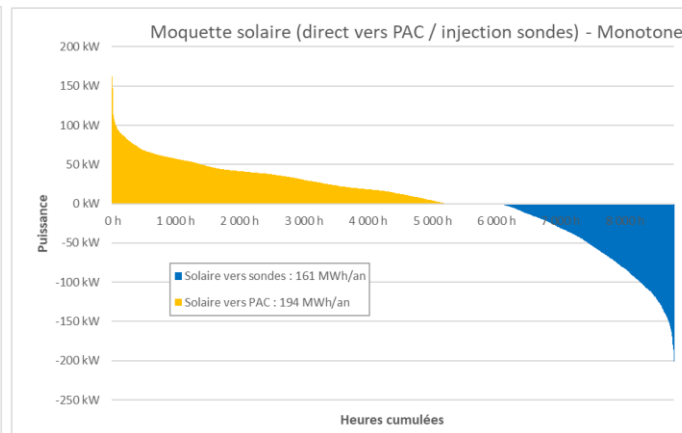
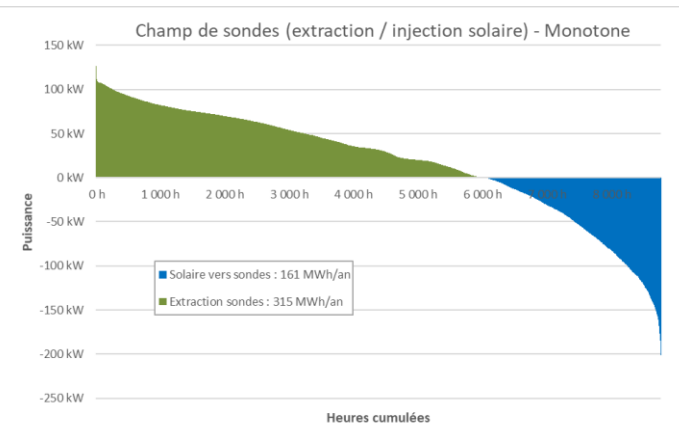
Schéma de principe simplifié



Bilan énergétique prévisionnel

- ⇒ Couverture géothermie : 93% soit 660 MWh
 - ⇒ Elec géothermie : 164 MWh / COP Global : 4,05
 - ⇒ Production solaire : 355 MWh dont 160 MWh dans les sondes et 195 MWh vers PAC
- Ratio : 1 180 kWh/m².an**

CHAUD								
Année 10 Mois	Besoins Chaud	BILAN PAC				BILAN GEOTH.		Appoint Chaud
		Couverture		Electricité PAC	COP PAC	Electricité aux	COP global	
Janvier	95,5 MWh	89,6 MWh	93,8%	23,7 MWh	3,78	0,7 MWh	3,67	5,9 MWh
Février	85,6 MWh	80,8 MWh	94,3%	21,1 MWh	3,83	0,6 MWh	3,72	4,9 MWh
Mars	79,0 MWh	74,6 MWh	94,4%	18,2 MWh	4,11	0,6 MWh	3,97	4,4 MWh
Avril	57,0 MWh	52,8 MWh	92,6%	11,9 MWh	4,44	0,6 MWh	4,22	4,2 MWh
Mai	50,6 MWh	46,2 MWh	91,3%	9,8 MWh	4,71	0,5 MWh	4,46	4,4 MWh
Juin	33,3 MWh	29,2 MWh	87,7%	5,8 MWh	5,07	0,3 MWh	4,80	4,1 MWh
Juillet	28,8 MWh	25,8 MWh	89,7%	5,0 MWh	5,21	0,3 MWh	4,94	3,0 MWh
Août	28,0 MWh	25,3 MWh	90,5%	4,9 MWh	5,19	0,3 MWh	4,92	2,7 MWh
Septembre	32,3 MWh	29,3 MWh	90,6%	6,1 MWh	4,78	0,3 MWh	4,55	3,0 MWh
Octobre	50,7 MWh	46,7 MWh	91,9%	10,1 MWh	4,64	0,6 MWh	4,39	4,1 MWh
Novembre	79,4 MWh	74,5 MWh	93,8%	18,2 MWh	4,10	0,6 MWh	3,96	4,9 MWh
Décembre	92,7 MWh	87,9 MWh	94,8%	22,8 MWh	3,85	0,7 MWh	3,74	4,8 MWh
TOTAL	713,2 MWh	662,8 MWh	92,9%	157,5 MWh	4,21	6,2 MWh	4,05	50,4 MWh



