

COUFOR

Étude des coûts relatifs aux travaux de forage en géothermie de surface

Rapport final

Décembre 2019

Étude réalisée dans le cadre des projets
de Service public du BRGM
et de la convention ADEME-BRGM 1805C0054

P. Monnot (BRGM)

Vérificateur :

Nom : A. Gutierrez

Date : 30/03/2020

Signature :



Approbateur :

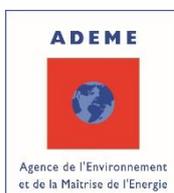
Nom : B. Sanjuan

Date : 01/04/2020

Signature :



En l'absence de signature, notamment pour les rapports diffusés en version numérique,
l'original signé est disponible aux Archives du BRGM.
Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2000.



Avertissement

*Ce rapport est adressé en recommandé avec accusé de réception, en communication exclusive au demandeur : **ADEME**, en 2 exemplaires conformément au cahier des charges.*

Le tirage initial de ce rapport, en nombre fixé par convention, est diffusé à son commanditaire. Sa communicabilité ultérieure à des tiers est liée à la prise d'une décision administrative formelle à laquelle il concourt, conformément à la loi n° 78-753 du 17 juillet 1978.

*Passé ce délai, ce rapport devient communicable à tout tiers extérieur qui en ferait la demande ; le **BRGM** ne peut plus être tenu comme responsable de l'usage qui pourrait en être fait et des éventuelles conséquences pouvant en résulter.*

Mots clés : Géothermie, Très basse énergie, Normalisation, Europe, Forage

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

Monnot P. - Décembre 2019. - COUFOR - Étude des coûts relatifs aux travaux de forage en géothermie de surface – BRGM/RP-68724-FR - Rapport final. 75 pages, 32 figures, 30 tableaux.

© BRGM, 2019, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Les coûts des travaux de forage en géothermie de faible profondeur (0-200 m), dite « géothermie de surface » ou « très basse énergie », sont très variables d'une opération à l'autre et dépendent des types de réalisation et de leur contexte. À travers les expertises AQUAPAC¹ que mène le BRGM, il ressort que les coûts de forage annoncés par le maître d'ouvrage sont souvent au-dessus des corrélations issues de l'analyse des dossiers. Il s'avère difficile d'expliquer ces anomalies de coût, compte-tenu des spécificités de chaque étude.

Pour apporter des éléments d'explication, la présente étude, effectuée dans le cadre de la convention de financement ADEME-BRGM 1805C0054, vise à réaliser une analyse plus fine sur un échantillon représentatif de dossiers AQUAPAC, permettant de comparer les coûts totaux et leur décomposition relative aux différents postes de la réalisation du forage. L'objectif est d'identifier les principaux postes qui peuvent impliquer des écarts de coût pour la zone Île-de-France (IDF) et en dehors de cette zone, et d'en expliquer la cause (géographie, géologie, technique). La comparaison des dossiers AQUAPAC avec des dossiers Fonds Chaleur, initialement prévue, n'a pas pu être menée, en raison du nombre de dossiers insuffisant et de leur contenu (relevé de dépenses d'investissement), difficilement comparable avec la base de données AQUAPAC. Cette approche nécessiterait un travail conséquent de mise en conformité des deux bases de données.

Pour mener l'analyse des coûts à partir des données AQUAPAC, le BRGM a procédé en deux étapes :

- la première étape a été de se focaliser sur les **montants de garantie** accordés par le comité AQUAPAC (période 2000 – 2019), ce qui représente un échantillon de 175 dossiers. Ces montants (plafonnés à 140 K€) couvrent le coût total pour la réalisation d'un forage de reconnaissance. Ils ont été mis en relation avec plusieurs facteurs impactant le coût de la réalisation du forage : le secteur géographique (en distinguant les forages réalisés en IDF des autres régions en France), la géologie, la profondeur de foration et le débit garanti. Le diamètre n'a pas été pris en compte, à ce stade, car ce paramètre n'est pas renseigné dans la base de données AQUAPAC (il a été pris en compte dans de cadre de l'analyse détaillée des postes de dépense menée en deuxième approche) :
 - il ressort de l'analyse menée par *secteur géographique* une grande disparité du nombre des dossiers en fonction des régions (51 % des dossiers concerne l'IDF) et une grande disparité des montants garantis suivant les différentes régions. La région IDF présente les montants garantis les plus élevés (moyenne : 78 k€). Le montant moyen garanti dans les régions situées hors IDF varie entre 27 et 57 k€, avec des valeurs généralement proches de 40 - 45 k€. Malgré une certaine disparité des valeurs, la répartition globale des montants de garantie par région et en fonction de la profondeur montre une cohérence et permettra d'orienter les futures demandes de garantie de recherche AQUAPAC,
 - l'analyse menée sur les montants de garantie en fonction de la *géologie* montre que l'ordre de grandeur du montant de garantie moyen est assez bien contraint pour les calcaires, la craie et les sables (~65 k€ +/- 5 k€). Il est, en revanche, inférieur pour les alluvions (37 k€). Les valeurs maximales peuvent être mises en relation avec des

¹ La procédure AQUAPAC, initiée par un protocole d'accord signé entre l'ADEME, EDF et le BRGM le 23 novembre 1983, propose aux maîtres d'ouvrage, qui souhaitent réaliser une opération de géothermie de très basse énergie sur aquifère superficiel, une double garantie portant sur la présence puis sur la pérennité de la ressource en eau souterraine nécessaire au bon fonctionnement de leur installation. Il s'agit de la garantie « recherche » et de la garantie « pérennité ». Le montant de la garantie « recherche » couvre le coût du premier forage (forage de reconnaissance).

techniques de foration ou d'équipement spécifiques en fonction de la géologie. Elles sont les plus élevées dans la craie (ce qui peut être expliqué par la présence de cavités), puis dans les sables et les alluvions (ce qui peut s'expliquer par les spécificités des techniques de forage avec tubage à l'avancement), puis dans les calcaires (présence de fissures),

- l'analyse des montants de garantie en fonction de la *profondeur* met en évidence une grande disparité des valeurs minimales et maximales. Elle peut s'expliquer par le fait que le montant de garantie intègre des postes dont le coût ne dépend pas de la profondeur forée : amenée – repli, tests hydrauliques, analyse d'eau, maîtrise d'œuvre. Les montants de garantie moyens suivent, par contre, une augmentation logique avec la profondeur pour les profondeurs comprises entre 40 m et 100 m (ce qui représente l'intervalle le mieux renseigné),
 - l'analyse des montants de garantie en fonction du *débit* met en évidence qu'environ 80 % des dossiers de la base AQUAPAC concernent des débits compris entre 10 et 60 m³/h. On observe une augmentation du montant de garantie moyen en fonction du débit. On observe la même tendance pour les montants de garantie minimums, ce qui n'est pas le cas pour les montants de garantie maximums (le pic se situe dans la classe de débit 31 - 60 m³/h). Cela peut s'expliquer par les spécificités de certaines opérations qui vont intégrer un coût élevé de postes qui ne dépendent pas du débit : amenée-repli, maîtrise d'œuvre ;
- la deuxième étape a été de se focaliser sur les **postes de dépenses** pour la réalisation d'un forage de reconnaissance. Chaque poste représente un coût prévisionnel déclaré par le pétitionnaire au comité AQUAPAC, qui mène ensuite son analyse pour en déterminer le montant de garantie. L'objectif était d'expliquer les écarts de coûts de chaque poste en fonction de la nature du sous-sol, de la profondeur, du diamètre foré, de l'équipement du forage et des essais réalisés sur site. L'analyse a été menée sur un échantillon de 38 dossiers AQUAPAC (période 2014 – 2019). Une distinction a été faite sur la région Île-de-France, qui comprend le plus grand nombre de dossiers AQUAPAC (20 %), puis sur les régions hors Île-de-France. L'analyse a été menée en quatre phases : sur les **coûts totaux**, sur les coûts de **foration et de l'équipement** exclusivement, sur l'**anomalie des coûts**, sur les **relations** entre le coût de chaque poste de dépense et la profondeur, le diamètre ou le débit :
- il ressort de l'analyse menée sur les *coûts totaux* qu'ils peuvent varier du simple au double pour un même diamètre de foration de l'aquifère cible. Cela peut s'expliquer par l'utilisation de différents diamètres de foration en cas de forages télescopiques, par le recours aux forages réalisés pour lesquels le coût du forage peut pratiquement doubler parce qu'on a utilisé un premier diamètre pour forer, puis un deuxième pour élargir. Cela peut également s'expliquer par le type de matériau utilisé pour la colonne captante (inox 304 L, PVC) ou par une hauteur crépinée plus ou moins importante impliquant une complétion du forage spécifique. La nature du massif filtrant (gravier, billes de verre) n'est pas précisée dans les dossiers AQUAPAC. On s'attendait à avoir une meilleure relation entre les coûts totaux et le diamètre, car le diamètre est lié au débit et la relation entre coût et débit sur les valeurs moyennes est assez nette. Cela signifie également qu'un élément de disparité supplémentaire est lié à l'inadéquation entre le diamètre de l'ouvrage et le débit. Ces variations de coût peuvent également s'expliquer par les postes, qui ne dépendent pas de la profondeur et du diamètre : amenée-repli, analyse d'eau, tests hydrauliques, maîtrise d'œuvre et tarifs de la société de forage qui intègrent encore d'autres critères. Les diamètres les plus couramment utilisés dans les calcaires sont le 311 mm ou le 375 mm. Ces deux diamètres sont également les plus utilisés dans la craie. La fourchette des coûts totaux est plus basse pour le diamètre 375 mm que celle pour le diamètre 311 mm dans les calcaires et la craie, ce qui signifie que pour ces deux formations géologiques, le diamètre ne représente pas le paramètre exclusif de différenciation des coûts,

- l'analyse menée plus spécifiquement sur les coûts de *foration et de l'équipement* met en évidence une disparité de valeurs semblable à celle observée à travers l'analyse menée sur les coûts totaux. Cette disparité est plus importante pour les opérations situées hors Île-de-France, le nuage de points ne permet pas, en effet, de démontrer une liaison directe entre le coût additionné de ces deux postes et le diamètre,
- l'analyse menée sur les *anomalies de coût* permet de dégager **13 opérations** sur 40 qui présentent une différence entre le montant garanti par le comité AQUAPAC et le coût total déclaré par le pétitionnaire, supérieur à 20 k€. Les anomalies de coût ont été mises en évidence, pour chaque opération, par le calcul de 4 ratios : coût total sur la profondeur, coût total sur le diamètre, coût total sur le débit, coût total sur la puissance. Ces anomalies ont été expliquées par l'analyse du coût des postes « foration », « équipement », « tests hydrauliques », « analyse d'eau », « coût de la fermeture », « maîtrise d'œuvre » et par le calcul des ratios de ces postes respectifs avec la profondeur et/ou le diamètre et/ou le débit et le pourcentage du coût total moyen. On constate, par exemple, que pour des opérations d'un diamètre de foration identique, les anomalies du coût total peuvent s'expliquer soit par une dérive du poste de foration, soit par une dérive du poste équipement, mais rarement par une dérive du coût des deux postes en simultané.

Cette étude met en évidence que 80 % des dossiers AQUAPAC (sur un total de 155 opérations) concernent des débits compris entre 10 et 60 m³/h et 90% des dossiers concernent une gamme de profondeurs comprises entre 20 m et 100 m. On constate que les diamètres de foration restent dans des dimensions proches : le diamètre moyen en Île-de-France est de 390 mm dans les calcaires et de 332 mm dans la craie. Les diamètres de foration les plus importants sont utilisés dans les alluvions (moyenne 683 mm). Le diamètre de foration n'est donc pas le paramètre majeur qui influence le coût total du forage, hormis dans des formations spécifiques qui nécessitent des gros diamètres de foration (alluvions). Les matériaux utilisés pour la colonne captante sont généralement l'acier inox 304 L. Le PVC à manchons vissés est rarement utilisé en IDF. En fonction du type de matériau utilisé et du diamètre de foration, le coût du poste équipement est plus ou moins élevé.

Cette étude révèle qu'il est parfois difficile d'expliquer ou d'interpréter, par une approche exclusivement scientifique, les différences de coût pour des opérations de doublet géothermiques sur forage d'eau. Un certain nombre de paramètres non exclusivement liés aux aspects techniques peuvent influencer le coût total du forage (taille de la société, amortissement de son équipement, ses coûts de structure, approche commerciale, business plan, subventions). Ainsi, un projet type (même profondeur, même lithologie, même réponse technique...) ne correspond pas à un montant unique.

Les résultats permettront, cependant, d'orienter les futures demandes de garantie AQUAPAC, notamment à partir de l'analyse graphique de la répartition régionale des **montants de garantie** en fonction de la profondeur (période 2014 - 2019), de la synthèse des **coûts moyens** pour chaque poste de dépense (à partir de 38 dossiers AQUAPAC) et des **courbes de tendance** entre le coût de chaque poste et trois paramètres (profondeur, diamètre, débit).

Les perspectives pourraient être de réaliser un traitement statistique complémentaire des résultats, en raisonnant sur les écarts-types ou sur une représentation par boîte à moustache. Le raisonnement sur les valeurs max ou min montre qu'elles sont, en effet, facilement biaisées par des valeurs atypiques.

Sommaire

1. Introduction	15
2. Enjeux.....	15
3. Objectifs	15
4. Méthodologie	17
4.1. ANALYSE DES MONTANTS DE GARANTIE ISSUS DE LA BASE DE DONNEES AQUAPAC (PÉRIODE 2000 – 2019).....	17
4.2. ANALYSE DES POSTES DE DEPENSE POUR LA RÉALISATION D'UN FORAGE DE RECONNAISSANCE	17
5. Résultats	21
5.1. ANALYSE DES MONTANTS DE GARANTIE ISSUS DE LA BASE DE DONNEES AQUAPAC (PÉRIODE 2000 – 2019)	21
5.1.1. Analyse des montants de garantie par région	21
5.1.2. Analyse des montants de garantie en fonction de la géologie.....	23
5.1.3. Analyse des montants de garantie par gamme de profondeur	27
5.1.4. Analyse des montants de garantie par gamme de débit	28
5.1.5. Analyse des montants de garantie moyens	30
5.2. ANALYSE DES POSTES DE DEPENSE POUR LA RÉALISATION D'UN FORAGE DE RECONNAISSANCE	32
5.2.1. Analyse sur les coûts totaux	32
5.2.2. Analyse sur les coûts de foration et équipement.....	36
5.2.3. Analyse des anomalies de coût	38
5.2.4. Analyse de la relation entre le coût de chaque poste de dépense et la profondeur, le diamètre ou le débit	60
6. Conclusions.....	74

Liste des figures

Figure 1 :	Approche méthodologique pour l'analyse des postes de dépense pour la réalisation d'un forage de reconnaissance.....	20
Figure 2 :	Répartition, par région, des montants garantis (coûts minimum, moyen, maximum) pour la réalisation d'un forage de reconnaissance dans le cadre des demandes de garanties de recherche AQUAPAC.....	22
Figure 3 :	Répartition, par région et en fonction de la profondeur, des montants de garantie pour la réalisation d'un forage de reconnaissance sur la période 2014 - 2019	22
Figure 4 :	Répartition par typologie de formation géologique (lithologie) des montants garantis (coûts totaux minimum, moyen, maximum)	24
Figure 5 :	Répartition régionale des montants de garantie en fonction de la profondeur pour la réalisation d'un forage de reconnaissance dans les alluvions.....	25
Figure 6 :	Répartition régionale des montants de garantie en fonction de la profondeur pour la réalisation d'un forage de reconnaissance dans les calcaires	25
Figure 7 :	Répartition régionale des montants de garantie en fonction de la profondeur pour la réalisation d'un forage de reconnaissance dans la craie.....	26
Figure 8 :	Répartition régionale des montants de garantie en fonction de la profondeur pour la réalisation d'un forage de reconnaissance dans les sables	26
Figure 9 :	Montant garantis (coûts totaux minimum, moyen, maximum) par gamme de profondeur.....	28
Figure 10 :	Montant garanti (coûts totaux minimum, moyen, maximum) par gamme de débit (m ³ /h)	29
Figure 11 :	Répartition par région des montants de garantie pour la réalisation d'un forage de reconnaissance en fonction du débit (période 2014 – 2019).....	29
Figure 12 :	Coût total par mètre linéaire de forage en fonction du diamètre de foration et dans la craie, les calcaires et les sables de l'Yprésien pour la réalisation d'un forage de reconnaissance (22 opérations situées en Île-de-France).	33
Figure 13 :	Coût total par mètre linéaire de forage en fonction du diamètre de foration et de la géologie pour la réalisation d'un forage de reconnaissance (opérations situées hors Île-de-France). Les opérations situées dans le cercle bleu présentent un coût total anormalement élevé.	35
Figure 14 :	Coût additionné des postes de foration et équipement par mètre linéaire de forage en fonction du diamètre de foration et de la géologie pour la réalisation d'un forage de reconnaissance (opérations situées en Île-de-France).....	36
Figure 15 :	Coût additionné des postes de foration et équipement par mètre linéaire de forage en fonction du diamètre de foration et de la géologie pour la réalisation d'un forage de reconnaissance (opérations situées hors Île-de-France).	37
Figure 16 :	Mise en relation du coût des postes de « foration » et « d'équipement » avec la profondeur (à gauche) et le diamètre (à droite) pour des opérations situées en Île-de-France dans la craie. L'objectif de dégager une courbe de tendance linéaire représentative (surligné en vert).	61
Figure 17 :	Mise en relation du coût du poste « tests hydrauliques » avec le débit (à gauche) et le diamètre (à droite), « fermeture » avec la profondeur (à gauche) et le diamètre (à droite) pour des opérations situées en Île-de-France dans la craie. L'objectif de dégager une courbe de tendance linéaire représentative (surligné en vert). Aucune relation représentative entre le coût de la fermeture et la profondeur ou le diamètre n'a pu être dégagée. Représentation sous la forme d'histogramme du coût des postes « fermeture » et « analyse d'eau ».	62
Figure 18 :	Représentation sous la forme d'histogramme du coût du poste « Maîtrise d'œuvre dans la craie.....	62

Figure 19 :	Mise en relation du coût des postes de « foration » et « d'équipement » avec la profondeur (à gauche) et le diamètre (à droite) pour des opérations situées en Île-de-France dans les calcaires. L'objectif de dégager une courbe de tendance linéaire représentative (surligné en vert).	63
Figure 20 :	Mise en relation du coût du poste « tests hydrauliques » avec le débit (à gauche) et le diamètre (à droite), « fermeture » avec la profondeur (à gauche) et le diamètre (à droite) pour des opérations situées en Île-de-France dans les calcaires. L'objectif de dégager une courbe de tendance linéaire représentative (surligné en vert). Aucune relation représentative entre le coût de la fermeture et la profondeur ou le diamètre n'a pu être dégagée. Représentation sous la forme d'histogramme du coût des postes « tests hydrauliques » et « fermeture ».	64
Figure 21 :	Mise en relation du coût du poste « Maîtrise d'Oeuvre avec la profondeur pour des opérations situées en Île-de-France dans la craie. Représentation sous la forme d'histogramme du coût des postes « maîtrise d'œuvre », « amenée - repli » et « analyse d'eau ».	65
Figure 22 :	Mise en relation du coût des postes de « foration » et « d'équipement » avec la profondeur (à gauche) et le diamètre (à droite) pour des opérations situées hors Île-de-France dans les alluvions. Les courbes de tendance linéaire sont données à titre indicatif en raison du nombre de données trop faible. Les relations représentatives ont été surlignées en vert.	66
Figure 23 :	Mise en relation du coût du poste « tests hydrauliques » avec le débit (à gauche) et le diamètre (à droite), « fermeture » avec la profondeur (à gauche) et le diamètre (à droite) pour des opérations situées dans les régions hors Île-de-France dans les alluvions. L'objectif de dégager une courbe de tendance linéaire représentative (surligné en vert). Aucune relation représentative entre le coût de la fermeture et la profondeur ou le diamètre n'a pu être dégagée. Représentation sous la forme d'histogramme du coût des postes « tests hydrauliques » et « fermeture ».	67
Figure 24 :	Représentation sous la forme d'histogramme du coût des postes « Maîtrise d'Oeuvre » et « analyse d'eau pour des opérations situées dans les régions hors Île-de-France dans les alluvions.	67
Figure 25 :	Mise en relation du coût des postes de « foration » et « d'équipement » avec la profondeur (à gauche) et le diamètre (à droite) pour des opérations situées hors Île-de-France dans la craie. Aucune relation représentative entre le coût des tests hydrauliques et la profondeur ou le diamètre n'a pu être dégagée. Représentation sous la forme d'histogramme du coût du poste « tests hydrauliques ».	68
Figure 26 :	Mise en relation du coût du poste « fermeture » avec la profondeur (à gauche) et le diamètre (à droite) pour des opérations situées dans les régions hors Île-de-France dans la craie. Aucune relation représentative entre le coût de la fermeture et la profondeur ou le diamètre n'a pu être dégagée. Représentation sous la forme d'histogramme du coût des postes « fermeture », « analyse d'eau », « Maîtrise d'œuvre » et « amenée - repli ».	69
Figure 27 :	Mise en relation du coût des postes de « foration » et « d'équipement » avec la profondeur (à gauche) et le diamètre (à droite) pour des opérations situées hors Île-de-France dans les calcaires. Les courbes de tendance linéaire représentatives sont surlignées en vert.	70
Figure 28 :	Mise en relation du coût du poste « tests hydrauliques » avec le débit (à gauche) et le diamètre (à droite), « fermeture » avec la profondeur (à gauche) et le diamètre (à droite) pour des opérations situées dans les régions hors Île-de-France dans les calcaires. Aucune relation représentative n'a pu être dégagée pour ces deux postes. Représentation sous la forme d'histogramme du coût des postes « tests hydraulique » et « fermeture ».	71
Figure 29 :	Représentation sous la forme d'histogramme du coût des postes « Maîtrise d'Oeuvre », « amenée - repli » et analyse d'eau » pour des opérations situées dans les régions hors Île-de-France dans les calcaires.	72

Liste des tableaux

Tableau 1 : Postes de dépenses pour la réalisation d'un forage de reconnaissance renseignés dans le formulaire AQUAPAC.....	18
Tableau 2 : Analyse par région du montant garanti (minimum, maximum, moyen) pour la réalisation d'un forage de reconnaissance	21
Tableau 3 : Répartition du nombre d'opérations par typologie de formation géologique (lithologie) et des montants garantis (coût total minimum, maximum, moyen) pour la réalisation d'un forage de reconnaissance	23
Tableau 4 : Analyse, par gamme de profondeurs, du montant garanti pour la réalisation d'un forage de reconnaissance : coût total minimum, maximum, moyen.....	27
Tableau 5 : Analyse, par gamme de débits, du montant garanti (coût minimum, moyen, maximum) renseigné dans les dossiers de demande de garantie de recherche AQUAPAC.	28
Tableau 6 : Classification par région et par ordre décroissant, du montant de garantie moyen (coût total), renseigné dans les dossiers AQUAPAC.....	30
Tableau 7 : Regroupement des régions en fonction du montant de garantie moyen (classement par ordre décroissant de 80 – 40 K€).	30
Tableau 8 : Montants de garantie moyens en fonction de la lithologie (Île-de-France et hors Île-de-France).....	31
Tableau 9 : Montants de garantie moyens en fonction de la profondeur du forage (île-de-France et hors Île-de-France).	31
Tableau 10 : Montants de garantie en fonction du débit (Île-de-France et hors Île-de-France).....	32
Tableau 11 : Coût total par mètre linéaire de forage en fonction du diamètre de foration et dans la craie, les calcaires et les sables de l'Yprésien pour la réalisation d'un forage de reconnaissance (22 opérations situées en Île-de-France)	33
Tableau 12 : Coût total par mètre linéaire de forage en fonction du diamètre de foration et de la géologie pour la réalisation d'un forage de reconnaissance (opérations situées hors Île-de-France).....	34
Tableau 13 : Coût additionné des postes de foration et équipement par mètre linéaire de forage en fonction du diamètre de foration et de la géologie pour la réalisation d'un forage de reconnaissance (opérations situées en Île-de-France).....	36
Tableau 14 : Coût additionné des postes de foration et équipement par mètre linéaire de forage en fonction du diamètre de foration et de la géologie pour la réalisation d'un forage de reconnaissance (opérations situées hors Île -de-France).	37
Tableau 15 : Analyse des coûts prévisionnels de chaque poste de dépense pour la réalisation d'un forage de reconnaissance dans la craie (opérations situées en Île -de-France). Les valeurs en rouges correspondent à des anomalies de coût.	41
Tableau 16 : Analyse des coûts prévisionnels de chaque poste de dépense pour la réalisation d'un forage de reconnaissance dans les calcaires du Lutétien (opérations situées en Île-de-France). Les postes en rouge correspondent à des anomalies de coût.	44
Tableau 17 : Analyse des coûts prévisionnels de chaque poste de dépense pour la réalisation d'un forage de reconnaissance dans les sables de l'Yprésien (opérations situées en Île-de-France). Les postes en rouge correspondent à des anomalies de coût.	46
Tableau 18 : Analyse des coûts prévisionnels de chaque poste de dépense pour la réalisation d'un forage de reconnaissance dans les alluvions (opérations situées dans les régions Auvergne Rhône-Alpes, Bourgogne Franche-Comté, Normandie, Grand Est). Les postes en rouge correspondent à des anomalies de coût.	48
Tableau 19 : Analyse des coûts prévisionnels de chaque poste de dépense pour la réalisation d'un forage de reconnaissance dans la craie (opérations situées dans les régions Haut-de-France, Centre-Val de Loire, Nouvelle-Aquitaine). Les postes en rouge correspondent à des anomalies de coût.	50

Tableau 20 : Analyse des coûts prévisionnels de chaque poste de dépense pour la réalisation d'un forage de reconnaissance dans les calcaires (opérations situées dans les régions Nouvelle-Aquitaine, Normandie, Centre-Val de Loire). Les postes en rouge correspondent à des anomalies de coût.	53
Tableau 21 : Analyse des coûts prévisionnels de chaque poste de dépense pour la réalisation d'un forage de reconnaissance dans les sables et graviers du Pliocène (opérations situées dans la région Nouvelle-Aquitaine et dans le granite d'Epinal dans la région Grand Est). Les postes en rouge correspondent à des anomalies de coût.	55
Tableau 22 : Synthèse de l'analyse sur l'anomalie des coûts menée sur les opérations en Île-de-France (base de données AQUAPAC 2014 – 2019). Les valeurs en rouge représentent une anomalie de coût et les valeurs surlignées en noir présentent un écart très important avec la moyenne.	57
Tableau 23 : Synthèse de l'analyse sur l'anomalie des coûts menée sur les opérations dans les régions hors Île-de-France (base de données AQUAPAC 2014 – 2019). Les valeurs en rouge représentent une anomalie de coût et les valeurs surlignées en noir présentent un écart très important avec la moyenne.	58
Tableau 24 : Synthèse des coûts moyens de chaque poste de dépense pour des opérations situées en Île-de-France et dans les régions Hors Île-de-France.	59
Tableau 25 Répartition des coûts de 10 opérations situées en Île-de-France pour la réalisation d'un forage de reconnaissance dans la craie. Les cases surlignées en rouge correspondent aux opérations qui présentent des anomalies de coût. Les cases en orange correspondent à des valeurs aberrantes écartées pour l'analyse.	60
Tableau 26 Coût des postes de dépenses prévisionnels pour la réalisation d'un forage de reconnaissance dans les calcaires (opérations situées en Île-de-France). Les cases surlignées en rouge correspondent aux opérations qui présentent des anomalies de coût. La case surlignée en orange correspond à une valeur aberrante écartée pour l'analyse.	63
Tableau 27 Coût des postes de dépenses prévisionnels pour la réalisation d'un forage de reconnaissance dans les alluvions (opérations situées hors Île-de-France). Les cases surlignées en rouge correspondent aux opérations qui présentent des anomalies de coût.	65
Tableau 28 Coût des postes de dépenses prévisionnels pour la réalisation d'un forage de reconnaissance dans la craie (opérations situées hors Île-de-France).	67
Tableau 29 Coût des postes de dépenses prévisionnels pour la réalisation d'un forage de reconnaissance dans les calcaires (opérations situées hors Île-de-France).	70
Tableau 30 Synthèse des courbes de tendances linéaires représentatives qui ont pu être dégagées (cases vertes) par l'analyse graphique menée sur la relation entre le coût de chaque poste et les trois paramètres (profondeur, diamètre, débit.). Les cases rouges représentent les relations non représentatives et les cases grises les postes sans relation directe avec le paramètre.	73

1. Introduction

La procédure AQUAPAC a été initiée par un protocole d'accord signé entre l'ADEME, EDF et le BRGM le 23 novembre 1983. Son objectif est de proposer aux maîtres d'ouvrage, qui souhaitent réaliser une opération de géothermie de très basse énergie sur aquifère superficiel, une double garantie portant sur la présence, puis sur la pérennité de la ressource en eau souterraine nécessaire au bon fonctionnement de leur installation. Il s'agit de la garantie « recherche » et de la garantie « pérennité ».

