

ANNEXE 6 : NOTE DETAILLANT LA CREATION DU MODELE FEFLOW UTILISE POUR MODELISER LES IMPACTS DE L'EXPLOITATION

Installation de géothermie

Le système de géothermie sera amené à produire de l'énergie par l'intermédiaire d'une pompe à chaleur dans le local chaufferie générale et à mettre en œuvre 1 doublet de forage géothermique sur la nappe du Champigny.

Le scénario de géothermie retenu est un scénario avec un débit maximal de 80 m³/h via la réalisation de 1 doublet de forage sur la nappe du Champigny permettant de couvrir 78% des besoins en chaud du projet.

Remarque :

Les besoins en froid du projet seront également couverts par la géothermie mais ces derniers sont minimes par rapport aux besoins en chaud et n'auront pas d'impact dans les modélisations numériques.

Les forages seront donc reliés par le biais d'un réseau étanche au local géothermie dans lequel sera situé l'échangeur géothermie faisant le lien avec la pompe à chaleur. Une fois passée au travers de l'échangeur à plaque, les eaux pompées seront acheminées au forage d'injection par l'intermédiaire de canalisations de rejet et étanches.

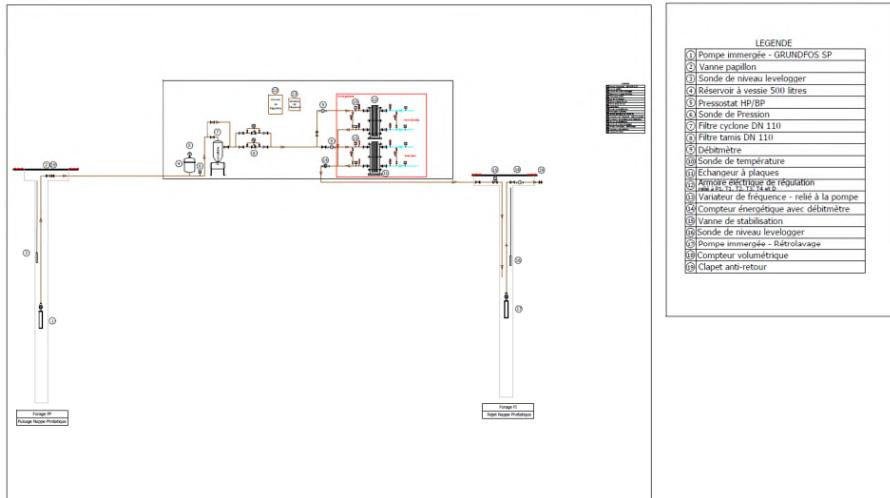
Le fluide frigorigène qui sera privilégié dans les échangeurs sera de type R1234ze. A défaut, si ce fluide n'est pas disponible pour les PAC prévues, le fluide sera soit du R454B ou de R410A.]

Commenté [PO1]: À confirmer avec ICPE

Par ailleurs, les liaisons hydrauliques entre les différents organes reliant les forages aux locaux techniques seront assurées par des canalisations en PEHD.

Enfin, les liaisons électriques seront situées dans des fourreaux électriques. Les câbles de basses intensités seront séparés des câbles de haute intensité de manière à éviter toutes interférences entre eux.

Il est possible que des fines soient présentes dans les fissures du Champigny. Les opérations de développement des forages permettront dans un premier temps d'en éliminer un maximum. Il reste néanmoins possible que durant la phase d'exploitation, des fines soient libérées dans la nappe (i.e. phénomène de débourrage) provenant des fissures éloignées dans l'aquifère. Ainsi, diverses filtrations seront effectuées en amont des échangeurs. Ces filtrations sont présentées sur le synoptique ci-dessous :



(1) Plan synoptique de l'installation de géothermie avec 1 doublet de forage

Forage de production

Les principales caractéristiques du/des forages de production sont les suivantes :

