

Etat et typologie des forages aux GTI en Lorraine

BRGM/RP-58555-FR
Décembre 2010



Etat et typologie des forages aux GTI en Lorraine

BRGM/RP-58555-FR
Décembre 2010

Étude réalisée dans le cadre des projets
de Service public du BRGM 2006 06EAUC24

D. Nguyen-Thé
Avec la collaboration de
J. Thonnon

Vérificateur :

Nom : L. Vaute

Date : 30/11/2010

(Original signé)

Approbateur :

Nom : D. Midot

Date : 06/12/2010

(Original signé)



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.



Mots clés : forage, grès du Trias inférieur, GTI, suivi, Lorraine.

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

Nguyen-Thé D., avec la collaboration de Thonnon J. (2010) – Etat et typologie des forages aux GTI en Lorraine. BRGM/RP-58555-FR, 130 p., 34 ill., 5 ann.

Synthèse

La nappe des grès du Trias inférieur qui constitue la principale ressource en eau souterraine de la région Lorraine est exploitée par de nombreux forages. Certains d'entre eux sont très anciens. Or tout forage a une durée de vie limitée, qui peut être écourtée en fonction de la qualité de la réalisation de l'ouvrage, de la nature des terrains qu'il traverse, de l'utilisation de celui-ci, ou encore de son entretien.

A la demande de l'Agence de l'eau Rhin-Meuse, une quarantaine d'ouvrages d'eau à problèmes ont fait l'objet d'une étude documentaire par le BRGM. Ces forages ont été sélectionnés à partir des retours d'expériences des services de l'Etat en charge des eaux souterraines, et de ceux d'hydrogéologues agréés en Lorraine. La typologie des défaillances qui les affectent est variée. Il s'agit de colmatages, d'incrustations, de perforations, voire de l'écrasement des tubages et crépines. L'absence des crépines ou des massifs filtrants est aussi fréquente et peut conduire à l'ensablement des forages. Ces problèmes se traduisent parfois par des évolutions anormales de la qualité des eaux captées.

Il apparaît que les contraintes tectoniques n'ont pas d'influence globale sur l'occurrence des problèmes de forage, et que l'âge des forages constitue un facteur peu déterminant dans l'apparition de ces problèmes. Ces deux paramètres ne peuvent donc pas servir à définir une stratégie d'investigations ou de surveillance des forages.

Une part importante des ouvrages défaillants concerne des forages qui traversent des évaporites. De ce fait, il est recommandé pour les forages qui sont dans cette situation de saturer en sel la boue, de doubler les tubages et la cimentation ainsi que d'utiliser un ciment sursulfaté alumineux en regard des formations évaporitiques. Par ailleurs, pour tous les ouvrages d'eau, il faut suivre les règles de l'art relatives à la réalisation des forages, dont les principales sont rappelées dans la partie du rapport consacrée aux recommandations.

Il est aussi recommandé de suivre régulièrement l'état des forages aux GTI, de préférence en couplant plusieurs méthodes d'investigations pour faire des diagnostics pertinents, de façon à détecter toute dégradation qui pourrait remettre en cause la pérennité des ouvrages. L'entretien régulier des forages et leur maintenance préventive sont préférables aux opérations curatives qui s'avèrent plus coûteuses.

Afin d'appréhender d'éventuels problèmes d'ouvrages d'eau de manière à ne plus connaître de situation de crise, il est préconisé une stratégie pragmatique de surveillance du parc des forages aux grès du Trias inférieur, qui consisterait :

- pour tous les forages aux GTI, qu'ils soient exploités ou non, à mesurer *a minima* la conductivité et les concentrations en Cl, Fe, SO₄ de leurs eaux ; à renouveler ces mesures au moins tous les cinq ans ; à consigner les résultats des mesures auprès de l'Administration ;
- pour les ouvrages d'eau en exploitation, tous les cinq ans, à réaliser des diagraphies de contrôle couplées à une inspection par caméra vidéo.

Sommaire

1. Introduction	9
2. Présentation des grès du Trias inférieur	11
3. Problématique étudiée	17
3.1. EXEMPLE DE LA DEFAILLANCE DU FORAGE DE MANONVILLER.....	17
3.2. LES GRES DU TRIAS INFERIEUR : UN AQUIFERE TRES SOLLICITE	19
3.3. ETUDES DIAGNOSTIQUES ENTREPRISES PAR LE PASSE	21
3.3.1. Diagnostic de 1983.....	22
3.3.2. Diagnostic de 1994.....	23
3.3.3. Diagnostic de 2002.....	24
3.4. OBJECTIF ET INTERET DE L'ETUDE ACTUELLE	25
4. Nouvelle étude de la détérioration de l'état des forages aux GTI en Lorraine. ..	27
4.1. SELECTION DE NOUVEAUX FORAGES.....	27
4.2. ETUDE DE L'INFLUENCE DE L'AGE DES FORAGES	28
4.3. ETUDE DE L'INFLUENCE DE LA TRAVERSEE DE FORMATIONS EVAPORITIQUES	31
4.4. EVENTUELLE INFLUENCE DE LA TECTONIQUE	34
4.4.1. Analyse à partir des 42 forages recensés	34
4.4.2. Analyse à partir d'une liste élargie de forages.....	35
4.5. ANALYSE DES AUTRES FACTEURS	37
4.5.1. Typologie des problèmes recensés.....	37
4.5.2. Examen des résultats analytiques disponibles.....	39
4.5.3. Ensemble des problèmes de qualité recensés.....	49
4.5.4. Résultats analytiques complémentaires d'autres captages du département des Vosges.....	50
4.5.5. Données hydrodynamiques et productivité des ouvrages.....	51
4.5.6. Tubages et fonds des forages	53
4.6. BILAN	54

4.7. RECOMMANDATIONS	56
4.7.1. Généralités	56
4.7.2. Proposition de protocole de suivi et d'investigations.....	61
5. Conclusion.....	63
6. Bibliographie	65

Liste des illustrations

Illustration 1 : Lithostratigraphie synthétique des grès du Trias inférieur.....	11
Illustration 2 : Log lithostratigraphique des grès du Trias inférieur.....	12
Illustration 3 : Pendage du toit des GTI.....	13
Illustration 4 : Coupe hydrogéologique schématique des GTI.....	14
Illustration 5 : Dégradation de la qualité de l'eau pompée au forage de Manonviller	18
Illustration 6 : Pics de concentrations observés au démarrage du pompage.....	18
Illustration 7 : Ouvrages lorrains ayant rencontrés les GTI.....	20
Illustration 8 : Implantations des forages qui ont été diagnostiqués par le passé.....	21
Illustration 9 : Liste des ouvrages diagnostiqués en 1983.....	22
Illustration 10 : Liste des ouvrages d'eau diagnostiqués en 1994.....	23
Illustration 11 : Liste des ouvrages d'eau diagnostiqués en 2002.....	24
Illustration 12 : Liste des ouvrages d'eau étudiés en 2010.....	27
Illustration 13 : Carte des implantations des forages étudiés en 2010.....	28
Illustration 14 : Décennies de déclaration des ouvrages aux GTI dans la BSS.....	29
Illustration 15 : Décennies de réalisation des ouvrages aux GTI.....	29
Illustration 16 : Ages des forages aux GTI qui sont problématiques.....	30
Illustration 17 : Taux de problèmes des forages versus leurs âges.....	31
Illustration 18 : Lithostratigraphie et coupe du Trias lorrain	32
Illustration 19 : Faciès évaporitiques du Trias de l'est de la France	33
Illustration 20 : Forages problématiques et structures tectoniques.....	34
Illustration 21 : Incidents de forages sur les GTI.....	36
Illustration 22 : Typologie des problématiques des forages	38
Illustration 23 : Chroniques d'analyses du forage F2 de Créhange	40

Illustration 24 : Chroniques d'analyses du forage 242 de Longeville-lès-Saint-Avoid (1 ^{ère} partie).....	42
Illustration 25 : Chroniques d'analyses du forage 242 de Longeville-lès-Saint-Avoid (2 ^{ème} partie).....	43
Illustration 26 : Chroniques d'analyses du forage F3W de Saint-Avoid (1 ^{ère} partie).....	44
Illustration 27 : Chroniques d'analyses du forage F3W de Saint-Avoid (2 ^{ème} partie).	45
Illustration 28 : Comparaison des concentrations en calcium et en sulfate.....	46
Illustration 29 : Chroniques d'analyses du forage F4 de Saint-Avoid.....	47
Illustration 30 : Chroniques d'analyses des forages S et F de Voellerdingen	48
Illustration 31 : Chroniques d'analyses du forage F de Godoncourt.....	48
Illustration 32 : Chroniques de productivité de deux forages situés à Saint-Avoid et Longeville-lès-Saint-Avoid.....	52
Illustration 33 : Coupe d'un forage d'eau en nappe libre	58
Illustration 34 : Coupe d'un forage d'eau en nappe captive	58

Liste des annexes

Annexe 1 : Coupes des forages de Meurthe-et-Moselle	73
Annexe 2 : Coupes des forages de la Moselle	85
Annexe 3 : Coupes des forages du Bas-Rhin.....	115
Annexe 4 : Coupes des forages des Vosges.....	119
Annexe 5 : Répartition des ouvrages d'eau réalisés en Lorraine en fonction des décennies	125

1. Introduction

La nappe des grès du Trias inférieur constitue la principale ressource en eau souterraine de la région Lorraine. Elle est exploitée par de nombreux forages dont certains ont été réalisés il y a plus d'un siècle. Les grès du Trias inférieur, qui sont aussi désignés de manière simplifiée par le sigle GTI, représentent une réserve stratégique de part les volumes d'eau qu'ils sont susceptibles de fournir, la qualité de leurs eaux, et leur contexte hydrogéologique puisque la plus grande partie de la nappe exploitable est captive. De ce fait, la nappe des GTI doit être particulièrement bien protégée vis-à-vis des pollutions.

Tout forage a une durée de vie limitée, qui peut être écourtée en fonction de la qualité de la réalisation de l'ouvrage, de la nature des terrains qu'il traverse, de l'utilisation de celui-ci, ou encore de son entretien.

La présente étude a pour objet de tenter de dégager une typologie des forages qui présentent un risque de dégradation à partir de l'étude d'un nombre restreint de captages, d'orienter le choix des forages à retenir sur lesquels des diagnostics pourraient être effectués, et de préciser les forages dont la surveillance de la qualité des eaux captées devrait être accrue en priorité.

Pour ce faire, une quarantaine d'ouvrages d'eau ont fait l'objet d'une étude documentaire. Ces forages ont été sélectionnés à partir des retours d'expériences des services de l'Etat en charge des eaux souterraines, et de ceux d'hydrogéologues agréés en Lorraine.

2. Présentation des grès du Trias inférieur

La présentation suivante est issue du rapport BRGM/RP-54517-FR. Les grès du Trias inférieur correspondent à une puissante série gréseuse, qui s'est développée au Buntsandstein, il y a 240 à 245 millions d'années, sous l'action d'un grand fleuve s'écoulant vers le Nord-Est en direction de la Mer germanique. Les principales formations géologiques qui composent les grès du Trias inférieur sont rappelées sur l'illustration 1.

Age (Ma)	Stratigraphie		Lithologie	
240	Muschelkalk	inférieur	Grès coquillier	
	Buntsandstein	supérieur	Grès à <i>Votzia</i>	
			Couches intermédiaires	Grès bigarrés
		moyen	(Zone-limite violette) Conglomérat principal	
			Grès vosgien (Conglomérat inférieur)	
245		inférieur	Grès de Senones ou Grès d'Annweiler	

Illustration 1 : Lithostratigraphie synthétique des grès du Trias inférieur.

La figure suivante précise et illustre les faciès détritiques rencontrés dans les grès du Trias inférieur. Ces derniers commencent par la formation des Grès de Senones ou du Grès d'Annweiler, qui est souvent arkosique (proportion importante de feldspaths) et dont les grains sont anguleux. Son aspect buriné et tacheté est caractéristique. Au-dessus, le Grès vosgien est un grès tendre, constitué de grains bien roulés, de dimensions moyennes allant jusqu'à la taille de galets. Sa base est plus ou moins grossière et commence par des bancs conglomératiques (le Conglomérat inférieur). Il est principalement constitué par du quartz et secondairement par des feldspaths, et on y rencontre des lentilles d'argile. C'est la formation la plus épaisse des GTI. Le Conglomérat principal, qui vient par dessus, contient des galets essentiellement siliceux parfois pluri-décimétriques. Il est organisé en une succession de lentilles conglomératiques. Son sommet est marqué par l'altération et la présence d'oxydes de fer. C'est la Zone-limite violette. Les Couches intermédiaires qui suivent sont riches en feldspaths. Elles sont composées de grains grossiers ; dans leur tiers supérieur, les galets sont absents tandis que des lentilles argileuses sont rencontrées. Au-dessus, se trouvent les Grès à *Votzia* qui sont riches en débris de végétaux. Ils se décomposent en une partie inférieure massive (le Grès à meules) à un grain fin et contenant des micas, et une partie supérieure (le Grès argileux) constituée de grès fins argileux, parfois entrecoupés de lits d'argiles. Enfin, le Grès coquillier, qui vient coiffer la série, marque une transition majeure dans la sédimentation (transgression marine) puisqu'il correspond au premier dépôt marin du Trias moyen (Muschelkalk). Il s'agit d'un grès à ciment dolomitique riche en fossiles.

