



Coûts d'investissement en géothermie de surface

Paul Voisard - ADEME

CT SAGE – 7^{ème} édition – 4 novembre 2025



SOMMAIRE



01 CADRE DE L'ETUDE



02 ETAT DE L'ART



03 MODÉLISATION



04 RECOMMANDATIONS

OI CADRE DE L'ETUDE

Périmètre de l'étude

- Projets engagés juridiquement en 2022 - 2023 - 2024
- Coûts inclus : du captage géothermique jusqu'aux départs régulés en local technique (cela exclut la distribution et l'émission)
- Projets soutenus par le Fonds Chaleur

Coûts considérés

- Coûts réels (et non prévisionnels)
- Coûts Hors Taxe (H.T)
- Analyse en valeurs courantes, sans taux d'actualisation

Documents sources *

- Documents techniques
 - Annexe technique
 - Fiche synthèse
 - Rapports intermédiaires (ou finaux)
 - Schéma hydraulique
- Documents de coûts réels
 - Factures
 - Devis signés
 - ERD (état récapitulatif des dépenses)
 - DPGF (Décomposition des Prix Globale et Forfaitaire)
 - Bilan financier

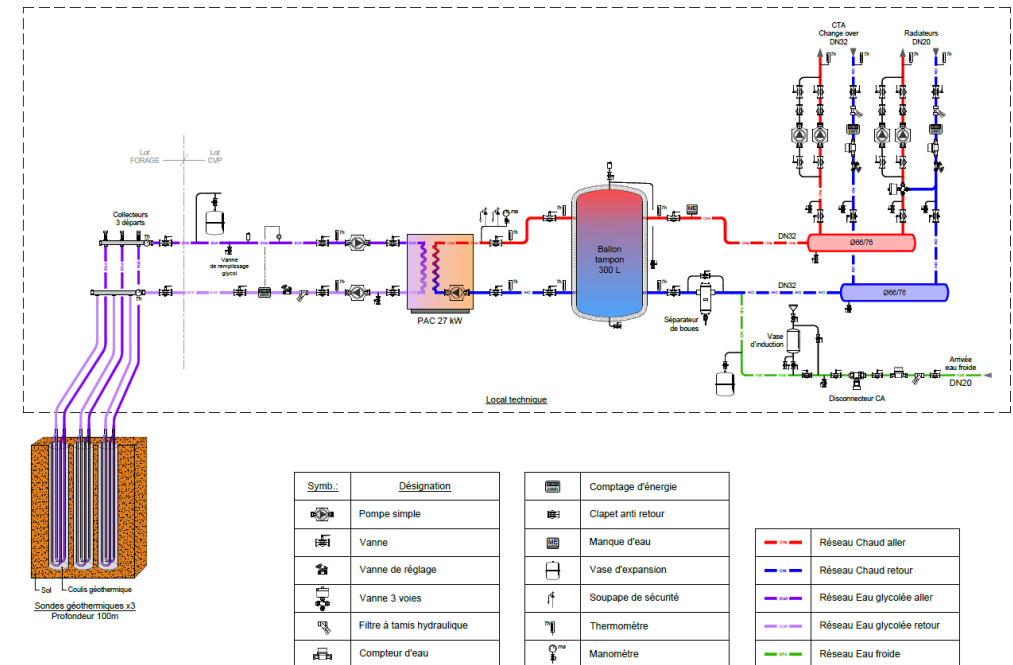


Schéma hydraulique d'une installation de PAC sur champ de sondes

* Les éléments techniques et de coûts récoltés sont détaillés en annexe

**1. Captage géothermique
(Lot Forage)**

Forage et équipements
Logistique chantier
Raccordement forage
Essais et mise en service

**2. Production
(Lot CVC)**

PAC et pompes
Logistique chantier
Accessoires hydrauliques, tuyauterie
Essais et mise en service
Equipements spécifiques