- Forage au Rotary-boue Ø 610 mm entre 0 et 24 m de profondeur,
- Pose et cimentation du tube acier Ø 508 mm jusqu'à 24 m de profondeur,
- Foration en Ø 445 mm entre 24 et 72 m de profondeur,
- Pose d'un tube plein INOX Ø 323 mm entre 22 et 35 m de profondeur,
- Pose d'une crépine INOX fil enroulé (slot 2 mm) Ø 323 mm entre 35 et 71 m.
- Pose de 1 m de tube plein en fonds de forage afin de servir de tube décanteur.
- Massif filtrant de 24 à 72 m, constitué de graviers de granulométrie adaptée au slot des crépines (4 à 8 mm).

Le ou les forages de production seront ensuite équipés comme suit :

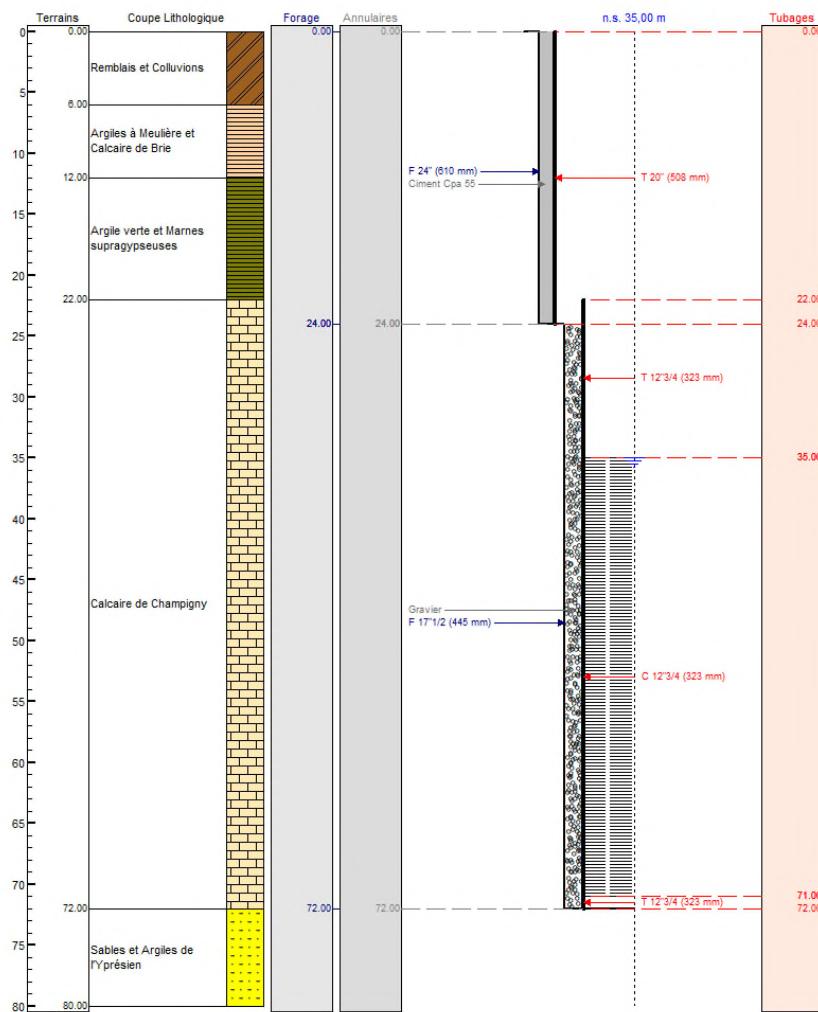
- Mise en place d'une pompe de production immergée à 50 m de profondeur par rapport au terrain naturel ;
- La pompe de forage devra être capable de fournir le débit nominal de 80 m³/h.