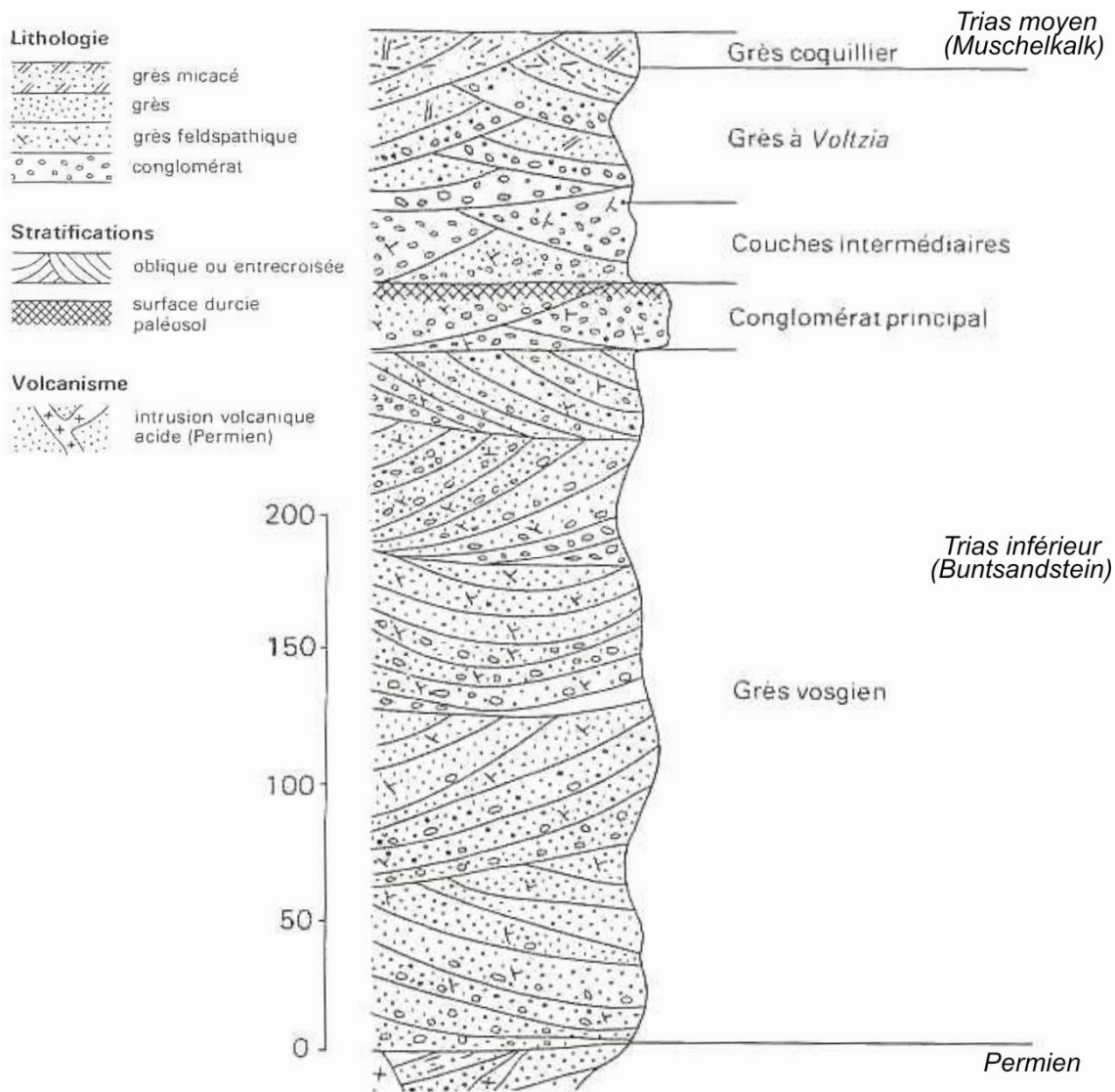


Illustration 2 : Log lithostratigraphique des grès du Trias inférieur (forage 01947X0001/HL239 ; d'après Thomas et al., 1978, modifié).

Le log ci-dessus donne une indication de ce que peuvent être les épaisseurs des formations géologiques, sachant que celles-ci peuvent varier géographiquement. La puissance du Grès vosgien atteint par exemple plus de 300 mètres au nord-est de la zone d'étude alors qu'elle s'annule au sud-ouest du département des Vosges. Dans leur ensemble, les grès du Trias inférieur sont très peu épais à l'ouest (la série géologique disparaît et plonge en direction du centre du Bassin de Paris), tandis qu'ils sont très épais vers le Nord-Est où ils affleurent. L'extension des dépôts du Buntsandstein est également très grande latéralement. Les grès s'étendent à l'aplomb de pratiquement toute la zone d'étude, même s'ils n'affleurent qu'en zone orientale de celle-ci. L'étalement de la série gréseuse provient du manque de subsidence pendant la mise en place des dépôts, ce qui a entraîné une large divagation du système fluvial.

La figure ci-dessous représente en perspective l'altitude du toit du réservoir aquifère des grès du Trias inférieur. Le pendage vers l'Ouest de l'aquifère est ainsi mis en évidence. Seuls des forages profonds peuvent atteindre l'aquifère cible dans la partie ouest de la Lorraine.

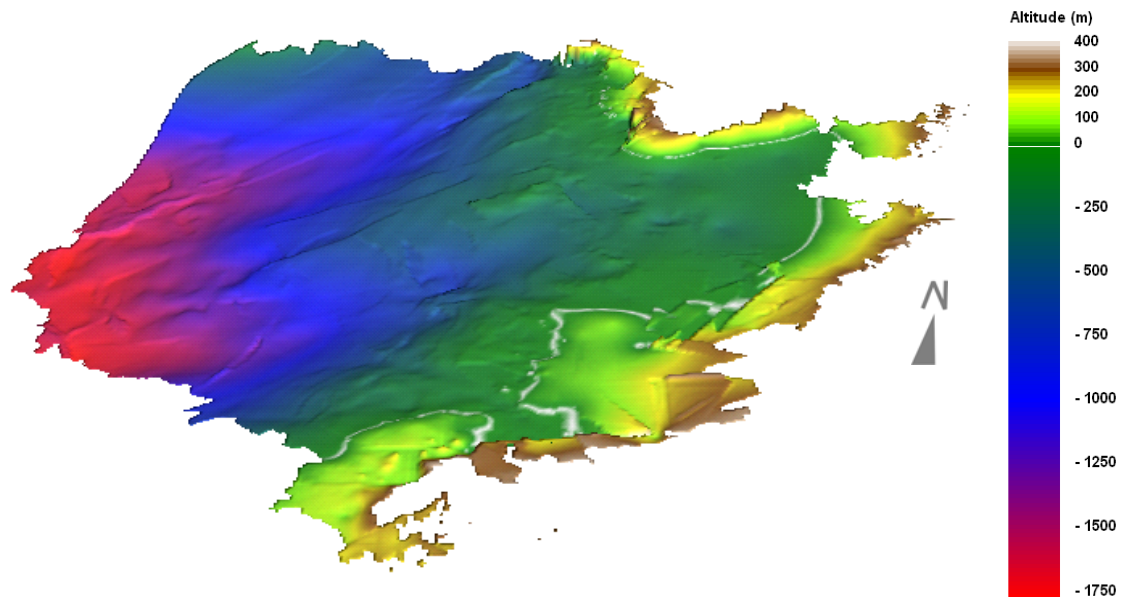


Illustration 3 : Pendage du toit des GTI.

D'un point de vue hydrogéologique, les grès peuvent être aquifères depuis leur base du Buntsandstein inférieur, jusqu'à leur sommet dans le Muschelkalk inférieur. Mais globalement, le mur de l'aquifère correspond le plus souvent au Grès vosgien, et le toit peut coïncider avec les Grès à *Voltzia*. Selon l'échelle d'étude des GTI, ceux-ci peuvent être considérés ou non comme un aquifère multicouche. On y distingue parfois deux principales nappes : la nappe supérieure des Grès à *Voltzia* ; et la nappe inférieure du Grès vosgien qui est la plus importante. Quelle que soit l'approche retenue, les niveaux intermédiaires argileux rencontrés dans la série gréseuse sont le siège de flux verticaux de drainance qui justifient de considérer les grès du Trias inférieur comme un seul et même système aquifère.

Le réservoir aquifère des GTI a une importance stratégique régionale. Il contient 180 milliards de mètres cubes d'eau douce, répartis en 30.10^9 m^3 pour la partie libre de la nappe et 150.10^9 m^3 pour sa partie captive (Laurent, 2000). Première ressource en eau souterraine de la Lorraine et du bassin Rhin-Meuse (Alsace comprise), les GTI sont intensément exploités pour l'alimentation en eau potable (AEP), l'alimentation en eau industrielle (AEI) et l'embouteillage, et le niveau piézométrique de leur nappe captive diminue régulièrement. Par ailleurs, dans le nord du département de la Moselle, les eaux du réservoir aquifère s'infiltrant dans les travaux miniers réalisés

dans les séries carbonifères sous-jacentes, suite à l'exploitation du gisement de charbon. Le régime de la nappe des GTI a ainsi été considérablement perturbé par les exhaures minières du bassin houiller. Le schéma conceptuel, de la figure suivante, permet d'illustrer les circulations souterraines complexes dans les secteurs perturbés de la nappe.

Ainsi, à partir des trois types de régimes de la nappe des grès du Trias inférieur qui sont mentionnés ci-dessus (libre, captif et influencé), différents secteurs ont été distingués dans les GTI. Pour mettre en place le référentiel d'évaluation des ressources en eau souterraine, les GTI ont été subdivisés en trois masses d'eau souterraine : la masse d'eau de code 2004 du « Grès vosgien en partie libre » ; la masse d'eau de code 2005 du « Grès vosgien captif non minéralisé » ; et la masse d'eau de code 2028 des « Grès du Trias inférieur du bassin houiller ». En effet, la partie ouest de la nappe a une salinité élevée qui la rend impropre pour l'AEP. De même, dans le secteur de l'Est Mosellan, la minéralisation de la nappe est élevée (on parle parfois de « bulle salée » dans ce secteur).

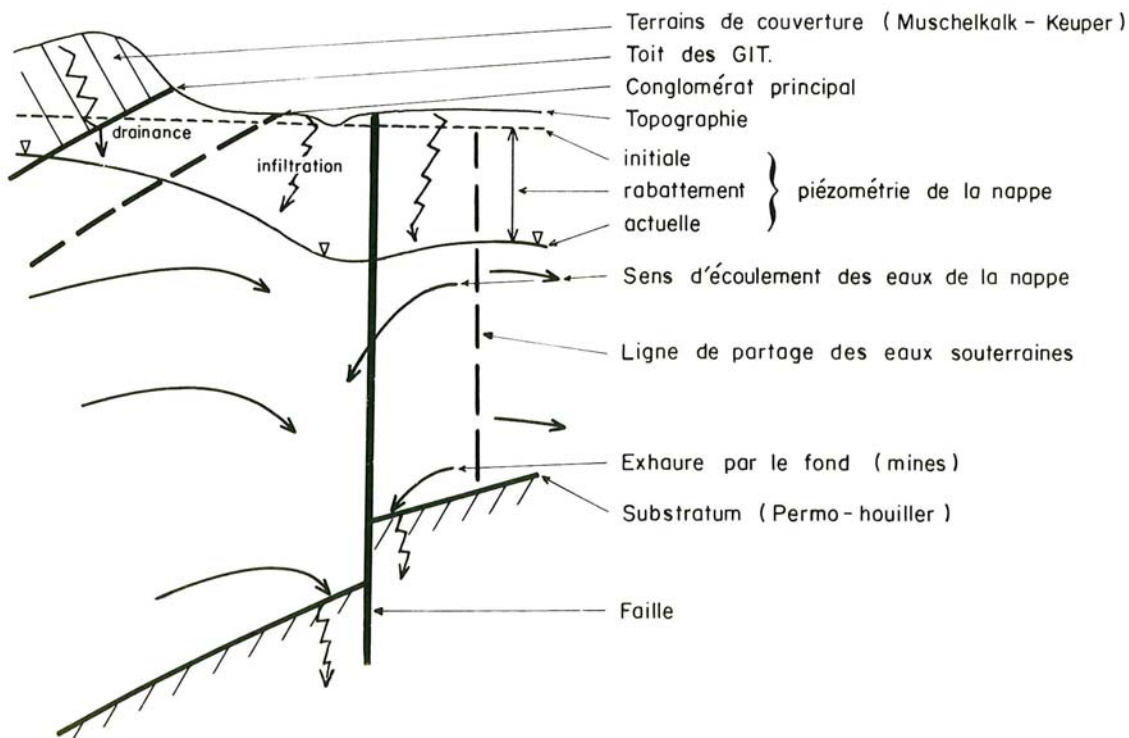


Illustration 4 : Coupe hydrogéologique schématique des GTI (Babot et al., 1972).

Au sud-ouest et à l'ouest de la boutonnière du Warndt, qui s'ouvre au nord-est vers le Länder allemand de la Sarre, la bordure des affleurements des grès du Trias inférieur situés à la limite de la masse d'eau 2028 forme une saillie, avant que les grès ne plongent sous les formations géologiques du Trias moyen (Muschelkalk et Lettenkohle) ; il s'agit d'une inversion de relief.

A l'origine, avant le 19^{ème} siècle et le début des pompages d'épuisement des mines du bassin houiller lorrain et autres pompages, la morphologie des terrains géologiques devait permettre à ce léger relief (sud-ouest et ouest de la boutonnière) de coïncider avec une ligne de partage des eaux souterraines dans la nappe des GTI. Au nord-est de cette limite à flux nul, les circulations souterraines devaient être globalement orientées en direction de la rivière de la Sarre (Babot *et al.*, 1972).

Le régime de la nappe des grès du Trias inférieur a été extrêmement perturbé depuis la mise en œuvre des exhaures du bassin houiller. L'état piézométrique contemporain de la nappe permet de constater que l'axe de divergence des eaux souterraines existe encore vers les communes de Boucheporn, Longeville-lès-Saint-Avold *etc.* au niveau du relief du sud-ouest de la boutonnière. Le réseau hydrographique draine ainsi toujours la partie ouest et nord-ouest de la masse d'eau 2028. Cette situation est particulièrement visible au niveau de la Bisten et de son affluent le Grossbach.

Par contre, la différence majeure par rapport à l'état originel de la nappe réside dans le fait que les pompages ont engendré des cônes de dépression considérables centrés sur les communes de Freyming-Merlebach et Forbach. Ils sont respectivement dus aux exhaures des puits de Vouters et Marienau. Les rabattements de la surface piézométrique de la nappe y sont supérieurs à 100 mètres, si l'on considère que la charge hydrostatique initiale était d'au moins 200 m NGF.