Le montant de la garantie « recherche » couvre le coût du premier forage. Le coût d'un forage dépend principalement de la profondeur de celui-ci, mais aussi de la zone géographique où il est réalisé, ainsi que du diamètre du forage qui est d'autant plus grand que le débit de production est élevé. D'autres facteurs peuvent également influencer le coût d'un forage : nature du tubage, méthode de foration.

2. Enjeux

Les coûts des travaux de forage en géothermie sont très variables d'une opération à l'autre et dépendent des types de réalisation et de leur contexte. A travers les expertises AQUAPAC, l'analyse des coûts de forage en géothermie de faible profondeur (0-200 m), dite « géothermie de surface » ou « très basse énergie », montre qu'un certain nombre de dossiers de demande de garantie de recherche présentent des coûts de forage annoncés par le maître d'ouvrage largement au-dessus des corrélations issues de l'analyse des dossiers. Il s'avère difficile d'expliquer ces anomalies de coût, compte-tenu des spécificités de chaque étude.

Pour apporter des éléments d'explication, cela implique de réaliser une analyse plus fine sur un échantillon représentatif de dossiers AQUAPAC, permettant de comparer les coûts totaux prévisionnels et leur décomposition relative aux différents postes de la réalisation du forage.

3. Objectifs

Cette étude, effectuée dans le cadre de la convention de financement ADEME-BRGM 1805C0054, vise à analyser les coûts relatifs aux travaux de forages géothermiques, sur la base des données issues des dossiers instruits par la SAF Environnement, dans le cadre des demandes par les maîtres d'ouvrage de la garantie dite de « recherche », pour ce qui concerne la géothermie superficielle (dispositif AQUAPAC).

L'objectif est d'identifier les principaux postes qui peuvent impliquer des écarts de coût pour la réalisation d'un forage pour la zone Île-de-France et en dehors de cette zone, et d'en expliquer la cause (géographie, géologie, technique).

Une comparaison des dossiers AQUAPAC avec des dossiers Fonds Chaleur n'a pas pu être menée de façon satisfaisante, en raison du nombre de dossiers insuffisant et de leur contenu (relevé de dépenses d'investissement), difficilement comparable avec la base de données AQUAPAC.

4. Méthodologie

4.1. ANALYSE DES MONTANTS DE GARANTIE ISSUS DE LA BASE DE DONNÉES AQUAPAC (PÉRIODE 2000 – 2019)

La première étape a été de se focaliser sur les **montants de garantie** accordés par le comité AQUAPAC sur la période 2000 - 2019. Cette première approche a été choisie, car la base de données AQUAPAC renseigne ces montants pour chaque dossier, ce qui représente un échantillon de 175 dossiers. Les dossiers retenus ont été les demandes effectives de garantie de recherche sur toute la France (53 dossiers n'ayant pas abouti à une demande effective n'ont pas été pris en compte).

Le montant en garantie de recherche AQUAPAC représente le coût total garanti pour la réalisation d'un forage de reconnaissance. Ce montant a été mis en relation avec les facteurs impactant le coût de la réalisation du forage :

- **le secteur géographique :**
 - une distinction a été faite entre les forages réalisés en Île-de-France (milieu urbain impactant sur les coûts d'aménée-repli et d'implantation des forages en liaison avec le cadastre souterrain) et hors Île-de-France ;
- **la géologie (lithologie) :**
 - la nature des roches forées impacte le coût de la réalisation des forages, en particulier sur le choix et le coût de la technique de forage et de l'équipement des forages (nature du tubage, type de crépine) ;
- **la profondeur de foration :**
 - la relation entre le coût des forages et la profondeur forée permettra de dégager des tendances ;
- **le débit garanti :**
 - la relation entre le coût des forages et le débit garanti (qui intègre le diamètre foré) permettra également de dégager des tendances.

Note : le diamètre de foration n'a pas été pris en compte à ce stade, car il n'est pas renseigné dans la base de données AQUAPAC. Il a été pris en compte dans l'analyse détaillée des postes de dépense menée en deuxième approche.

Une **synthèse** a permis de comparer les montants de garantie accordés en France avec les montants de garantie accordés en Île-de-France.

4.2. ANALYSE DES POSTES DE DÉPENSE POUR LA RÉALISATION D'UN FORAGE DE RECONNAISSANCE

La deuxième étape a consisté en l'analyse des **postes de dépense** pour la réalisation d'un forage de reconnaissance. Chaque poste représente un coût prévisionnel² déclaré par le pétitionnaire au comité AQUAPAC, qui mène ensuite son analyse pour en déterminer le

² Cette analyse ne prend pas en compte les coûts totaux réels, après la réalisation des forages de reconnaissance car ces derniers ne sont pas systématiquement communiqués au comité AQUAPAC et sont influencés par les aléas techniques du chantier. L'intérêt se porte ici sur les coûts prévisionnels, tels qu'ils peuvent être pris en compte par le pétitionnaire (souscripteur de la garantie AQUAPAC), compte-tenu de la coupe géologique prévisionnelle, de l'avis hydrogéologique prévisionnel et des études d'impact.

montant de garantie. L'objectif était d'expliquer les écarts de coûts de chaque poste en fonction de la nature du sous-sol, de la profondeur, du diamètre foré, de l'équipement du forage et des essais réalisés sur site.

L'analyse a été menée sur un échantillon de 38 dossiers AQUAPAC (période 2014 – 2019³), en détaillant les coûts des différents postes de dépense renseignés dans les formulaires AQUAPAC (cf. tableau 1). La sélection des dossiers a été menée en distinguant les opérations situées en Île-de-France et les régions hors Île-de-France, ainsi que les différentes formations géologiques rencontrées dans chacune des régions.

Postes de dépense
Amenée et repli du matériel - « installation du chantier » ⁴
Foration
Équipement forage (tubage, crépine, etc.)
Tests hydrauliques (pompage d'essai)
Analyse de l'eau
Coût de la fermeture en cas d'échec total

Tableau 1 : Postes de dépenses pour la réalisation d'un forage de reconnaissance renseignés dans le formulaire AQUAPAC.

Une synthèse des coûts a été réalisée pour les opérations sélectionnées, en représentant dans des tableaux, la décomposition du coût de chaque poste.

³ L'approche détaillée des coûts a été faite à partir de 2014, date de la mise en place du nouveau formulaire AQUAPAC permettant la décomposition des postes de dépense relatifs à la réalisation d'un forage de reconnaissance.

⁴ Le poste « amenée – repli » n'est pas systématiquement renseigné et parfois intégré dans le poste de foration

La méthodologie pour l'analyse et la comparaison des résultats été menée en quatre phases (voir figure 1) :

- **une première analyse** a été menée sur les **coûts totaux**, qui globalisent l'ensemble des postes (dont certains d'entre eux ne varient pas en fonction de la profondeur ou du diamètre⁵) pour la réalisation d'un forage de reconnaissance ;
- pour affiner cette approche, une **deuxième analyse** a été faite en distinguant uniquement les postes de **foration et d'équipement**, dont le coût est étroitement lié avec la profondeur et le diamètre de foration ;
- **une troisième analyse** a été menée sur les opérations présentant des **anomalies de coût**. Elles ont été mises en évidence sur les dossiers présentant une différence supérieure à 20 k€ entre le montant garanti par le comité AQUAPAC et le coût total déclaré par le pétitionnaire. L'anomalie du coût de chaque poste a été déterminée par comparaison avec le coût moyen⁶ ;
- **une quatrième analyse** a été réalisée sur les **relations** entre le coût de chaque poste de dépense et la profondeur, le diamètre ou le débit. Les valeurs aberrantes de chaque poste ont été écartées.

⁵ C'est le cas des postes de dépense suivants : analyse d'eau, tests hydrauliques, amenée-repli, maîtrise d'œuvre.

⁶ Le coût moyen a été calculé en prenant la moyenne du coût de chaque poste sur les opérations sélectionnées

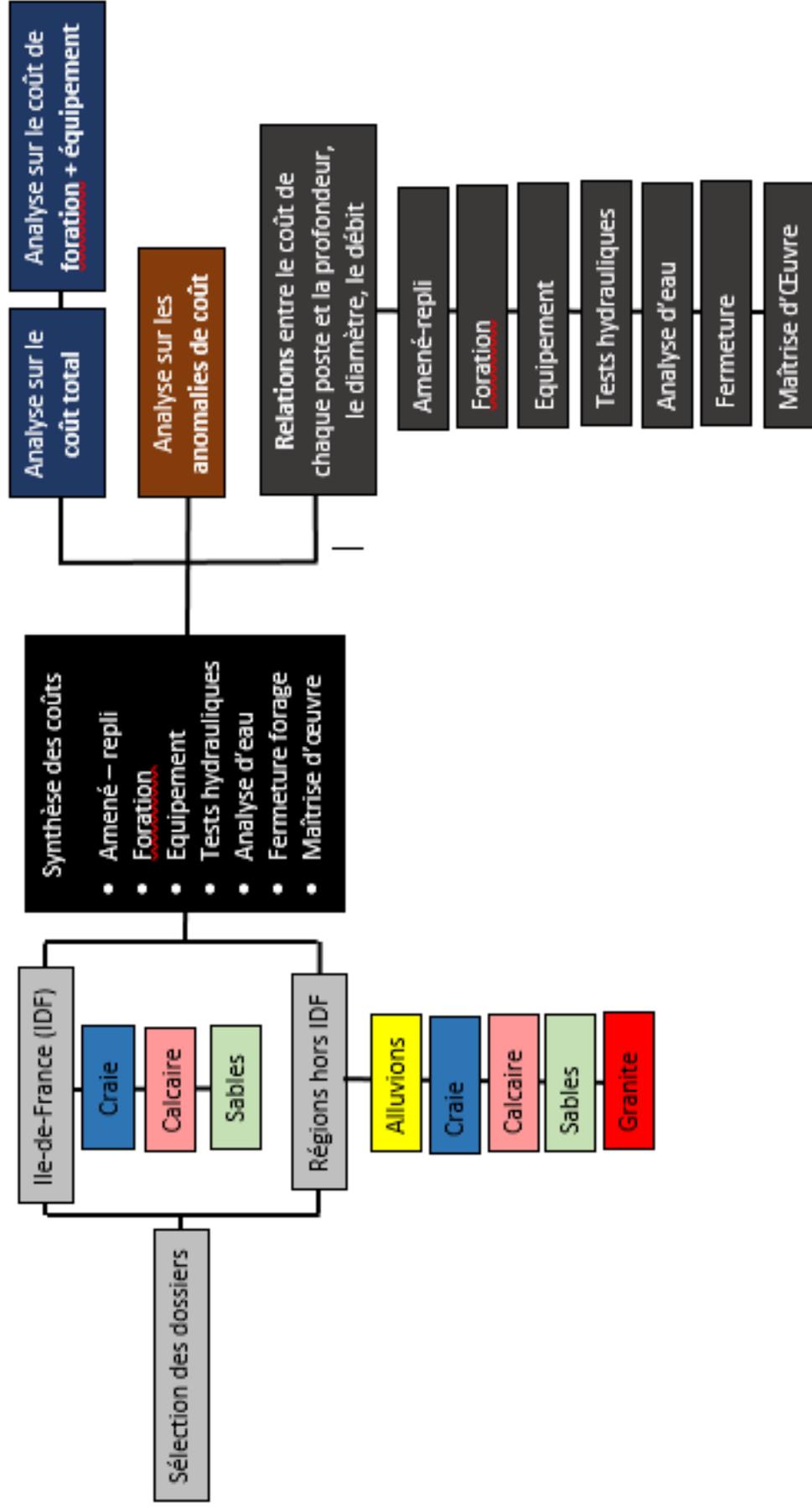


Figure 1 : Approche méthodologique pour l'analyse des postes de dépense pour la réalisation d'un forage de reconnaissance.

5. Résultats

5.1. ANALYSE DES MONTANTS DE GARANTIE ISSUS DE LA BASE DE DONNEES AQUAPAC (PÉRIODE 2000 – 2019)

5.1.1. Analyse des montants de garantie par région

Les données relatives au montant garanti⁷ attribué par la garantie « recherche » AQUAPAC pour la réalisation des forages de reconnaissance ont été traitées sur la période 2000 – 2019. L'analyse a été menée sur les montants de garantie « minimum, moyen et maximum » sur un total de 175 opérations.

Régions	Montant de garantie			Nb dossiers
	min	moy	max	
ÎLE-DE-FRANCE	30 000	78 023	170 000	90
CENTRE - VAL DE LOIRE	13 800	39 126	100 000	21
NORMANDIE	23 000	41 735	71 000	14
AUVERGNE RHÔNE-ALPES	5 700	40 742	140 000	13
NOUVELLE-AQUITAINE	8 446	36 729	70 000	13
HAUTS-DE-FRANCE	17 000	45 200	115 000	10
GRAND EST	25 000	57 600	76 000	5
PROVENCE-ALPES-CÔTE D'AZUR	25 941	37 235	45 000	4
BOURGOGNE - FRANCHE-COMTÉ	24 500	48 250	72 000	2
PAYS DE LA LOIRE	20 000	27 000	34 000	2
OCCITANIE	140 000	140 000	140 000	1
Total				175

Tableau 2 : Analyse par région du montant garanti (minimum, maximum, moyen) pour la réalisation d'un forage de reconnaissance.

Le tableau 2 met en évidence une grande disparité du nombre des dossiers en fonction des régions :

- Île-de-France : 90 opérations ;
- Centre-Val de Loire : 21 opérations ;
- Normandie, Auvergne Rhône-Alpes et Nouvelle-Aquitaine : 13 - 14 opérations ;
- Hauts-de-France : 10 opérations ;
- Autres régions : < 10 opérations.

⁷ Le montant garanti fait référence au montant total du coût des travaux pour la réalisation d'un forage de reconnaissance, équipement et essais inclus. Ce montant est arrêté par le comité AQUAPAC, après analyse et comparaison des dossiers de demande avec les montants accordés pour des forages d'une même gamme de profondeur. Ce montant fait partie intégrante du contrat de garantie de recherche AQUAPAC.

Il est à noter que la valeur pour l'Occitanie n'est pas représentative car elle se base que sur un seul dossier.

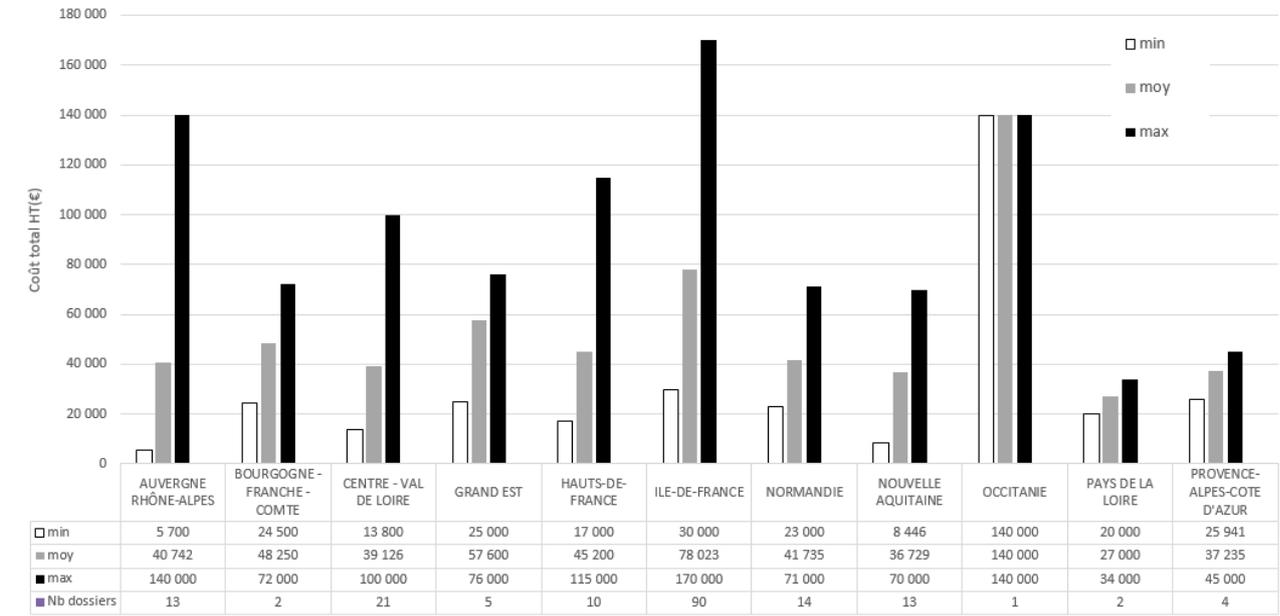


Figure 2 : Répartition, par région, des montants garantis (coût minimum, moyen, maximum) pour la réalisation d'un forage de reconnaissance dans le cadre des demandes de garanties de recherche AQUAPAC.

La figure 2 met en évidence une grande disparité des montants de garantie minimum, moyen, maximum suivant les différentes régions. La région Île-de-France présente les montants les plus élevés (moyenne 78 k€). Le montant moyen garanti dans les régions situées hors de l'Île-de-France varie entre 27 et 57 k€, avec des valeurs généralement proches de 40 - 45 k€.

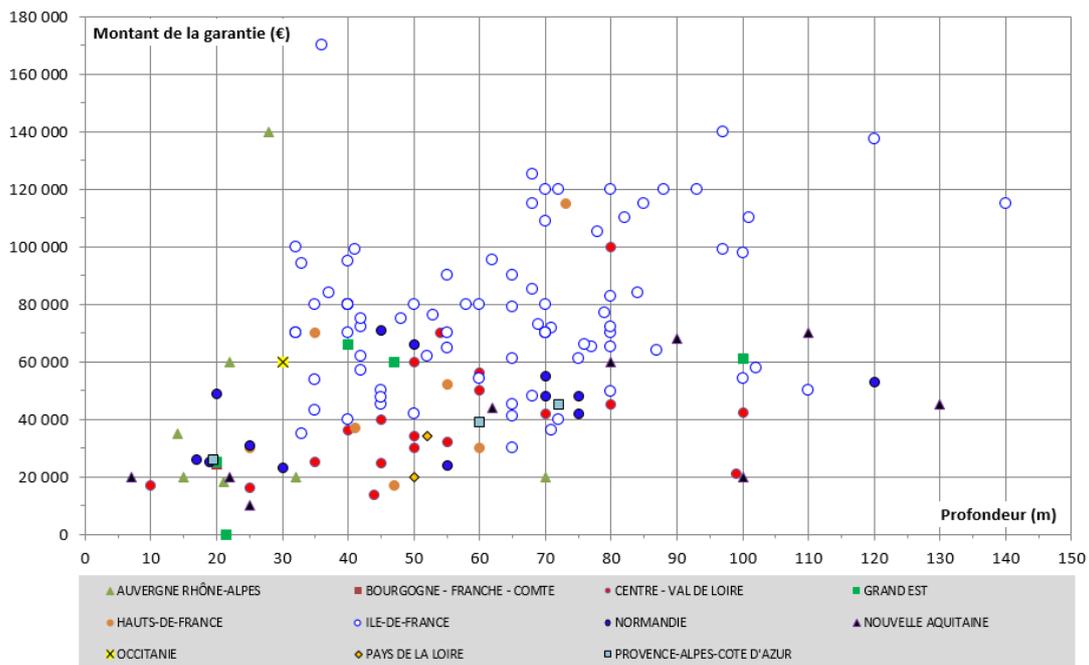


Figure 3 : Répartition, par région et en fonction de la profondeur, des montants de garantie pour la réalisation d'un forage de reconnaissance sur la période 2014 - 2019.

La figure 3 montre la répartition globale des montants de garantie par région en fonction de la profondeur sur la période 2014 - 2019. Ces valeurs, malgré leur dispersion, montrent une certaine cohérence et permettront d'orienter les futures demandes de garantie de recherche AQUAPAC.

5.1.2. Analyse des montants de garantie en fonction de la géologie

La nature des roches forées impacte le coût de la réalisation des forages, en particulier le choix de la technique de forage et de l'équipement des forages (nature du tubage, type de crépine).

L'analyse se porte sur les typologies de formations géologiques renseignées dans le formulaire AQUAPAC. Une simplification de tri des données a été faite en regroupant les formations géologiques en lithologie (nature de la roche).

Le tableau 3 montre la répartition du nombre de dossiers et du montant de la garantie en fonction du type de lithologie sur un total de 155 dossiers :

- calcaires, craie : 104 opérations (67 %) ;
- sables, alluvions : 46 opérations (30 %) ;
- autres (schistes, granite, grès, marno-calcaires) : 5 opérations (< 3 %).

Lithologie	Coût total			Nb dossiers
	min	moy	max	
Calcaires	9 880	68 724	125 000	55
Craie	13 800	61 396	170 000	49
Sables	20 000	70 868	140 000	24
Alluvions	16 950	37 640	140 000	22
Schistes socle	8 446	21 223	34 000	2
Granite	61 000	61 000	61 000	1
Grès	68 000	68 000	68 000	1
Marno-calcaires	39 800	39 800	39 800	1
Total				155

Tableau 3 : Répartition du nombre d'opérations par typologie de formation géologique (lithologie) et des montants garantis (coût total minimum, maximum, moyen) pour la réalisation d'un forage de reconnaissance.

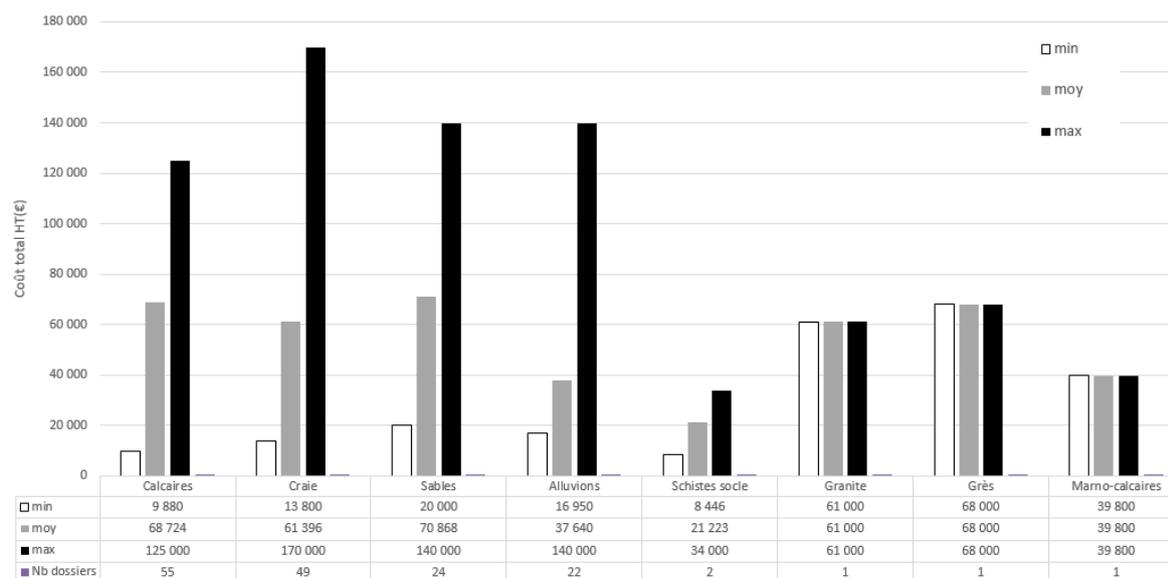


Figure 4 : Répartition par typologie de formation géologique (lithologie) des montants garantis (coûts totaux minimum, moyen, maximum) .

La figure 4 montre la répartition des montants garantis (coûts totaux minimum, moyens, maximum) par typologie de formation géologique (lithologie). On peut remarquer que l'ordre de grandeur du **montant de garantie moyen** est assez bien contraint pour les calcaires, la craie et les sables (~65 k€ (+/- 5 k€)). Il est, en revanche, inférieur pour les alluvions (37 k€). Cette différenciation peut toutefois être biaisée par le fait que les projets dans les alluvions présentent une profondeur moins élevée.