3. Système de gestion et suivi

Armoire électrique
GTB
Raccordement électrique
Instrumentation/comptages

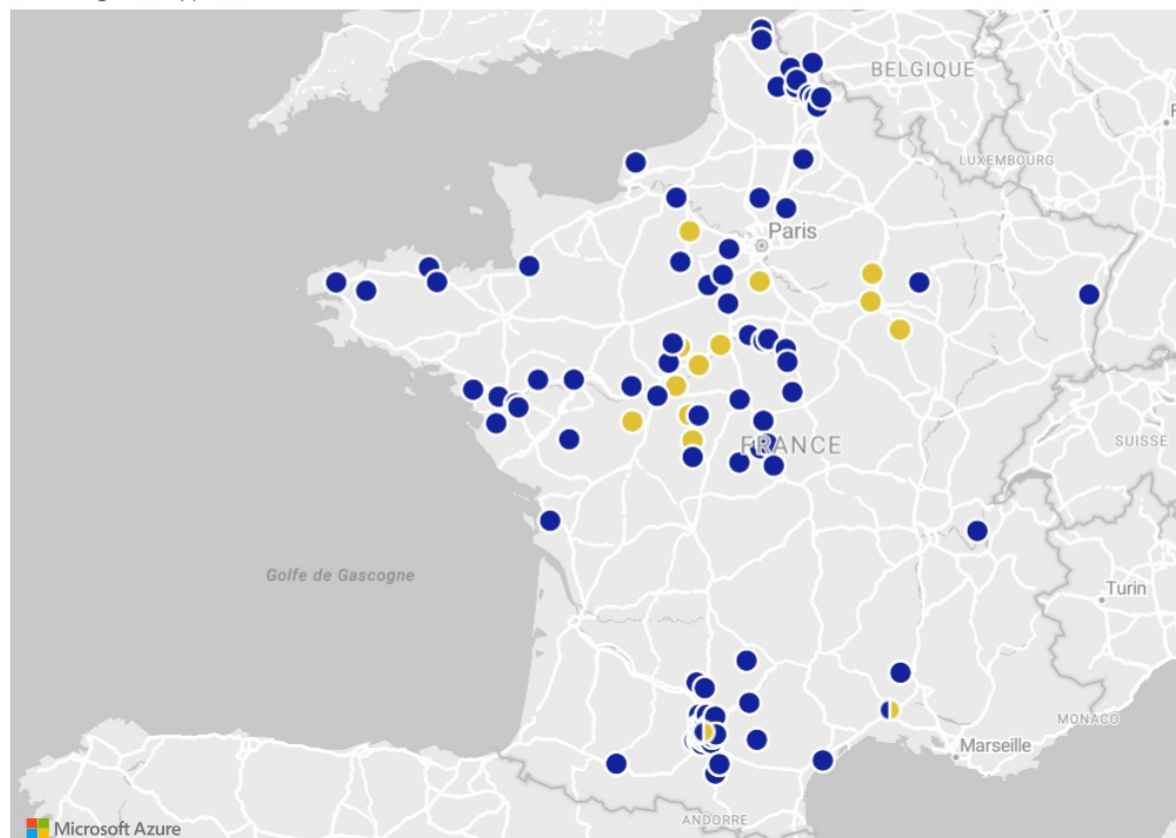
4. Aménagement – VRD

Local technique (rénovation ou création)
Aménagement, terrassement, voirie

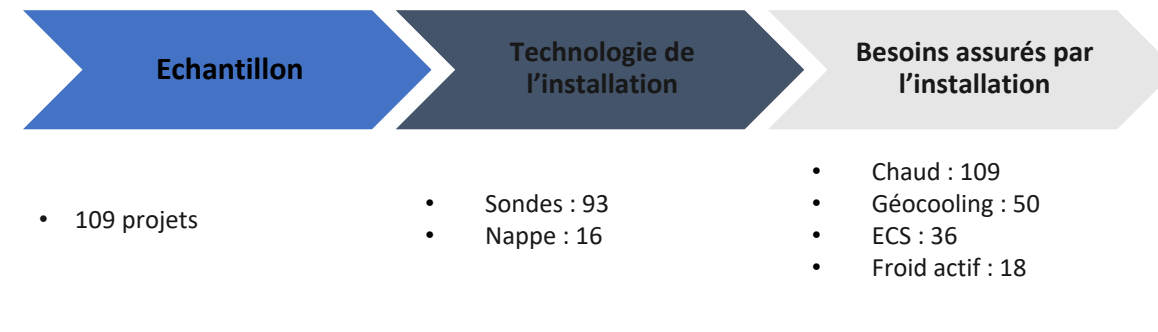
5. Ingénierie

Dossiers d'exécution pour le captage
Dossiers d'exécution pour la production
Dossiers administratifs
Maîtrise d'œuvre