Le cône de rabattement de Vouters a permis de mettre en évidence le fait que la faille de Hombourg constituait une limite étanche ; la nappe n'est rabattue qu'au sud-est de la faille. La faille de Longeville pourrait éventuellement être aussi une limite étanche puisqu'il semble y avoir un léger décalage des équipotentielles de part et d'autre de cette faille sur une carte piézométrique contemporaine. Par contre, le cône de rabattement de Marienau ne présente pas cette asymétrie. Il est en revanche possible qu'il mette en évidence le fait que la faille de Behren-lès-Forbach (continuité de la faille de Vuillemin-Wendel) constitue un axe préférentiel d'écoulement des eaux souterraines. La nappe semble en effet drainée au niveau de cette faille. Notons enfin que de l'autre côté du cône de dépression de Marienau, la Rosselle aval draine également la nappe des GTI vers la cote altimétrique 190 m NGF.

Avec l'arrêt des exhaures françaises en 2006, et des exhaures allemandes qui concernent les GTI, le régime naturel de la nappe continue à être profondément modifié. Les simulations réalisées (voir par exemple Vaute *et al.*, 2007) montrent qu'il le sera encore pendant quelques années au cours de l'ennoyage des mines, qui a déjà commencé. Puis il le demeurera pendant la phase transitoire de remontée du niveau des eaux souterraines dans l'aquifère des GTI. La durée de toute cette période post-exhaures est évaluée à plusieurs décennies. A l'issue de la phase transitoire, les circulations souterraines dans la masse d'eau 2028 devraient à nouveau se faire globalement en direction de la Bisten et de la Rosselle, puis de la Sarre au nord-est. Les pompages résiduels de substitution pour l'AEI et l'AEP, et les nouveaux pompages prévus dans la nappe des GTI pour assurer le dénoyage des caves des habitations situées à proximité des aires d'émergence des eaux souterraines dans certaines vallées (notamment celle de la Rosselle), devraient toutefois abaisser quelque peu la piézométrie par rapport à son état d'origine.

3. Problématique étudiée

3.1. EXEMPLE DE LA DEFAILLANCE DU FORAGE DE MANONVILLER

Le forage d'eau de Manonviller en Meurthe-et-Moselle, de code national 02693X0001/F, a été réalisé en 1962 afin de capter, pour l'AEP, la nappe des grès du Trias inférieur. Nous avons dressé ses coupes géologique et technique initiales (consultables en annexe 1).

Cet ouvrage traversait d'abord sur plus de 250 m de profondeur des morts-terrains constitués par des formations géologiques du Quaternaire, du Keuper inférieur, de la Lettenkohle et du Muschelkalk, avant d'atteindre les GTI dont il captait la nappe de 337 à 410 m de profondeur. Les formations évaporitiques qui ont été rencontrées dans le Trias moyen et supérieur sont du gypse en filonnets abondants (dans le Keuper inférieur), de l'anhydrite (dans la Lettenkohle), et de l'anhydrite et du gypse (dans le Muschelkalk inférieur et moyen). Le seul incident qui soit survenu pendant les travaux de la foration fut une éruption aquifère de $20 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, avec une pression au sol de quelques centaines de grammes, rencontrée à 77 m de profondeur au niveau des Couches à Cératites du Muschelkalk supérieur. Elle a été « écrasée » par l'injection d'un coulis de ciment et le contrôle ultérieur de l'étanchéité du forage a été positif.

Une diagraphie de contrôle réalisée dans le forage de Manonviller en 1985 a montré qu'il n'y avait pas de détérioration du tubage dans les zones sensibles. En 1990, un diagnostic de l'état du forage a été effectué en réalisant un pompage et des mesures simultanées de la température de l'eau. Il n'a pas mis en évidence d'anomalie ni de détérioration des tubages.

Une situation de crise grave est survenue à partir de l'année 2005 pour l'AEP : une dégradation de la qualité de l'eau pompée au forage a été constatée avec des augmentations rapides des concentrations en chlorure et sodium, et de la conductivité électrique de l'eau (illustration 5), qui laissaient penser à une détérioration de l'ouvrage d'eau. Les suivis qualitatifs détaillés de l'eau du forage ont permis de mettre en évidence au démarrage des pompages des augmentations brusques de ces mêmes concentrations, suivies par des retours tout aussi rapides aux valeurs initiales (illustration 6). Ce type d'évolution subite des paramètres de la qualité est caractéristique d'une dégradation du tubage d'un forage (Griole, 1991). Les pics de saumure observés en début de pompages à Manonviller se sont accentués avec le temps et ont été confirmés à plusieurs reprises par des mesures quasiment continues de la conductivité.

En 2006, des investigations conséquentes par une inspection vidéo et des diagraphies ont été faites et ont mis en évidence la perforation du tubage à 200 m de profondeur. Des prélèvements d'eau ont été réalisés à des profondeurs de 326 et 388 m. Les analyses faites sur ces échantillons ont donné respectivement des concentrations anormales en chlorure de 215 et 155 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ et en sodium de 166 et 130 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, montrant que la contamination ne venait pas de la nappe des GTI, mais qu'elle provenait bien du lessivage d'évaporites présentes au niveau du tubage percé.

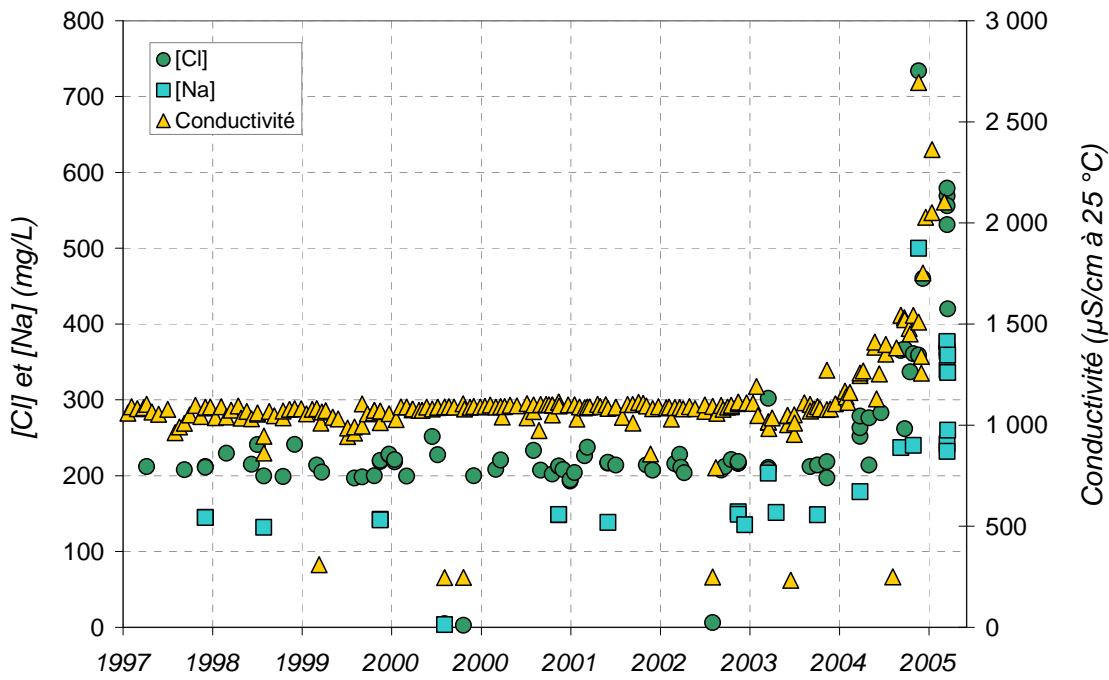


Illustration 5 : Dégradation de la qualité de l'eau pompée au forage de Manonviller de code national 02693X0001/F (d'après un graphique de la DDASS 54).

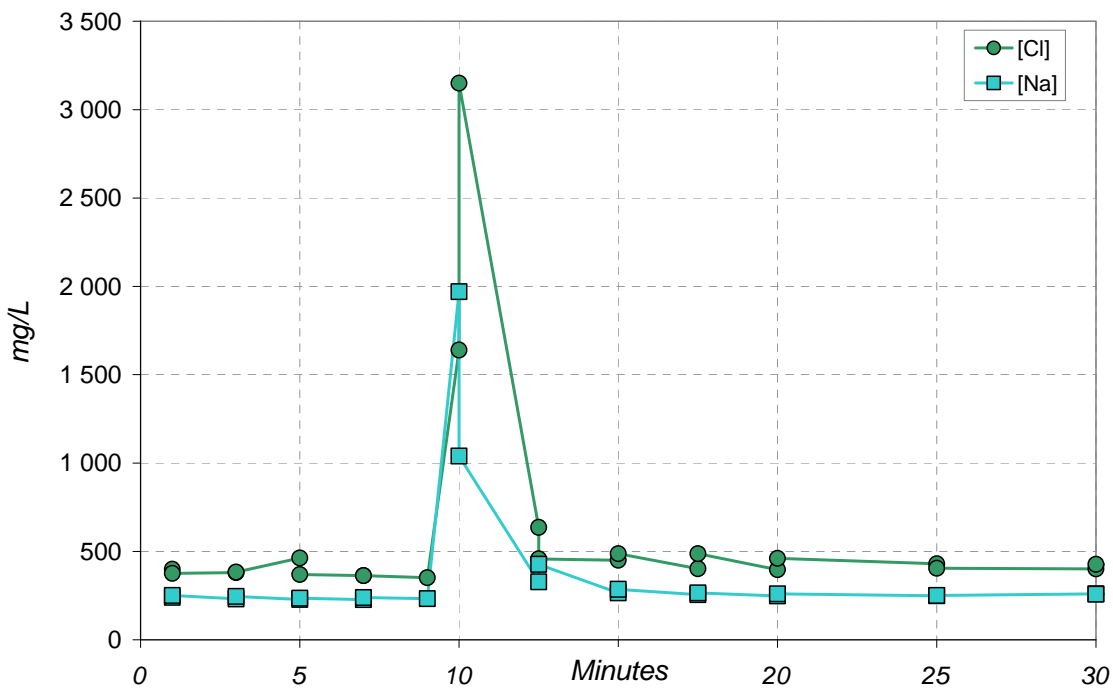


Illustration 6 : Pics de concentrations observés au démarrage du pompage le 16 mars 2006 (d'après les données de la SAUR).

La pose d'un packer pour colmater le forage a été écartée compte tenu du fait qu'autour de la zone percée la corrosion du tubage était avancée. La pression qui aurait été engendrée par le packer aurait en effet risqué d'entraîner la rupture du tubage et d'aggraver la situation. Cette situation de crise a finalement trouvé son épilogue en la substitution du forage, qui a été rebouché.

3.2. LES GRES DU TRIAS INFERIEUR : UN AQUIFERE TRES SOLLICITE

Il est possible d'essayer de dénombrer l'ensemble des ouvrages qui captent la nappe des grès du Trias inférieur en Lorraine, à partir de la Banque des données du Sous-Sol (BSS). Cette base de données stocke pour le territoire régional environ 32 000 ouvrages souterrains qui ont été déclarés au titre du code minier, et d'autres ouvrages comme les sources. Pour peut-être la moitié des points de la banque, des informations relatives à la stratigraphie sont conservées.

En faisant une requête sur l'âge des formations qui ont été atteintes ou traversées par les ouvrages, de manière à ce qu'il soit compris entre le Muschelkalk inférieur et le Buntsandstein inférieur, nous avons ainsi sélectionné (de façon non exhaustive) entre 1500 et 1600 ouvrages. Leur répartition en Lorraine est représentée sur l'illustration 7 (points rouges et bleus).

Nous avons ensuite conservé de cette liste préliminaire uniquement les ouvrages d'eau, c'est-à-dire les puits, forages, piézomètres, qualitomètres ou sources, ainsi que les ouvrages pour lesquels il existait une mesure de niveau d'eau. La liste résultante d'ouvrages d'eau aux GTI contient plus de 1100 points, qui sont aussi reportés sur l'illustration 7 (points bleus).

Cet inventaire des ouvrages d'eau n'est pas non plus exhaustif, puisqu'il découle des informations stratigraphiques qui ne sont pas systématiquement transmises et donc renseignées dans la BSS. Ce nombre déjà important d'ouvrages d'eau montre toutefois l'intérêt porté à la nappe des grès du Trias inférieur. Il montre aussi l'ampleur potentielle des problèmes de dégradation de l'état des ouvrages qui pourraient survenir, allant jusqu'à engendrer une pollution de la nappe des GTI comme cela a déjà été constaté par le passé au droit du Bassin houiller lorrain (Ramon, 1976).

Les ouvrages ayant atteint les grès du Trias inférieur dans leur partie centrale et vers l'Ouest sont pour la plupart des forages de reconnaissance pour les hydrocarbures. Quant aux ouvrages d'eau, ils sont situés, à une exception près, en Meurthe-et-Moselle, en Moselle et dans les Vosges.

Si l'on se réfère à l'altitude du toit des grès (*confer* l'illustration 3), c'est-à-dire à l'altitude jusqu'à laquelle il est nécessaire de forer pour atteindre l'aquifère, on constate que la majorité des points recensés dans notre inventaire se trouve sur les affleurements des GTI ou proches de ceux-ci. Cela correspond bien évidemment aux secteurs où les grès sont à moindres profondeurs et donc les plus accessibles.