Les **valeurs maximales** du montant de garantie peuvent être mises en relation avec des techniques de foration ou d'équipement spécifiques en fonction de la géologie. Elles sont les plus élevées dans la craie (ce qui peut être expliqué par la présence de cavités), puis dans les sables et les alluvions (ce qui peut s'expliquer par les spécificités des techniques de forage avec tubage à l'avancement), puis dans les calcaires (présence de fissures).

Les figures 5 - 8 montrent la **répartition régionale** des montants de garantie attribués pour les demandes de recherche AQUAPAC, en fonction de la profondeur et de la géologie. Leur représentation graphique montrent des nuages de points, qui suivent plus ou moins une augmentation linéaire des montants avec la profondeur. On peut également en tirer les observations suivantes pour :

- **les alluvions** : les principales régions concernées sont Auvergne Rhône-Alpes, Normandie et Grand Est. Les montants de garantie sont assez bien contraints dans un nuage de point compris entre 5 – 50 m de profondeur et 10 – 70 k€. Une tendance linéaire n'est pas démontrée ;
- **les calcaires** : les principales régions concernées sont Île-de-France, Centre-Val-de-Loire et Nouvelle Aquitaine. On remarque que les montants de garantie sont plus élevés en Île-de-France et que le nuage de points est disparate (ce qui peut s'expliquer par la présence de vides karstiques plus ou moins importants qui se répercute sur le coût de la foration et de l'équipement, et ceci indépendamment de la profondeur). Le nuage de points dans les autres régions suit davantage la logique d'une augmentation linéaire du montant de la garantie avec la profondeur ;
- **la craie** : les principales régions concernées sont Île-de-France, Centre-Val-de-Loire et Hauts-de-France. Les nuages de points des deux premières régions suivent plus ou moins la logique d'une augmentation linéaire du montant de la garantie avec la profondeur, ce qui n'est pas le cas pour Hauts-de-France.

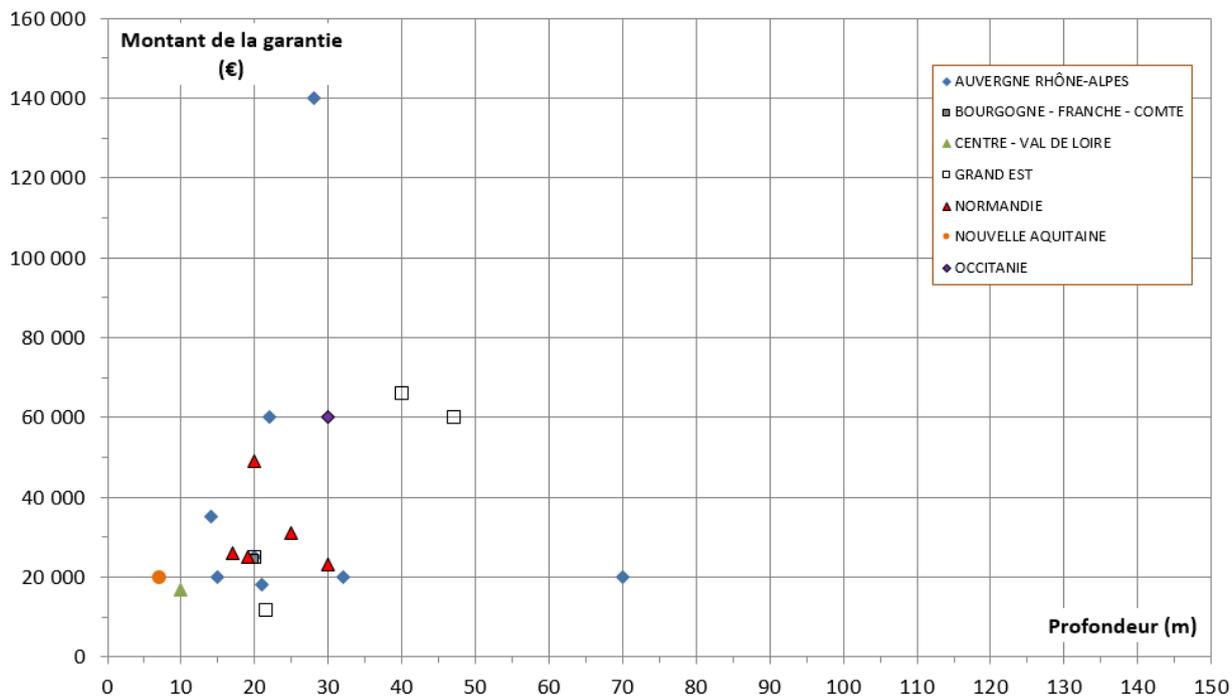


Figure 5 : Répartition régionale des montants de garantie en fonction de la profondeur pour la réalisation d'un forage de reconnaissance dans **les alluvions**.

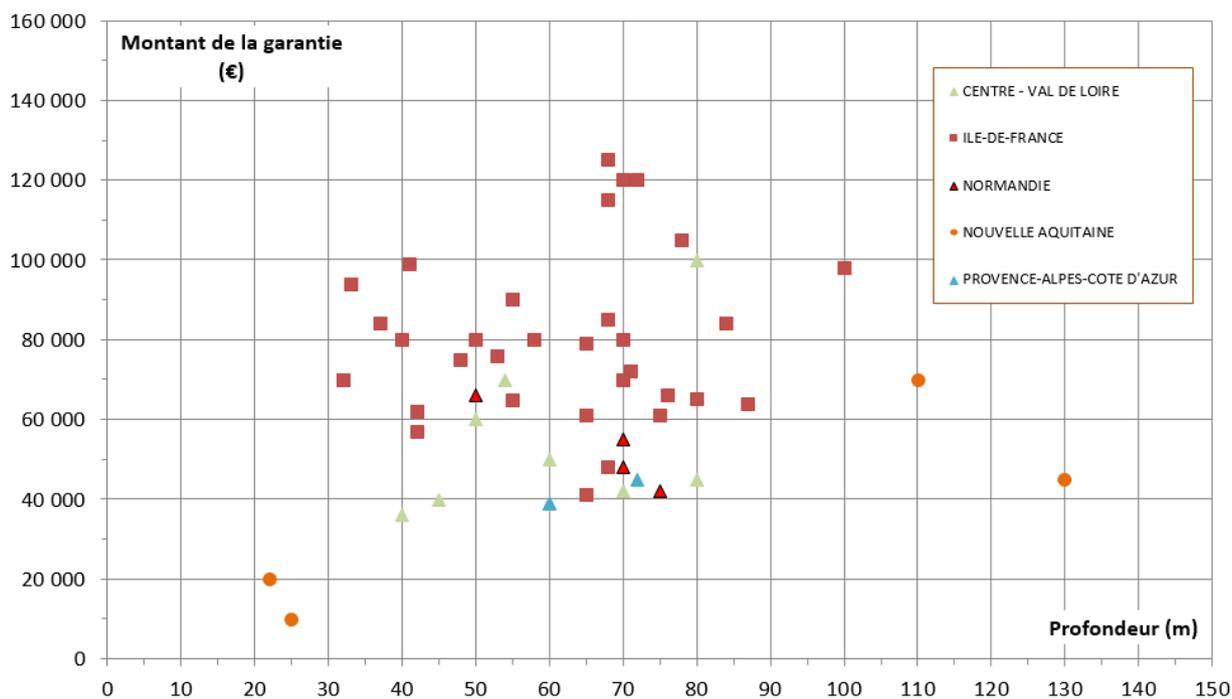


Figure 6 : Répartition régionale des montants de garantie en fonction de la profondeur pour la réalisation d'un forage de reconnaissance dans **les calcaires**.

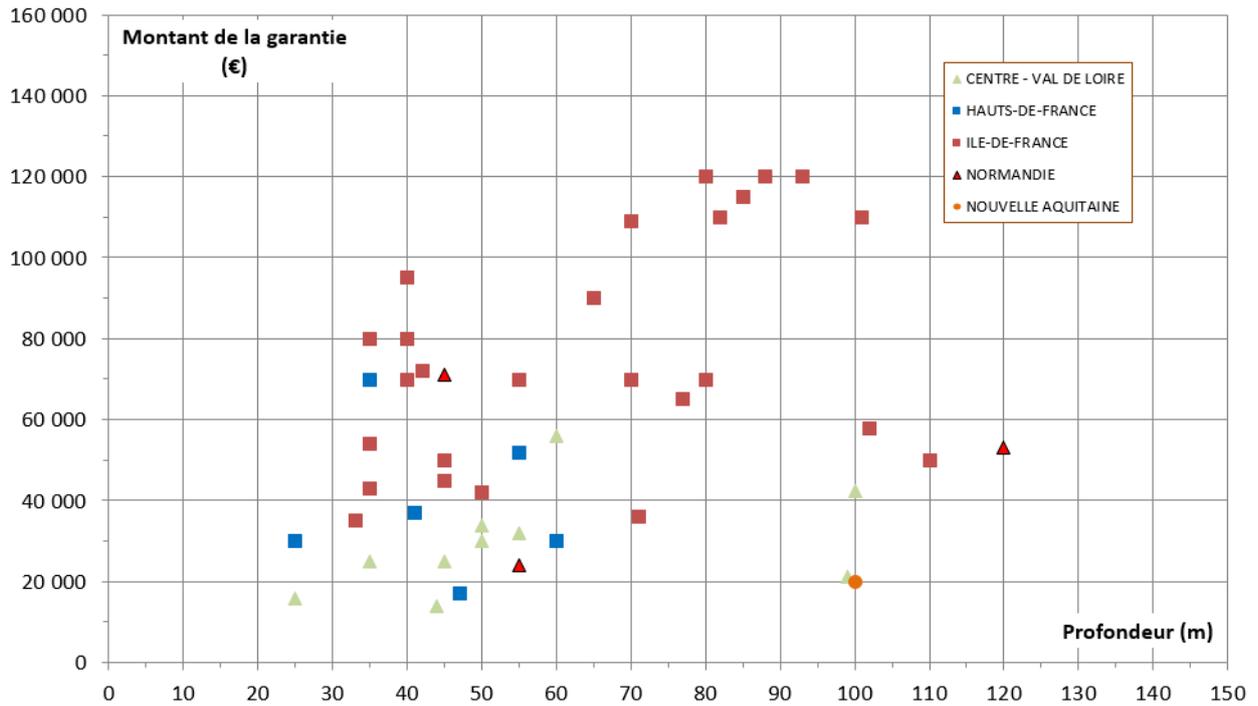


Figure 7 : Répartition régionale des montants de garantie en fonction de la profondeur pour la réalisation d'un forage de reconnaissance dans **la craie**.

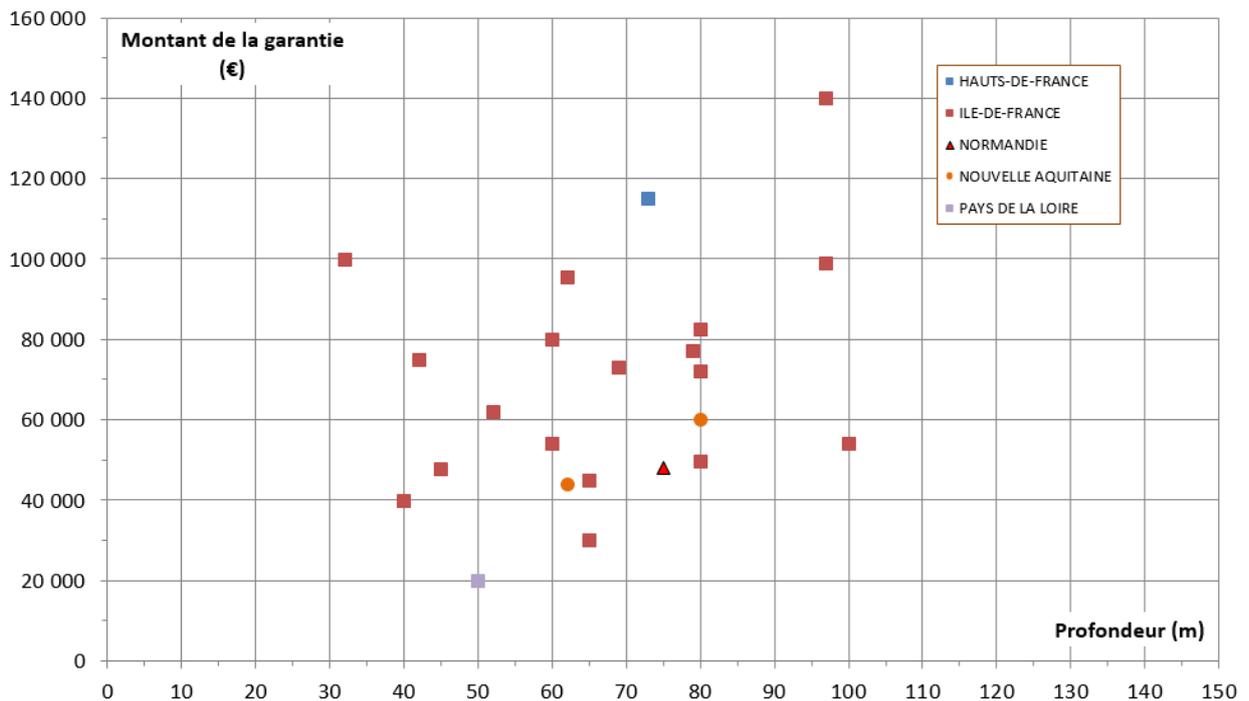


Figure 8 : Répartition régionale des montants de garantie en fonction de la profondeur pour la réalisation d'un forage de reconnaissance dans **les sables**.

5.1.3. Analyse des montants de garantie par gamme de profondeur

La relation entre le coût des forages et la profondeur forée permet, dans certains cas, d'expliquer les écarts potentiels du coût de réalisation des forages. L'analyse se porte sur les profondeurs renseignées dans le formulaire AQUAPAC⁸. Une simplification de tri des données a été faite en regroupant les profondeurs par gammes de profondeur de 20 m (cf. tableau 4).

Le tableau 4 met en évidence que la plupart des forages renseignés dans la base AQUAPAC sont compris entre 20 m et 100 m de profondeurs :

- < 20 m : 6 opérations ;
- > 20 m et < 100 m : 141 opérations ;
- > 100 m : 8 opérations.

Profondeur (m)	Coût total (€ HT)			Nb dossiers
	min	moy	max	
< 20	16 950	24 127	35 000	6
20 - 40	9 880	57 592	170 000	37
41 - 60	13 800	53 201	99 000	44
61 - 80	20 000	70 483	125 000	45
81 - 100	20 000	81 107	140 000	15
101 - 120	50 000	79 750	137 500	6
121 - 140	45 000	80 000	115 000	2
Total				155

Tableau 4 : Analyse, par gamme de profondeurs, du montant garanti pour la réalisation d'un forage de reconnaissance : coût total minimum, maximum, moyen.

La figure 9 met en évidence une disparité des montants de garantie minimum et maximum, qui semblent être indépendants de la profondeur forée. Elle peut s'expliquer par le fait que les coûts totaux intègrent des postes, dont le coût ne dépend pas de la profondeur forée : amenée – repli, tests hydrauliques, analyse d'eau, maîtrise d'œuvre et tarifs de la société de forage, qui intègrent encore d'autres critères. Les montants de garantie moyens suivent, par contre, une augmentation avec la profondeur pour les profondeurs comprises entre 40 m et 100 m (qui représentent les intervalles les mieux renseignés).

⁸ À noter que le diamètre du forage n'est pas renseigné dans le formulaire AQUAPAC.

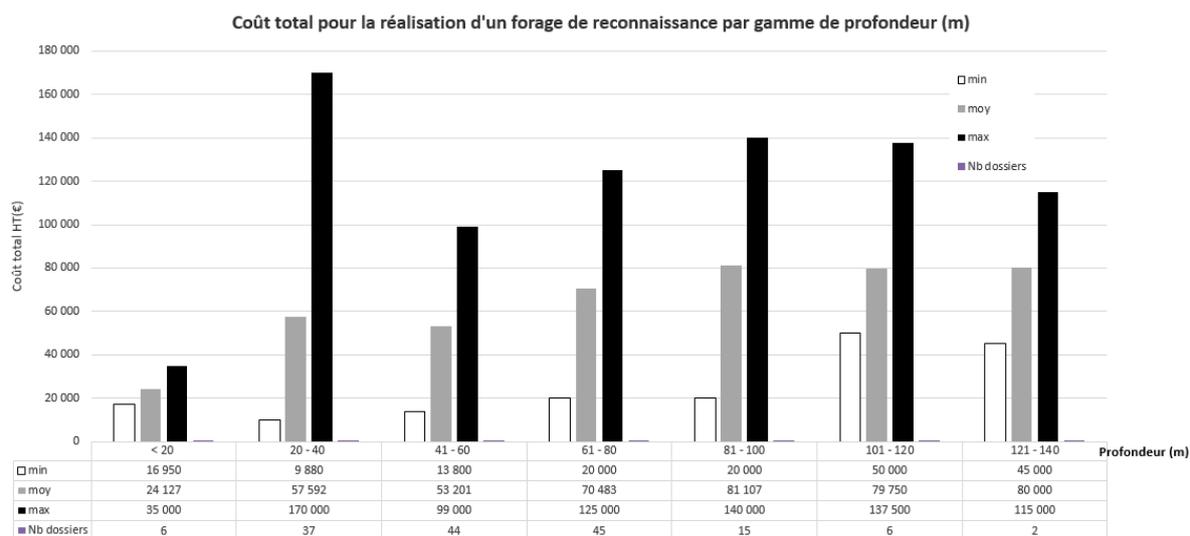


Figure 9 : Montant garanti (coûts totaux minimum, moyens, maximum) par gamme de profondeurs.

5.1.4. Analyse des montants de garantie par gamme de débits

Le débit de production influence le coût de réalisation du forage car il intègre son dimensionnement global (diamètre, profondeur) et son équipement (hauteurs crépinées, cimentations).

L'analyse s'est portée sur les débits renseignés dans le formulaire AQUAPAC⁹. Une simplification du tri des données a été faite en regroupant les débits par classes.

Le tableau 5 met en évidence que ~ 80 % des dossiers de la base AQUAPAC (sur un total de 155 opérations), concernent des débits compris entre 10 et 60 m³/h :

Débit (m3/h)	Coût total			Nb dossiers
	min	moy	max	
< 10	16 000	34 668	47 675	7
10 - 30	9 880	53 727	120 000	74
31 - 60	13 800	70 454	170 000	53
61 - 90	23 100	76 512	125 000	16
91 - 200	42 400	96 980	140 000	5
Total				155

Tableau 5 : Analyse, par gamme de débit, du montant garanti (coûts minimum, moyen, maximum) renseigné dans les dossiers de demande de garantie de recherche AQUAPAC.

⁹ Le débit pris en compte dans la présente étude est le débit maximum de production du forage tel qu'il est stipulé dans le formulaire de souscription de la garantie AQUAPAC.

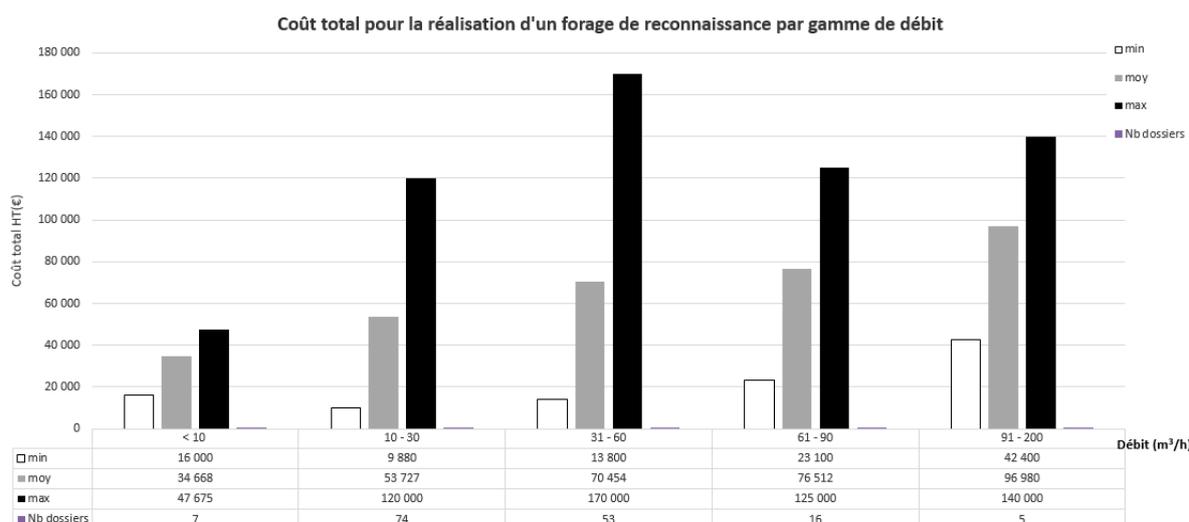


Figure 10 : Montant garanti (coûts totaux minimum, moyens, maximum) par gamme de débits (m³/h).

La figure 10 met en évidence une augmentation du montant de garantie moyen en fonction de la classe de débit. On observe la même tendance pour les montants de garantie minimum (excepté pour la première classe de débit). Ce n'est, en revanche, pas le cas pour les montants de garantie maximum (le pic se situe dans la classe de débit 31 – 60 m³/h). Cela peut s'expliquer par les spécificités de certaines opérations qui vont impliquer un coût total élevé intégrant le coût de postes qui ne dépendent pas du débit : amenée – repli, maîtrise d'œuvre.

La figure 11 montre la répartition globale des montants de garantie par région en fonction du débit sur la période 2014 – 2019. Ces résultats, malgré leur disparité, montrent une certaine cohérence et permettront d'orienter les futures demandes de garantie de recherche AQUAPAC.

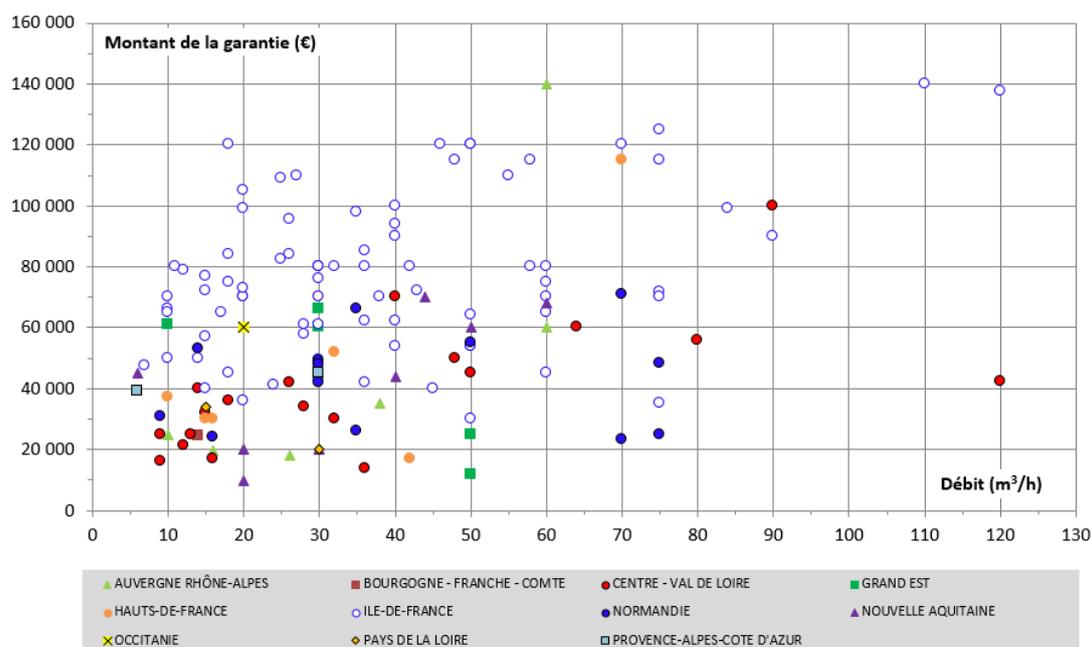


Figure 11 : Répartition par région des montants de garantie pour la réalisation d'un forage de reconnaissance en fonction du débit (période 2014 – 2019).

5.1.5. Analyse des montants de garantie moyens

L'analyse des montants de garantie moyens¹⁰ calculés **par région** montre que les coûts pratiqués en Île-de-France sont les plus élevés. Il est à noter que la valeur pour l'Occitanie n'est pas représentative car elle ne se base que sur un seul dossier :

Régions	Montant de garantie
	moyen € HT
OCCITANIE	140 000
ÎLE-DE-FRANCE	78 023
GRAND EST	57 600
BOURGOGNE - FRANCHE - COMTÉ	48 250
HAUTS-DE-FRANCE	45 200
NORMANDIE	41 735
AUVERGNE RHÔNE-ALPES	40 742
CENTRE - VAL DE LOIRE	39 126
PROVENCE-ALPES-CÔTE D'AZUR	37 235
NOUVELLE-AQUITAINE	36 729
PAYS DE LA LOIRE	27 000

Tableau 6 : Classification par région et par ordre décroissant, du montant de garantie moyen (coût total), renseigné dans les dossiers AQUAPAC.

Le tableau 7 donne le regroupement des régions en fonction du montant de garantie moyen (classement par ordre décroissant de 80 – 40 K€).

Régions	Montant de garantie moyen (K€)
Île-de-France	~ 80
Grand Est	~ 60
Bourgogne - Franche Comté, Hauts de France	~ 50
Centre-Val de Loire, Normandie, Auvergne RHA	~ 40
Nouvelle-Aquitaine, PACA, Pays de la Loire	< 40

Tableau 7 : Regroupement des régions en fonction du montant de garantie moyen (classement par ordre décroissant de 80 – 40 K€).

L'analyse des montants de garantie moyens en fonction de la **lithologie** montre que l'ordre de grandeur, en Île-de-France, semble peu influencé par le type de lithologie. Il est du même ordre de grandeur pour les sables, calcaires et la craie (voir tableau 8). Ceci peut s'expliquer par l'influence sur le coût total d'autres facteurs, et notamment l'aménée-repli, qui peut représenter un coût important en Île-de-France.