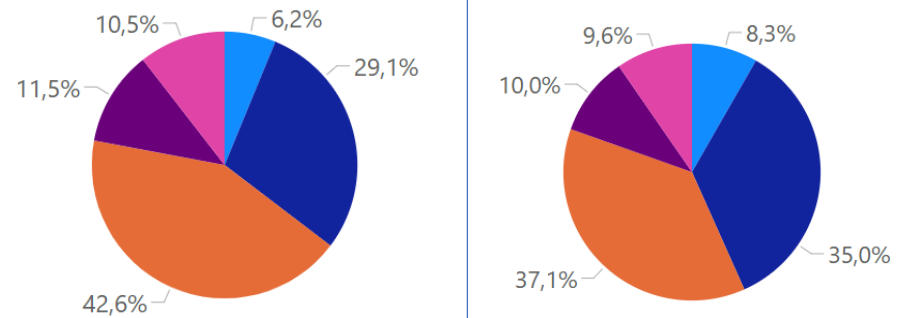
Technologie ● nappe ● sondes



Cartographie des projets traités



02 ETAT DE L'ART



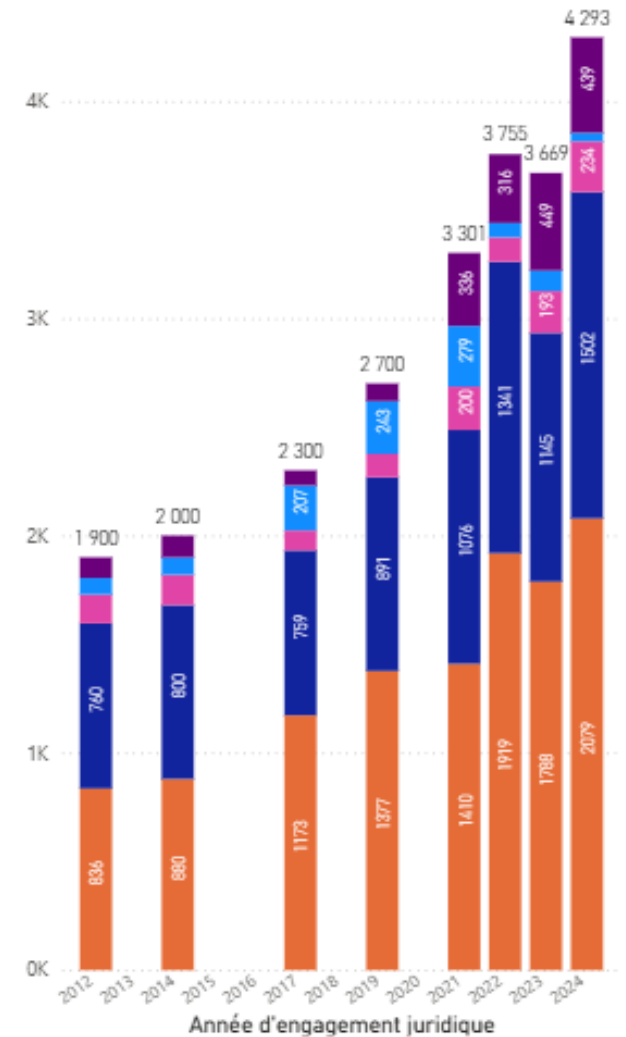
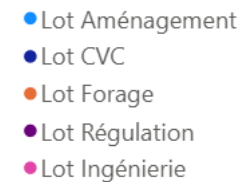
Répartition des coûts entre les différentes postes de dépenses : PAC sur sondes (à gauche), PAC sur nappe (à droite)

- Des coûts “dominés” par 2 postes de dépenses :

a) Le lot Forage

b) Le lot CVC

- Des coûts en constante augmentation sur les dix dernières années pour la majorité des postes de dépenses (avec notamment une hausse de près de 25% entre 2021 et 2024)
- Cette hausse s’explique entre autres par certaines externalités : modification de la réglementation, inflation, hausse des prix de l’énergie et de l’acier et conflit en Ukraine



Evolution des coûts d'investissements (€/kW) sur les dernières années

02 ETAT DE L'ART

Les grandeurs clés qui dictent la filière géothermique :

Technologie	€/MWh EnR	€/MWh produit	€/m ²	€/ml (Lot Forage)	Facteur de charge prévisionnel (%)	SCOP chaud prévisionnel	Surcoût d'un local technique (%)	Surcoût géocooling (€)
Sondes	210,9	162,3	204,7	100	19,8	4,1	+ 8,6	7300
Nappe	125,3	103,4	178,9	x	25,1	4,6	+ 8,6	x

NB :