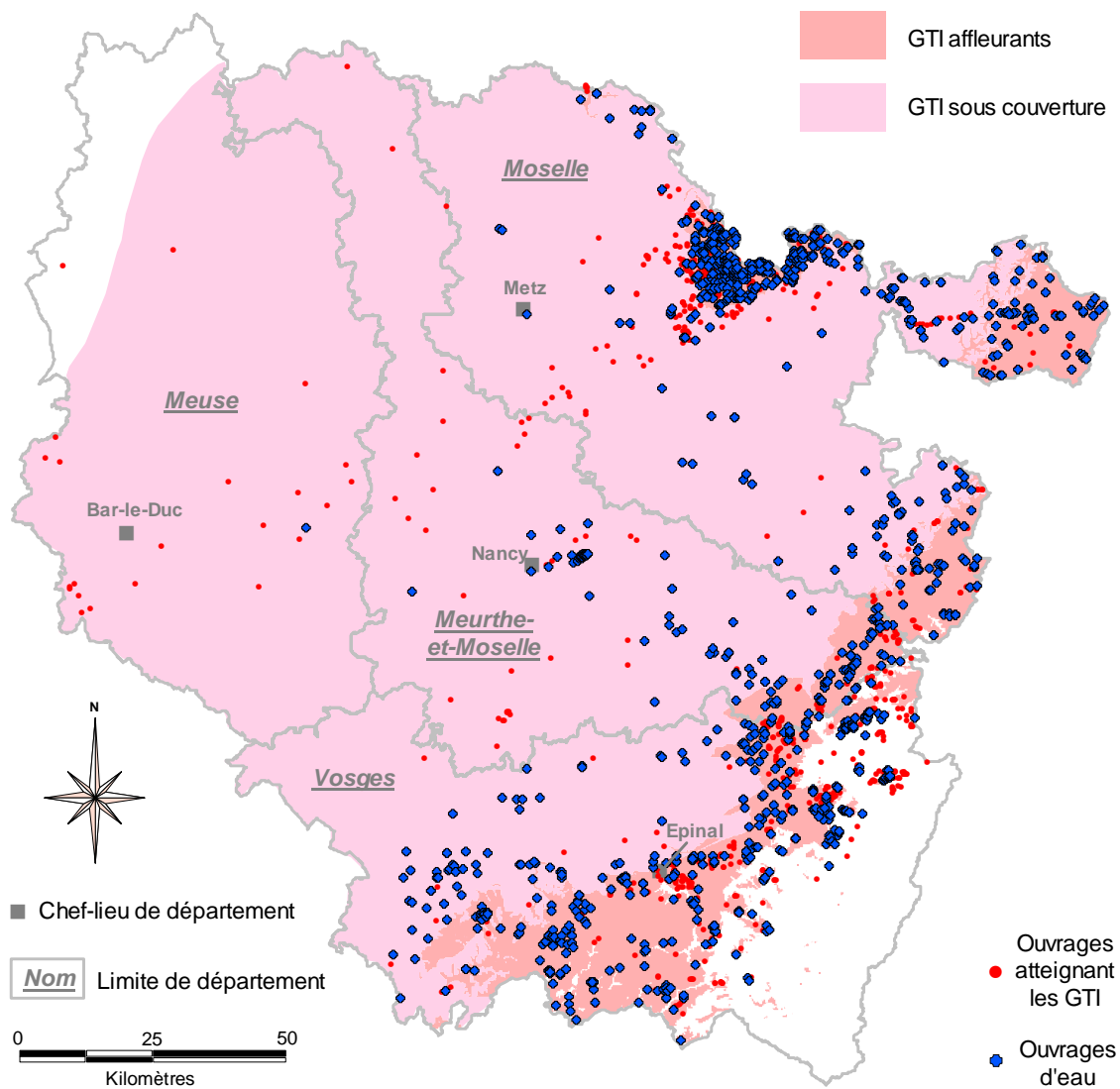


Illustration 7 : Ouvrages lorrains ayant rencontrés les GTI.

3.3. ETUDES DIAGNOSTIQUES ENTREPRISES PAR LE PASSE

En 1983, un premier diagnostic sur l'état du parc de forages profonds sollicitant l'aquifère des grès du Trias inférieur sous couverture a été réalisé (Ricour, 1983). Il a été réalisé sur 83 forages.

Une actualisation de ce diagnostic a été effectuée en 1994 pour les forages profonds atteignant la nappe du Grès vosgien en Lorraine. Il a abouti à un certain nombre de recommandations concernant 28 forages (Petit *et al.*, 1994).

Un bilan a été dressé en 2002 pour déterminer quels aménagements avaient été effectués sur une partie des forages qui avaient été pris en compte dans l'étude de 1994 (Kirsch *et al.*, 2002). Il a concerné 16 forages.

La carte de l'illustration 8 permet de préciser la répartition de tous les forages étudiés dans le cadre des diagnostics faits de 1983 à 2002.

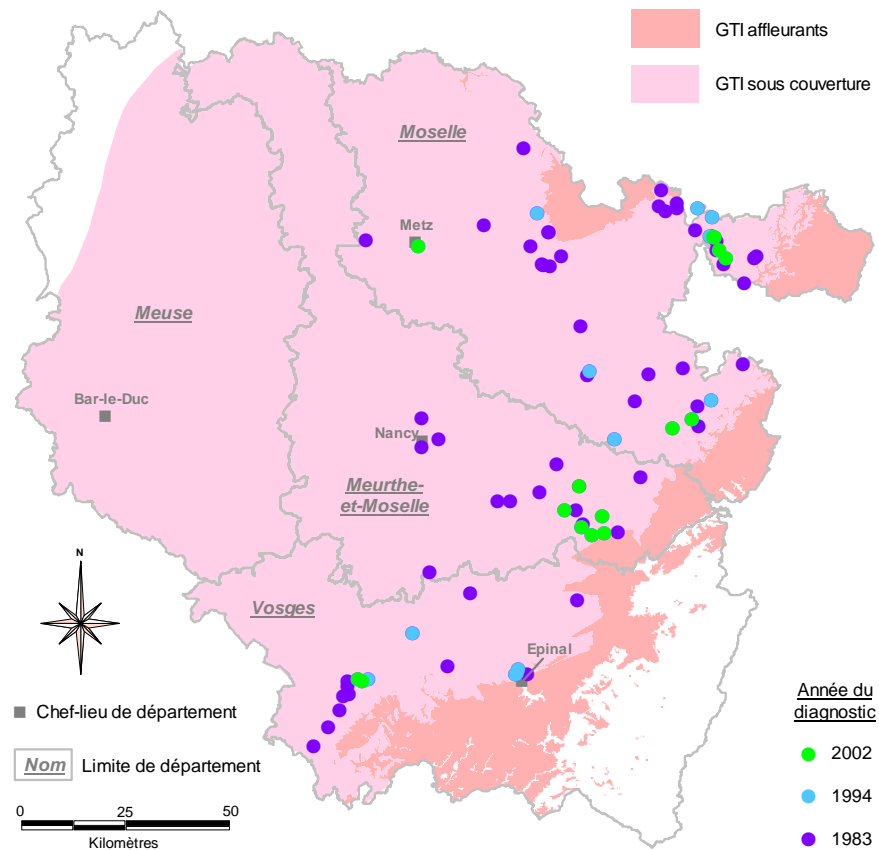


Illustration 8 : Implantations des forages qui ont été diagnostiqués par le passé.

3.3.1. Diagnostic de 1983

L'étude du diagnostic de 1983 a porté sur les forages captant la nappe des grès du Trias inférieur sous couverture en Lorraine et qui avaient été réalisés avant 1963. Il avait en effet été considéré que les forages implantés sur les zones d'affleurement de la formation des GTI, étaient moins exposés à la dégradation naturelle, et par là même, présentaient moins de risques de contamination de l'aquifère. La liste des 83 forages ainsi sélectionnés est présentée dans le tableau de l'illustration 9.

Indice	Dési.	Indice	Dési.	Indice	Dési.	Indice	Dési.
01391X0010	F	01664X0003	F1	02316X0002	S33	03038X0001	F
01396X0039	F2	01664X0006	F4	02318X0008	F	03041X0001	GT
01406X0013	F	01664X0007	F5	02321X0001	F	03043X0011	F
01406X0014	F	01664X0008	F	02322X0002	F	03052X0019	F
01406X0020	S	01664X0010	F	02323X0001	F	03378X1003	F
01407X0003	F	01664X0012	F	02323X0002	F	03382X0007	F3
01407X0004	221	01668X0008	F	02323X0004	S	03382X0018	F2
01407X0005	S	01668X1007	F	02323X0006	F	03382X0019	F2
01633X0016	P	01668X1009	F	02684X0002	S	03382X0043	F2
01641X0001	S	01675X0001	F	02684X0020	F	03382X0047	F
01644X0010	S3	01675X0002	F	02691X0003	F	03383X0051	V
01651X0019	F	01675X0004	F	02692X0002	F	03383X0052	III
01652X0041	F1	01953X0005	LMO-1	02692X0004	F	03385X0001	F
01652X0042	F2	01957X0008	F1	02693X0001	F	03385X0002	F
01652X0091	F	01957X0055	F2	02693X0002	F	03386X0030	S
01656X0013	F	01965X0001	S	02697X0001	F	03392X0002	S
01656X0014	F1	01966X0001	F	02697X0002	F	03394X0006	F
01656X0015	F2	01975X1001	F	02697X0003	F	03394X0029	F3
01663X0016	F	02301X0017	F	02697X0005	F	03394X0031	F1
01664X0001	F	02302X0009	F1	02698X0001	F	03394X0032	F1
01664X0002	F	02305X0063	F3	02701X0016	F	03394X0035	F2

Illustration 9 : Liste des ouvrages diagnostiqués en 1983.

Le diagnostic a d'abord consisté à mettre en place une méthodologie, à partir de l'étude détaillée de trois captages, en se basant sur l'analyse des :

- comptes rendus d'exécution des forages (éventuels problèmes rencontrés lors de la cimentation des ouvrages, niveaux d'évaporites traversés) ;
- évolution des courbes caractéristiques des forages dans le temps ;
- évolution des niveaux statiques ;
- évolution de la qualité des eaux captées ;
- informations complémentaires apportées par les exploitants.

Puis l'état des 83 forages a été analysé. Il en est ressorti que :

- 9 forages avaient déjà été obturés, de manière plus ou moins satisfaisante ;
- 21 forages devaient être cimentés ;
- 3 forages étaient à restructurer ;
- 14 forages devaient faire l'objet de diagraphies ;
- 36 ouvrages devaient être suivis régulièrement.

Les recommandations émises ont été suivies de travaux de réparation ou de neutralisation qui se sont achevés en 1990.

3.3.2. Diagnostic de 1994

Une nouvelle étude pour diagnostiquer l'état des forages profonds atteignant la nappe du Grès vosgien en Lorraine a été réalisée à partir de la sélection la plus exhaustive possible des forages sollicitant l'aquifère des grès du Trias inférieur sous couverture.

De cette première sélection, ont été retenus pour être diagnostiqués 42 forages. Il s'agissait des ouvrages qui avaient plus de 40 années d'existence, qui n'avaient pas fait l'objet d'un diagnostic depuis 1983, qui traversaient des évaporites dans la couverture, et qui ne présentaient pas d'envahissement par des eaux minéralisées des aquifères sus-jacents, ou au contraire présentaient des indices ou des risques de contamination.

Finalement, parmi ces ouvrages d'eau, les 28 forages qui étaient considérés comme les plus vulnérables, et qui étaient situés dans les départements de Meurthe-et-Moselle, de la Moselle et des Vosges, ont fait l'objet d'un diagnostic à partir de l'analyse d'informations issues de la BSS, des archives du BRGM, des Directions Départementales des Affaires Sanitaires et Sociales (DDASS), et des exploitants des ouvrages d'eau. Ces forages sont listés ci-dessous.

Indice	Dési.	Indice	Dési.	Indice	Dési.	Indice	Dési.
01396X0039	F2	01664X0010	F	02633X0001	F	03382X0047	F
01407X0005	S	01668X1007	F	02692X0004	F	03383X0051	V
01641X0001	S	01957X0008	F1	02693X0002	F	03383X0052	III
01664X0001	F2	02318X0008	F	02697X0002	F	03394X0029	F3
01664X0002	F2	02322X0002	F	02697X0003	F	03394X0032	F1
01664X0006	F4	02323X0001	F	02697X0005	F	03394X0035	F2
01664X0007	F5	02323X0002	F	03038X0001	F	03394X0031	F1

Illustration 10 : Liste des ouvrages d'eau diagnostiqués en 1994.

Le diagnostic a conclu sur la nécessité de réaliser des investigations et des aménagements sur ces ouvrages. Plusieurs opérations pouvant être effectuées sur le même forage, il s'agissait de faire des :

- analyses d'eau sur 12 forages ;
- diagraphies sur 8 forages ;
- pompages d'essai sur 4 forages ;
- restructurations ou obturations de 3 forages ;
- restructurations de 3 forages ;
- obturations de 2 forages.

3.3.3. Diagnostic de 2002

Parmi les forages pour lesquels des recommandations avaient été émises en 1994, 16 ouvrages ont été sélectionnés par l'Administration afin d'établir le bilan des opérations qui avaient été entreprises sur ceux-ci (liste ci-dessous).

Indice	Dési.	Indice	Dési.	Indice	Dési.	Indice	Dési.
01641X0001	S	01668X1007	F	02693X0001	F	02697X0005	F
01664X0006	F4	02322X0002	F	02693X0002	F	03378X1003	F
01664X0007	F5	02323X0001	F	02697X0002	F	03382X0047	F
01664X0010	F	02692X0004	F	02697X0003	F	03383X0051	V

Illustration 11 : Liste des ouvrages d'eau diagnostiqués en 2002.

Des enquêtes auprès des gestionnaires ont été effectuées pour chacun de ces forages, consistant en la vérification de la réalisation des recommandations et également en l'acquisition d'éventuelles informations complémentaires concernant les ouvrages. Ce travail d'actualisation s'est déroulé selon :

- un premier inventaire et recueil d'informations complémentaires par rapport à celles déjà recueillies en 1994, à partir de la BSS et des archives du BRGM ;
- une enquête systématique auprès des propriétaires, gestionnaires ou exploitants des forages, et l'éventuelle récupération de documents en leur possession ;
- une visite de terrain pour les forages accessibles ;
- la collecte auprès des DDASS des départements concernés, ou dans des rapports d'études, des résultats du suivi de la qualité des eaux captées par les ouvrages en exploitation (concentrations en fer et en sulfate, et dureté).