¹⁰ Montant de garantie moyen : coût total moyen garanti pour la réalisation d'un forage de reconnaissance

Dans les régions hors Île-de-France, les montants de garantie moyens sont plus variables (le coût du poste amenée-repli est plus à la marge). Ils ne retranscrivent, cependant, pas des variations de coût de foration et d'équipement, comme l'on pourrait s'y attendre en fonction de la lithologie (voir chapitre 5.2.3). Cela signifie que la lithologie n'est pas le paramètre principal, qui influence le coût total du forage :

Lithologie	IDF	HORS IDF
Sables	74 413	57 400
Calcaires	80 736	48 530
Grès		68 000
Craie	79 623	34 965
Granite		61 000
Marno-calcaires	39 800	
Alluvions		37 640
Schistes socle		34 000

Tableau 8 : Montants de garantie moyens en fonction de la lithologie (Île-de-France et hors Île-de-France).

L'analyse des montants de garantie moyens en fonction de la **profondeur** du forage ne montre pas une augmentation linéaire, le pic se situant, en Île-de-France, vers 81 - 100 m, et hors Île-de-France, vers 61 - 80 m (voir tableau 9) :

Profondeur (m)	IDF	HORS IDF
< 20		24 127
20 - 40	77 935	39 391
41 - 60	67 450	40 896
61 - 80	75 986	55 349
81 - 100	100 400	42 520
101 - 120	88 875	49 280
121 - 140	115 000	45 000

Tableau 9 : Montants de garantie moyens en fonction de la profondeur du forage (Île-de-France et hors Île-de-France).

L'analyse des montants de garantie moyens en fonction du **débit** montre, pour l'Île-de-France, une augmentation des montants en fonction de la gamme de débit (voir tableau 10). C'est également le cas pour les régions hors Île-de-France (excepté pour les débits inférieurs à 10 m³/h et supérieurs à 90 m³/h) :

Débit (m ³ /h)	IDF	HORS IDF
< 10	47 675	35 333
10 - 30	71 193	33 635
31 - 60	81 122	51 489
61 - 90	90 738	62 286
91 - 200	110 625	42 400

Tableau 10 : Montants de garantie en fonction du débit (Île-de-France et hors Île-de-France).

5.2. ANALYSE DES POSTES DE DÉPENSE POUR LA RÉALISATION D'UN FORAGE DE RECONNAISSANCE

L'analyse des postes de dépense déclarés par le pétitionnaire au comité AQUAPAC a été menée sur un échantillon de 38 dossiers AQUAPAC, sur la période 2014 – 2019. Une distinction a été faite sur la région Île-de-France, qui comprend le plus grand nombre de dossiers AQUAPAC (20 %), puis sur les régions hors Île-de-France.

L'analyse a été menée en quatre phases : sur les **coûts totaux**, sur les coûts de **foration et de l'équipement** exclusivement, sur **l'anomalie des coûts**, sur les **relations** entre le coût de chaque poste de dépense et la profondeur, le diamètre ou le débit.

5.2.1. Analyse sur les coûts totaux

Les coûts totaux représentent la somme de chaque poste de dépense pour la réalisation d'un forage de reconnaissance. Ils représentent des coûts prévisionnels et sont déclarés par le pétitionnaire au comité AQUAPAC, à partir d'un formulaire spécifique. Ils intègrent des postes, dont le coût ne varie pas forcément en fonction de la profondeur ou du diamètre¹¹.

Ces coûts peuvent être impactés par les spécificités de chaque opération, compte-tenu de la localisation géographique (impactant notamment le coût de l'amenée – repli), la géologie (impactant la technique de forage), l'aquifère ciblé et le débit recherché (impactant le diamètre et de la profondeur de foration).

L'analyse a été menée sur les coûts totaux rapportés au mètre linéaire de forage et mis en relation avec le diamètre de foration de l'aquifère¹² et en fonction de la géologie. Elle s'est

¹¹ C'est le cas des postes de dépense suivants : analyse d'eau, tests hydrauliques, amenée-repli, maîtrise d'œuvre.

¹² Le diamètre considéré dans cette étude est le diamètre de foration de l'aquifère cible (diamètre de foration au dernier train de tige). Les diamètres successifs utilisés en cas forage télescopique (foration à travers plusieurs aquifères/aquicludes) ne sont pas pris en compte.

portée sur 22 opérations, situées en Île-de-France (voir tableau 11 et figure 12), et sur 16 opérations, en France, hors Île-de-France (voir tableau 12 et figure 13).

Île-de-France

Craie		Calcaires		Sables - Yprésien	
Diamètre foration aquifère (mm)	Coût total € /ml	Diamètre foration aquifère (mm)	Coût total € /ml	Diamètre foration aquifère (mm)	Coût total € /ml
311	1746	311	1474	380	1540
311	2296	311	2092	400	693
311	2575	311	2101	560	3784
375	1386	311	2179		
375	1777	311	2781		
375	2330	311	2909		
381	1398	311	3960		
445	1782	375	1079		
508	4092	375	2095		
508	6324				

Tableau 11 : Coût total par mètre linéaire de forage en fonction du diamètre de foration et dans la craie, les calcaires et les sables de l'Yprésien pour la réalisation d'un forage de reconnaissance (22 opérations situées en Île-de-France).

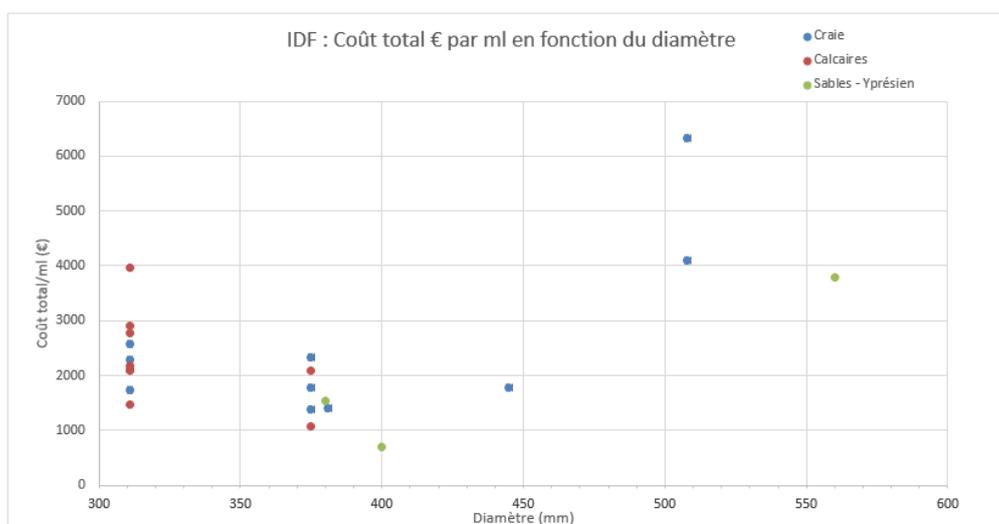


Figure 12 : Coût total par mètre linéaire de forage en fonction du diamètre de foration et dans la craie, les calcaires et les sables de l'Yprésien pour la réalisation d'un forage de reconnaissance (22 opérations situées en Île-de-France).

On peut remarquer que :

- les coûts totaux par mètre linéaire peuvent varier du simple au double pour un même diamètre. Cela peut s'expliquer par l'utilisation de différents diamètres de foration en cas de forage télescopiques, par le recours aux forages réalésés pour lesquels le coût du forage peut pratiquement doubler parce qu'on a utilisé un premier diamètre pour forer, puis un deuxième pour élargir, mais également par le matériau de la colonne captante, par une hauteur crépinée plus importante, par une complétion du forage différente. Ces variations de coût peuvent également s'expliquer par les postes qui ne dépendent pas de la profondeur et du diamètre : amenée-repli, analyse d'eau, tests hydrauliques, maîtrise d'œuvre. Les diamètres les plus couramment utilisés dans les calcaires sont du 311 mm ou du 375 mm. Ces deux diamètres sont également les plus utilisés dans la craie ;
- la fourchette des coûts totaux est plus basse pour le diamètre 375 mm que celle pour le diamètre 311 mm dans les calcaires et la craie, ce qui signifie que pour ces deux formations géologiques, le diamètre ne représente pas le paramètre exclusif de différenciation des coûts ;
- le coût total de l'opération forée en 380 mm dans les sables de l'Yprésien est en cohérence avec celui des opérations forées en 311 et 375 mm dans les calcaires et la craie.
- les valeurs révèlent une disparité des coûts totaux en fonction des différentes opérations. Deux d'entre elles présentent un coût total particulièrement élevé au regard du diamètre :
 - opération forée en 311 mm dans les calcaires : 3 960 €/ml,
 - opération forée en 508 mm dans la craie : 6 324 €/ml.

Régions hors Île-de-France

Alluvions		Craie		Calcaires		Sables et graviers du Pliocènes		Granite d'Epinal	
Diamètre foration aquifère (mm)	Coût total € /ml	Diamètre foration aquifère (mm)	Coût total € /ml	Diamètre foration aquifère (mm)	Coût total € /ml	Diamètre foration aquifère (mm)	Coût total € /ml	Diamètre foration aquifère (mm)	Coût total € /ml
300	1228	168	208	208	395	219	1411	311	733
350	2500	311	2099	219	2736				
880	2483	380	948	225	3685				
1200	1947	440	424	374	705				
				380	1305				
				410	1297				
				440	1535				

Tableau 12 : Coût total par mètre linéaire de forage en fonction du diamètre de foration et de la géologie pour la réalisation d'un forage de reconnaissance (opérations situées hors Île-de-France).

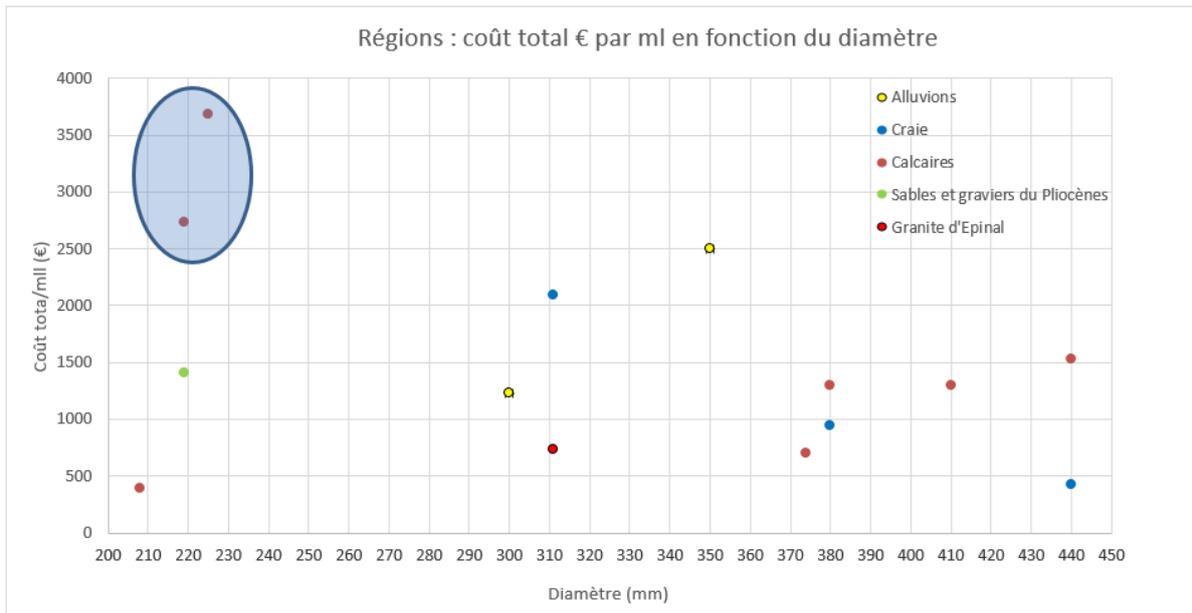


Figure 13 : Coût total par mètre linéaire de forage en fonction du diamètre de foration et de la géologie pour la réalisation d'un forage de reconnaissance (opérations situées hors Île-de-France). Les opérations situées dans le cercle bleu présentent un coût total anormalement élevé.

On peut remarquer que :

- la gamme des diamètres utilisés est plus large qu'en Île-de-France, que ce soit dans les calcaires et la craie ou les autres formations géologiques ;
- les coûts totaux par mètre linéaire sont généralement plus bas que ceux pratiqués en Île-de-France ;
- les coûts peuvent varier du simple au double pour un même diamètre. Cela peut s'expliquer par l'utilisation de différents diamètres de foration en cas de forage télescopiques, par le recours aux forages réalisés pour lesquels le coût du forage peut pratiquement doubler parce qu'on a utilisé un premier diamètre pour forer, puis un deuxième pour élargir, mais également par le matériau de la colonne captante, par une hauteur crépinée plus importante, par une complétion du forage différente. Ces variations de coût peuvent également s'expliquer par les postes qui ne dépendent pas de la profondeur et du diamètre : amenée-repli, analyse d'eau, tests hydrauliques, maîtrise d'œuvre. Elles peuvent traduire des anomalies de coût (voir chapitre 5.2.3) ;
- on s'attendait à avoir une meilleure relation coût diamètre, car le diamètre est lié au débit et la relation entre coût et débit sur les valeurs moyennes est assez nette. Cela signifie également qu'un élément de disparité supplémentaire est lié à l'inadéquation entre le diamètre de l'ouvrage et le débit ;
- les valeurs révèlent une disparité des coûts totaux en fonction des différentes opérations. Deux d'entre elles présentent un coût total particulièrement élevé au regard du diamètre :
 - opération forée en 219 mm dans les calcaires : 2 736 €/ml,
 - opération forée en 225 mm dans les calcaires : 3 685 €/ml.

5.2.2. Analyse sur les coûts de foration et équipement

Pour affiner l'approche des coût totaux qui intègrent les postes de dépense dont le coût ne varie pas en fonction de la profondeur ou du diamètre¹³, une analyse a été faite en représentant uniquement le coût de la foration et de l'équipement en distinguant les opérations situées en Île-de-France (voir tableau 13 et figure 14) et celles situées dans les régions hors Île-de-France (voir tableau 14 et figure 15).

Cette approche a permis de comparer le coût additionné de ces deux postes, ramenée au mètre linéaire en fonction du diamètre et de la géologie.

Île-de-France

Craie		Calcaires		Sables - Yprésien	
Diamètre foration aquifère (mm)	Coût foration + équipement €/ml	Diamètre foration aquifère (mm)	Coût foration + équipement €/ml	Diamètre foration aquifère (mm)	Coût foration + équipement €/ml
311	664	311	846	380	951
311	1150	311	909	400	440
311	1522	311	1038	560	1758
375	871	311	1157		
375	1046	311	1185		
375	1300	311	1278		
381	677	311	2180		
445	1241	375	790		
508	1847	375	1468		
508	2114				

Tableau 13 : Coût additionné des postes de foration et équipement par mètre linéaire de forage en fonction du diamètre de foration et de la géologie pour la réalisation d'un forage de reconnaissance (opérations situées en Île-de-France).

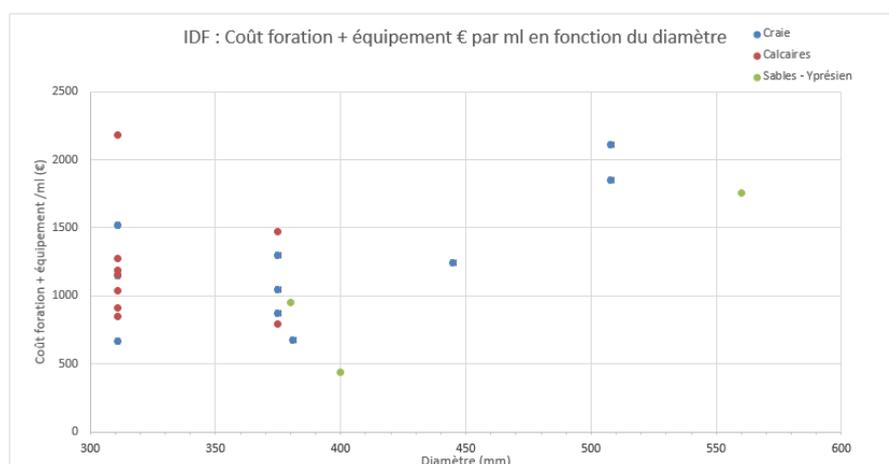


Figure 14 : Coût additionné des postes de foration et équipement par mètre linéaire de forage en fonction du diamètre de foration et de la géologie pour la réalisation d'un forage de reconnaissance (opérations situées en Île-de-France).

¹³ C'est le cas des postes de dépense suivants : analyse d'eau, tests hydrauliques, amené-repli, maîtrise d'œuvre.

Régions hors Île-de-France

Alluvions		Craie		Calcaires		Sables et graviers du Pliocènes		Granite d'Epinal	
Diamètre foration aquifère (mm)	Coût foration + équipement € /ml	Diamètre foration aquifère (mm)	Coût foration + équipement € /ml	Diamètre foration aquifère (mm)	Coût foration + équipement € /ml	Diamètre foration aquifère (mm)	Coût foration + équipement € /ml	Diamètre foration aquifère (mm)	Coût foration + équipement € /ml
300	643	168	96	208	128	219	731	311	337
350	1805	311	785	219	1285				
880	1987	380	552	225	2739				
1200	1397	440	352	374	375				
				380	601				
				410	933				
				440	830				

Tableau 14 : Coût additionné des postes de foration et équipement par mètre linéaire de forage en fonction du diamètre de foration et de la géologie pour la réalisation d'un forage de reconnaissance (opérations situées hors Île-de-France).

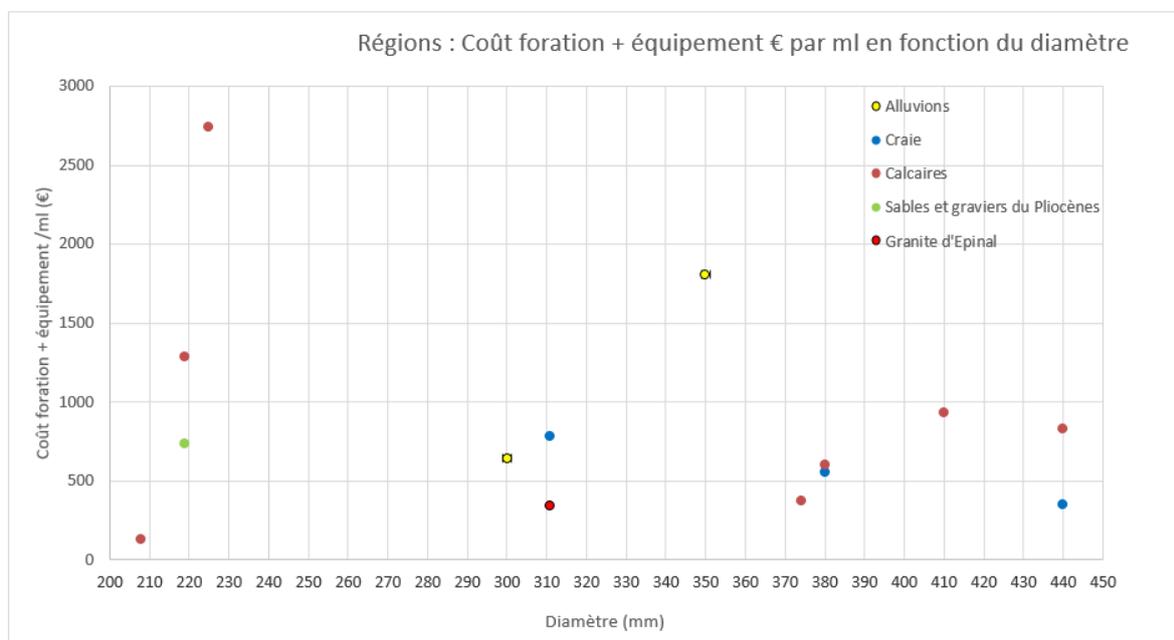


Figure 15 : Coût additionné des postes de foration et équipement par mètre linéaire de forage en fonction du diamètre de foration et de la géologie pour la réalisation d'un forage de reconnaissance (opérations situées hors Île-de-France).

Cette analyse met en évidence une disparité de valeurs semblable à celle observée à travers l'analyse menée sur le coût total. Elle est plus importante pour les opérations situées hors Île-de-France, qui ne montrent pas de liaison directe entre le coût des deux postes foration – équipement et le diamètre.

5.2.3. Analyse des anomalies de coût

Une synthèse des coûts a été réalisée pour des opérations sélectionnées en fonction de la géologie rencontrée dans chacune des régions. L'objectif était de dégager les dossiers présentant des anomalies de coûts et d'en expliquer l'origine. L'analyse a été faite sur le même échantillon d'opérations qu'en 5.2.1.

Les opérations présentant des **anomalies de coût** ont été mises en évidence sur les dossiers indiquant une différence supérieure à 20 k€ entre le montant garanti par le comité AQUAPAC¹⁴ et le coût total déclaré par le pétitionnaire. Ces opérations sont surlignées en rouge dans les tableaux ci-dessous.

Les anomalies de coûts ont été répertoriées en deux catégories pour chaque opération : **écarts majeurs** et **écarts mineurs**. Cette distinction a été faite par comparaison du coût de chaque poste avec la **moyenne** respective, calculée sur les opérations sélectionnées. Les postes de dépense supérieurs à la moyenne sont affichés en rouge dans les tableaux.

Une distinction supplémentaire a permis de comparer le coût de chaque poste (en %) par rapport au **coût total moyen**. Cela permet de pondérer l'anomalie du coût de chaque poste par rapport à la moyenne des opérations.

Île-de-France

Les tableaux 15 – 17 présentent la synthèse des coûts pour la réalisation d'un forage de reconnaissance dans trois types de formations géologiques : la Craie du Campanien-Turonien, les calcaires du Lutétien et les sables de l'Yprésien.

- Craie du Campanien-Turonien (voir tableau 15) :

4 opérations sur 10 présentent une anomalie entre le coût total et le montant garanti (Delta CT-MG) :

- opération 24.104 (Delta CT-MG = 63 k€) :

une anomalie ressort entre le coût total (143 206 €) et la **profondeur** (35 m), ce qui représente un ratio de 4 092 €/m (moyenne : 2 570 €/m). Une anomalie ressort également entre le coût total et la **puissance** (280 kW), ce qui représente un ratio de 511 €/kW (moyenne : 287 €/kW). Ces deux anomalies peuvent être expliquées par les postes de dépense suivants :

▪ écarts majeurs :

- le coût de **foration** par mètre linéaire est de 1 249 €/m, la moyenne étant dans les calcaires de 591 €/m. En comparaison, l'opération 27.109 présente un ratio de 507 €/m pour une profondeur et un diamètre de foration équivalents. Le coût de foration représente pour cette opération 32 % du coût total moyen (moyenne : 26 %) ;
- le coût de **fermeture** par mètre linéaire est de 1 143 €/m, la moyenne étant dans les calcaires de 247 €/m. Le coût de fermeture représente pour cette opération **29 %** du coût total moyen (moyenne : 8 %) ;

¹⁴ Le montant de garantie est défini par le comité AQUAPAC, notamment en référence à une courbe des montants garantis pour les opérations de même profondeur

▪ **écarts mineurs :**

- le coût de l'**équipement** du forage par mètre linéaire est de 865 €/m, la moyenne étant dans les calcaires de 652 €/m. Le pourcentage du coût de l'équipement par rapport au coût total moyen (22 %) est en revanche inférieur à la moyenne (26 %) ;
- le pourcentage du coût de la **maîtrise d'œuvre** par rapport au coût total moyen (11 %) dépasse légèrement la valeur limite fixée par le Comité AQUAPAC (10 %) ;

- **opération 27.109 (Delta CT-MG = 57 k€) :**

une anomalie ressort entre le coût total (227 656 €) et la **profondeur** (36 m), ce qui représente un ratio de 6 324 €/m (moyenne : 2 570 €/m). Une anomalie ressort également entre le coût total et le **diamètre** (508 mm), ce qui représente un ratio de 448 €/mm (moyenne : 365 €/mm). En comparaison, l'opération 24.104 présente un ratio de 282 €/mm pour un diamètre équivalent. Ces deux anomalies peuvent être expliquées par les postes de dépense suivants :

▪ **écarts majeurs :**

- le coût de la **maîtrise d'œuvre** paraît être démesuré (92 600 €). Le pourcentage par rapport au coût total moyen (**67 %**) dépasse la valeur limite fixée par le Comité AQUAPAC (10 %) ;
- le coût de l'**équipement** du forage par mètre linéaire est de 1 340 €/m, la moyenne étant dans les calcaires de 652 €/m. Le coût de l'équipement représente 35 % du coût total moyen (moyenne : 26 %) ;

▪ **écarts mineurs :**

- le coût des **tests hydrauliques** par rapport au débit est de 628 €/m³/h, la moyenne étant à 528 €/m³/h. Ce poste représente 27 % du coût total moyen (moyenne : 18 %) ;

- **Opération 28.117 (Delta CT-MG = 106 k€) :**

une anomalie ressort entre le coût total (226 560 €) et le **diamètre** (311 mm), ce qui représente un ratio de 728 €/mm (moyenne : 365 €/mm). Une anomalie ressort également entre le coût total et le **débit** (50 m³/h), ce qui représente un ratio de 4 531 €/m³/h (moyenne : 2 824 €/m³/h). Une anomalie ressort également entre le coût total et la **puissance** (625 kW), ce qui représente un ratio de 362 €/kW (moyenne : 287 €/kW). Ces trois anomalies peuvent être expliquées par les postes de dépense suivants :

▪ **écarts majeurs :**

- le coût de l'**équipement** du forage par mètre linéaire est de 948 €/m, la moyenne étant dans les calcaires de 652 €/m. Le coût de l'équipement par rapport au diamètre de foration (268 €/mm) dépasse également la moyenne (94 €/mm). Le coût de l'équipement représente **60 %** du coût total moyen (moyenne : 26 %) ;
- le coût des **tests hydrauliques** par rapport au débit est de 1 050 €/m³/h, la moyenne étant à 528 €/m³/h. Ce poste représente 38 % du coût total moyen (moyenne : 18 %) ;

▪ **écarts mineurs :**

- le coût de **foration** par rapport au diamètre est de 163 €/mm, la moyenne étant dans les calcaires de 99 €/mm. Le coût de foration par mètre linéaire (574 €/m) est en revanche inférieur à la moyenne (591 €/m). Le coût de foration représente pour cette opération 37 % du coût total moyen (moyenne : 26 %) ;
- le coût du poste **analyse d'eau** (1200 €) dépasse légèrement la moyenne (1137 €) ;

- **opération 25.111 (Delta CT-MG = 30 k€) :**

une anomalie ressort entre le coût total (140 000 €) et le **débit** (27 m³/h), ce qui représente un ratio de 5 185 €/ m³/h (moyenne : 2 824 €/ m³/h). Une anomalie ressort également entre le coût total et la **puissance** (295 kW), ce qui représente un ratio de 475 €/kW (moyenne : 287 €/kW). Ces deux anomalies peuvent être expliquées par les postes de dépense suivants :

▪ **écarts majeurs :**

- le coût de **foration** par mètre linéaire est de 634 €/m, la moyenne étant dans les calcaires de 591 €/m. Le coût de foration par rapport au diamètre (171 €/mm) est également plus élevé que la moyenne (99 €/mm). Le coût de foration représente pour cette opération **46 %** du coût total moyen (moyenne : 26 %) ;
- le coût du poste **analyse d'eau** (2 000 €) dépasse la moyenne (1 137 €) ;

▪ **écarts mineurs :**

- le coût de **fermeture** représente 11 % du coût total moyen (moyenne : 8 %) ;
- le pourcentage du coût de la **maîtrise d'œuvre** par rapport au coût total moyen (18 %) dépasse la valeur limite fixée par le Comité AQUAPAC (10 %).