⇒ Impact recharge et délestage du champ de sondes

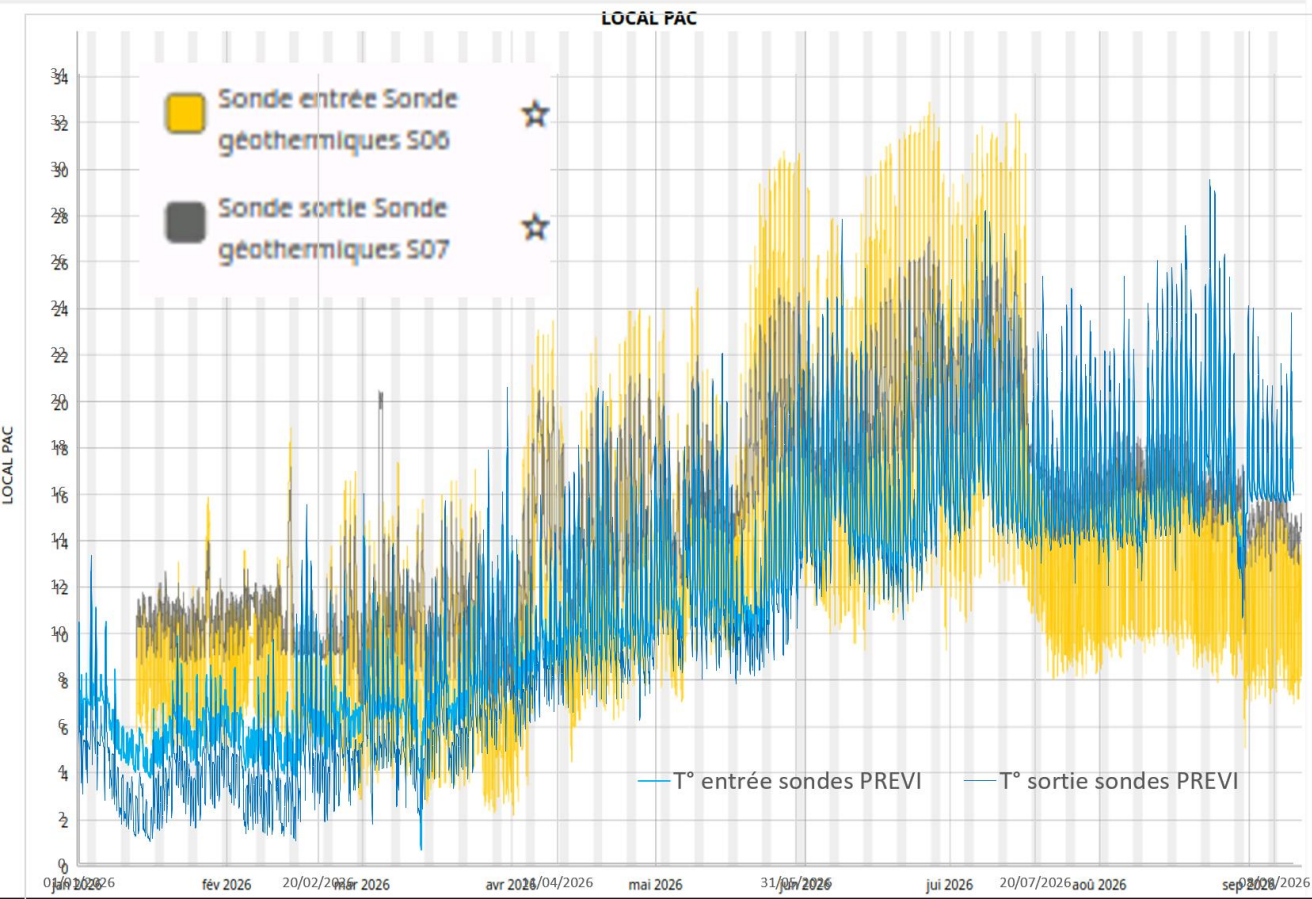
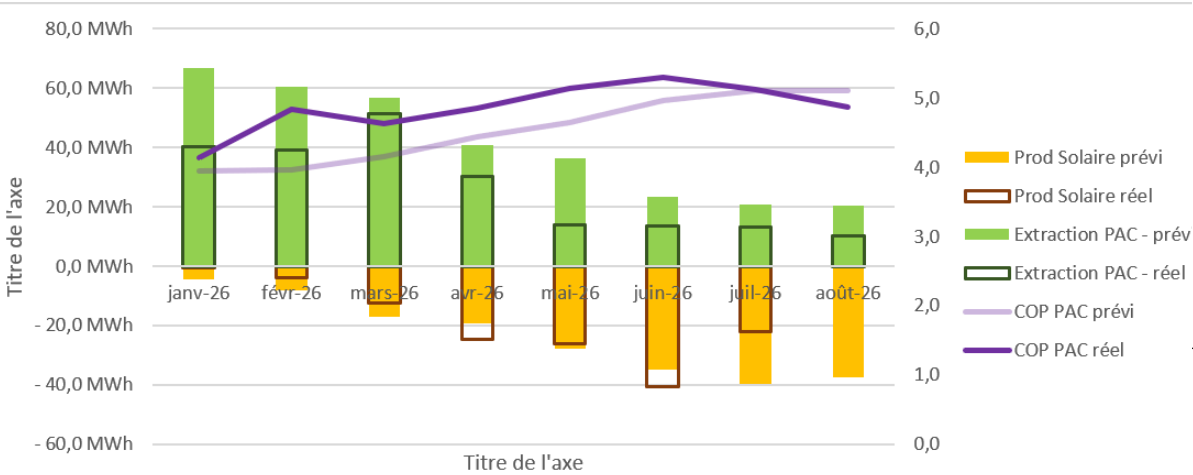
- Gain de 12 à 15 sondes selon les contraintes foncières (densité des sondes)
- Gain sur le COP PAC (sans recharge d'environ 3,9)