Ces opérations ont permis d'aboutir au bilan présenté ci-dessous, faisant ressortir que les recommandations du diagnostic de 1994 avaient été en partie suivies. Plusieurs inspections télévisées avaient été effectuées mais aucune diagraphie n'avait été réalisée. Certaines opérations prescrites prioritairement en 1994 n'avaient pas encore été entreprises en 2002. Au final il ressortait que :

- 10 forages étaient toujours en exploitation ;
- 6 forages n'étaient plus exploités ;
- 3 forages avaient été rebouchés, dont 1 de manière insatisfaisante ;
- 1 tête de forage avait été fermée et soudée ;
- 2 forages étaient en attente de réhabilitation ;
- 3 inspections vidéo avaient été réalisées ;
- les forages exploités pour l'AEP avaient fait l'objet d'un suivi de la qualité de leurs eaux par la DDASS ;
- aucune diagraphie n'avait été effectuée sur les 16 forages ;
- pour 1 forage, toujours en exploitation, aucune nouvelle information n'avait pu être récupérée auprès du gestionnaire.

3.4. OBJECTIF ET INTERET DE L'ETUDE ACTUELLE

Il s'agit en premier lieu de réaliser un nouveau diagnostic de l'état actuel des forages aux GTI, selon les informations disponibles.

Par ailleurs, les ressources en eau souterraines et les captages sont intimement liés puisque les aquifères sont des formations géologiques suffisamment perméables pour permettre des écoulements d'eau souterraine et leur captage en quantités appréciables, notamment à l'aide de forages.

Il faut ainsi souligner que l'attention portée aux captages d'eau est, par voie de conséquence, nécessaire à la pérennisation de la ressource en eau. L'objectif de la présente étude est donc bien de protéger la ressource des grès du Trias inférieur. Il est en même temps d'essayer de déterminer s'il existe des causes particulières à la dégradation des forages aux GTI.

4. Nouvelle étude de la détérioration de l'état des forages aux GTI en Lorraine

4.1. SELECTION DE NOUVEAUX FORAGES

Les précédents diagnostics réalisés sur les forages et passés en revue dans la partie 3 ont été faits sur des listes d'ouvrages d'eau qui ont été sélectionnés principalement à partir de critères correspondant à un âge avancé des forages, à leur situation dans des secteurs où les grès du Trias inférieur n'affleuraient pas, et aussi lorsqu'ils traversaient des évaporites.

Ces études ayant apporté des premiers enseignements sur l'état de dégradation des forages, on peut se demander si elles avaient une portée représentative de l'ensemble des problématiques affectant les forages aux GTI. Pour tenter de le savoir nous avons interviewé des acteurs majeurs des forages d'eau en Lorraine, excepté dans le département de la Meuse.

Les services de l'Etat (l'Agence Régionale de Santé, les Directions Départementales des Territoires, la Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement) concernés par l'AEP en Meurthe-et-Moselle, Moselle et dans les Vosges, l'Agence de l'eau Rhin-Meuse, et des hydrogéologues agréés nous ont ainsi apporté un précieux concours pour identifier dans ces trois départements les diverses problématiques qui ont déjà affecté des forages d'eau. Les 42 forages concernés sont listés dans le tableau de l'illustration 12 et ils sont localisés sur l'illustration 13.

Nous tenons également à remercier, en plus des services, organismes et fonctionnels cités ci-dessus, le Conseil Général de la Moselle, le Service d'Infrastructure de la Défense de Nancy, la Société des Eaux de l'Est, et le Syndicat Mixte de Production d'Eau Potable de la Région de Sarre-Union de nous avoir aimablement mis à disposition des informations et données.

Indice	Dési.	Indice	Dési.	Indice	Dési.	Indice	Dési.
01398X0033	F3W	01653X0063	F4	01668X0120	S	02311X0017	F
01398X0110	F2	01653X0066	2BIS	01668X0121	F	02315X0001	F
01641X0001	S	01653X0107	242	01672X0002	F	02323X0006	F
01644X0033	F	01653X0148	F6	01677X0001	F	02693X0001	F
01652X0044	F1	01653X0149	F7	01685X0001	F	02697X0030	F
01652X0114	F2	01654X0011	25	01957X0008	F1	03044X0010	F
01652X0131	F3	01654X0013	29	02301X0017	F	03044X0014	F
01652X0157	H3	01654X0041	F2	02302X0098	F	03381X0008	F
01652X0158	H4	01656X0015	F2	02302X0124	F2	03742X0001	F
01653X0043	F2	01664X0012	F	02305X0063	F3		
01653X0044	F3	01665X0026	F	02307X0238	F		

Illustration 12 : Liste des ouvrages d'eau étudiés en 2010.

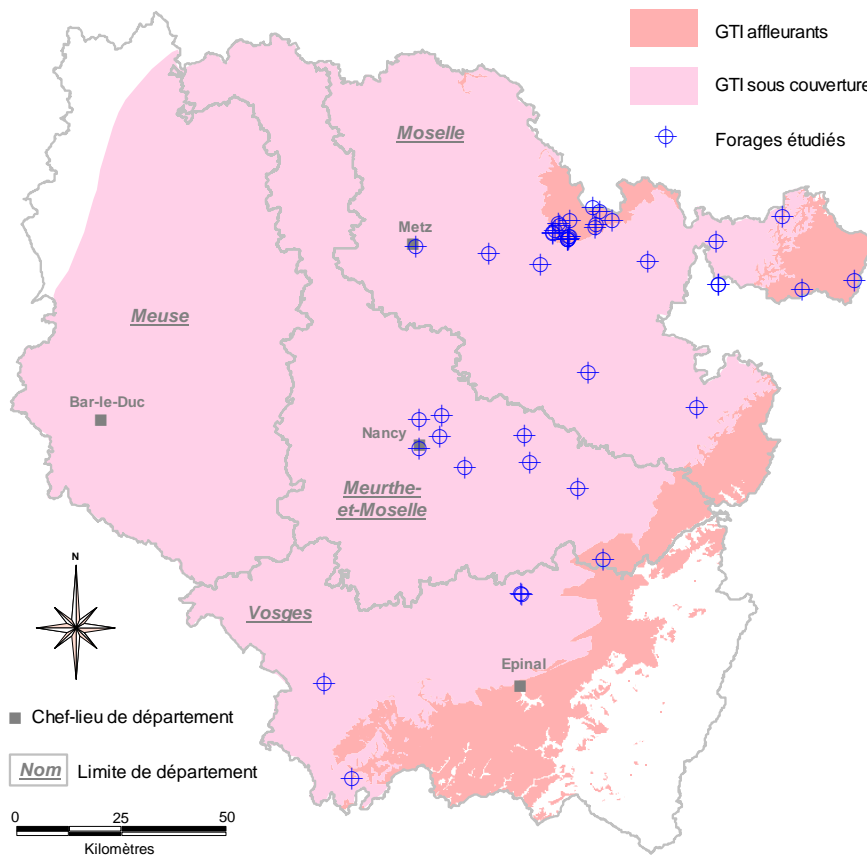


Illustration 13 : Carte des implantations des forages étudiés en 2010.

4.2. ETUDE DE L'INFLUENCE DE L'AGE DES FORAGES

Le vieillissement d'un forage d'eau qui survient au cours de son exploitation ou naturellement au fil du temps par les réactions qui se produisent entre les tubages, crépines, parties cimentées, et les terrains encaissants, peut de prime abord être repéré grâce à l'âge du forage.

Une analyse approximative de l'âge du parc des forages d'eau aux grès du Trias inférieur en Lorraine peut être faite en considérant les dates des déclarations des travaux de foration dans la base de la BSS. Elles sont indiquées pour 949 des 1144 ouvrages d'eau inventoriés (confer la partie 3.2), soit pour 83 % de ces forages.

Les âges des déclarations sont présentés graphiquement par classe de décennie sur l'illustration 14. Il apparaît que les premières déclarations de forages ont été faites dans les années 1930, mais qu'elles n'ont vraiment pris de l'ampleur qu'à partir des années 1960. Depuis elles ont été en moyenne de 188 déclarations sur 10 ans, soit de 19 déclarations par an.

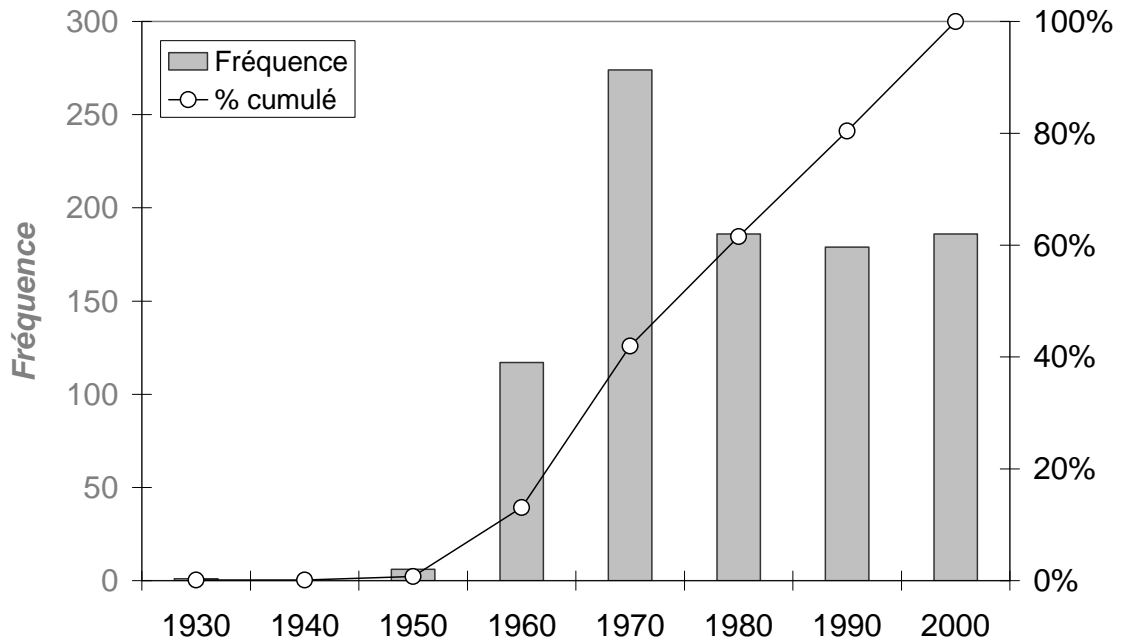


Illustration 14 : Décennies de déclaration des ouvrages aux GTI dans la BSS (pour 944 forages).

Un meilleur indicateur sur l'âge du parc de forages d'eau aux GTI peut bien entendu être tiré des dates de la réalisation des travaux de foration lorsqu'elles sont indiquées. Leur histogramme est présenté sur l'illustration 15.

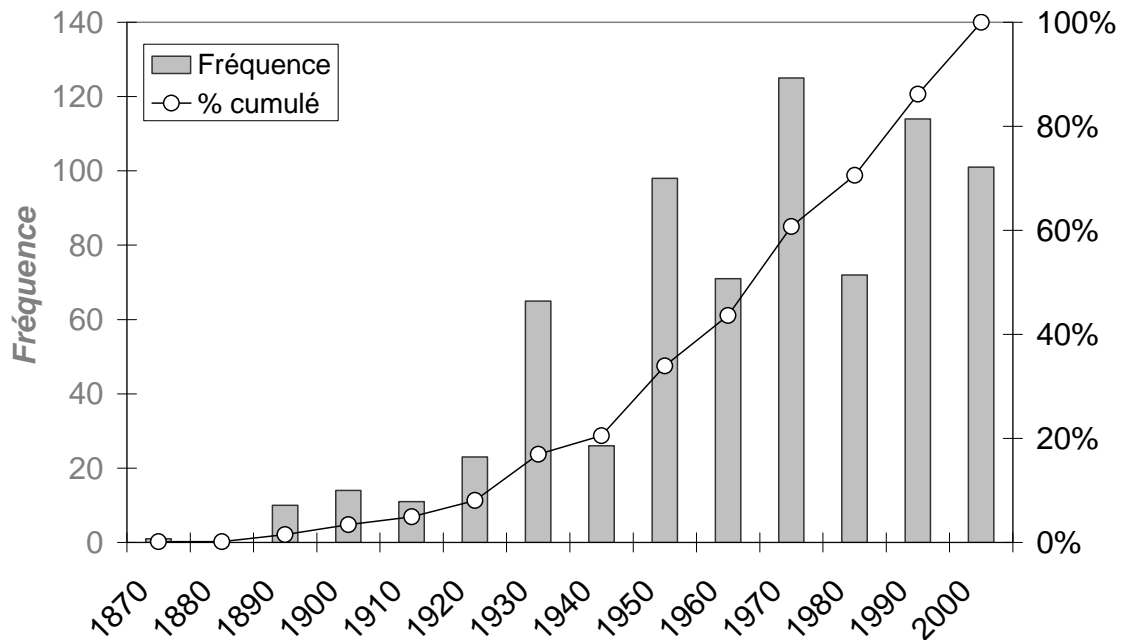


Illustration 15 : Décennies de réalisation des ouvrages aux GTI (pour 731 forages).

La répartition dans le temps est ainsi beaucoup plus précise. On constate un décalage important entre l'année de la réalisation des travaux et celle de la déclaration des forages dans la BSS, qui peut atteindre plusieurs dizaines d'années. Le premier puits aux GTI a en fait été creusé en 1875 et l'accroissement du nombre d'ouvrages réalisés était plus progressif que ce que laissait supposer le premier graphique. Les premières augmentations importantes de réalisations sont survenues au cours des décennies 1930 puis 1950.

Ce second histogramme est non biaisé mais il souffre d'une moins bonne représentativité, puisque les dates des forations ont été transmises pour leur stockage dans la BSS pour un nombre moins élevé d'ouvrages d'eau : 731 forages, soit 64 % de l'ensemble des ouvrages identifiés.

Nous avons analysé la répartition spatiale de tous ces ouvrages d'eau au cours du temps (voir les cartes des implantations des ouvrages par décennie reportées en annexe 5). Les premiers ouvrages ont été réalisés là où les grès affleurent ou à proximité des affleurements. Et c'est à partir des années 1960 que des forages profonds sont apparus dans les zones de recouvrement des GTI. L'importation des techniques pétrolières pour la réalisation des forages d'eau a permis d'atteindre plus facilement des profondeurs de 500 m et plus.

Pour les 42 forages d'eau problématiques identifiés par nos partenaires, nous avons aussi représenté sur un histogramme les âges de leurs réalisations (illustration 16).