COUFOR - Étude des coûts relatifs aux travaux de forage en géothermie de surface

No dossier	24 104	27 109	24 108	25 114	28 114	25 108	26 106	28 117	28 113	25 111
REGION	IDF	IDF	IDF	IDF	IDF	IDF	IDF	IDF	IDF	IDF
Aquifère	Craie	Craie	Craie	Craie	Craie	Craie de Meudon (Montien)	Craie	Craie fracturée du Campanien	Craie fracturée du Campanien	Craie (Montien)
Profondeur (m)	35	36	40	40	42	65	80	88	93	101
Coût total /profondeur (€/m)	4092	6324	1782	2330	2296	1777	1746	2575	1398	1386
Diamètre foration aquifère (mm)	508	508	445	375	311	375	311	311	381	375
Coût total /diamètre (€/mm)	282	448	160	249	310	308	449	728	341	373
Débit garanti (m ³ /h)	32	60	200	30	43	40	70	50	50	27
Coût total /débit (€/m ³ /h)	2500	2833	356	3107	2242	2888	1995	4531	2600	5185
Puissance thermique (kW)	280	792	19000	201	500	418	654	625	1550	295
Coût total /Puissance (€/kW)	511	287	4	464	193	276	214	362	84	475
Coût amenée - repli	0	23923	0	0	11800	0	0	29000	23000	0
Coût foration (€)	43725	18264	13000	25000	12080	30000	67850	50550	37000	64000
Coût /profondeur (€/m)	1249	507	325	625	288	462	848	574	398	634
Coût /diamètre (€/mm)	86	36	29	67	39	80	218	163	97	171
Coût foration / coût total moyen (%)	32	13	9	18	9	22	49	37	27	46
Coût équipement forage	30281	48244	36645	27000	15808	38000	24130	83390	26000	24000
Coût /profondeur (€/m)	865	1340	916	675	376	585	302	948	280	238
Coût /diamètre (€/mm)	60	95	82	72	51	101	78	268	68	64
Coût équipement/coût total moyen (%)	22	35	26	20	11	27	17	60	19	17
Coût tests hydrauliques (€)	13280	37707	6025	18000	31205	16000	42080	52520	23000	10000
Coût /débit (€/m ³ /h)	415	628	30	600	726	400	601	1050	460	370
Coût tests/coût total moyen (%)	10	27	4	13	23	12	30	38	17	7
Coût analyse eau	920	1200	1350	1000	1100	1000	600	1200	1000	2000
Coût fermeture (€)	40000	5718	10000	10000	4500	12000	5000	5000	10000	15000
Coût /profondeur (€/m)	1143	159	250	250	107	185	63	57	108	149
Coût fermeture/coût total moyen (%)	29	4	7	7	3	9	4	4	7	11
Coût maîtrise d'Œuvre	15000	92600	4250	12200	19925	18500	0	4900	10000	25000
Coût MO/coût total moyen (%)	11	67	3	9	14	13	0	4	7	18
Coût total (€)	143206	227656	71270	93200	96418	115500	139660	226560	130000	140000
Montant garanti (€)	80 000	170 000	70 000	80 000	72 000	90 000	120 000	120 000	120 000	110 000
Différence (€)	63 206	57 656	1 270	13 200	24 418	25 500	19 660	106 560	10 000	30 000
Commentaire			Rotary à la boue							
										Limite : 10%
										138347

Postes de dépense

Tableau 15 : Analyse des coûts prévisionnels de chaque poste de dépense pour la réalisation d'un forage de reconnaissance dans la craie (opérations situées en Île-de-France). Les valeurs en rouge correspondent à des anomalies de coût.

- **Calcaires du Lutétien (voir tableau 16) :**

3 opérations sur 9 présentent une anomalie entre le coût total et le montant garanti (Delta CT-MG :

- **opération 25.103 (Delta CT-MG = 25 k€) :**

aucune anomalie ne ressort entre le coût total (100 580 €) et les paramètres suivants : profondeur, diamètre, débit, puissance. Les ratios sont, en effet, tous inférieurs à la moyenne. Des anomalies de coût peuvent, cependant, être dégagées pour les postes de dépense suivants :

▪ **écarts majeurs :**

- le coût de l'**équipement** du forage par mètre linéaire est de 854 €/m, la moyenne étant dans les calcaires de 494 €/m. Le coût de l'équipement par rapport au diamètre de foration (41 €/mm) dépasse également la moyenne (24 €/mm). Le coût de l'équipement représente 35 % du coût total moyen (moyenne : 22 %) ;

▪ **écarts mineurs :**

- le pourcentage du coût de la **maîtrise d'œuvre** par rapport au coût total moyen (16 %) dépasse la valeur limite fixée par le Comité AQUAPAC (10 %) ;

- **opération 25.118 (Delta CT-MG = 118 k€) :**

une anomalie ressort entre le coût total et le **débit** (11 m³/h), ce qui représente un ratio de **18 000 €/ m³/h** (moyenne : 5 012 €/ m³/h). Une anomalie ressort également entre le coût total (198 000 €) et la **profondeur** (50 m), ce qui représente un ratio de 3 960 €/m (moyenne : 2 297 €/m). Une anomalie ressort également entre le coût total et le **diamètre** (311 mm), ce qui représente un ratio de 637 €/mm (moyenne : 365 €/mm). Une anomalie ressort également entre le coût total et la **puissance** (85 kW), ce qui représente un ratio de 2 329 €/kW (moyenne : 585 €/kW). Ces quatre anomalies peuvent être expliquées par les postes de dépense suivants :

▪ **écarts majeurs :**

- le coût de **foration** par mètre linéaire est de 1580 €/m, la moyenne étant dans les calcaires de 712 €/m. Le coût de foration par rapport au diamètre (40 €/mm) est également plus élevé que la moyenne (31 €/mm). Le coût de foration représente pour cette opération **67 %** du coût total moyen (moyenne : 32 %) ;
- le coût des **tests hydrauliques** par rapport au débit est de 3636 €/m³/h, la moyenne étant à 978 €/m³/h. Ce poste représente 34 % du coût total moyen (moyenne : 19 %) ;
- le pourcentage du coût de la **maîtrise d'œuvre** par rapport au coût total moyen (28 %) dépasse la valeur limite fixée par le Comité AQUAPAC (10 %).
- le coût de **fermeture** représente 13 % du coût total moyen (moyenne : 5 %) ;

▪ **écarts mineurs :**

- le coût de l'**équipement** du forage par mètre linéaire est de 600 €/m, la moyenne étant dans les calcaires de 494 €/m. Le coût de l'équipement représente 26 % du coût total moyen (moyenne : 22 %) ;

- **opération 27.102 (Delta CT-MG = 32 k€) :**

une anomalie ressort entre le coût total et le **débit** (18 m³/h), ce qui représente un ratio de 8 472 €/ m³/h (moyenne : 5012 €/ m³/h). Une anomalie ressort également entre le coût total (152 500 €) et le **diamètre** (311 mm), ce qui représente un ratio de 490 €/mm (moyenne : 365 €/mm). Une anomalie ressort également entre le coût total et la **puissance** (165 kW), ce qui représente un ratio de 924 €/kW (moyenne : 585 €/kW). Ces trois anomalies peuvent être expliquées par les postes de dépense suivants :

▪ **écarts majeurs :**

- le coût de **foration** par mètre linéaire est de 1043 €/m, la moyenne étant dans les calcaires de 712 €/m. Le coût de foration par rapport au diamètre (48.-/mm) est également plus élevé que la moyenne (31 €/mm). Le coût de foration représente pour cette opération **62 %** du coût total moyen (moyenne : 32 %) ;
- le coût du poste **analyse d'eau** (6500 €) dépasse la moyenne (2 392 €).
- le coût des **tests hydrauliques** par rapport au débit est de 1 778 €/m³/h, la moyenne étant à 978 €/m³/h. Ce poste représente 27 % du coût total moyen (moyenne : 19 %) ;

▪ **écarts mineurs :**

- le pourcentage du coût de la **maîtrise d'œuvre** par rapport au coût total moyen (15 %) dépasse la valeur limite fixée par le Comité AQUAPAC (10 %).

- **Sables - Yprésien (voir tableau 17) :**

1 opération sur 3 présente une anomalie entre le coût total et le montant garanti (Delta CT-MG) :

- **Opération 26.101 (Delta CT-MG = 21 k€) :**

une anomalie ressort entre le coût total (121 095 €) et la **profondeur** (32 m), ce qui représente un ratio de 3 784 €/m (moyenne : 2 006 €/m). Une anomalie ressort également entre le coût total et le **débit** (40 m³/h), ce qui représente un ratio de 3 027 € (moyenne : 2 485 €/ m³/h). Ces deux anomalies peuvent être expliquées par les postes de dépense suivants :

▪ **écarts majeurs :**

- le coût de l'**équipement** du forage par mètre linéaire est de 932 €/m, la moyenne étant dans les calcaires de 460 €/m. Le coût de l'équipement représente 34 % du coût total moyen (moyenne : 22 %) ;
- le coût des **tests hydrauliques** par rapport au débit est de 792 €/m³/h, la moyenne étant à 587 €/m³/h. Ce poste représente 36 % du coût total moyen (moyenne : 24 %) ;
- le pourcentage du coût de la **maîtrise d'œuvre** par rapport au coût total moyen (30 %) dépasse la valeur limite fixée par le Comité AQUAPAC (10 %) ;

▪ **écarts mineurs :**

- le coût de **foration** par mètre linéaire est de 827 €/m, la moyenne étant dans les sables de 590 €/m. Les ratios de coût de foration par rapport au diamètre et de coût de foration par rapport au pourcentage du coût total sont en revanche inférieurs à la moyenne ;
- le coût de **fermeture** représente 6 % du coût total moyen (moyenne : 4 %) ;

No dossier	26 101	27 103	25 101		
REGION	ILE-DE-FRANCE	ILE-DE-FRANCE	ILE-DE-FRANCE		
Aquifère	Sables - Yprésien	Sables - Yprésien	Calcaires et sables Yprésien	Moyenne	
Profondeur (m)	32	62	65	53	
Coût total /profondeur (€/m)	3784	1540	693	2006	
Diamètre foration aquifère (mm)	560	380	400	447	
Coût total /diamètre (€/mm)	216	251	113	193	
Débit garanti (m ³ /h)	40	26	60	42	
Coût total /débit (€/m ³ /h)	3027	3673	750	2484	
Puissance thermique (kW)	465	207	950	541	
Coût total /Puissance (€/kW)	260	461	47	256	
Postes de dépense	Coût amenée - repli	0	0	0	0
	Coût foration (€)	26459	38000	21550	28670
	Coût /profondeur (€/m)	827	613	332	590
	Coût /diamètre (€/mm)	22	40	48	37
	Coût foration / coût total moyen (%)	30	44	25	33
	Coût équipement forage	29815	21000	7090	19302
	Coût /profondeur (€/m)	932	339	109	460
	Coût /diamètre (€/mm)	25	22	16	21
	Coût équipement/coût total moyen (%)	34	24	8	22
	Coût tests hydrauliques (€)	31682	21000	9725	20802
	Coût /débit (€/m ³ /h)	792	808	162	587
	Coût tests/coût total moyen (%)	36	24	11	24
	Coût analyse eau	1864	5000	150	2338
	Coût fermeture (€)	5000	4000	1000	3333
	Coût /profondeur (€/m)	156	65	15	79
	Coût fermeture/coût total moyen (%)	6	5	1	4
	Coût maîtrise d'Œuvre	26275	6500	5500	12758
	Coût MO/coût total moyen (%)	30	7	6	Limite : 10%
	Coût total (€)	121095	95500	45015	87203
	Montant garanti (€)	100 000	95 500	45 000	
Différence (€)	21 095	0	15		
Commentaire	Rotary boue	Rotary boue	Rotary boue ou MFT Tubage PVC, Spécial Forage, vissé		

Tableau 17 : Analyse des coûts prévisionnels de chaque poste de dépense pour la réalisation d'un forage de reconnaissance dans les **sables de l'Yprésien** (opérations situées en Île-de-France). Les postes en rouge correspondent à des anomalies de coût.

Régions hors Île-de-France

Les tableaux 18 – 21 présentent la synthèse des coûts de chaque poste de dépense pour les cinq types de formations géologiques (lithologies) retenues (déclarées dans les formulaires AQUAPAC) : les alluvions, la craie, les calcaires, les sables et graviers du Pliocène, le granite. Les deux dernières sont moins documentées, avec un seul dossier chacune.

- Alluvions (voir tableau 18) :

1 opération sur 3 présente une anomalie entre le coût total et le montant garanti (Delta CT-MG) :

- opération 26.111 (Delta CT-MG = 31 k€) :

une anomalie ressort entre le coût total (91 500 €) et le **débit** (30 m³/h), ce qui représente un ratio de 3 050 € (moyenne : 1 845 €/m³/h). Cette anomalie peut être expliquée par les postes de dépense suivants :

▪ écarts majeurs :

- le coût de l'**équipement** du forage par mètre linéaire est de 841 €/m, la moyenne étant dans les calcaires de 548 €/m. Le coût de l'équipement par rapport au diamètre de foration (1 200 mm) est de 66 €/mm et dépasse également la moyenne (33 €/mm). Le coût de l'équipement représente **79 %** du coût total moyen (moyenne : 30 %). Il est à noter que ce forage a été réalisé à la benne et à la soupape avec mise en œuvre d'un tubage de soutènement avançant au niveau de l'outil. La colonne de tubage est en PVC, ce qui devrait baisser le coût par rapport à une colonne en acier inox 304 L ;
- le coût des **tests hydrauliques** par rapport au débit est de 608 €/m³/h, la moyenne étant à 278 €/m³/h. Ce poste représente 36 % du coût total moyen (moyenne : 16 %) ;

▪ écarts mineurs :

- le pourcentage du coût de la **maîtrise d'œuvre** par rapport au coût total moyen (14 %) dépasse la valeur limite fixée par le Comité AQUAPAC (10 %) ;

- Opération 26.110 (Delta CT-MG = 0.6 k€) :

bien que l'écart entre le coût total et le montant garanti soit inférieur à 20 k€ pour cette opération, l'analyse montre qu'elle présente plusieurs postes de dépense dont le montant est supérieur à la moyenne.

Une anomalie ressort entre le coût total (49 650 €) et la **profondeur** (20 m), ce qui représente un ratio de 2 483 €/m (moyenne : 2 039 €/m). Une anomalie ressort également entre le coût total et la **puissance** (133 kW), ce qui représente un ratio de 373 €/kW (moyenne : 225 €/kW). Ces deux anomalies peuvent être expliquées par les postes de dépense suivants :

▪ écarts majeurs :

- le coût de **foration** par mètre linéaire est de 1 988 €/m, la moyenne étant dans les alluvions de 911 €/m. Le coût de foration par rapport au diamètre de foration (880 mm) est de 80 €/mm et dépasse également la moyenne (40 €/mm). Le coût de foration représente pour cette opération **79 %** du coût total moyen (moyenne : 41 %). Ces valeurs élevées peuvent s'expliquer par le

poste équipement qui est intégré au poste foration. Il est à noter que la foration a été réalisée avec la technique BENOTO (havage sous tubage à l'avancement forcé à l'aide d'un louvoyeur) ;

▪ **écarts mineurs :**

- le coût du poste **analyse d'eau** (880 €) dépasse la moyenne (569 €).

No dossier	28 106	25 104	26 110	26 111		
REGION	AUVERGNE RHÔNE-ALPES	BOURGOGNE - FRANCHE - COMTE	NORMANDIE	GRAND EST		
Aquifère	Nappe alluviale du Doubs (sables et graviers)	Alluvions	Alluvions anciennes de la Seine	Alluvions du Rhin	Moyenne	
Profondeur (m)	14	20	20	47	25	
Coût total /profondeur (€/m)	2500	1228	2483	1947	2039	
Diamètre foration aquifère (mm)	350	300	880	1200	683	
Coût total /diamètre (€/mm)	100	82	56	76	79	
Débit garanti (m ³ /h)	38	14	30	30	28	
Coût total /débit (€/m ³ /h)	921	1755	1655	3050	1845	
Puissance thermique (kW)	351	96	133	540	280	
Coût total /Puissance (€/kW)	100	256	373	169	225	
Postes de dépense	Coût amenée - repli	0	0	0	0	
	Coût foration (€)	12275	4450	39750	26210	20671
	Coût /profondeur (€/m)	877	223	1988	558	911
	Coût /diamètre (€/mm)	35	18	80	29	40
	Coût foration / coût total moyen (%)	24	9	79	52	41
	Coût équipement forage	13000	8413	0	39540	15238
	Coût /profondeur (€/m)	929	421	0	841	548
	Coût /diamètre (€/mm)	32	34	0	66	33
	Coût équipement/coût total moyen (%)	26	17	0	79	30
	Coût tests hydrauliques (€)	6950	1680	6060	18250	8235
	Coût /débit (€/m ³ /h)	183	120	202	608	278
	Coût tests/coût total moyen (%)	14	3	12	36	16
	Coût analyse eau	350	495	880	550	569
	Coût fermeture (€)	1300	4060	0	0	1340
	Coût /profondeur (€/m)	93	203	0	0	74
	Coût fermeture/coût total moyen (%)	3	8	0	0	3
	Coût maîtrise d'Œuvre	6225	5470	2960	6950	5401
	Coût MO/coût total moyen (%)	12	11	6	14	Limite : 10%
	Coût total (€)	35000	24568	49650	91500	50180
	Montant garanti (€)	40 100	24 500	49 000	60 000	
Différence (€)	-5 100	68	650	31 500		
Commentaire	Forage à la tarière, au marteau- fond-de-trou ou au rotary (à l'air ou l'eau potable), avec tube de soutènement provisoire à l'avancement. Colonne de captage d'environ 200 mm de diamètre en acier inox 304 L	Forage au rotary	BENOTO (havage sous tubage à l'avancement forcé à l'aide d'un louvoyeur)	Forage effectué à la benne et à la soupape avec mise en oeuvre d'un tubage de soutènement avançant au niveau de l'outil. Tubage PVC		

Tableau 18 : Analyse des coûts prévisionnels de chaque poste de dépense pour la réalisation d'un forage de reconnaissance dans les **alluvions** (opérations situées dans les régions Auvergne Rhône-Alpes, Bourgogne Franche-Comté, Normandie, Grand Est).
Les postes en rouge correspondent à des anomalies de coût.

- **Craie (voir tableau 19) :**

aucune opération sur les 4 sélectionnées ne présente une anomalie entre le coût total et le montant garanti (Delta CT-MG). L'analyse montre, en revanche, que trois d'entre-elles présentent plusieurs postes de dépense, dont le montant est supérieur à la moyenne :

- **Opération 27.111 :**

une anomalie ressort entre le coût total (73 451 €) et la **profondeur** (35 m), ce qui représente un ratio de 2 099 €/m (moyenne : 920 €/m). Une anomalie ressort également entre le coût total et le **diamètre** (311 mm), ce qui représente un ratio de 236 €/mm (moyenne : 152 €/mm). Une anomalie ressort également entre le coût total et le **débit** (30 m³/h), ce qui représente un ratio de 2 448 €/m³/h (moyenne : 1 139 €/m³/h). Une anomalie ressort également entre le coût total et la **puissance** (230 kW), ce qui représente un ratio de 319 €/kW (moyenne : 173 €/kW). Ces quatre anomalies peuvent être expliquées par les postes de dépense suivants :

▪ **écarts majeurs :**

- le coût de l'**équipement** du forage par mètre linéaire est de 494 €/m, la moyenne étant dans la craie de 223 €/m. Le coût de l'équipement représente 36 % du coût total moyen (moyenne : 26 %) ;
- le coût des **tests hydrauliques** par rapport au débit est de 802 €/m³/h, la moyenne étant à 299 €/m³/h. Ce poste représente **50 %** du coût total moyen (moyenne : 21 %) ;
- le coût du poste **analyse d'eau** (1 705 €) dépasse la moyenne (854 €) ;

▪ **écarts mineurs :**

- le coût de **fermeture** représente 12 % du coût total moyen (moyenne : 5 %) ;

- **opération 25.107 :**

une anomalie ressort entre le coût total (56 850 €) et la **profondeur** (60 m), ce qui représente un ratio de 948 €/m (moyenne : 920 €/m). Cette anomalie peut être expliquée par les postes de dépense suivants :

▪ **écarts majeurs :**

- le coût de **foration** par mètre linéaire est de 370 €/m, la moyenne étant dans la craie de 223 €/m. Le coût de foration par rapport au diamètre de foration (380 mm) est de 39 €/mm et dépasse légèrement la moyenne (31 €/mm). Le coût de foration représente pour cette opération **46 %** du coût total moyen (moyenne : 29 %) ;
- le pourcentage du coût de la **maîtrise d'œuvre** par rapport au coût total moyen (23 %) dépasse la valeur limite fixée par le Comité AQUAPAC (10 %).

▪ **écarts mineurs :**

- le coût du poste **analyse d'eau** (1200 €) dépasse la moyenne (854 €).

No dossier	27 111	25 107	29 101	25 109		
REGION	HAUTS-DE-France	CENTRE - VAL DE LOIRE	NOUVELLE AQUITAINE	CENTRE - VAL DE LOIRE		
Aquifère	Craie Sénonienne blanche à silex	Craie_Séno-Turonien	Craie fracturée du Campanien	Craie	Moyenne	
Profondeur (m)	35	60	100	100	74	
Coût total /profondeur (€/m)	2099	948	208	424	920	
Diamètre foration aquifère (mm)	311	380	168	440	325	
Coût total /diamètre (€/mm)	236	150	124 €	96	152	
Débit garanti (m ³ /h)	30	80	20	120	63	
Coût total /débit (€/m ³ /h)	2448	711	1042	353	1139	
Puissance thermique (kW)	230	750	80	1 231	573	
Coût total /Puissance (€/kW)	319	76	261	34	173	
Postes de dépense	Coût amenée - repli	10228	0	390	0	2655
	Coût foration (€)	10171	22170	6510	16650	13875
	Coût /profondeur (€/m)	291	370	65	167	223
	Coût /diamètre (€/mm)	14	39	31	39	31
	Coût foration / coût total moyen (%)	21	46	13	34	29
	Coût équipement forage	17307	10950	3100	18553	12478
	Coût /profondeur (€/m)	494	183	31	186	223
	Coût /diamètre (€/mm)	25	20	16	44	26
	Coût équipement/coût total moyen (%)	36	23	6	38	26
	Coût tests hydrauliques (€)	24058	9010	5050	3380	10375
	Coût /débit (€/m ³ /h)	802	113	253	28	299
	Coût tests/coût total moyen (%)	50	19	10	7	21
	Coût analyse eau	1705	1200	150	360	854
	Coût fermeture (€)	5682	2220	2500	0	2601
	Coût /profondeur (€/m)	162	37	25	0	56
	Coût fermeture/coût total moyen (%)	12	5	5	0	5
	Coût maîtrise d'Œuvre	4300	11300	3140	3430	5543
	Coût MO/coût total moyen (%)	9	23	6	7	Limite : 10%
	Coût total (€)	73451	56850	20840	42373	48379
	Montant garanti (€)	70 000	56 000	20 000	42 400	
Différence (€)	3 451	850	840	-27		
Commentaire			MFT. Tubage acier jusqu'à 16 m puis trou nu	Forage au rotary. Tubage PVC		

Tableau 19 : Analyse des coûts prévisionnels de chaque poste de dépense pour la réalisation d'un forage de reconnaissance dans la **craie** (opérations situées dans les régions Haut-de-France, Centre-Val de Loire, Nouvelle-Aquitaine).
Les postes en rouge correspondent à des anomalies de coût.