Afin d'optimiser le fonctionnement et la pérennité de la pompe immergée de production, des équipements annexes devront être mis en œuvre :

- Une tête de forage INOX 304L étanche composée d'une bride PN 16 percée et boulonnée sur la bride précédente ;

- Une sonde de pression 4-20 mA, tension minimum 6V avec un câble blindé, 1 boitier de dérivation étanche mis en place dans la chambre du forage et renvoi de lecture via la sous-station la plus proche vers l'automate général de l'installation ;
- Un variateur de fréquence permettant de travailler sur une variation de fréquence allant de 30 à 50 Hz.

La coupe technique du forage de production est illustrée ci-dessous et est présentée en **Annexe 1**.



(2) Coupe géologique et technique des forages à réaliser pour un débit de 80 m³/h par forage

Forages d'injection

Le ou les forages d'injection seront réalisés selon la méthodologie suivante :

- *Forage au Rotary-boue Ø 610 mm entre 0 et 24 m de profondeur,*
- *Pose et cimentation du tube acier Ø 508 mm jusqu'à 24 m de profondeur,*
- *Foration en Ø 445 mm entre 24 et 72 m de profondeur,*
- *Pose d'un tube plein INOX Ø 323 mm entre 22 et 35 m de profondeur,*
- *Pose d'une crêpine INOX fil enroulé (slot 2 mm) Ø 323 mm entre 35 et 71 m.*
- *Pose de 1 m de tube plein en fonds de forage afin de servir de tube décanteur.*
- *Massif filtrant de 24 à 72 m, constitué de graviers de granulométrie adaptée au slot des crêpines (4 à 8 mm).*

Les forages d'injection seront équipés de la manière suivante :

- *Une tête de forage INOX 304L étanche composée d'une bride PN 16 percée et boulonnée sur la bride précédente ;*
- *Une colonne de rejet DN80 PN 16 – tube en INOX 304 avec raccord de type ZSM, en éléments de 1,5 m ;*
- *Un dispositif de rétro-lavage descendu en pied de colonne de rejet et équipé d'une vanne motorisée permettant de passer du mode injection au mode rétro-lavage ;*
- *Une vanne hydraulique de stabilisation ;*
- *Une sonde de pression 4-20 mA, tension minimum 6V avec un câble blindé, raccordement dans le boîtier de dérivation étanche mis en place dans la chambre du forage et renvoi de lecture vers l'automate général.*

La coupe technique et géologique des forages d'injection est la même que celle du forage de production, seul les équipements associés aux forages seront différents.

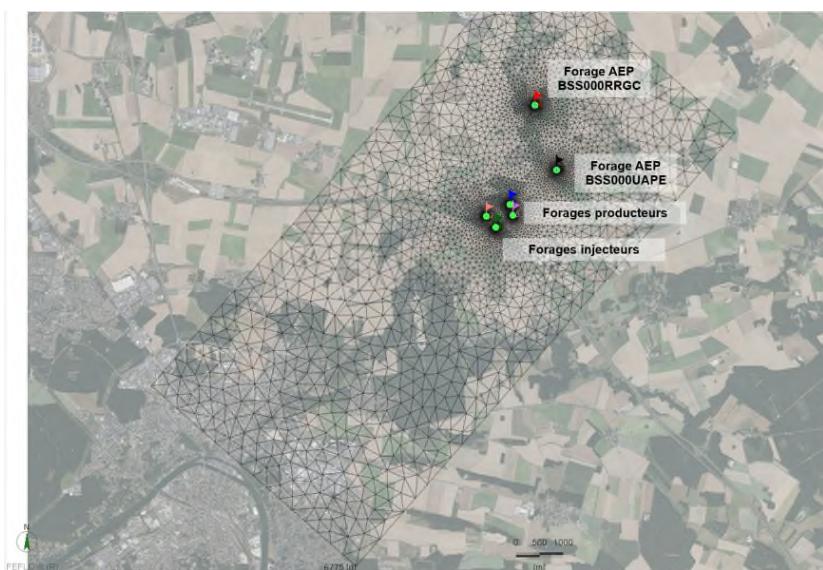
Structure du modèle

L'élaboration du modèle d'écoulement nécessite de délimiter le domaine d'étude, dans lequel seront distribuées les caractéristiques hydrodynamiques et thermiques de l'aquifère et des couches géologiques sus et sous-jacentes.