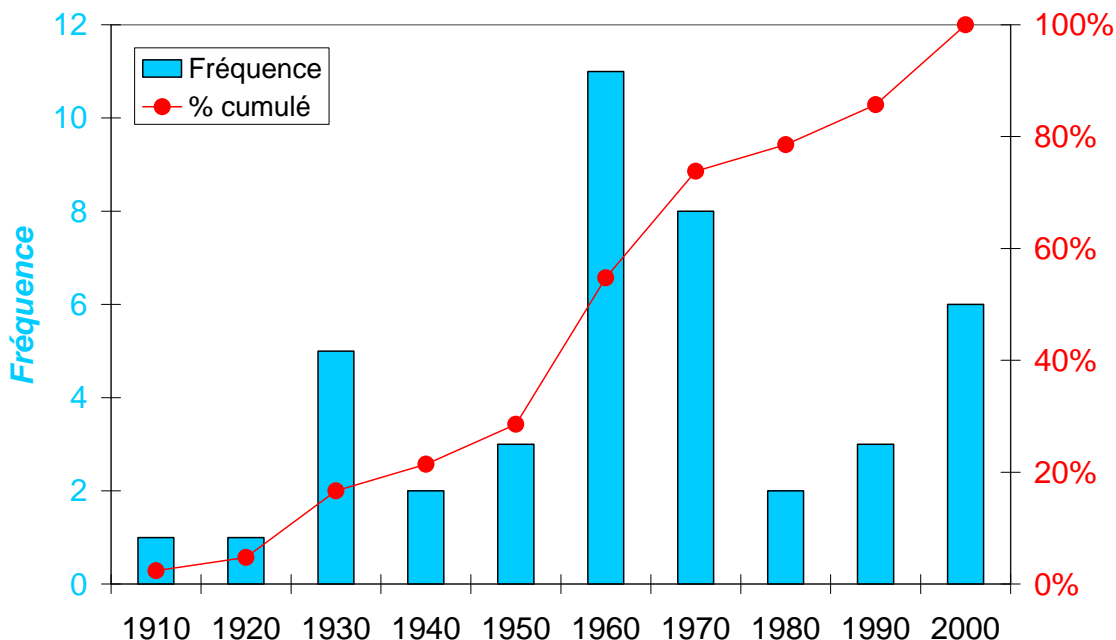


Illustration 16 : Ages des forages aux GTI qui sont problématiques.

Des années 1910 à 1940, la répartition des âges des forages problématiques semble proche de celle de tous les forages d'eau aux GTI identifiés en Lorraine. Puis les deux répartitions se différencient. Les forages récents se distinguent aussi par l'importance relative des problèmes qu'ils rencontrent.

Pour cerner plus aisément quelle influence peut avoir l'âge des forages sur les problèmes qui les affectent, on peut représenter par décennie la part des forages problématiques dans les forages d'eau aux GTI (illustration 17). La proportion moyenne des forages à problèmes est de 6,5 % et atteint au maximum 15,5 % pour les forages des années 1960. Concernant la tendance, on constate que la proportion des forages problématiques augmente légèrement avec l'âge de ces forages. L'accroissement est d'environ de 0,3 % par décennie. Ainsi la vétusté des forages semble être un facteur d'influence secondaire vis-à-vis de l'occurrence des problèmes sur les ouvrages d'eau aux grès du Trias inférieur.

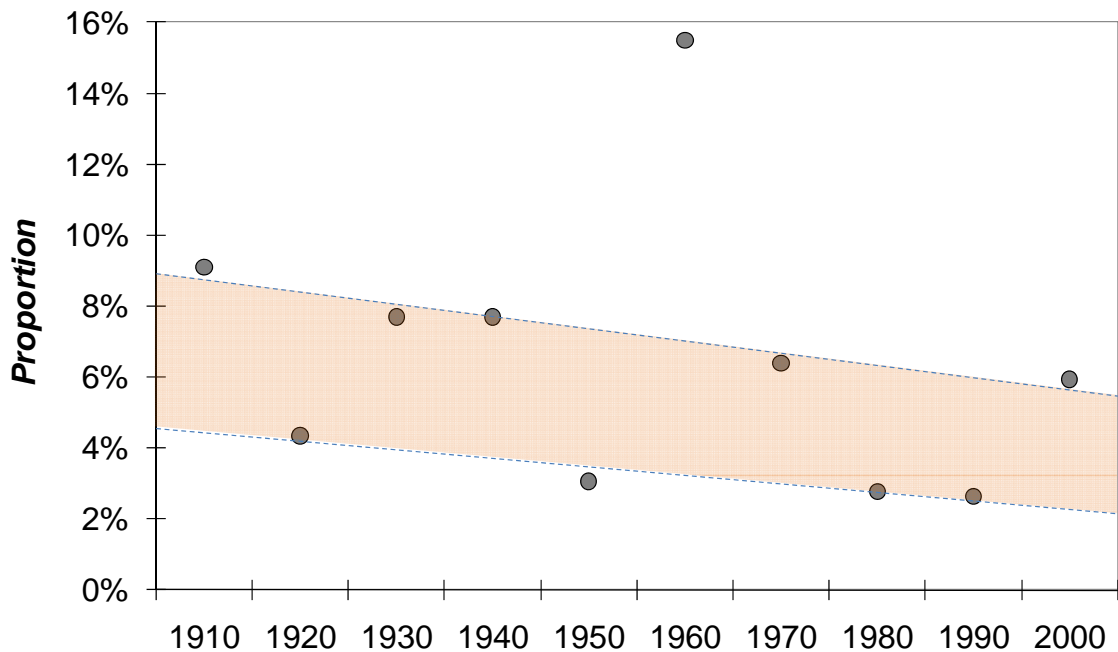


Illustration 17 : Taux de problèmes des forages versus leurs âges.

4.3. ETUDE DE L'INFLUENCE DE LA TRAVERSEE DE FORMATIONS EVAPORITIQUES

La série des formations géologiques qui composent les grès du Trias inférieur, présentée sur l'illustration 1, peut être prolongée vers le haut par les formations du Muschelkalk, de la Lettenkohle et du Keuper dans lesquelles des évaporites sont rencontrées. Il existe notamment en Lorraine les gisements de sel gemme qui sont situés dans le Muschelkalk moyen et dans le Keuper inférieur, comme indiqué sur la pile lithostratigraphique et la coupe nord-ouest-sud-est de l'illustration 18.

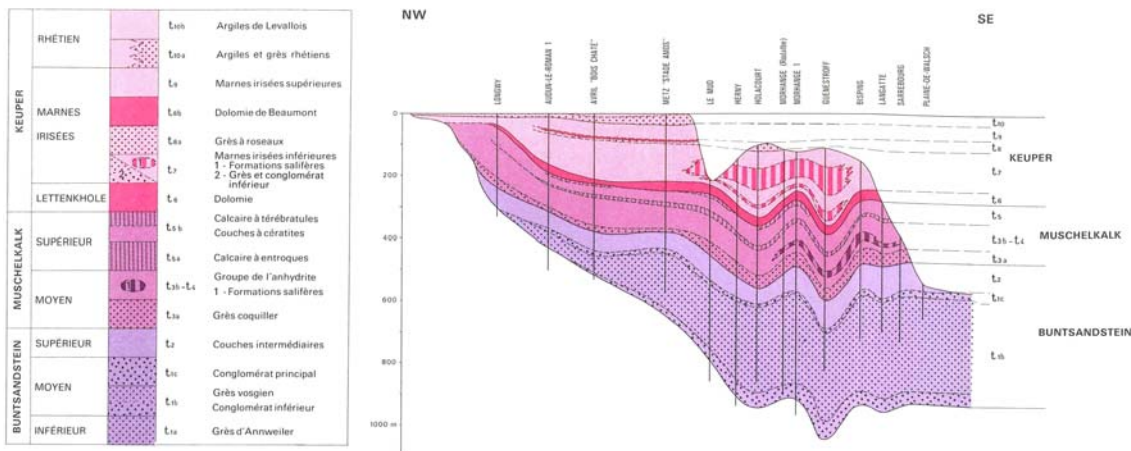


Illustration 18 : Lithostratigraphie et coupe du Trias lorrain (Maget et Maïaux, in Mégnien et al., 1980).

Les extensions latérales des faciès évaporitiques et en particulier des formations salifères en Lorraine et dans les régions voisines sont précisées sur l'illustration suivante. Celles des argiles à anhydrite et gypse recouvrent presque tout le territoire lorrain. Et le sel gemme s'étend sur une large bande d'orientation quasiment est-ouest débutant à la limite de l'Île-de-France et se terminant en Alsace, et qui va approximativement de Mirecourt au sud dans les Vosges, à Metz au nord en Moselle.

Un grand nombre de forages aux grès du Trias inférieur en Lorraine pourrait *a priori* rencontrer du sel gemme, et tous les forages pourraient rencontrer des formations évaporitiques.

Lorsqu'un forage traverse des évaporites, celles-ci peuvent facilement altérer la gaine de ciment de l'ouvrage. Quand du chlorure rentre en contact avec un tubage il peut entraîner sa corrosion et aller jusqu'à sa perforation. La rencontre de formations évaporitiques représente ainsi un risque pour la pérennité des forages.

A partir des informations recueillies sur les 42 forages problématiques nous avons dressé leurs coupes. Elles sont reportées par département, puis classées par commune et par code BSS dans les annexes 1 à 4. Certaines coupes techniques ne sont qu'indicatives dans la mesure où les documents disponibles pour les tracer étaient peu précis ou contradictoires entre eux. L'intérêt essentiel de ces annexes reste néanmoins de mettre en regard, pour chaque forage, sa coupe technique et sa coupe géologique. L'accent a été mis sur le réservoir aquifère, qui a été représenté en rose, et sur la présence d'évaporites, qui ont été représentées en jaune.

On observe que parmi les forages problématiques, 17 d'entre eux traversent des évaporites si l'on se réfère à leurs coupes géologiques, ce qui représente une part importante de 40,5 % des forages. L'existence des évaporites ne peut toutefois être à l'origine des problèmes rencontrés pour les autres forages, c'est-à-dire pour la majorité des forages.

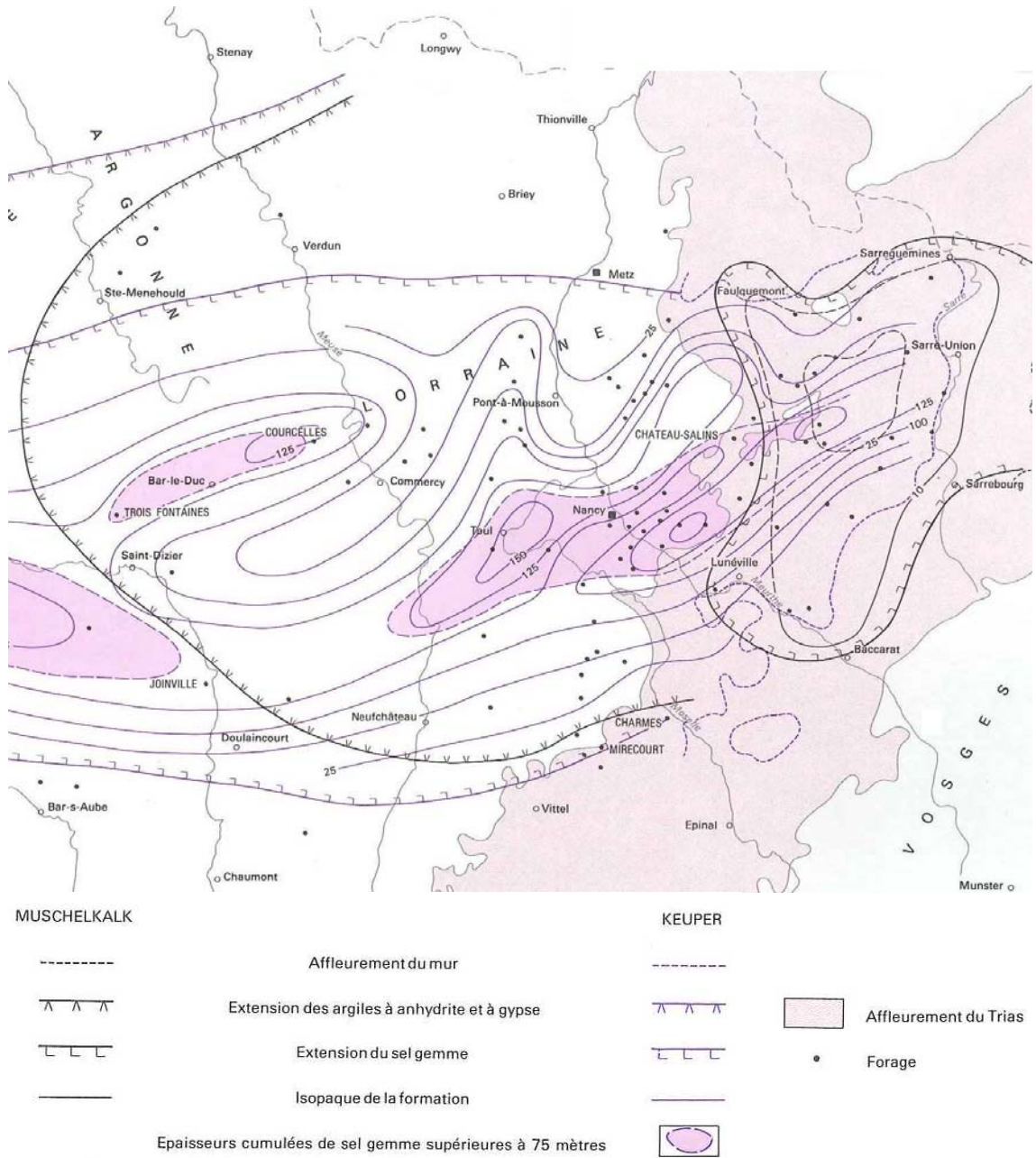


Illustration 19 : Faciès évaporitiques du Trias de l'est de la France (Maget et Maïaux, in Mégnien et al., 1980).