- **Calcaires (voir tableau 20) :**

3 opérations sur 7 présentent une anomalie entre le coût total et le montant garanti (Delta CT-MG) :

- **Opération 26.108 (Delta CT-MG = 124 k€) :**

une anomalie ressort entre le coût total (184 246 €) et la **profondeur** (50 m), ce qui représente un ratio de 3685 €/m (moyenne : 1 511 €/m). Une anomalie ressort également entre le coût total et le **diamètre** (225 mm), ce qui représente un ratio de 819 €/mm (moyenne : 344 €/mm). Une anomalie ressort également entre le coût total et le **débit** (64 m³/h), ce qui représente un ratio de 2 879 €/ m³/h (moyenne : 2 109 €/m³/h). Une anomalie ressort également entre le coût total et la **puissance** (600 kW), ce qui représente un ratio de 307 €/kW (moyenne : 276 €/kW). Ces quatre anomalies peuvent être expliquées par les postes de dépense suivants :

▪ **écarts majeurs :**

- le coût de l'**équipement** du forage par mètre linéaire est de 1 610 €/m, la moyenne étant dans les calcaires de 501 €/m. Le coût de l'équipement représente **77 %** du coût total moyen (moyenne : 33 %) ;
- le coût de **foration** par mètre linéaire est de 769 €/m, la moyenne étant dans la craie de 297 €/m. Le coût de foration par rapport au diamètre de foration est, en revanche, inférieur à la moyenne. Le coût de foration représente pour cette opération **37 %** du coût total moyen (moyenne : 21 %) ;
- le coût de **fermeture** représente le 8 % du coût total moyen (moyenne : 2 %) ;
- le pourcentage du coût de la **maîtrise d'œuvre** par rapport au coût total moyen (38 %) dépasse la valeur limite fixée par le Comité AQUAPAC (10 %) ;

- **opération 26.104 (Delta CT-MG = 77 k€) :**

une anomalie ressort entre le coût total (147 750 €) et la **profondeur** (54 m), ce qui représente un ratio de 2 736 €/m (moyenne : 1 511 €/m). Une anomalie ressort également entre le coût total et le **diamètre** (219 mm), ce qui représente un ratio de 675 €/mm (moyenne : 344 €/mm). Une anomalie ressort également entre le coût total et le **débit** (40 m³/h), ce qui représente un ratio de 3 694 €/ m³/h (moyenne : 2 109 €/m³/h). Une anomalie ressort également entre le coût total et la **puissance** (270 kW), ce qui représente un ratio de 547 €/kW (moyenne : 276 €/kW). Ces quatre anomalies peuvent être expliquées par les postes de dépense suivants :

- **écarts majeurs :**
 - le coût de l'**équipement** du forage par mètre linéaire est de 883 €/m, la moyenne étant dans les calcaires de 501 €/m. Le coût de l'équipement représente **45 %** du coût total moyen (moyenne : 33 %) ;
 - le coût des **tests hydrauliques** par rapport au débit est de 1 277 €/m³/h, la moyenne étant à 614 €/m³/h. Ce poste représente **49 %** du coût total moyen (moyenne : 21 %) ;
 - le coût du poste **analyse d'eau** (2400 €) dépasse la moyenne (1 740 €).
- **écarts mineurs :**
 - le coût de **foration** par mètre linéaire est de 769 €/m, la moyenne étant dans la craie de 297 €/m. Le coût de foration par rapport au diamètre de foration est, en revanche, inférieur à la moyenne. Le coût de foration représente pour cette opération **37 %** du coût total moyen (moyenne : 21 %) ;
 - le pourcentage du coût de la **maîtrise d'œuvre** par rapport au coût total moyen (16 %) dépasse la valeur limite fixée par le Comité AQUAPAC (10 %) ;
- **opération 28.116 (Delta CT-MG = 36 k€) :**

bien que la différence entre le montant garanti et le montant total soit supérieur à 20 k€, aucune anomalie ne ressort entre le coût total (91 320 €) et les paramètres suivants : profondeur, diamètre, débit, puissance. Les ratios sont, en effet, tous inférieurs à la moyenne. Des anomalies de coût peuvent cependant être dégagées pour les postes de dépense suivants :

 - **écarts majeurs :**
 - le coût du poste **analyse d'eau** (2 200 €) dépasse la moyenne (1 740 €) ;
 - **écarts mineurs :**
 - le pourcentage du coût de la **maîtrise d'œuvre** par rapport au coût total moyen (11 %) dépasse légèrement la valeur limite fixée par le Comité AQUAPAC (10 %).

COUFOR - Étude des coûts relatifs aux travaux de forage en géothermie de surface

No dossier	27 107	24 106	26 108	28 104	28 116	26 112	27 110		
REGION	NOUVELLE AQUITAINE	NORMANDIE	CENTRE - VAL DE LOIRE	CENTRE - VAL DE LOIRE	NORMANDIE	CENTRE - VAL DE LOIRE	NOUVELLE AQUITAINE		
Aquifère	Calcaires et marnes du Jurassique	Calcaires - Dogger	Calcaires d'Etampes	Calcaires Séno-Turonien	Calcaires du Bathonien	Calcaires du Jurassique	Calcaires Coniaciens - turonien	Moyenne	
Profondeur (m)	25	50	50	54	70	80	110	79	
Coût total /profondeur (€/m)	395	1535	3685	2736	1305	1297	705	1511	
Diamètre foration aquifère (mm)	208	440	225	219	380	410	374	346	
Coût total /diamètre (€/mm)	47 €	174	819	675 €	240 €	253 €	207 €	344	
Débit garanti (m³/h)	20	35	64	40	50	90	44	56	
Coût total /débit (€/m³/h)	494	2193	2879	3694	1826	1153	1762	2109	
Puissance thermique (kW)	128	350	600	270	460	871	324	481	
Coût total /Puissance (€/kW)	77	219	307	547	199	119	239	276	
Postes de dépense	Coût amenée - repli	0	0	0	6500	9500	0	2750	4688
	Coût foration (€)	1765	12386	38450	21703	18800	21400	27695	22400
	Coût /profondeur (€/m)	71	248	769	402	269	268	252	297
	Coût /diamètre (€/mm)	18	16	21	15	21	21	36	23
	Coût foration / coût total moyen (%)	2	12	37	21	18	20	26	21
	Coût équipement forage	1443	29114	80516	47706	23300	53240	13636	34471
	Coût /profondeur (€/m)	58	582	1610	883	333	666	124	501
	Coût /diamètre (€/mm)	7	66	358	218	61	130	36	111
	Coût équipement/coût total moyen (%)	1	28	77	45	22	51	13	33
	Coût tests hydrauliques (€)	1936	18676	15880	51096	24600	17788	21490	28744
	Coût /débit (€/m³/h)	97	534	248	1277	492	198	488	614
	Coût tests/coût total moyen (%)	2	18	15	49	23	17	20	27
	Coût analyse eau	350	0	1200	2400	2200	360	2000	1740
	Coût fermeture (€)	1800	0	8000	1500	1000	3200	1500	1800
	Coût /profondeur (€/m)	72	0	160	28	14	40	14	24
	Coût fermeture/coût total moyen (%)	2	0	8	1	1	3	1	2
	Coût maîtrise d'Œuvre	2582	16581	40200	16845	11920	8140	8451	11339
Coût MO/coût total moyen (%)	2	16	38	16	11	8	8	Limite : 10%	
Coût total (€)	9876	76757	184246	147750	91320	103768	77522	105090	
Montant garanti (€)	9 880	66 000	60 000	70 000	55 000	100 000	70 000		
Différence (€)	-4	10 757	124 246	77 750	36 320	3 768	7 522		
Commentaire	MFT. Tube acier plein Ø 211x219 mm, cimenté 0-10 m puis trou nu.	Forage rotary aux polymères diamètre 219 mm réalisé en diamètre 440 mm. Tubage inox 304L diamètre 339 mm.		MFT	MFT. Tube PVC.	Forage rotary. Tube PVC.	MFT. Tube PVC.		

Tableau 20 Analyse des coûts prévisionnels de chaque poste de dépense pour la réalisation d'un forage de reconnaissance dans les **calcaires** (opérations situées dans les régions Nouvelle-Aquitaine, Normandie, Centre-Val de Loire). Les postes en rouge correspondent à des anomalies de coût.

- **Sables et graviers du Pliocène, granite d'Épinal (voir tableau 21) :**

1 opération sur 2 présente une anomalie entre le coût total et le montant garanti (Delta CT-MG). En raison du faible nombre d'opérations dans les mêmes contextes géologiques, la comparaison des valeurs a été faite, à titre indicatif, avec la moyenne des postes, dans les alluvions, pour les sables et graviers du Pliocène, et dans les calcaires, pour le granite :

- **opération 28.103 – sables et graviers du Pliocène (Delta CT-MG = 52 k€) :**

une anomalie ressort entre le coût total et le **diamètre** (219 mm), ce qui représente un ratio de 515 €/mm (moyenne dans les alluvions : 79 €/mm). Cette anomalie ne s'explique, cependant, pas par une dérive du coût des postes par rapport aux valeurs moyennes dans les calcaires, mis à part le pourcentage du coût de la **maîtrise d'œuvre** (11 %), qui dépasse légèrement la valeur limite fixée par le Comité AQUAPAC (10 %) ;

- **opération 28.101 – Granite d'Épinal (Delta CT-MG = 12 k€) :**

bien que l'écart entre le coût total et le montant garanti soit inférieur à 20 k€ pour cette opération, l'analyse montre qu'elle présente plusieurs postes de dépense, dont le montant est supérieur à la moyenne.

Une anomalie ressort entre le coût total et le **débit** (10 m³/h), ce qui représente un ratio de 7 327 €/m³/h (moyenne dans les calcaires : 2 109 €/m³/h). Une anomalie ressort également entre le coût total et la **puissance** (104 kW), ce qui représente un ratio de 705 €/kW (moyenne : 276 €/kW). Ces deux anomalies peuvent être expliquées par les postes de dépense suivants :

▪ **écarts majeurs :**

- le coût des **tests hydrauliques** par rapport au débit est de 1 292 €/m³/h, la moyenne étant dans les calcaires à 614 €/m³/h. Ce poste représente en revanche 11 % du coût total moyen, ce qui est inférieur à la moyenne dans les calcaires (moyenne : 27 %) ;
- le pourcentage du coût de la **maîtrise d'œuvre** par rapport au coût total moyen (16 %) dépasse la valeur limite fixée par le Comité AQUAPAC (10 %).

No dossier	28 103	Moyenne (alluvions)	28 101	Moyenne (calcaires)	
REGION	NOUVELLE AQUITAINE		GRAND EST		
Aquifère	Sables et graviers du Pliocène		Granite d'Epinal		
Profondeur (m)	80	25	100	79	
Coût total /profondeur (€/m)	1411	2039	733	1511	
Diamètre foration aquifère (mm)	219	683	311	346	
Coût total /diamètre (€/mm)	515 €	79	236 €	344	
Débit garanti (m³/h)	50	28	10	56	
Coût total /débit (€/m ³ /h)	2258	1845	7327	2109	
Puissance thermique (kW)	440	280	104	481	
Coût total /Puissance (€/kW)	257	225	705	276	
Postes de dépense	Coût amenée - repli	19900	0	3000	4688
	Coût foration (€)	17225	20671	17750	22400
	Coût /profondeur (€/m)	215	911	178	297
	Coût /diamètre (€/mm)	15	40	24	23
	Coût foration / coût total (%)	15	41	16	21
	Coût équipement forage	41281	15238	16000	34471
	Coût /profondeur (€/m)	516	548	160	501
	Coût /diamètre (€/mm)	69	33	26	111
	Coût équipement/coût total (%)	37	30	14	33
	Coût tests hydrauliques (€)	20800	8235	12920	28744
	Coût /débit (€/m ³ /h)	416	278	1292	614
	Coût tests/coût total (%)	18	16	11	27
	Coût analyse eau	500	569	850	1740
	Coût fermeture (€)	1030	1340	5000	1800
	Coût /profondeur (€/m)	13	74	50	24
	Coût fermeture/coût total (%)	1	3	4	2
	Coût maîtrise d'Œuvre	12150	5401	17750	11339
	Coût MO/coût total (%)	11	Limite : 10%	16	Limite : 10%
Coût total (€)	112886	50180	73270	105090	
Montant garanti (€)	60 000		61 000		
Différence (€)	52 886		12 270		
Commentaire	Tubage INOX 304L		MFT. Tube PVC		

Tableau 21 : Analyse des coûts prévisionnels de chaque poste de dépense pour la réalisation d'un forage de reconnaissance dans les **sables et graviers du Pliocène** (opérations situées dans la région Nouvelle-Aquitaine et dans le granite d'Epinal dans la région Grand-Est). Les postes en rouge correspondent à des anomalies de coût.

Synthèse de l'analyse sur l'anomalie de coûts

L'analyse relative aux postes de dépenses prévisionnels, menée sur un échantillon de 38 dossiers AQUAPAC, a révélé des anomalies entre le montant garanti par le comité AQUAPAC et le coût total déclaré par le pétitionnaire pour **13 opérations**. Ces dernières présentent une différence supérieure à 20 k€. La synthèse des résultats est présentée dans les tableaux 22 – 24.

Les anomalies du coût total ont été dégagées, pour chaque opération, par le calcul de 4 ratios : coût total sur la profondeur, coût total sur le diamètre, coût total sur le débit, coût total sur la puissance.

Ces anomalies ont été expliquées par l'analyse du coût des postes « foration », « équipement », « tests hydrauliques », « analyse d'eau », « coût de la fermeture », « maîtrise d'œuvre » et par le calcul des ratios des postes respectifs avec la profondeur et/ou le diamètre et/ou le débit et le pourcentage du coût total moyen.

On constate que, pour des opérations d'un diamètre de foration identique, les anomalies du coût total peuvent s'expliquer soit par une dérive du poste de foration, soit par une dérive du poste équipement, mais pas systématiquement par les deux postes en simultanément. On constate que les diamètres de foration restent dans des dimensions proches : le diamètre moyen, en Île-de-France, est de 390 mm dans les calcaires et de 332 mm dans la craie. Les diamètres de foration les plus importants sont utilisés dans les alluvions (moyenne 683 mm). Ceci signifie que le diamètre de foration n'est pas le paramètre majeur qui influence le coût total du forage, hormis dans des formations spécifiques, qui nécessitent des gros diamètres de foration.

Les matériaux utilisés pour la colonne captante sont généralement l'acier inox 304 L. Le PVC à manchons vissés est rarement utilisé. En fonction du type de matériau utilisé et du diamètre de foration, le coût du poste équipement sera plus ou moins élevé.

Pour quelques opérations ayant pour cible l'aquifère de la craie ou les alluvions, le coût des postes ci-dessous est parfois très important par rapport au coût total moyen :

- **coût de foration :**
 - craie Île-de-France : 46 % (moyenne : 26 %), opération 25.111 ;
- **coût de l'équipement :**
 - craie Île-de-France : 60 % (moyenne : 26 %), opération 28.117 ;
 - craie Hauts de France : 83 % (moyenne : 67 %), opération 27.111 ;
 - alluvions Grand-Est : 79 % (moyenne : 30 %), opération 26.111 ;
- **coût des tests hydrauliques :**
 - craie Île-de-France : 38 % (moyenne : 18 %), opération 28.117 ;
 - alluvions Grand-Est : 36 % (moyenne : 16 %), opération 26.111 ;
- **coût de la fermeture du forage :**
 - craie Île-de-France : 29 % (moyenne : 8 %), opération 24.104 ;
 - craie Hauts de France : 27 % (moyenne : 12 %), opération 27.111 ;
- **coût de la maîtrise d'Œuvre :**
 - craie Île-de-France : 67 % (limite : 10 %), opération 27.109 ;
 - craie Centre-Val-de-Loire : 54 % (limite : 10 %), opération 25.107.

COUFOR - Étude des coûts relatifs aux travaux de forage en géothermie de surface

No dossier	24 104		27 109		28 117		25 111		25 103		25 118		27 102		26 101	
	Craie								Moyenne		Calcaires du Lutétien		Moyenne		Sables - Yprésien	
Aquifère																
Profondeur (m)	35	36	88	101	62	48	50	70	55	32	53					
Coût total /profondeur (€/m)	4092	6324	2575	1386	2570	2095	3960	2179	2324	3784	2006					
Diamètre foration aquifère (mm)	508	508	311	375	390	375	311	311	332	560	447					
Coût total /diamètre (€/mm)	282	448	728	373	365	268	637	490	365	216	193					
Débit garanti (m³/h)	32	60	50	27	60	60	11	18	40	40	42					
Coût total /débit (€/m³/h)	2500	2833	4531	5185	2824	1676	18000	8472	4793	3027	2484					
Puissance thermique (kW)	280	792	625	295	2432	609	85	165	738	465	541					
Coût total /Puissance (€/kW)	511	287	362	475	287	165	2329	924	555	260	256					
Coût amenée - repli	0	23923	29000	0	8772	0	0	0	5562	0	0					
Coût foration (€)	43725	18264	50550	64000	36147	29500	79000	73000	37656	26459	28670					
Coût /profondeur (€/m)	1249	507	574	634	591	615	1580	1043	700	827	590					
Coût /diamètre (€/mm)	86	36	163	171	99	29	40	48	38	22	37					
Coût foration / coût total moyen (%)	32	13	37	46	26	15	40	37	20	19	21					
Coût équipement forage	30281	48244	83390	24000	35350	41000	30000	16500	26905	29815	19302					
Coût /profondeur (€/m)	865	1340	948	238	652	854	600	236	510	932	460					
Coût /diamètre (€/mm)	60	95	268	64	94	41	15	11	31	25	21					
Coût équipement/coût total moyen (%)	22	35	60	17	26	21	15	8	14	22	14					
Coût tests hydrauliques (€)	13280	37707	52520	10000	24982	7900	40000	32000	22442	31682	20802					
Coût /débit (€/m³/h)	415	628	1050	370	528	132	3636	1778	933	792	587					
Coût tests/coût total moyen (%)	10	27	38	7	18	4	20	16	12	23	15					
Coût analyse eau	920	1200	1200	2000	1137	1100	1000	6500	2267	1864	2338					
Coût fermeture €	40000	5718	5000	15000	11722	2500	15000	6500	6350	5000	3333					
Coût /profondeur (€/m)	1143	159	57	149	247	52	300	93	129	156	79					
Coût fermeture/coût total moyen (%)	29	4	4	11	8	1	8	3	3	4	2					
Coût maîtrise d'Œuvre	15000	92600	4900	25000	20238	18580	33000	18000	18400	26275	12758					
Coût MO/coût total moyen (%)	11	67	4	18	10%	9	17	9	10%	19	10%					
Coût total (€)	143206	227656	226560	140000	138347	100580	198000	152500	119582	121095	87203					
Montant garanti (€)	80 000	170 000	120 000	110 000		75 000	80 000	120 000		100 000						
Différence (€)	63 206	57 656	106 560	30 000		25 580	118 000	32 500		21 095						

Tableau 22 : Synthèse de l'analyse sur l'anomalie des coûts menées sur les opérations en Île-de-France (base de données AQUAPAC 2014 – 2019). Les valeurs en rouge représentent une anomalie de coût et les valeurs surlignées en noir présentent un écart très important avec la moyenne.

COUFOR - Étude des coûts relatifs aux travaux de forage en géothermie de surface

No dossier	26 111		27 111		25 107		26 108		28 103		28 101	
	GRAND EST		HAUTS-DE-France		CENTRE-VAL DE LOIRE		CENTRE-VAL DE LOIRE		NOUVELLE-AQUITAINE		GRAND EST	
REGION	GRAND EST		France		LOIRE		LOIRE		AQUITAINE		EST	
Aquifère	Alluvions	Moyenne	Craie		Moyenne		Calcaires		Moyenne		Granite d'Epinal	
Profondeur (m)	47	25	35	60	74	50	54	70	80	25	100	79
Coût total /profondeur (€/m)	1947	2039	2099	948	920	3685	2736	1305	1411	2039	733	1511
Diamètre foration aquifère (mm)	1200	683	311	380	325	225	219	380	346	683	311	346
Coût total /diamètre (€/mm)	76	79	236	150	152	819	675	240	515	79	236	344
Débit garanti (m³/h)	30	28	30	80	63	64	40	50	50	28	10	56
Coût total /débit (€/m³/h)	3050	1845	2448	711	1139	2879	3694	1826	2258	1845	7327	2109
Puissance thermique (kW)	540	280	230	750	573	600	270	460	440	280	104	481
Coût total /Puissance (€/kW)	169	225	319	76	173	307	547	199	257	225	705	276
Coût amenée - repli	0	0	10228	0	2655	0	6500	9500	19900	0	3000	4688
Coût foration (€)	26210	20671	10171	22170	13875	38450	21703	18800	17225	20671	17750	22400
Coût /profondeur (€/m)	558	911	291	370	223	769	402	269	215	911	178	297
Coût /diamètre (€/mm)	29	40	14	39	31	21	15	21	15	40	24	23
Coût foration / coût total moyen (%)	52	41	49	106	67	21	12	10	12	41	19	21
Coût équipement forage	39540	15238	17307	10950	12478	80516	47706	23300	41281	15238	16000	34471
Coût /profondeur (€/m)	841	548	494	183	223	1610	883	333	516	548	160	501
Coût /diamètre (€/mm)	66	33	25	20	26	358	218	61	69	33	26	111
Coût équipement/coût total moyen (%)	79	30	83	53	60	44	26	13	45	30	17	33
Coût tests hydrauliques (€)	18250	8235	24058	9010	10375	15880	51096	24600	20800	8235	12920	28744
Coût /débit (€/m³/h)	608	278	802	113	299	248	1277	492	416	278	1292	614
Coût tests/coût total moyen (%)	36	16	115	43	50	9	28	13	23	16	14	27
Coût analyse eau	550	569	1705	1200	854	1200	2400	2200	500	569	850	1740
Coût fermeture (€)	0	1340	5682	2220	2601	8000	1500	1000	1030	1340	5000	1800
Coût /profondeur (€/m)	0	74	162	37	56	160	28	14	13	74	50	24
Coût fermeture/coût total moyen (%)	0	3	27	11	12	4	1	1	1	3	5	2
Coût maîtrise d'œuvre	6950	5401	4300	11300	5543	40200	16845	11920	12150	5401	17750	11339
Coût MO/coût total moyen (%)	14	10%	21	54	10%	22	9	6	13	10%	19	10%
Coût total (€)	91500	50180	73451	56850	48379	184246	147750	91320	112886	50180	73270	105090
Montant garanti (€)	60000		70000	50000		60000	70000	50000	60000		61000	
Différence (€)	31500		3451	850		124246	77750	36320	52886		12270	

Tableau 23 : Synthèse de l'analyse sur l'anomalie des coûts menées sur les opérations dans les régions hors Île-de-France (base de données AQUAPAC 2014 – 2019). Les valeurs en rouge représentent une anomalie de coût et les valeurs surlignées en noir présentent un écart très important avec la moyenne.

COUFOR - Étude des coûts relatifs aux travaux de forage en géothermie de surface

Région	IDF			Hors IDF				
	Craie	Calcaires	Sables - Yprésien	Alluvions du Rhin	Craie	Calcaires	Sables et graviers du Pliocène	Granite d'Epinal
Nombre de dossiers	10	7	3	4	4	7	1	1
Profondeur moyenne (m)	62	55	53	25	74	79	80	100
Coût total /profondeur (€/m)	2570	2297	2006	2039	920	1511	1411	733
Diamètre foration aquifère moyen (mm)	390	325	447	683	325	346	219	311
Coût total /diamètre (€/mm)	365	365	193	79	152	344	515	236
Débit moyen garanti (m ³ /h)	60	37	42	28	63	56	50	10
Coût total /débit (€/m ³ /h)	2824	5012	2484	1845	1139	2109	2258	7327
Puissance thermique moyenne (kW)	2432	549	541	280	573	481	440	104
Coût total /Puissance (€/kW)	287	585	256	225	173	276	257	705
Coût amenée - repli moyen (€)	8772	5206	0	0	2655	4688	19900	3000
Coût foration moyen (€)	36147	37823	28670	20671	13875	22400	17225	17750
Coût /profondeur (€/m)	591	712	590	911	223	297	215	178
Coût /diamètre (€/mm)	99	31	37	40	31	23	15	24
Coût foration / coût total moyen (%)	26	32	33	41	29	21	15	16
Coût équipement forage moyen (€)	35350	25967	19302	15238	12478	34471	41281	16000
Coût /profondeur (€/m)	652	494	460	548	223	501	516	160
Coût /diamètre (€/mm)	94	24	21	33	26	111	69	26
Coût équipement/coût total moyen (%)	26	22	22	30	26	33	37	14
Coût moyen tests hydrauliques (€)	24982	22160	20802	8235	10375	28744	20800	12920
Coût /débit (€/m ³ /h)	528	978	587	278	299	614	416	1292
Coût tests/coût total moyen (%)	18	19	24	16	21	27	18	11
Coût moyen analyse eau (€)	1137	2392	2338	569	854	1740	500	850
Coût moyen fermeture (€)	11722	5753	3333	1340	2601	1800	1030	5000
Coût /profondeur (€/m)	247	116	79	74	56	24	13	50
Coût fermeture/coût total moyen (%)	8	5	4	3	5	2	1	4
Coût moyen maîtrise d'Œuvre (€)	20238	18195	12758	5401	5543	11339	12150	17750
Coût moyen total (€)	138347	117497	87203	50180	48379	105090	112886	73270

Postes de dépense

Tableau 24 : Synthèse des coûts moyens de chaque poste de dépense pour des opérations situées en Île-de-France et dans les régions hors Île-de-France.

5.2.4. Analyse de la relation entre le coût de chaque poste de dépense et la profondeur, le diamètre ou le débit

Une analyse a été menée sur les relations entre le coût de chaque poste de dépenses et trois paramètres : la profondeur, le diamètre ou le débit. L'analyse a été menée sur les formations géologiques présentant un nombre significatif de données : craie et calcaires, en Île-de-France (tableaux 25 et 26 ; figures 16 à 21) ; alluvions, craie et calcaires, hors Île-de-France (tableaux 27 à 29 ; figures 22 à 29).

L'objectif était de déterminer si une relation existe, et dans le cas échéant, de dégager une courbe de tendance linéaire ou pas. Pour réaliser cette analyse, les valeurs aberrantes ont été écartées (cases en orange dans les tableaux). Les cases surlignées en rouge correspondent aux opérations qui présentent des anomalies de coût définies au chapitre 5.2.3.

Les graphiques ci-dessous dont le titre est surligné en vert mettent en évidence une courbe de tendance linéaire qui peut être jugée comme étant représentative, à l'inverse des graphiques dont le titre est surligné en rouge. Dans le cas où aucune courbe de tendance n'a pu être dégagée, un histogramme a été réalisé.

Île-de-France

Craie

No dossier	Profondeur (m)	Diamètre foration aquifère (mm)	Débit garanti (m ³ /h)	Amenée - repli	Foration	Equipement forage	Tests hydrauliques	Analyse eau	Coût fermeture	Maîtrise d'Œuvre
24 104	35	508	32	0	43725	30281	13280	920		15000
27 109	36	508	60	23923	18264	48244	37707	1200	5718	
24 108	40	445		0	13000	36645		1350	10000	4250
25 114	40	375	30	0	25000	27000	18000	1000	10000	12200
28 114	42	311	43	11800	12080	15808	31205	1100	4500	19925
25 108	65	375	40	0	30000	38000	16000	1000	12000	18500
26 106	80	311	70	0	67850	24130	42080	600	5000	0
28 117	88	311	50	29000	50550		52520	1200	5000	4900
28 113	93	381	50	23000	37000	26000	23000	1000	10000	10000
25 111	101	375	27	0	64000	24000	10000	2000	15000	25000
MIN	35	311	27	0	12080	15808	10000	600	4500	0
MOY	62	390	45	8772	36147	30012	27088	1137	8580	12197
MAX	101	508	70	29000	67850	48244	52520	2000	15000	25000

Tableau 25 : Répartition des coûts de 10 opérations situées en Île-de-France pour la réalisation d'un forage de reconnaissance dans **la craie**. Les cases surlignées en rouge correspondent aux opérations qui présentent des anomalies de coût. Les cases en orange correspondent à des valeurs aberrantes écartées pour l'analyse.