Le modèle du projet est divisé en 29 couches et s'étend sur une superficie de plus de 70 km², pour un volume de plus de 7532 millions de mètres cubes. Chaque plan du modèle présente un maillage triangulaire irrégulier de plus de 10 926 272 mailles. Ce maillage est localement densifié à proximité du projet et des ouvrages de géothermie.

L'orientation du modèle est définie du Nord-Est vers le Sud-Ouest selon le sens d'écoulement au droit du site d'étude. Les deux forages AEP les plus proche et situés en amont hydraulique du projet (BSS000UAPE et BSS000RRGC) ont été pris en compte dans les modélisations 3D.

A noter que l'ARS nous a fait un retour après la réalisation des modèles. Le captage AEP BSS000RRGC a été abandonné et n'est plus exploité de nos jours. Il n'y aura donc pas d'impact sur ce dernier par l'installation géothermique et inversement.



(3) *Maillage du modèle réalisé sous logiciel FEFLOW*

Dans le détail, les couches lithologiques suivantes ont été modélisées :

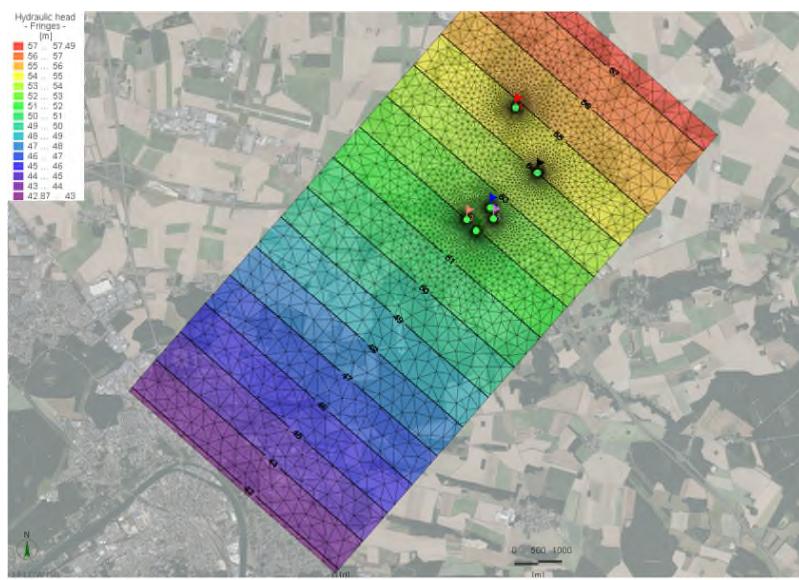
(4) Succession lithologique modélisée par couches

Formation	Cote du toit (m NGF)	Epaisseur (m)	Nombre de couches modélisées
Remblais + Colluvions	+87	6	2
Argiles à Meulière et Calcaire de Brie	+81	6	3
Argiles Vertes et Marnes supragypseuses	+75	10	4
Calcaire de Champigny non productif	+65	40	10
Calcaire de Champigny productif	+25	10	4
Sables et Argiles de l'Yprésien	+15	35	5

a. Paramétrage et calage hydrodynamique et thermique du modèle

- Type de nappe : Libre
- Type de calcul : Transitoire ;
- Tolérance sur l'erreur : Euclidien L2 intégrale (RMS) ;
- Équation de transport : Convective.
- Conditions initiales et aux limites de la nappe :
 - Charge imposée en amont : + 57,49 m NGF ;
 - Charge imposée en aval : + 42,87 m NGF ;
 - Gradient hydraulique : 0,13 % ;
 - Température initiale de la nappe : 12,5 °C.