4.4. EVENTUELLE INFLUENCE DE LA TECTONIQUE

4.4.1. Analyse à partir des 42 forages recensés

Les forages problématiques recensés sont reportés sur l'illustration 20, parallèlement aux failles et aux axes anticlinaux et synclinaux qui affectent les grès du Trias inférieur. A l'échelle de la Lorraine, il n'apparaît pas de lien direct évident entre la présence des forages à problèmes et la répartition des informations structurales. Ainsi, les contraintes tectoniques ne semblent pas avoir d'influence globale sur les problématiques rencontrées aux forages.

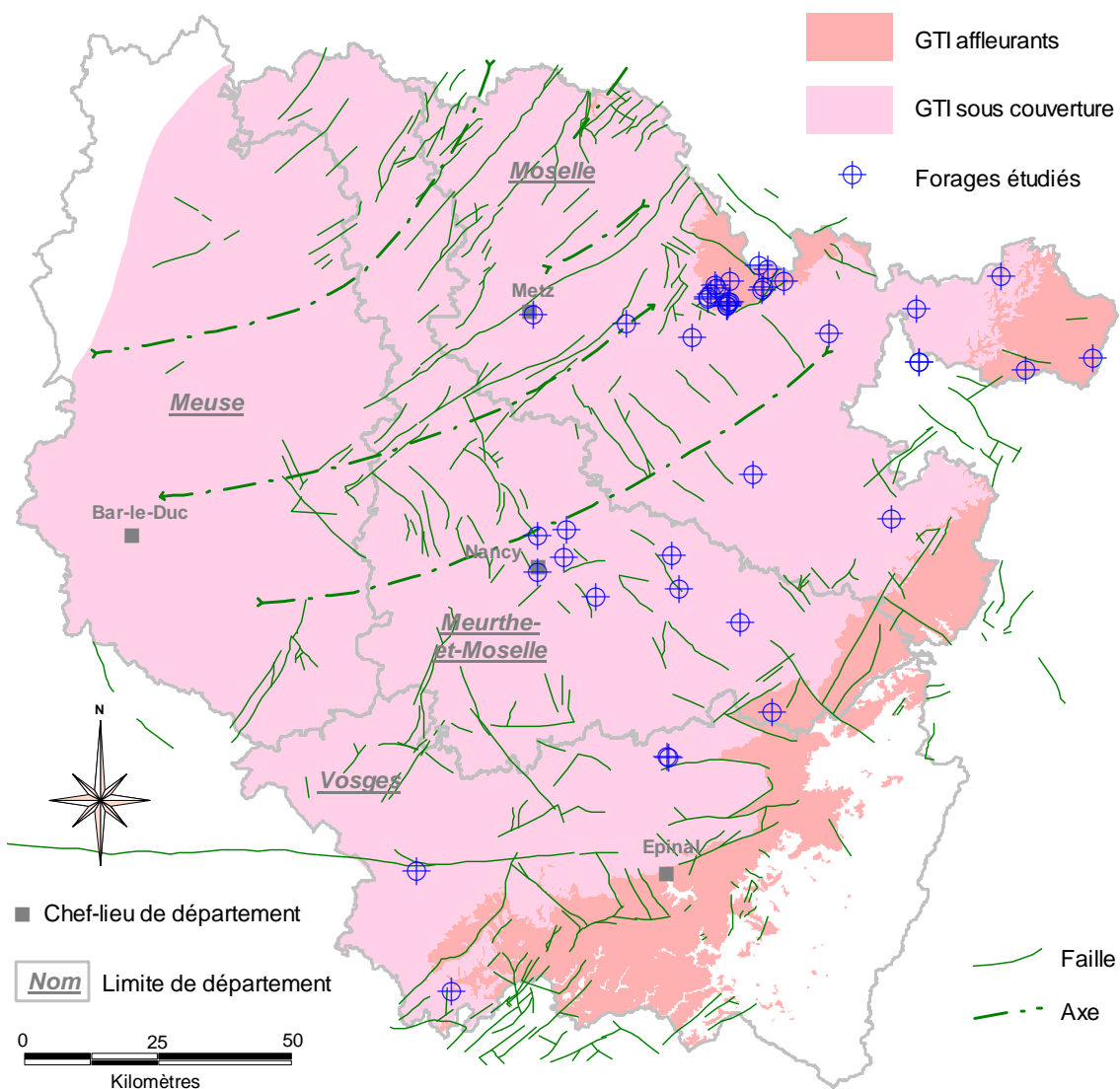


Illustration 20 : Forages problématiques et structures tectoniques.

Le cas particulier du captage d'AEP de Deneuvre de code BSS 02697X0030/F doit toutefois être mentionné. Il s'agit d'un ouvrage de 187 m de profondeur qui traverse exclusivement les grès. Des difficultés ont été rencontrées pour descendre la pompe dans le forage lors de son dernier remplacement en 1995. Celle-ci butait contre le tubage dont les sections semblaient décalées.

Le tremblement de terre du 22 février 2003 de Rambervillers (commune distante d'une douzaine de kilomètres de celle de Deneuvre) de magnitude locale 5,4 ayant entraîné la fissuration des ouvrages de stockage d'eau situés dans le périmètre de protection immédiate du captage, l'hypothèse selon laquelle le forage aurait subi des déformations pendant le séisme ne peut être écartée (Revol, 2003). Aussi l'arrêté préfectoral du 26 janvier 2006 impose qu'une inspection vidéo soit réalisée au cours de la prochaine dépose de la pompe, afin de juger de l'état du forage.

Il est aussi à noter qu'outre la possible déformation du forage, l'eau captée subit un traitement de neutralisation depuis 1994 et un autre de désinfection depuis 1999.

4.4.2. Analyse à partir d'une liste élargie de forages

Une première tentative intéressante de croisement des informations structurales avec l'occurrence d'incidents de forage a en fait déjà été effectuée par le passé (voir Coiffet *et al.*, 1982). Pour cela, un inventaire des incidents survenus sur tous les forages profonds, quel que soit leurs objectifs (eau, charbon ou hydrocarbures), a été fait. Les incidents pris en compte étaient les pertes d'injection dans les formations karstifiées ou fortement fissurées, le cavage des formations évaporitiques, et la mauvaise tenue des grès aquifères ou de leur couverture.

Les auteurs de l'étude ont conclu à une mauvaise tenue de la partie inférieure des GTI (Grès vosgien) en général, et de la partie supérieure des GTI (Couches intermédiaires et Grès à *Voltzia*) « *en périphérie du bassin houiller lorrain et dans la basse vallée de la Sarre, au niveau de l'anticlinal sarro-lorrain et de l'accident Sarralbe-Sarreguemines* ». De même, ils ont mentionné que la karstification des formations carbonatées du Trias moyen, à rapprocher de la mauvaise tenue des terrains et des pertes d'injection, se faisait préférentiellement aux alentours du bassin houiller (zone anticlinale en extension), dans la basse vallée de la Sarre ou dans la vallée de la Moselle en amont de Charmes (amont hydraulique d'accidents importants), et au voisinage des affleurements et en fond de vallées.

Sur l'illustration 21 nous avons repris la carte faite à partir de cet inventaire des incidents qui s'étaient produits jusqu'en 1982 et à partir des informations structurales. Nous y avons superposé les positions des ouvrages d'eau aux GTI qui ont été réalisés jusqu'en 1980, et que nous avons identifiés précédemment (*confer* la partie 4.2). Cela permet de comparer la répartition des incidents des forages d'eau, de charbon et d'hydrocarbures à celle de tous les forages d'eau dont la date de réalisation est connue.

Même si les objectifs des deux populations de forages ne se recoupent pas à l'identique, on constate toutefois que les incidents n'apparaissent pas davantage dans

les zones géologiques perturbées par rapport à tous les ouvrages d'eau. Par exemple, les nombreuses mauvaises tenues des terrains recensées à proximité du bassin houiller pourraient simplement être liées à la densité très importante de forages réalisés dans ce secteur, et ainsi ne pas être plus fréquentes qu'ailleurs. Il est de plus commun de chercher à implanter un forage d'eau en zone faillée, en espérant que la perméabilité de l'aquifère en soit augmentée, ce qui ne rend pas homogène la répartition des forages.

A l'échelle de la région, il ne semble pas que les failles, les axes anticlinaux ou synclinaux puissent expliquer les incidents de forages. En toute objectivité, au vu de l'illustration 21, on ne peut déduire un contrôle apparent de la tectonique sur la répartition des incidents de forage.

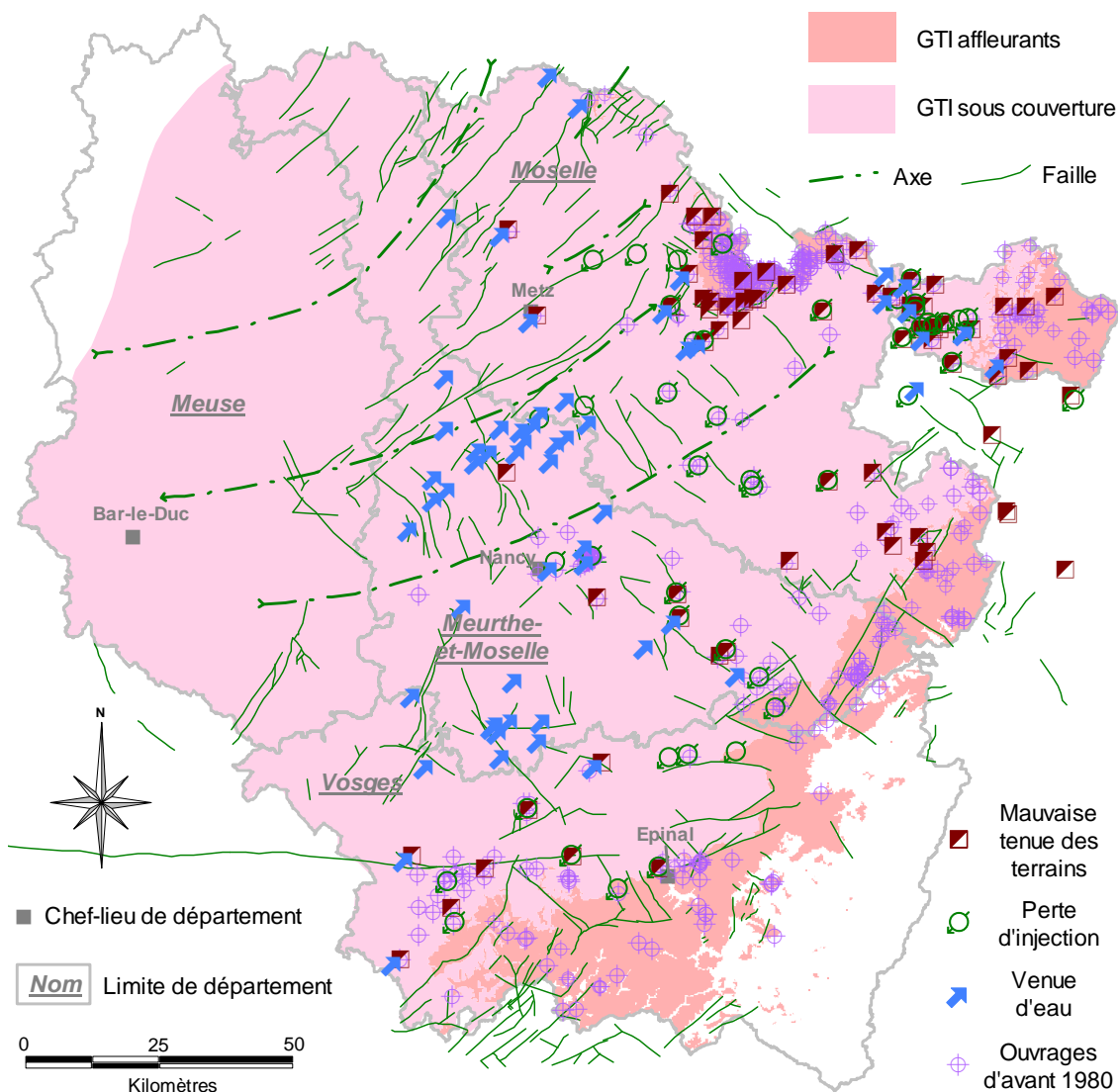


Illustration 21 : Incidents de forages sur les GTI (d'après Coiffet et al., 1982).

4.5. ANALYSE DES AUTRES FACTEURS

Les examens que nous venons de mener à des échelles globales dans les trois parties précédentes montrent que l'âge des forages, la présence de formations évaporitiques ou l'existence de contraintes tectoniques ne peuvent expliquer l'ensemble des problèmes qui ont été relevés sur les forages. Il est par conséquent nécessaire d'en revenir aux problèmes eux-mêmes et de les passer en revue pour essayer d'étudier quels sont les éventuels facteurs qui en sont à l'origine.

4.5.1. Typologie des problèmes recensés

Une synthèse des problématiques a été faite selon les indications de Madame Dellinger de la Direction Départementale des Territoires de la Moselle et de Monsieur Babot, expert hydrogéologue, que nous souhaitons vivement remercier ici, et à partir de la consultation des archives de l'Administration et de la documentation du BRGM. Les références des documents les plus intéressants sont reportées dans la partie 6 de la bibliographie. Ces documents concernent les 42 ouvrages qui ont été initialement recensés selon les retours d'expériences des services de l'Etat (revoir la partie 4.1). Deux de ces forages sont situés en dehors de la Lorraine dans le département du Bas-Rhin en Alsace Bossue.

Le tableau de l'illustration 22 permet de dresser la synthèse bibliographique des principaux problèmes qui sont rencontrés sur ces ouvrages d'eau. Cinq forages du recensement initial ont été supprimés faute de documents disponibles ou de problématiques suffisamment marquées. La liste résultante concerne ainsi 37 forages, dont certains ont déjà pu être rebouchés ou devraient l'être prochainement.

Parmi cette liste de 37 forages, 7 d'entre eux ont été étudiés lors du diagnostic de 1983, 1 seul l'a été lors de celui de 1994 et encore 1 autre l'a été pendant celui de 2002. Les recommandations formulées au cours de ces trois diagnostics ont été suivies en partie.