PROFONDEUR

DIAMETRE

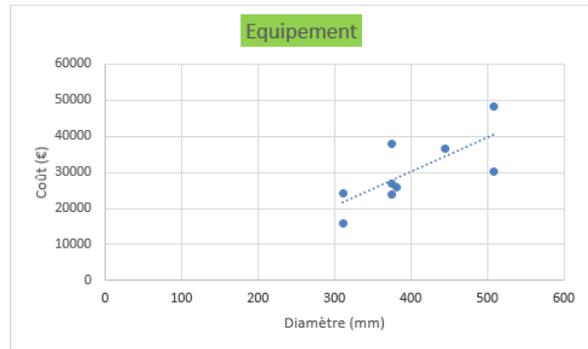
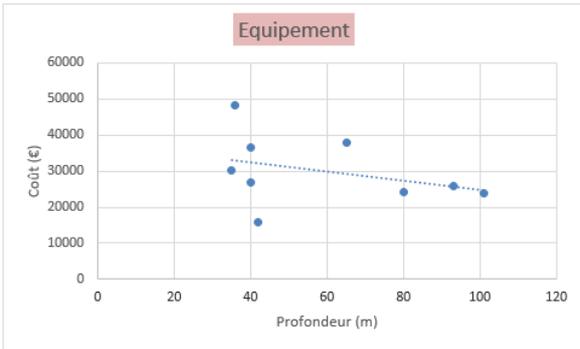
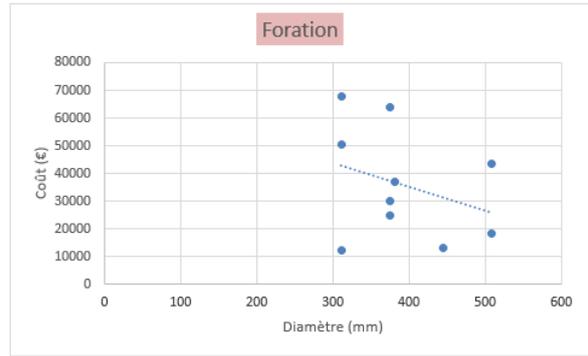
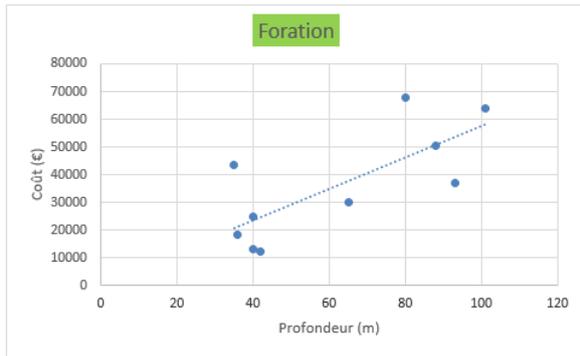
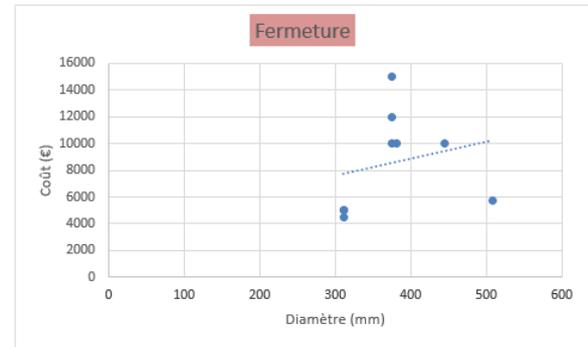
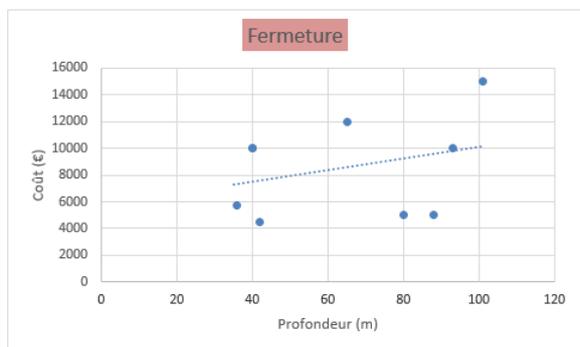
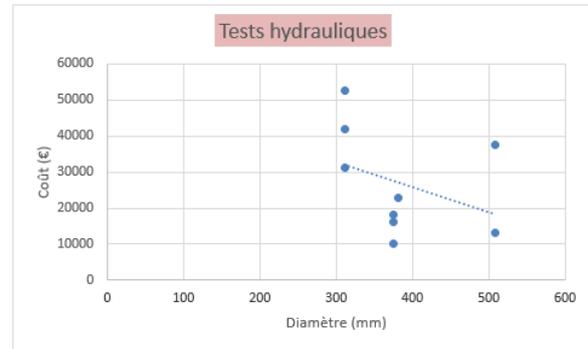
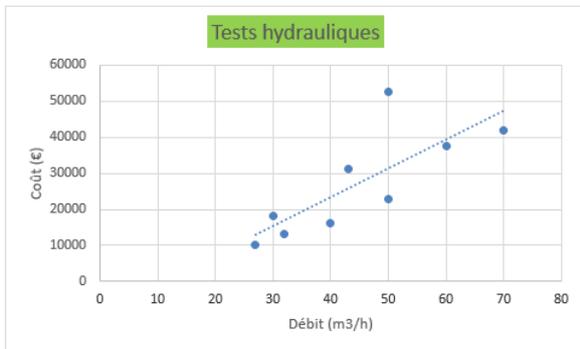


Figure 16 : Mise en relation du coût des postes de « foration » et « d'équipement » avec la profondeur (à gauche) et le diamètre (à droite) pour des opérations situées en Île-de-France dans la craie. (l'objectif de dégager une courbe de tendance linéaire représentative est surligné en vert).



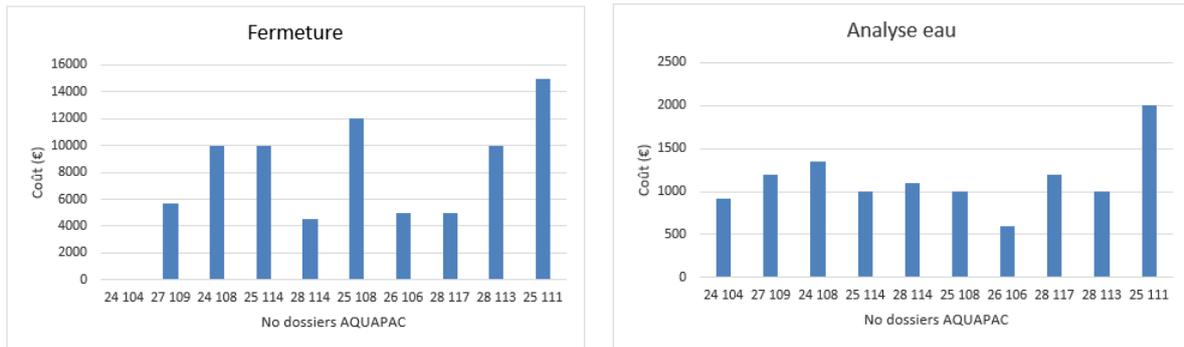


Figure 17 : Mise en relation du coût du poste « tests hydrauliques » avec le débit (à gauche) et le diamètre (à droite), « fermeture » avec la profondeur (à gauche) et le diamètre (à droite) pour des opérations situées en Île-de-France dans **la craie**. L'objectif de dégager une courbe de tendance linéaire représentative (surligné en vert). Aucune relation représentative entre le coût de la fermeture et la profondeur ou le diamètre n'a pu être dégagée. Représentation sous la forme d'histogramme du coût des postes « fermeture » et « analyse d'eau ».

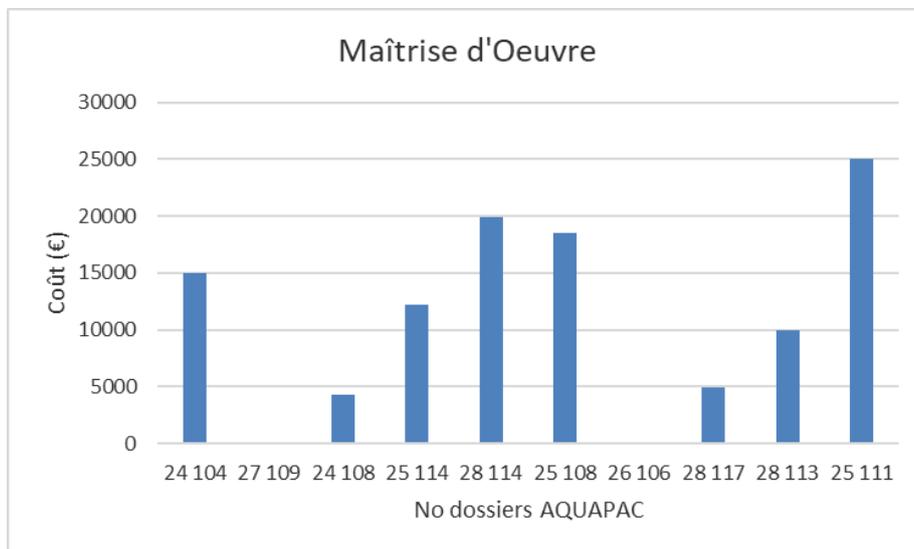


Figure 18 : Représentation sous la forme d'histogramme du coût du poste « maîtrise d'oeuvre » dans **la craie**.

Calcaires

No dossier	Profondeur (m)	Diamètre foration aquifère (mm)	Débit garanti (m3/h)	Amenée - repli	Foration	Equipement forage	Tests hydrauliques	Analyse eau	Coût fermeture	Maîtrise d'Œuvre
27 108	33	311	40	22000	11000	19000	32400	600	4500	6500
27 105	40	311	36	0	33390	12920	20131	630	7000	9628
28 102	41	311	20	0	33200	15400	21000	8450	6980	29000
27 101	42	311	40	0	20420	23200	8890	300	0	9110
25 103	48	375	60	0	29500	41000	7900	1100	2500	18580
25 118	50	311	11	0	79000	30000	40000	1000	4800	33000
28 107	68	311	75	24850	20900	36685	29120	950	4800	25540
27 102	70	311	18	0	73000	16500	32000	6500	6500	18000
22 102	100	375	35	0	40000	39000	8000	2000	4500	14400
MIN	33	311	11	0	11000	12920	7900	300	0	6500
MOY	55	325	37	5206	37823	25967	22160	2392	4598	18195
MAX	100	375	75	24850	79000	41000	40000	8450	7000	33000

Tableau 26 : Coût des postes de dépenses prévisionnels pour la réalisation d'un forage de reconnaissance dans **les calcaires** (opérations situées en Île-de-France). Les cases surlignées en rouge correspondent aux opérations qui présentent des anomalies de coût. La case surlignée en orange correspond à une valeur aberrante écartée pour l'analyse.

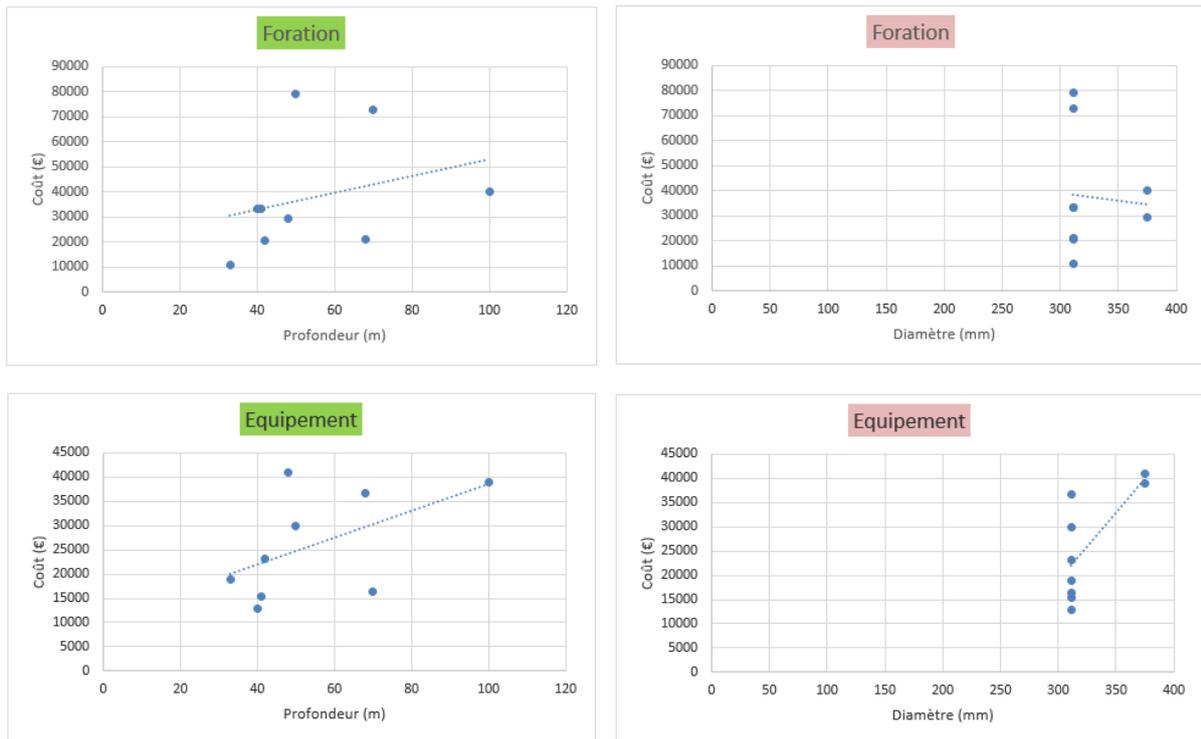


Figure 19 : Mise en relation du coût des postes de « foration » et « d'équipement » avec la profondeur (à gauche) et le diamètre (à droite) pour des opérations situées en Île-de-France dans **les calcaires**. L'objectif de dégager une courbe de tendance linéaire représentative (surligné en vert).

COUFOR - Étude des coûts relatifs aux travaux de forage en géothermie de surface

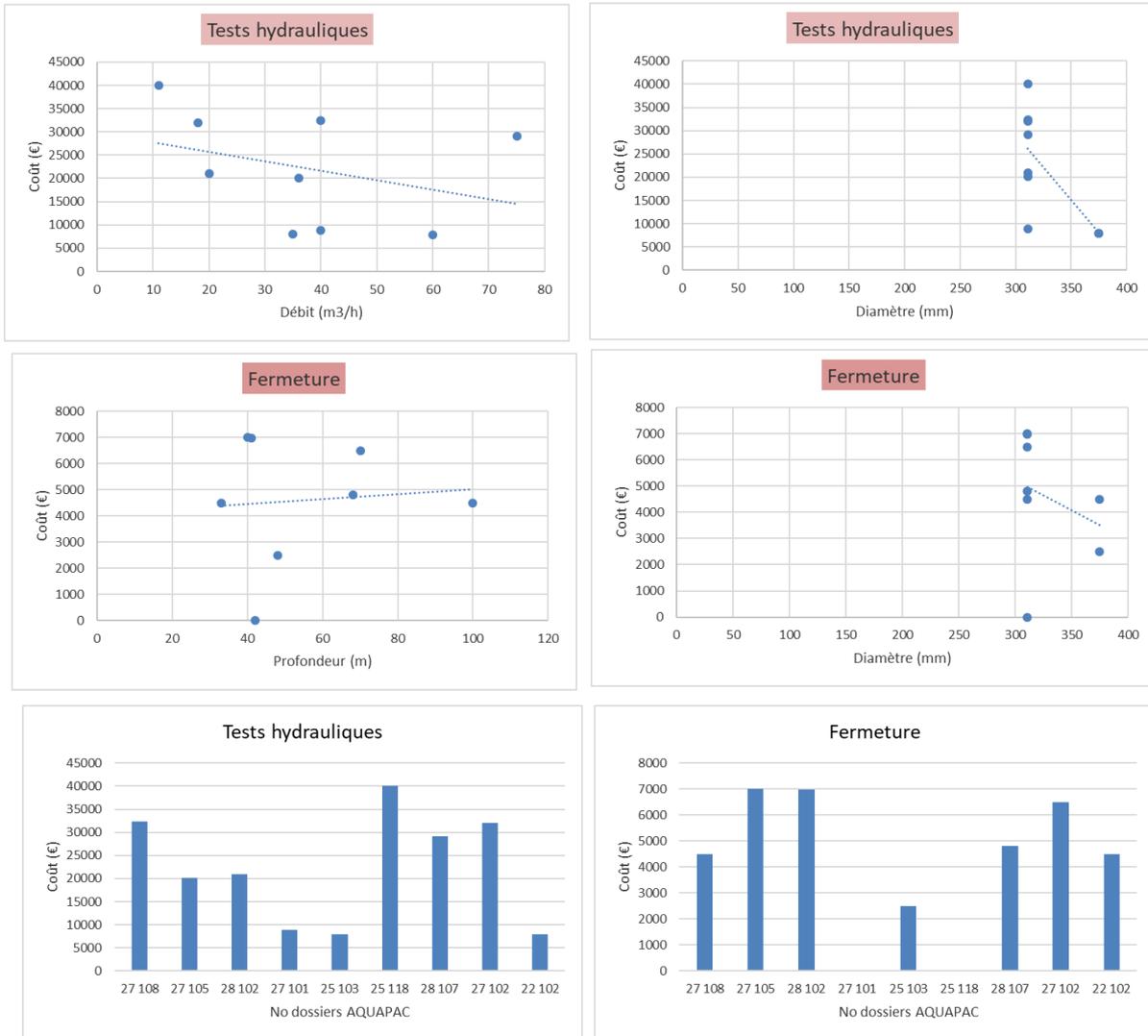


Figure 20 : Mise en relation du coût du poste « tests hydrauliques » avec le débit (à gauche) et le diamètre (à droite), « fermeture » avec la profondeur (à gauche) et le diamètre (à droite) pour des opérations situées en Île-de-France dans **les calcaires**. L'objectif de dégager une courbe de tendance linéaire représentative (surligné en vert). Aucune relation représentative entre le coût de la fermeture et la profondeur ou le diamètre n'a pu être dégagée. Représentation sous la forme d'histogramme du coût des postes « tests hydrauliques » et « fermeture ».

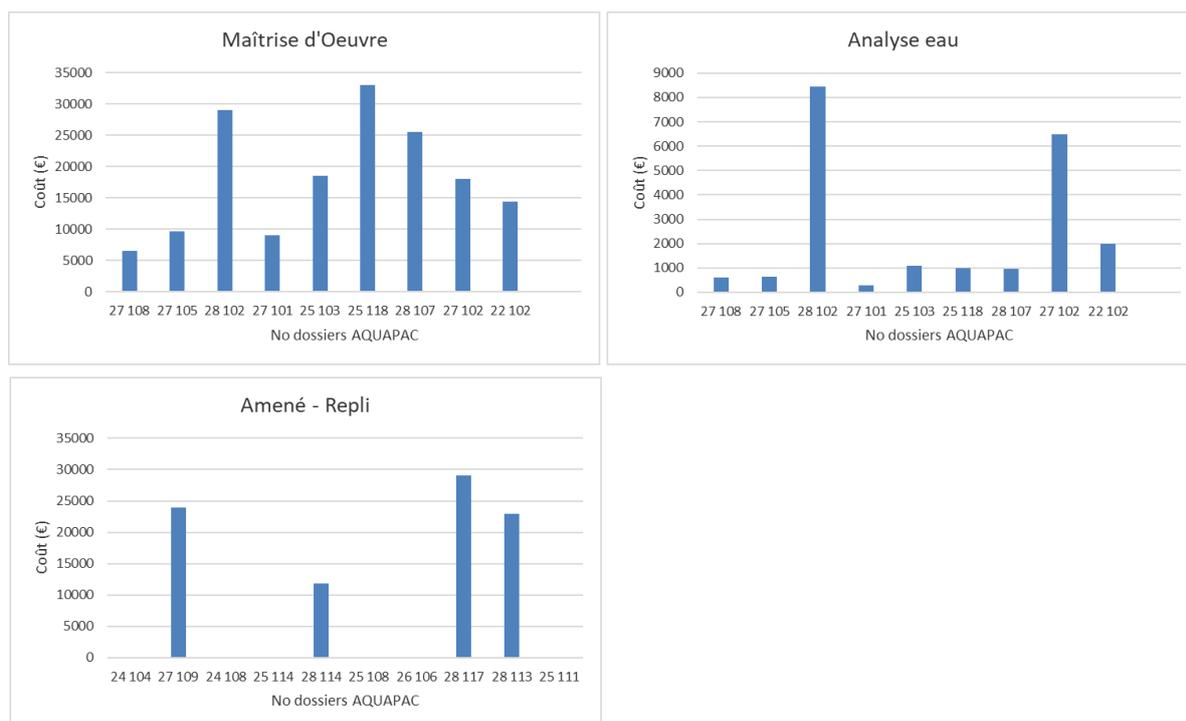


Figure 21 : Mise en relation du coût du poste « maîtrise d'oeuvre » avec la profondeur pour des opérations situées en Île-de-France dans **la craie**. Représentation sous la forme d'histogrammes du coût des postes « maîtrise d'oeuvre », « amenée – repli » et « analyse d'eau ».

Régions hors Île-de-France

Alluvions

No dossier	Profondeur (m)	Diamètre foration aquifère (mm)	Débit garanti (m3/h)	Amenée - repli	Foration	Equipement forage	Tests hydrauliques	Analyse eau	Coût fermeture	Maîtrise d'Œuvre
28 106	14	350	38	0	12275	13000	6950	350	1300	6225
25 104	20	300	14	0	4450	8413	1680	495	4060	5470
26 110	20	880	30	0	39750	0	6060	880	0	2960
26 111	47	1200	30	0	26210	39540	18250	550	0	6950
MIN	14	300	14	0	4450	0	1680	350	0	2960
MOY	25	683	28	0	20671	15238	8235	569	1340	5401
MAX	47	1200	38	0	39750	39540	18250	880	4060	6950

Tableau 27 : Coût des postes de dépenses prévisionnels pour la réalisation d'un forage de reconnaissance dans **les alluvions** (opérations situées hors Île-de-France). Les cases surlignées en rouge correspondent aux opérations qui présentent des anomalies de coût.

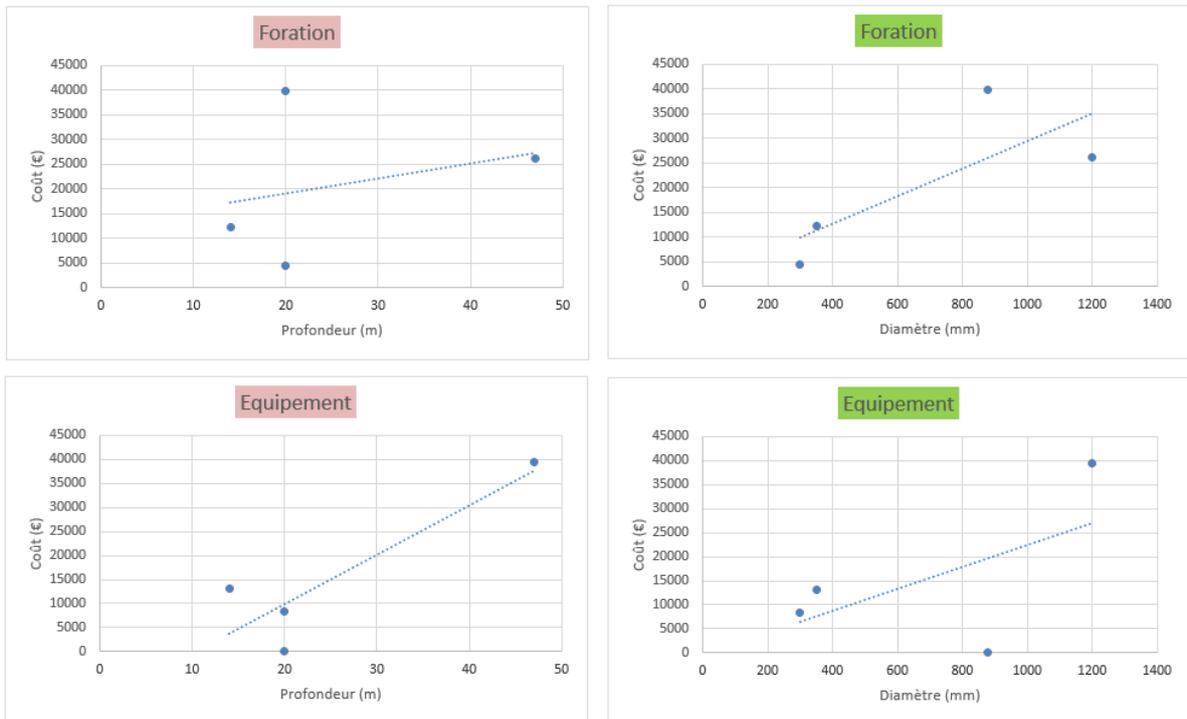
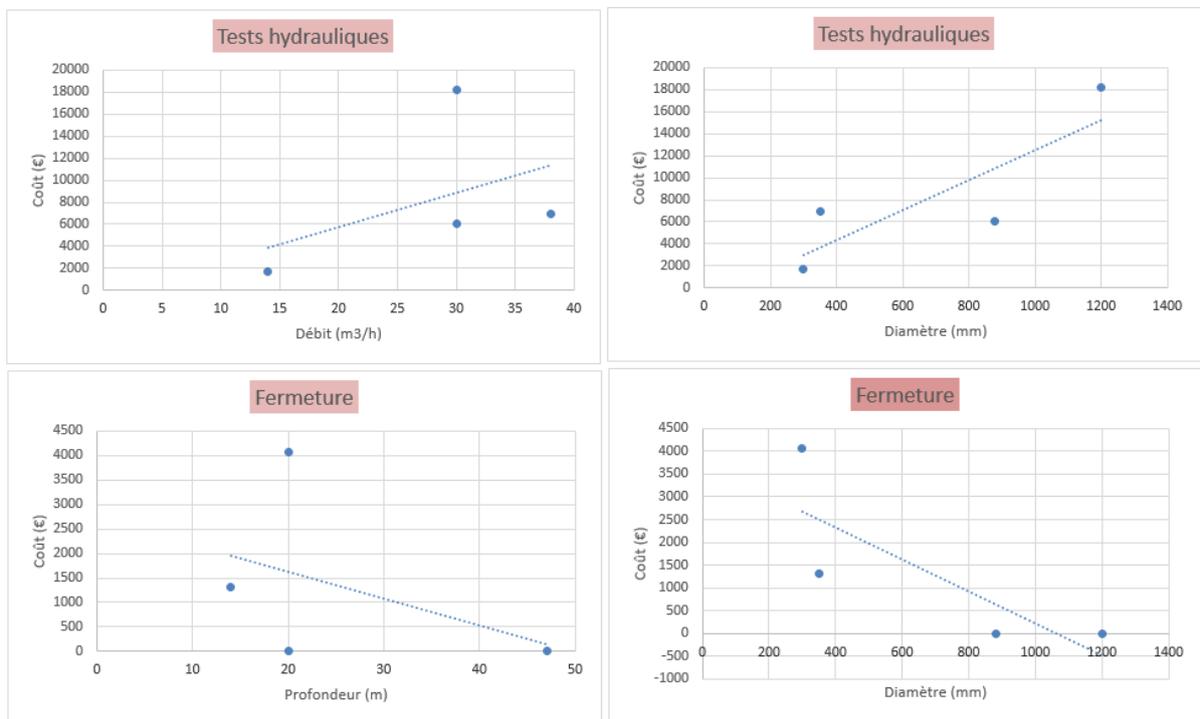


Figure 22 : Mise en relation du coût des postes de « foration » et « d'équipement » avec la profondeur (à gauche) et le diamètre (à droite) pour des opérations situées hors Île-de-France dans **les alluvions**. Les courbes de tendance linéaire sont données à titre indicatif en raison du nombre de données trop faible. Les relations représentatives ont été surlignées en vert.