Le calage piézométrique du modèle est ensuite lancé jusqu'à stabilisation des isopièzes de la nappe :



(5) Calage piézométrique du modèle FEFLOW

- Définition des caractéristiques hydrodynamiques et thermiques :**

D'après nos données internes, les ouvrages captant la nappe du Champigny dans un secteur équivalent à la zone d'étude sont recensés dans le tableau suivant avec leur paramètre hydrodynamique retenu :

(6) *Synthèse des caractéristiques hydrogéologique de la nappe du Champigny (STRATEGEO)*

Ouvrage	Distance au site	Ø (mm)	Débit (m ³ /h)	Rabattement (m)	Epaisseur captée (m)	Débit spécifique (m ³ /h/m)	Transmissivité (m ² /s)	Perméabilité (m/s)
BSS000UAPH	1,6 km	160	22	8,65	36,5	2,5	7,06.10 ⁻⁴	1,94.10 ⁻⁵
BSS000UAPJ	1,9 km	320	105	1,44	25	72,9	2,03.10 ⁻²	8,10.10 ⁻⁴
BSS000UAPG	4,3 km		83	2,56	25,7	32,4	9,01.10 ⁻³	3,50.10 ⁻⁴
BSS000RRJQ	4,4 km	273	115	5,55	19,75	20,7	5,76.10 ⁻³	2,91.10 ⁻⁴
BSS000UARP	5,5 km		10	1,4	69,35	7,1	1,98.10 ⁻³	2,86.10 ⁻⁵
Moyenne géométrique						15,5	4,30.10⁻³	1,36.10⁻⁴
Médiane						20,7	5,76.10⁻³	2,91.10⁻⁴

Ainsi, la nappe du Champigny montre une bonne productivité dans le secteur. Dans le cadre de nos modèles, il sera retenu une transmissivité de $5,3.10^{-3}$ m²/s.

Les paramètres hydrodynamiques et thermiques sont implantés de la manière suivante :

(7) *Tableau de répartition des paramètres hydrothermiques des couches géologiques*

Formation	Perméabilité horizontale Kh	Perméabilité verticale Kv	Porosité	Conductivité thermique	Capacité calorifique
Remblais + Colluvions	5.10^{-6} m/s	5.10^{-6} m/s	5 %	2,5 W/m/K	2,2 MJ/m ³ /K
Argiles à Meulière et Calcaire de Brie	5.10^{-6} m/s	5.10^{-6} m/s	5 %	2,2 W/m/K	2,3 MJ/m ³ /K
Argiles Vertes et Marnes supragypseuses	1.10^{-7} m/s	1.10^{-7} m/s	2 %	1,9 W/m/K	2,3 MJ/m ³ /K
Calcaire de Champigny non productif	$7,5.10^{-5}$ m/s	$3,75.10^{-5}$ m/s	3 %	2,3 W/m/K	2,3 MJ/m ³ /K
Calcaire de Champigny productif	3.10^{-4} m/s	$1,5.10^{-4}$ m/s	5%	2,3 W/m/K	2,3 MJ/m ³ /K
Sables et Argiles de l'Yprésien	5.10^{-5} m/s	$1,67.10^{-5}$ m/s	2%	2,3 W/m/K	2,2 MJ/m ³ /K

- Paramètres temporels :**

- *Temps de modélisation : 30 ans ;*
- *Période de chauffage sur une année : environ 365 jours*

Scénario de géothermie

Le scénario de géothermie retenu est un scénario avec un débit maximal de 80 m³/h via la réalisation de 1 doublet de forage sur la nappe du Champigny.

Remarque :

Les besoins en froid du projet seront également couverts par la géothermie mais ces derniers sont minimes par rapport aux besoins en chaud et n'auront pas d'impact dans les modélisations numériques.