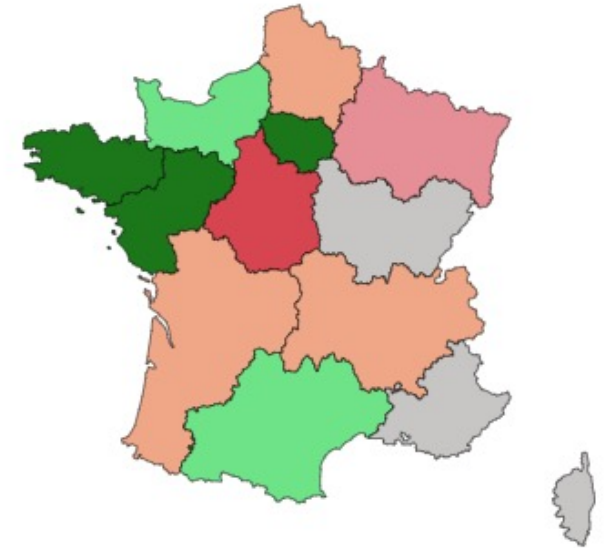
- x : absence de résultat ou grandeurs non significatives
- Le facteur de charge mesure le taux d'utilisation du système géothermique sur l'année

$$\text{Facteur de charge} = \frac{\text{Production de chaud annuel (MWh/an)}}{\text{Puissance calorifique (kW)}} \times \frac{1000}{8760}$$

Coût régional annualisé (€/MWh/20ans) comparé à la moyenne nationale *

PAC sur champs de sondes

- Très faible
- Faible
- Moyen
- Elevé
- Très élevé



* Très faible : < 0,7 x moyenne nationale / Faible : 0,7-0,9 / Moyenne : 0,9 – 1,1 / Elevé : 1,1 – 1,3 / Très élevé : > 1,3

Attention, les coûts régionaux sont à mettre en perspective du nombre de projets analysés par région.

Ils ne sont représentatifs **que pour les régions**:

- Occitanie
- Centre-Val de Loire
- Pays de la Loire
- Hauts-de-France

03 MODÉLISATION

Le captage géothermique : Projets sur sondes

$$\text{Coût Lot Forage (€)} = a \times \text{Longueur totale de sondes (m)} + b \times \text{Nombre de sondes (u)} + \sum_i \delta_i^* (\text{lithologie ou région}) + c$$

a : coût marginal (€/ml)

b : coût un forage supplémentaire (€/forage)

c : coût fixe (€)

δ_i : coût supplémentaire moyen en fonction de caractéristiques lithologiques ou géographiques (€)

* Les δ_i sont présentés dans le rapport de l'ADEME, *Coûts d'investissement réels en géothermie de surface*

Le captage géothermique : Projets sur nappe

Variables explicatives :

- Débit (m^3/h)
- Nombre de puits (u)
- Profondeur des puits (m)

Variable	Coefficients	Erreur standard	p-value*
a	78,7	4.391	0.001
b	2620	1162	0,027
c	1685	5832	0,773

*p-value < 0,05 : significatif ; p-value < 0,1 : marginalement significatif ; p-value > 0,1 : non significatif.