Retours depuis mise en service en novembre 2025

Piscine à moins de besoins de chaleur que prévu

La moquette solaire est à l'arrêt depuis le 17 juillet

	Production moquette solaire		Energie extraite PAC (sondes+Solaire)		COP PAC	
	Prévisionnel	Réel	Prévisionnel	Réel	Prévisionnel	Réel
janv-26	4,3 MWh	0,1 MWh	66,8 MWh	40,2 MWh	3,9	4,1
févr-26	8,1 MWh	3,9 MWh	60,4 MWh	39,0 MWh	4,0	4,8
mars-26	17,2 MWh	12,3 MWh	56,7 MWh	51,3 MWh	4,2	4,6
avr-26	19,4 MWh	24,7 MWh	41,0 MWh	30,1 MWh	4,4	4,8
mai-26	27,9 MWh	26,0 MWh	36,3 MWh	13,8 MWh	4,6	5,1
juin-26	34,8 MWh	40,5 MWh	23,5 MWh	13,5 MWh	5,0	5,3
juil-26	39,8 MWh	22,1 MWh	20,8 MWh	13,0 MWh	5,1	5,1
août-26	37,3 MWh	0,0 MWh	20,3 MWh	10,3 MWh	5,1	4,9



De réelles opportunités de couplage solaire / géothermie :
Délestage PAC / Décharge solaire / Recharge captage / Stockage

Conditions :

- **Nappe : nécessite une nappe à très faible vitesse d'écoulement**
- **Sondes :**
 - Pas / peu d'eau dans le sol
 - Pertinence de la recharge : taille de projet (> **centaine MWh**) / contrainte foncière / déséquilibre énergétique et temps de fonctionnement long (> **2000 h PP**)
 - Pertinence du stockage : gros projet (**~1 000 MWh**) / source de chaleur « gratuite » et haute température / usage Basse Température

EN DEVELOPPEMENT : couplage (recharge) intégré au Fonds Chaleur 2026 / GT Enerplan-AFPG / quelques dizaines de REX en France