Dans le cadre de la modélisation, le sens d'écoulement a été retenu nord-est/sud-ouest. L'installation comprend 2 forages distants d'environ 560 m minimum entre le forage injecteur et le forage producteur.

La modélisation a été réalisée à un débit max d'exploitation de 80 m³/h.

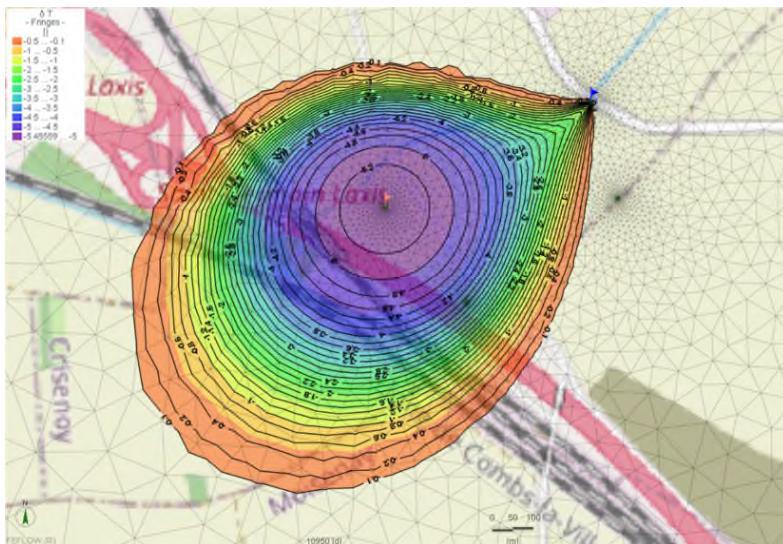
Pour rappel, le scénario 2 d'exploitation géothermique défini sur la nappe Champigny est le suivant :

(1) *Couverture énergétique du scénario de base à 80 m³/h*

Scénario	Mode	Côté bâtiment*		Côté sous-sol**		Débit de pointe par forage	Nombre de forages
		Puissance couverte P bâtiment	Energie couverte E bâtiment	Puissance couverte P géothermique	Energie couverte E géothermique		
Scénario de base Couverture de 78% des besoins de chaud	Chaud	*	*	464 kW	3269 MWh/an	80 m ³ /h	1 forage producteur et 1 forage injecteur

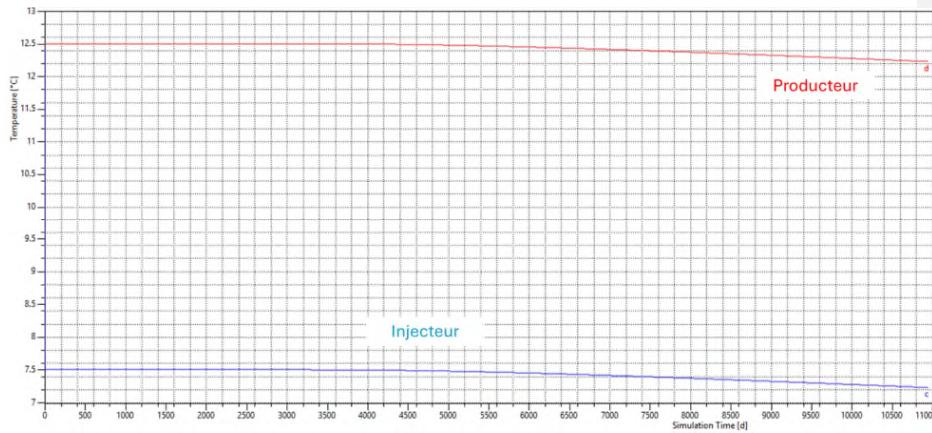
*Puissance et Energie couverte côté bâtiment à définir en fonction du COP/EER de la PAC retenue

**Hypothèse de calcul : ΔT = -5°C



(2) *Extension du panache thermique après 30 ans d'exploitation (affiché en ΔT)*

Le forage producteur présente un léger recyclage thermique avec une diminution de -0,3°C, ce qui reste toutefois acceptable après 30 ans d'exploitation.