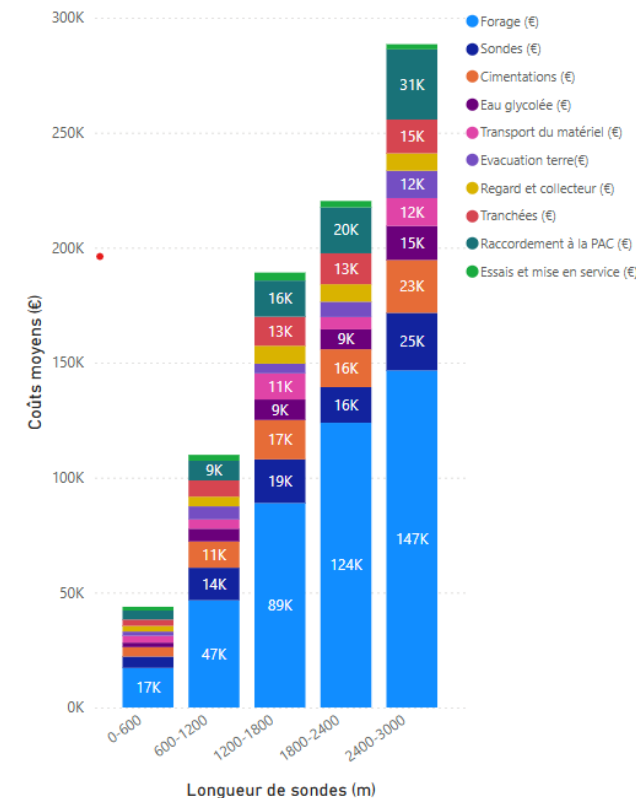
03 MODÉLISATION

Le captage géothermique : Projets sur sondes

$$\text{Coût Lot Forage (€)} = a \times \text{Longueur totale de sondes (m)} + b \times \text{Nombre de sondes (u)} + \sum_i \delta_i (\text{lithologie ou région}) + c$$

Interprétations :

- ☐ Dépendance linéaire avec la longueur de sondes (m)
→ Pas d'effets d'échelles
- ☐ Les coûts fixes identifiables
- ☐ Des impacts de la lithologie ou de la région sur le coût :
 - Le lot Forage en Centre-Val-de-Loire coûte en moyenne 23% de plus qu'en Occitanie
(contre -15% en Pays de la Loire)
 - Sur le coût « Forage et équipements », les sols en alluvions coûtent 20% plus chers que la moyenne nationale, tout comme le sable (en moyenne 11 k€).
Les sols en schistes et grès coûtent en moyenne 17% moins chers.



03 MODÉLISATION

La production (Lot CVC) : toutes technologies confondues

$$\ln(\text{Coût Lot CVC (€)}) = \alpha \ln(P) + \beta_1 U_{\text{géocooling}} + \beta_2 U_{\text{nappe}} + \beta_3 \text{Surface}(m^2) + \beta_4 \text{Nombre de PAC}(u) + b$$

P : Puissance calorifique de la PAC (kW)

$U_{\text{géocooling}}$: 1 si géocooling, 0 sinon

U_{nappe} : 1 si nappe, 0 si sondes

Interprétations :

- ☐ Dépendance logarithmique en la puissance calorifique de la PAC (effet d'échelle)
- ☐ Une augmentation de 10% de la puissance calorifique, augmentera de 6,6% le coût du lot CVC
- ☐ 1 PAC supplémentaire impliquera une augmentation d'n moyenne de 17700 (€)
- ☐ Surface : joue sur le nombre de départs régulés et la taille de l'installation mais peu sur le coût des éléments éligibles au Fonds Chaleur (pas l'émission ni la distribution)
- ☐ Le lot CVC d'un projet sur nappe est en moyenne 13% moins cher que ce même lot pour un projet sur sondes

Variable	Coefficients	Erreur standard	p-value*
b	8.2220	0.222	0.000
α	0.6618	0.066	0.000
β_1	0.0431	0.067	0.525
β_2	-0.1373	0.092	0.150
β_3	0.00002226	0.0000153	0,421
β_4	0.1702	0.057	0.003

A

DIMENSIONNER AU PLUS JUSTE

Le surdimensionnement entraîne un surcoût sur :

- ➔ Le lot CVC (*la PAC notamment*)
(*et par rebond sur le lot Forage*)

Exemple

- Un surdimensionnement de 30% pour passer de 100 à 130kW
- ➔ Surcoût sur la PAC de 20% (10 k€)

Recommandation

- Avoir un nombre d'heures de fonctionnement à puissance nominal compris entre 1800 et 2500 h/an
- Ajouter des appoints (durables) pour assurer les pics d'appel (PAC aérothermiques, épingle électrique, biomasse ou solaire)

B

PRIVILEGIER DES SONDES LONGUES

Pour un mètre linéaire de sondes fixé, il est préférable d'avoir des sondes plus longues, plutôt que plus de sondes

Exemple

- 900 mètres linéaires de sondes
- Situation référence : 7 sondes (89630 €)
- Avec 5 sondes, - **7%** (83400 €)
- ➔ Avec 9 sondes, + **5,5%**

Recommandation

- Quand les contraintes techniques le permettent, privilégier moins de sondes et plus de longueur moyenne par sondes

C

RÉDUIRE LE NOMBRE DE PACS

L'ajout de PAC influence la quantité d'accessoires hydrauliques nécessaires

Exemple

- Ajout d'une PAC
- Surcoût hydraulique de 17700 € en moyenne

Recommandation :

- Quand les contraintes techniques le permettent, limiter le nombre de PAC grâce par exemple à :
 - ❖ PAC à modulation continue
 - ❖ PAC multi-compresseurs (compresseurs multi-étages...)