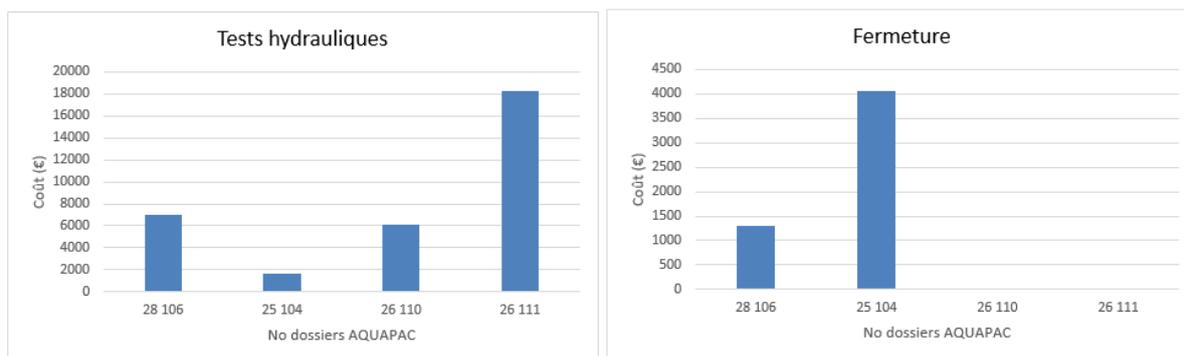


Figure 23 : Mise en relation du coût du poste « tests hydrauliques » avec le débit (à gauche) et le diamètre (à droite), « fermeture » avec la profondeur (à gauche) et le diamètre (à droite) pour des opérations situées dans les régions hors Île-de-France dans **les alluvions**. L'objectif de dégager une courbe de tendance linéaire représentative (surligné en vert). Aucune relation représentative entre le coût de la fermeture et la profondeur ou le diamètre n'a pu être dégagée. Représentation sous la forme d'histogrammes du coût des postes « tests hydrauliques » et « fermeture ».

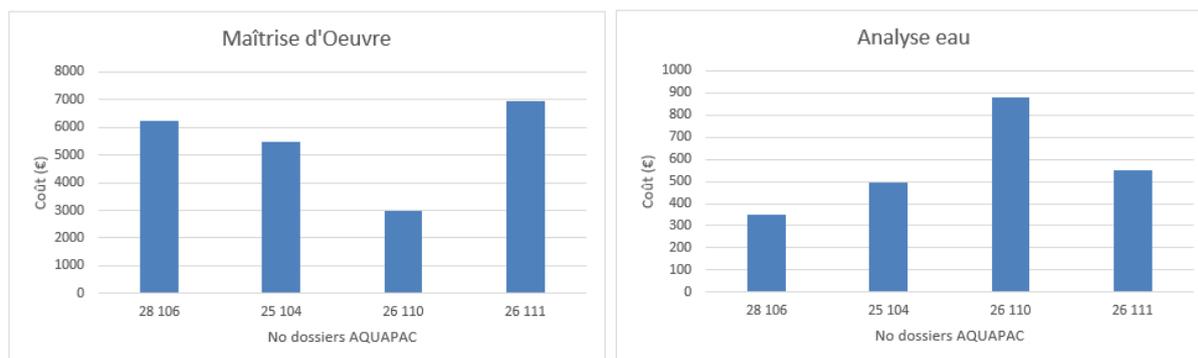


Figure 24 : Représentation sous la forme d'histogramme du coût des postes « maîtrise d'oeuvre » et « analyse d'eau pour des opérations situées dans les régions hors Île-de-France dans **les alluvions**.

Craie

No dossier	Profondeur (m)	Diamètre foration aquifère (mm)	Débit garanti (m3/h)	Amenée - repli	Foration	Equipement forage	Tests hydrauliques	Analyse eau	Coût fermeture	Maîtrise d'Œuvre
27 111	35	311	30	10228	10171	17307	24058	5682	4300	6225
25 107	60	380	80	0	22170	10950	9010	2220	11300	5470
29 101	100	168	20	390	6510	3100	5050	2500	3140	2960
25 109	100	440	120	0	16650	18553	3380	0	3430	6950
MIN	35	168	20	0	6510	3100	3380	0	3140	2960
MOY	74	325	63	2655	13875	12478	10375	2601	5543	5401
MAX	100	440	120	10228	22170	18553	24058	5682	11300	6950

Tableau 28 : Coût des postes de dépenses prévisionnels pour la réalisation d'un forage de reconnaissance dans **la craie** (opérations situées hors Île-de-France).

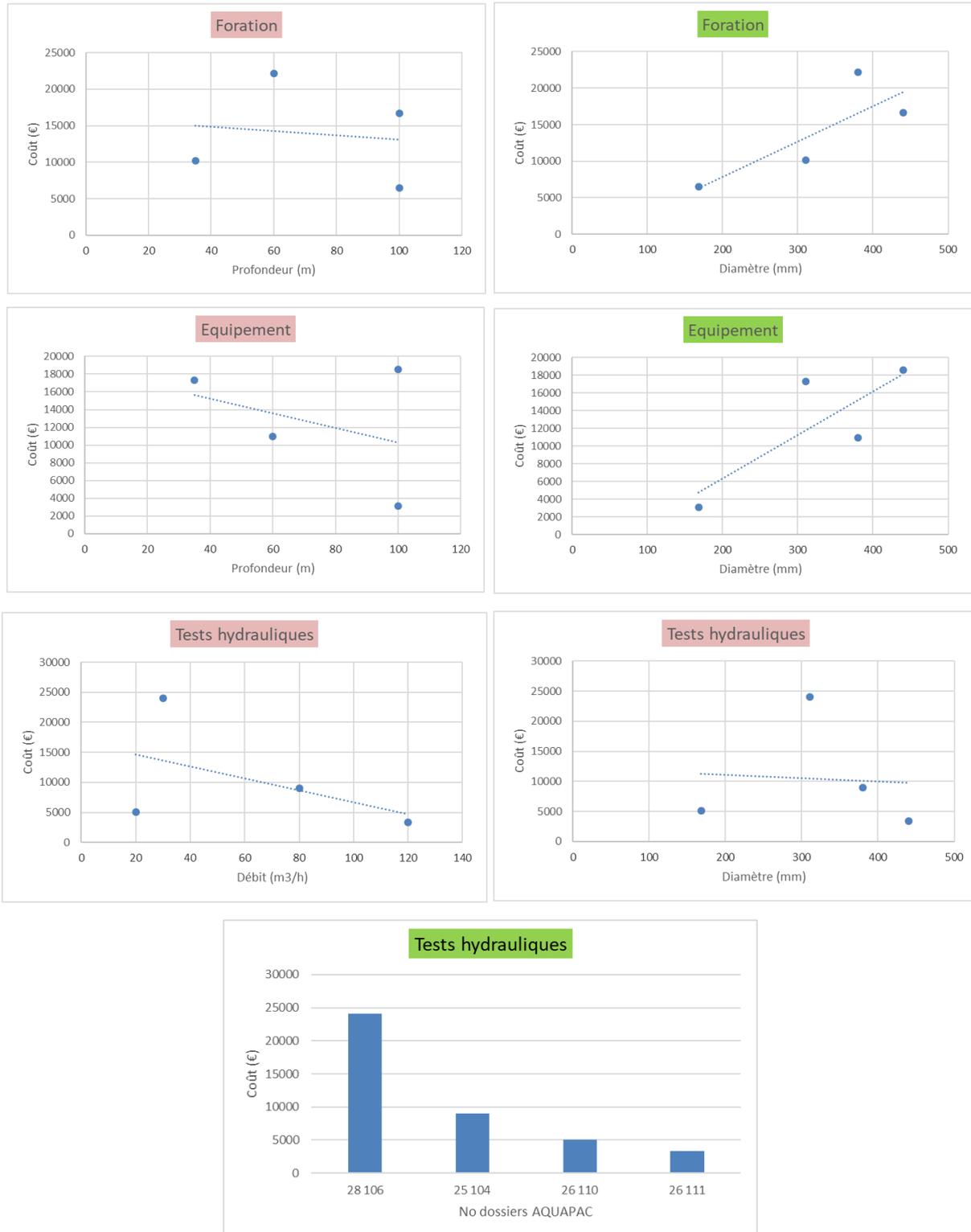


Figure 25 : Mise en relation du coût des postes de « foration » et « d'équipement » avec la profondeur (à gauche) et le diamètre (à droite) pour des opérations situées hors Île-de-France dans la craie. Aucune relation représentative entre le coût des tests hydrauliques et la profondeur ou le diamètre n'a pu être dégagée. Représentation sous la forme d'histogramme du coût du poste « tests hydrauliques ».

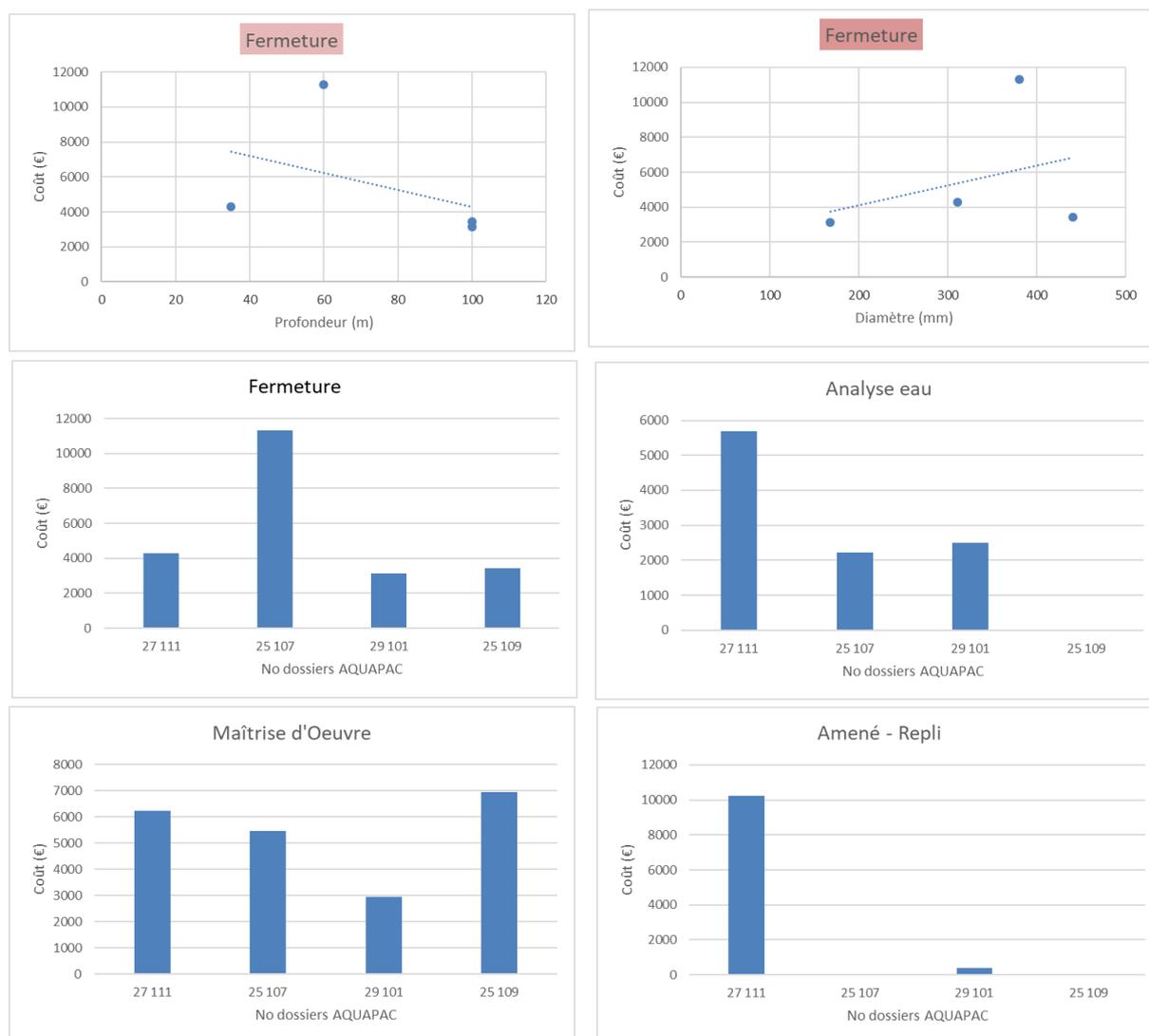


Figure 26 : Mise en relation du coût du poste « fermeture » avec la profondeur (à gauche) et le diamètre (à droite) pour des opérations situées dans les régions hors Île-de-France dans **la craie**. Aucune relation représentative entre le coût de la fermeture et la profondeur ou le diamètre n'a pu être dégagée. Représentation sous la forme d'histogramme du coût des postes « fermeture », « analyse d'eau », « maîtrise d'œuvre » et « amenée - repli ».

Calcaires

No dossier	Profondeur (m)	Diamètre foration aquifère (mm)	Débit garanti (m3/h)	Amenée - repli	Foration	Equipement forage	Tests hydrauliques	Analyse eau	Coût fermeture	Maîtrise d'Œuvre
27 107	25	208	20	0	1765	1443	1936	350	1800	2582
24 106	50	440	35	0	12386	29114	18676	0	0	16581
26 108	50	225	64	0	38450	80516	15880	1200	8000	40200
28 104	54	219	40	6500	21703	47706	51096	2400	1500	16845
28 116	70	380	50	9500	18800	23300	24600	2200	1000	11920
26 112	80	410	90	0	21400	53240	17788	360	3200	8140
27 110	110	374	44	2750	27695	13636	21490	2000	1500	8451
MIN	25	208	20	0	1765	1443	1936	0	0	2582
MOY	63	322	49	2679	20314	35565	21638	1216	2429	14960
MAX	110	440	90	9500	38450	80516	51096	2400	8000	40200

Tableau 29 : Coût des postes de dépenses prévisionnels pour la réalisation d'un forage de reconnaissance dans **les calcaires** (opérations situées hors Île-de-France).

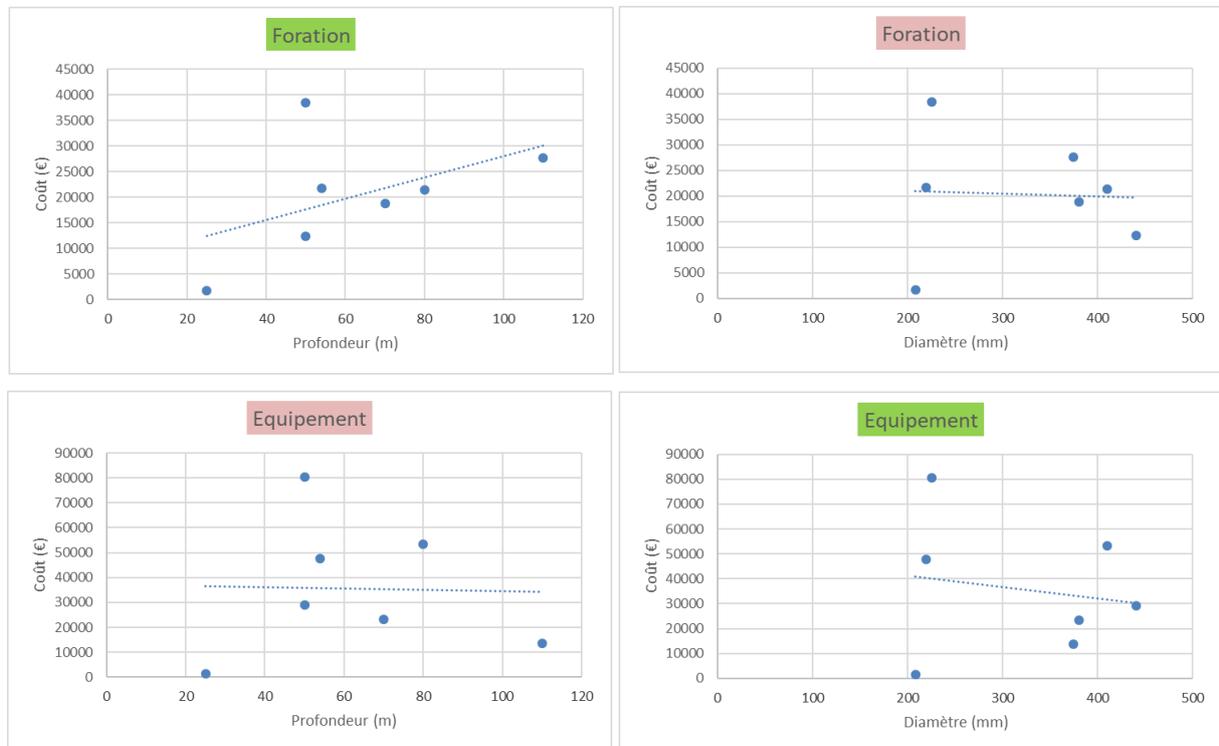


Figure 27 : Mise en relation du coût des postes de « foration » et « d'équipement » avec la profondeur (à gauche) et le diamètre (à droite) pour des opérations situées hors Île-de-France dans **les calcaires**. Les courbes de tendance linéaire représentatives sont surlignées en vert.

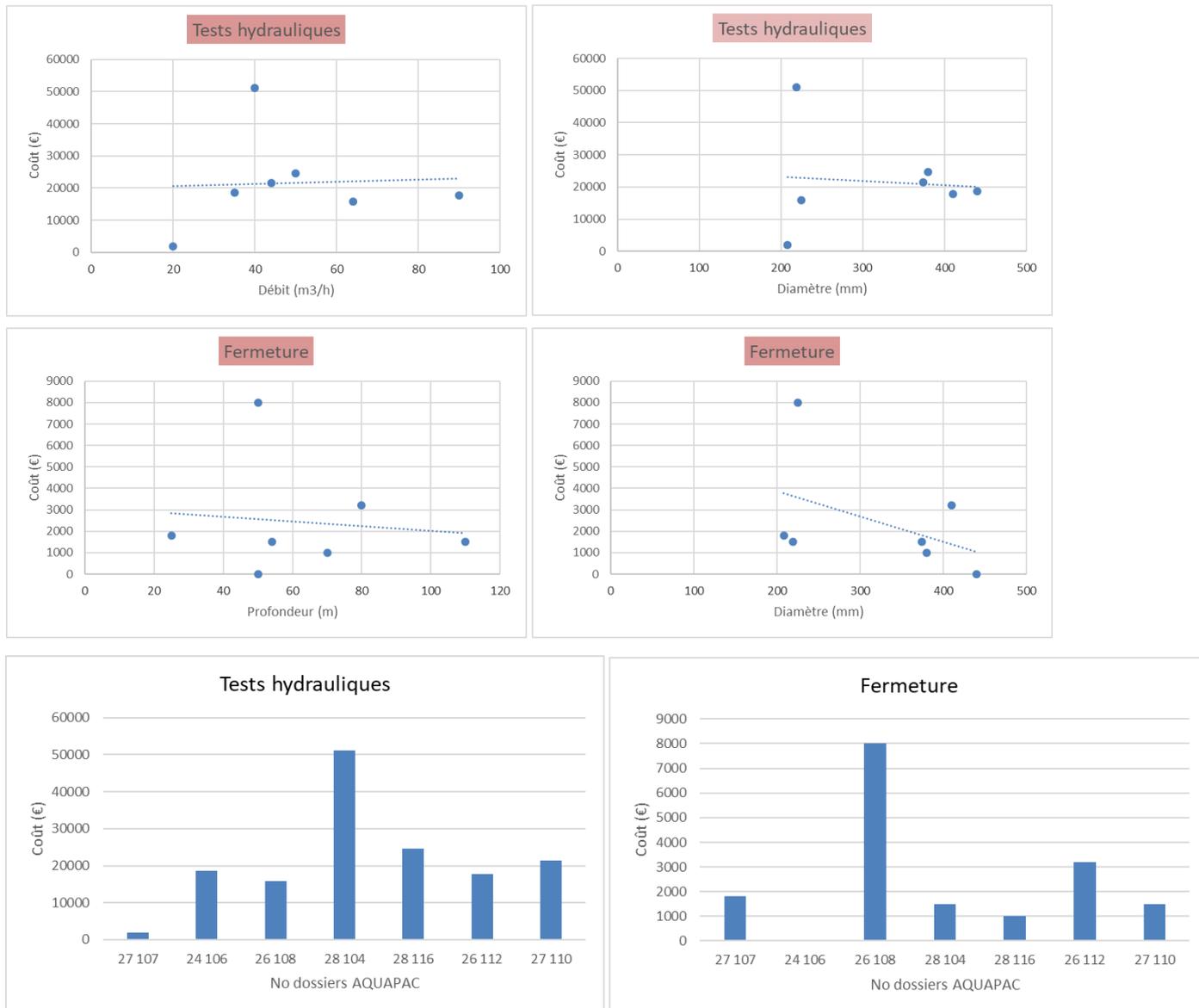


Figure 28 : Mise en relation du coût du poste « tests hydrauliques » avec le débit (à gauche) et le diamètre (à droite), « fermeture » avec la profondeur (à gauche) et le diamètre (à droite) pour des opérations situées dans les régions hors Île-de-France dans **les calcaires**. Aucune relation représentative n'a pu être dégagée pour ces deux postes. Représentation sous la forme d'histogrammes du coût des postes « tests hydraulique » et « fermeture ».



Figure 29 : Représentation sous la forme d'histogrammes du coût des postes « maîtrise d'oeuvre », « amenée - repli » et analyse d'eau » pour des opérations situées dans les régions hors Île-de-France dans **les calcaires**.

Synthèse de l'analyse de la relation entre le coût de chaque poste de dépense et la profondeur, le diamètre ou le débit

L'analyse graphique menée sur la relation entre le coût de chaque poste et les trois paramètres (profondeur, diamètre, débit) met en évidence qu'une relation linéaire ne peut pas être systématiquement démontrée.

Le tableau 30 présente la synthèse des courbes de tendances linéaires représentatives qui ont pu être dégagées (cases vertes), ce qui n'est pas le cas pour les cases rouges. Les cases grises représentent les postes sans relation directe avec le paramètre.

IDF	Craie			Calcaires		
	Profondeur	Diamètre	Débit	Profondeur	Diamètre	Débit
Coût foration						
Coût équipement						
Coût fermeture						
Coût tests hydrauliques						

HORS IDF	Alluvions			Craie			Calcaires		
	Profondeur	Diamètre	Débit	Profondeur	Diamètre	Débit	Profondeur	Diamètre	Débit
Coût foration									
Coût équipement									
Coût fermeture									
Coût tests hydrauliques									

Tableau 30 : Synthèse des courbes de tendances linéaires représentatives, qui ont pu être dégagées (cases vertes) par l'analyse graphique menée sur la relation entre le coût de chaque poste et les trois paramètres (profondeur, diamètre, débit). Les cases rouges représentent les relations non représentatives et les cases grises les postes sans relation directe avec le paramètre.

6. Conclusions

Le présent rapport synthétise les travaux menés dans le cadre de la convention de financement ADEME-BRGM 1805C0054.

Suite au constat que les coûts de forage annoncés par le maître d'ouvrage sont très variables d'une opération à l'autre, et souvent au-dessus des corrélations issues de l'analyse des dossiers, cette étude avait pour objectif d'identifier les principaux postes, qui peuvent impliquer des écarts de coût et d'en expliquer la cause (géographie, géologie, technique).

Une comparaison des dossiers AQUAPAC avec des dossiers Fonds Chaleur n'a pas pu être menée de façon satisfaisante, en raison du nombre de dossiers insuffisant et de leur contenu (relevés de dépenses d'investissement) difficilement comparable avec la base de données AQUAPAC. Cette approche nécessiterait un travail conséquent de mise en conformité des deux bases de données.

La méthodologie adoptée a été d'analyser les données de la base AQUAPAC sous deux volets différents, en se focalisant, en premier lieu, sur les **montants de garantie** accordés par le comité AQUAPAC sur la période 2000 – 2019 (175 dossiers), puis, dans un second temps, plus spécifiquement sur les **postes de dépenses** pour la réalisation d'un forage de reconnaissance (38 dossiers).

Cette étude révèle qu'il est parfois difficile d'expliquer ou d'interpréter, par une approche exclusivement scientifique, les différences de coût pour des opérations de doublets géothermiques sur forages d'eau. Un certain nombre de paramètres non exclusivement liés aux aspects techniques peuvent influencer le coût total du forage (taille de la société, amortissement de son équipement, ses coûts de structure, approche commerciale, Business plan, subventions). Ainsi, un projet type (même profondeur, même lithologie, même réponse technique...) ne correspond pas à un montant unique.

Les résultats permettront, cependant, d'orienter les futures demandes de garantie AQUAPAC, notamment à partir de l'analyse graphique de la répartition régionale des **montants de garantie** en fonction de la profondeur (période 2014 – 2019), de la synthèse des **coûts moyens** pour chaque poste de dépense (à partir de 38 dossiers AQUAPAC) et des **courbes de tendance** entre le coût de chaque poste et trois paramètres (profondeur, diamètre, débit).

Les perspectives pourraient être de réaliser un traitement statistique complémentaire des résultats, en raisonnant sur les écarts-types ou sur une représentation par boîte à moustache. Le raisonnement sur les valeurs max ou min montre qu'elles sont, en effet, facilement biaisées par des valeurs atypiques.



Centre scientifique et technique
Département Géothermie
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34