(3) Evolution de la température moyenne modélisée

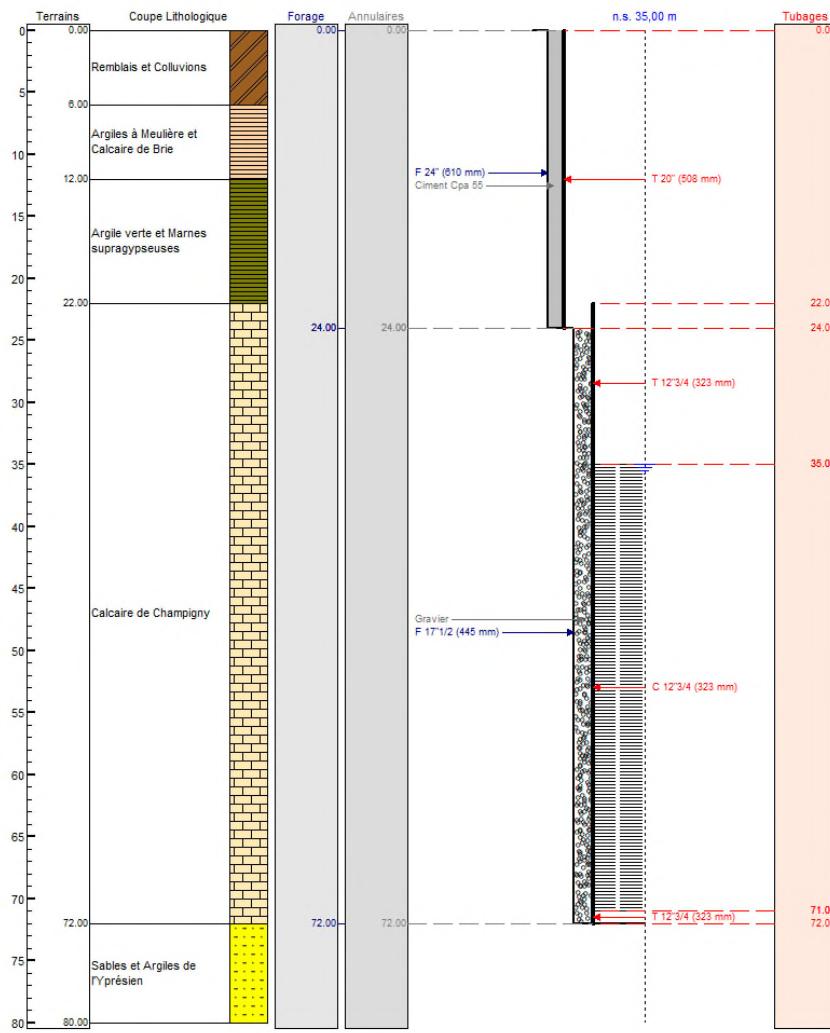
Remarque :

Pour rappel, seule une phase de reconnaissance permettra de déterminer précisément le sens d'écoulement et le gradient hydraulique de la nappe, toutefois la valeur de gradient étudiée semble permettre l'exploitation pérenne sur la base du scenario énergétique défini.

En conclusion, compte tenu du contexte hydrogéologique, il est possible d'envisager de satisfaire 78 % des besoins en chaud avec un débit de 80 m³/h et un recyclage thermique acceptable après 30 ans d'exploitation, avec une installation captant la nappe du Champigny.

La mise en place de ce scénario nécessite la réalisation de 2 forages (1 forage producteur et 1 forage injecteur).

ANNEXE 1 : COUPE PREVISIONNELLE DES FORAGES



(4) Coupe prévisionnelle des forages