04 RECOMMANDATIONS

PISTES DE REDUCTION DE COÛTS

A

DIMENSIONNER AU PLUS JUSTE

Le surdimensionnement entraîne un surcoût sur :

➔ Le lot CVC (*la PAC notamment*)
(*et par rebond sur le lot Forage*)

Exemple

- Un surdimensionnement de 30% pour passer 100 à 130 kW

➔ Surcoût sur la PAC de 20% (10 k€)

Recommandation

- Avoir un nombre d'heures de fonctionnement à puissance nominale compris entre 1800 et 2500 h/an
- Ajouter des appoints (durables) pour assurer les pics d'appel de puissance (PAC aérothermiques, épingle électrique, biomasse ou solaire)

B

PRIVILEGIER DES SONDES LONGUES

Pour un mètre linéaire de sondes fixé, il est préférable d'avoir des sondes plus longues, plutôt que plus de sondes

Exemple

- 900 mètres linéaires de sondes
 - Situation référence : 7 sondes (89630 €)
- Avec 5 sondes, - **7%** (83400 €)
- ➔ Avec 9 sondes, + **5,5%**

Recommandation

- Quand les contraintes techniques et réglementaires le permettent, privilégier moins de sondes et plus de longueur moyenne par sondes

C

RÉDUIRE LE NOMBRE DE PACS

L'ajout de PAC influence la quantité d'accessoires hydrauliques nécessaires

Exemple

- Ajout d'une PAC
- Surcoût hydraulique de 17700 € en moyenne

Recommandation :

- Quand les contraintes techniques le permettent, limiter le nombre de PAC grâce par exemple à :
 - ❖ PAC à modulation continue
 - ❖ PAC multi-compresseurs (compresseurs multi-étages...)

04 RECOMMANDATIONS

PISTES DE REDUCTION DE COÛTS

A

DIMENSIONNER AU PLUS JUSTE

Le surdimensionnement entraîne un surcoût sur :

- ➔ Le lot CVC (*la PAC notamment*)
(*et par rebond sur le lot Forage*)

Exemple

- Un surdimensionnement de 30% pour passer 100 à 130kW

- ➔ Surcoût sur la PAC de 20% (10 k€)

Recommandation

- Avoir un nombre d'heures de fonctionnement à puissance nominal compris entre 1800 et 2500 h/an
- Ajouter des appoints (durables) pour assurer les pics d'appel (PAC aérothermiques, épingle électrique, biomasse ou solaire)

B

PRIVILEGIER DES SONDES LONGUES

Pour un mètre linéaire de sondes fixé, il est préférable d'avoir des sondes plus longues, plutôt que plus de sondes

Exemple

- 900 mètres linéaires de sondes
- Situation référence : 7 sondes (89630 €)
- Avec 5 sondes, - **7%** (83400 €)
- ➔ Avec 9 sondes, + **5,5%**

➔ Recommandation

- Quand les contraintes techniques le permettent, privilégier moins de sondes et plus de longueur moyenne par sondes

C

RÉDUIRE LE NOMBRE DE PACS

L'ajout de PAC influence la quantité d'accessoires hydrauliques nécessaires

Exemple

- Ajout d'une PAC
- Surcoût hydraulique de 17700 € en moyenne

Recommandation :

- Quand les contraintes techniques le permettent, limiter le nombre de PAC grâce à :
 - ❖ PAC à modulation continue
 - ❖ PAC multi-compresseurs (compresseurs multi-étages...)

D

VÉRIFIER L'INTÉRÊT DE L'ANTIGEL

Coût de l'eau glycolée : 6,2 €/mL
(Soit environ 6% du coût du lot Forage)

Recommandation

Ne pas mettre de glycol (et privilégier l'eau simple) pour alléger les coûts

Attention : Cela n'est efficace que si l'augmentation du linéaire associé à l'absence d'antigel reste inférieure à 6%

E

PARTAGER LES DONNÉES

Données de coûts peu documentées et transparentes

Recommandation

- Poursuivre les études de coûts et les diffuser à toutes les parties prenantes

Cela permet une :

- 1) Réduction de la variabilité
- 2) Transparence et apprentissage

F

MASSIFIER ET INDUSTRIALISER

Manque d'acteurs pour assurer la demande

Exemple :

- Les pays nordiques
- En Suède, les coûts de forage sont 40% inférieurs à la France *(même si la législation n'est pas la même, il y'a sans doute des choses à faire)*

Recommandation

- Développer la filière forage (formations...)
- De même pour les installateurs de PAC
- Industrialiser les processus

04 RECOMMANDATIONS

PISTES DE REDUCTION DE COÛTS

04 RECOMMANDATIONS

PISTES DE REDUCTION DE COÛTS

D

VÉRIFIER L'INTÉRÊT DE L'ANTIGEL

Coût de l'eau glycolée : 6,2 €/mL
(Soit environ 6% du coût du lot Forage)

Recommandation

Ne pas mettre de glycol (et privilégier l'eau simple)
pour alléger les coûts

Attention : Cela n'est efficace que si l'augmentation du
linéaire associé à l'absence d'antigel reste inférieure à 6%

E

PARTAGER LES DONNÉES

Données de coûts peu documentées et
transparentes

Recommandation

- Poursuivre les études de coûts et les diffuser à
toutes les parties prenantes

Cela permet une :

- 1) Réduction de la variabilité
- 2) Transparence et apprentissage

F

MASSIFIER ET INDUSTRIALISER

Manque d'acteurs pour assurer la demande

Exemple :

- Les pays nordiques
- En Suède, les coûts de forage sont 40% inférieurs
à la France *(même si la législation n'est pas la même, il y'a sans
doute des choses à faire)*

Recommandation

- Développer la filière forage (formations...)
- De même pour les installateurs de PAC
- Industrialiser les processus

04 RECOMMANDATIONS

PISTES DE REDUCTION DE COÛTS

D

VÉRIFIER L'INTÉRÊT DE L'ANTIGEL

Coût de l'eau glycolée : 6,2 €/mL
(Soit environ 6% du coût du lot Forage)

Recommandation

Ne pas mettre de glycol (et privilégier l'eau simple)
pour alléger les coûts

Attention : Cela n'est efficace que si l'augmentation du
linéaire associé à l'absence d'antigel reste inférieure à 6%

E

PARTAGER LES DONNÉES

Données de coûts peu documentées et
transparentes

Recommandation

- Poursuivre les études de coûts et les diffuser à
toutes les parties prenantes

Cela permet une :

- 1) Réduction de la variabilité
- 2) Transparence et apprentissage

F

MASSIFIER ET INDUSTRIALISER

Manque d'acteurs pour assurer la demande

Exemple :

- Les pays nordiques
- En Suède, les coûts de forage sont 40% inférieurs
à la France (même si la législation n'est pas la même, il y'a sans
doute des choses à faire)

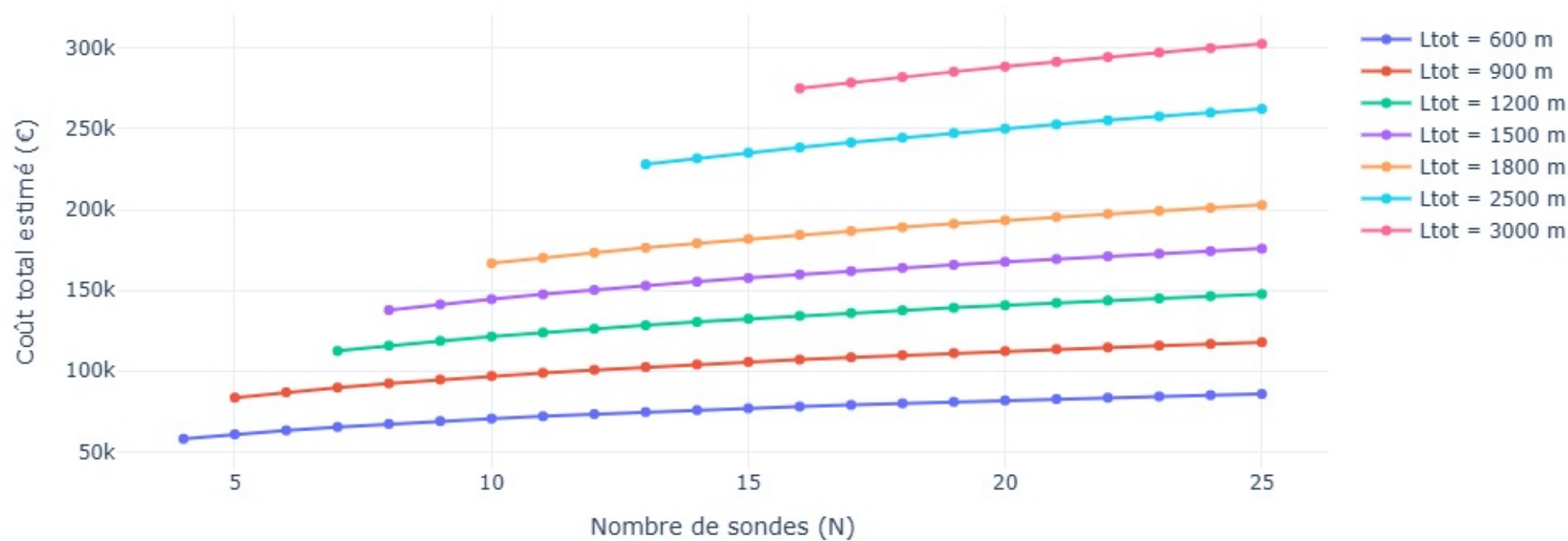
Recommandation

- Développer la filière forage (formations...)
- De même pour les installateurs de PAC
- Industrialiser les processus

Merci

ANNEXE

(Modèle : $\ln(\text{Coût sous-sol (€)}) = 5.65 + 1.00 \ln(\text{Sondes (u)}) + 0.78 \ln(\text{Longueur d'une sonde (m)})$)



Coût du sous-sol en fonction du nombre de sondes pour une longue unitaire de sondes inférieure à 200 mètres

ANNEXE

DÉTAILS DES ÉLÉMENTS TECHNIQUES ET DE COÛTS

Informations générales		
Code Fonds Chaleur *	Département *	Technologie *
Année du projet *	Commune *	Besoins *
Nature du projet	Longitude (°)	Type de PAC
Porteur du projet	Latitude (°)	Nombre de PAC
Type de porteur du projet		
Type de bâtiment		
Surface concernée (m²) *		

Forage sur sondes	Forage sur nappe	Forage global
Nombre de sondes (u) *	Technique de foration *	Transport du matériel de forage (€)
Longueur d'une sonde (m) *	Débit extrait (m³/h) *	Evacuation/ stockage terre(€)
	Nombre de puits (u) *	Ensemble regard et collecteur (€)
Forage (€)	Profondeur totale des puits (m) *	Tranchées (€)
Sondes (€)	Diamètre des forages (mm) *	Raccordement à la PAC (€)
Cimentations (€)		Essais et mise en service sous-sol (€)
Remplissage d'eau glycolée (€)	Puits et équipements (€)	Coûts additionnels sous-sol (€)
	Pompe de relevage (€)	Sous-sol non détaillé (€)
	Traitement de l'eau (€)	
	Echangeur de barrage (€)	

* Champs essentiels à l'analyse technique

ANNEXE

DÉTAILS DES ÉLÉMENTS TECHNIQUES ET DE COÛTS

Lot CVC		
<i>Besoin en chaud</i>	<i>Besoin en froid actif</i>	<i>Besoin en géocooling</i>
Puissance calorifique (kW)	Puissance frigorifique (kW)	Production par géocooling (MWh/an)
Production chaleur EnR (MWh/an)	Production froid actif EnR (MWh/an)	SEER (géocooling)
Production calorifique de la PAC (MWh/an)	Production frigorifique de la PAC (MWh/an)	Taux de couverture géocooling (%)
SCOP	SEER (froid actif)	
Taux de couverture chaud (%)	Taux de couverture froid actif (%)	
<i>PAC et pompes</i>	<i>Panoplie hydraulique</i>	<i>Coûts autres</i>
Fourniture et pose d'une PAC (€)	Accessoires hydrauliques (€)	Essais et mise en service CVC (€)
Circulateur primaire (€)	Tuyauterie et raccordement hydraulique (€)	Coûts additionnels hors-sol (€)
Circulateur secondaire (€)	Ballon tampon (€)	PH non détaillée (€)
	ECS - équipements (€)	CVC non détaillé (€)
	Géocooling - équipements (€)	

Régulation
Armoire de pilotage/régulation, GTB, alimentation électrique (€)
Appareils de mesure (€)
Aménagement
Aménagement sous-sol (€)
Aménagement hors-sol (€)
Bâtiment/Local technique (€)
Ingénierie
MOE (€)
Etudes forage (€)
Etudes CVC (€)
Appoint
Production globale de l'appoint (MWh/an)
Utilité de l'appoint
Puissance de l'appoint (kW)
Type d'équipement de production d'appoint

* Champs essentiels à l'analyse technique