La synthèse entreprise sur les 37 forages et qui est restituée sur l'illustration 21 nous a permis de dresser le diagnostic suivant :

- 20 ouvrages ont rencontré des problèmes au niveau de leurs tubages et fonds (colmatage, corrosion, perforation et ensablement), ce qui représente une part de 54 % d'entre eux ;
- 5 ouvrages ont connu des baisses de productivité, soit 14 % des forages ;
- 24 ouvrages ont fourni des eaux qui présentaient un problème de qualité, soit 65 % des forages ;
- 10 ouvrages se trouvaient dans des contextes où l'état de la nappe avait une incidence avérée sur les captages d'eau (baisse du niveau piézométrique ou minéralisation de la nappe), soit 27 % des forages.

Code BSS	Dép.	Commune	Forage	Productivité	Eau captée	Nappe
02311X0017/F		BATHELEMONT-LES-BAUZEY			Problème de qualité	
02315X0001/F		BIENVILLE-LA-PETITE			Problème de qualité	
02302X0098/F		BOUXIERES-AUX-CHENES			Problème de qualité	
02301X0017/F	54	CHAMPIGNEUILLES	Corrosion			
02697X0030/F		DENEUVRE	Décalage tubage		Problème de qualité	
02693X0001/F		MANONVILLER	Perforation		Problème de qualité	
02305X0063/F3		NANCY	Perforation, colmatage			
02307X0238/F		VARANGEVILLE	Corrosion, perforation			
01654X0041/F2		BETTING-LES-SAINT-AVOLD		Baisse	Problème de qualité	Baisse nappe
01656X0015/F2		GREHANGE		Baisse artésianisme	Problème de qualité	Baisse nappe, minéralisation
01677X0001/F		GOETZENBRUCK	Cimentation défaillante, ensablement par surexploitation			
01654X0011/25		HOMBOURG-HAUT		Baisse	Problème de qualité	
01654X0013/29		HOMBOURG-HAUT		Baisse	Problème de qualité	Baisse nappe
01652X0044/F1		LONGEVILLE-LES-SAINT-AVOLD	Ensablement	Baisse	Problème de qualité	Baisse nappe
01652X0114/F2		LONGEVILLE-LES-SAINT-AVOLD	Concrétions, perforation, ensablement			
01652X0131/F3		LONGEVILLE-LES-SAINT-AVOLD	Ensablement			
01652X0157/H3		LONGEVILLE-LES-SAINT-AVOLD	Encrassement			
01652X0158/H4		LONGEVILLE-LES-SAINT-AVOLD	Encrassement			
01653X0107/242		LONGEVILLE-LES-SAINT-AVOLD	Colmatage, ensablement		Problème de qualité	
01653X0148/F6		LONGEVILLE-LES-SAINT-AVOLD			Problème de qualité	
01653X0149/F7	57	LONGEVILLE-LES-SAINT-AVOLD			Problème de qualité	
01685X0001/F		PHILIPPSBOURG			Problème de qualité	Minéralisation
01665X0026/F		PUTTELANGE-AUX-LACS			Problème de qualité	
01398X0033/F3W		SAINT-AVOLD	Perforation		Problème de qualité	
01398X0110/F2		SAINT-AVOLD			Problème de qualité	
01653X0043/F2		SAINT-AVOLD			Problème de qualité	Minéralisation
01653X0044/F3		SAINT-AVOLD			Problème de qualité	Minéralisation
01653X0063/F4		SAINT-AVOLD			Problème de qualité	Minéralisation
01653X0066/2BIS		SAINT-AVOLD			Problème de qualité	Minéralisation
02323X0006/F		SARREBOURG	Perforation		Problème de qualité	Minéralisation
01957X0008/F1		VAL-DE-BRIDE	Colmatage			
01672X0002/F		VOLMUNSTER	Ensablement par surexploitation			
01664X0012/F		ZETTING	Ensablement			
01668X0121/F	67	VOELLERDINGEN			Problème de qualité	
03381X0008/F		BULGNEVILLE	Concrétions, corrosion		Problème de qualité	Baisse nappe
03742X0001/F	88	GODONCOURT	Perforation		Problème de qualité	
03044X0010/F		REHAINCOURT	Perforation		Problème de qualité	

Illustration 22 : Typologie des problématiques des forages.

Ces problématiques se sont cumulées sur certains ouvrages : la dégradation des tubages d'un forage pouvant avoir un impact sur la productivité du forage et sur la qualité des eaux captées par exemple ; la minéralisation de la nappe induisant aussi le captage d'une eau présentant un problème de qualité.

4.5.2. Examen des résultats analytiques disponibles

Pour ces 37 ouvrages nous avons importé les résultats des analyses sanitaires contenus dans la banque nationale d'Accès aux Données des Eaux Souterraines (ADES) qui étaient disponibles. Les résultats concernent 21 forages et sont au nombre de 13 873 (ils sont reportés dans le tableau Microsoft® Office Excel du Cdrom qui est joint). Pour deux de ces derniers forages, le SDEA (Syndicat des Eaux et de l'Assainissement du Bas-Rhin) nous a aimablement transmis 2 673 données complémentaires de son propre suivi analytique. La SEE (Société des Eaux de l'Est) a également eu l'amabilité de nous confier 2 096 résultats analytiques concernant deux de ses forages industriels. Au total, nous avons ainsi collecté 18 642 données, pour 23 forages, soit en moyenne un peu plus de 800 résultats d'analyses par forage.

Nous avons procédé à l'examen critique de toutes ces données analytiques afin de déceler des éventuelles dérives de paramètres qui pourraient traduire une dégradation de l'état d'un forage. Les courbes des évolutions temporelles des résultats d'analyses les plus intéressantes que nous avons tirées des données sont présentées dans les pages suivantes.

a) Forage de Créhange de code BSS 01656X0015/F2

Les chroniques des paramètres qualitatifs qui ont connu des évolutions positives au cours des contrôles sanitaires effectués en 1999, 2001 et 2005 sur les eaux captées au forage de Créhange (57), de code BSS 0165X0015/F2, sont présentées sur l'illustration 23. Elles concernent le calcium, le chlorure, la conductivité, la dureté, le manganèse, le sodium et le sulfate. Les augmentations enregistrées pour ces paramètres pendant la période 1999-2005 sont comprises entre 34 % pour le sulfate et 190 % pour le chlorure.

Dans la mesure où il s'agit d'un captage d'AEP, il est opportun de comparer ces résultats d'analyses aux références de qualité des eaux destinées à la consommation humaine qui existent pour le sulfate (250 mg.L⁻¹), le chlorure (250 mg.L⁻¹), le sodium (200 mg.L⁻¹) et la conductivité (1100 µS.cm⁻¹ à 25 °C). Pour les trois derniers paramètres, ces références sont largement dépassées. Les eaux captées sont par ailleurs très dures (la dureté totale ayant atteint 53 °F), et elles sont mélangées à des prélèvements faits dans d'autres forages, de sorte que le mélange des eaux résultant a des concentrations conformes aux références de qualité.

La mauvaise qualité des eaux est à mettre en regard du contexte hydrogéologique particulier. Le forage est implanté à proximité des zones minéralisées d'origine naturelle ou anthropique de la nappe des GTI (*confer* la partie 2 et Ramon, 1976) et pourrait capter en partie ces eaux minéralisées de la nappe. Le niveau piézométrique et l'artésianisme du forage de Créhange ont longtemps baissé suite à l'exhaure de la mine de Faulquemont. Avec l'arrêt de celle-ci en 1989, le niveau piézométrique du forage a commencé à remonter vers l'année 2000.

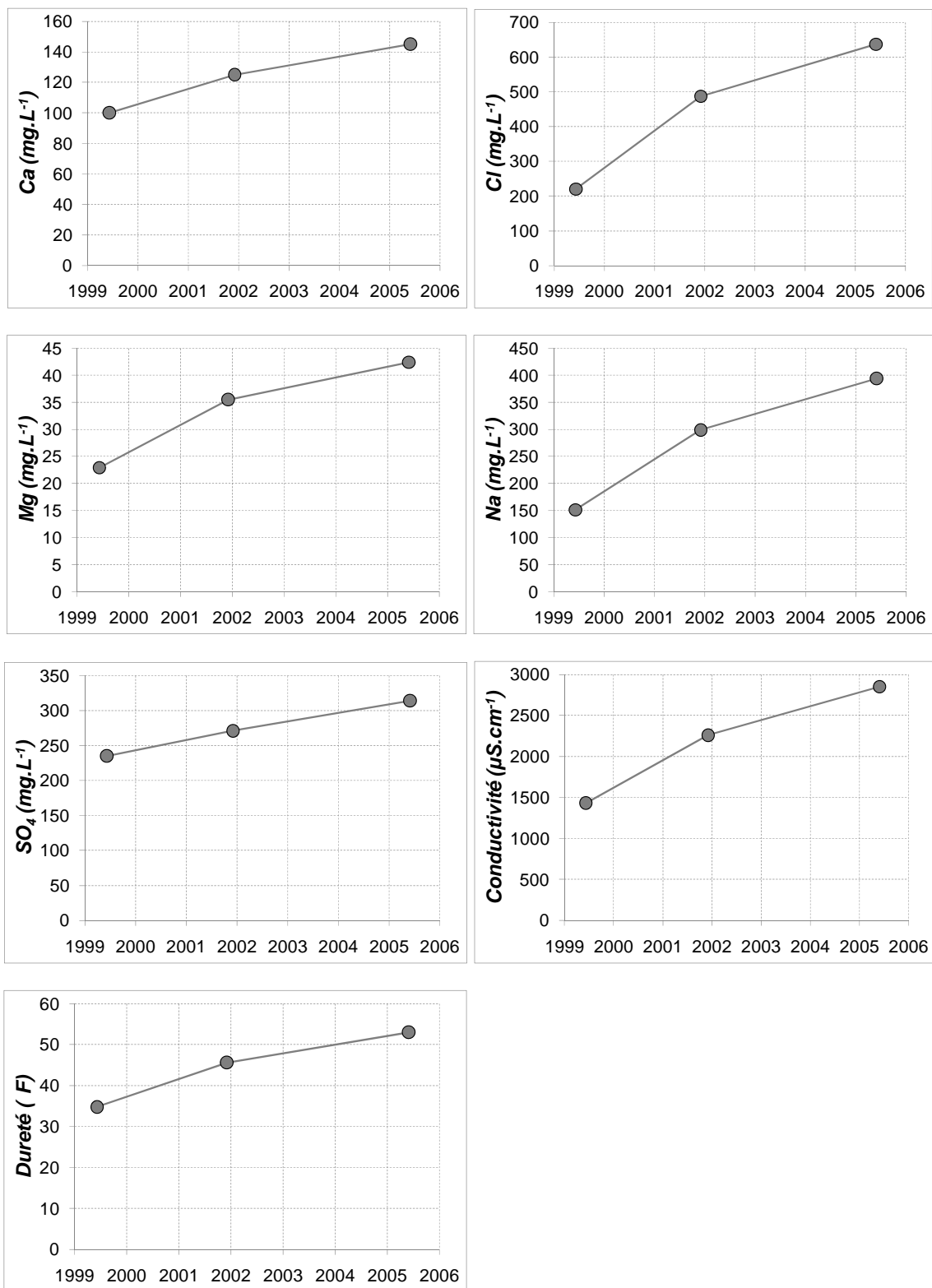


Illustration 23 : Forage de Créhange de code BSS 01656X0015/F2 (données issues d'ADES).

Il est généralement admis que la « bulle salée » de l'Est Mosellan serait due à un apport par drainance du Muschelkalk aquifère minéralisé. La présence des nombreux forages de reconnaissance du bassin houiller pourrait aussi avoir accentué la liaison hydraulique entre les deux aquifères et par là même la minéralisation locale de la nappe des GTI (Guillaume, 1952). En outre, le forage recoupe des évaporites et du sel gemme du Muschelkalk moyen, si l'on se réfère à sa coupe géologique (voir l'annexe 2).

Les augmentations simultanées des concentrations en chlorure et en sodium, les concentrations allant jusqu'aux valeurs respectives de 637 et 394 mg.L⁻¹, pourraient traduire l'arrivée au forage des eaux minéralisées en provenance du Muschelkalk, voire la perforation du tubage à hauteur du sel du Muschelkalk et le lessivage de celui-ci.

En tout état de cause, il est recommandé de suivre de près ce captage et de procéder à son inspection afin de repérer toute éventuelle détérioration prononcée de ses tubages, dans l'optique d'y remédier le plus précocement possible.

b) Forage de Longeville-lès-Saint-Avold de code BSS 01653X0107/242

Cet ouvrage sert à l'alimentation en eau industrielle. Les paramètres de qualité contrôlés de 1980 à 2004 qui ont présenté des évolutions significatives ont leurs chroniques de résultats reportées ci-après. Les eaux exploitées étant peu minéralisées, les valeurs mesurées de ces paramètres restent cependant modérées.

Dans le détail, il s'agit d'augmentations pour les concentrations en calcium, chlorure, fer, fluor, manganèse, sodium, sulfate et pour la conductivité, ainsi que de diminutions pour la concentration en magnésium et pour la turbidité. Les tendances les plus nettes ont concerné les concentrations en fluor et en manganèse, et la turbidité de l'eau.

D'une manière générale, le fluor peut être rencontré naturellement dans les eaux souterraines. Il est justement présent dans la nappe des GTI à des concentrations relativement faibles, de plusieurs dizaines à quelques centaines de µg.L⁻¹. L'augmentation importante initiale des concentrations en fluor dans les eaux du forage de Longeville-lès-Saint-Avold (57) semble en fait ne pas avoir eu lieu et avoir été effective seulement de 1995 à 1998.

En effet, en 1993 et 1994, la concentration en fluor a d'abord été notée comme nulle à deux reprises, probablement parce que les résultats des mesures étaient inférieurs au seuil de détection analytique (le seuil de détection du fluor valant souvent plusieurs dizaines de µg.L⁻¹, voire davantage). Puis une concentration en fluor de 0,09 µg.L⁻¹ a été notée. Cette valeur paraît là encore bien trop faible par rapport au seuil de détection. Il semble qu'il s'agisse d'une erreur d'unité, le résultat réel devant vraisemblablement être exprimé en mg.L⁻¹, et ainsi être du même ordre de grandeur que les concentrations mesurées ultérieurement (90 à 100 µg.L⁻¹).

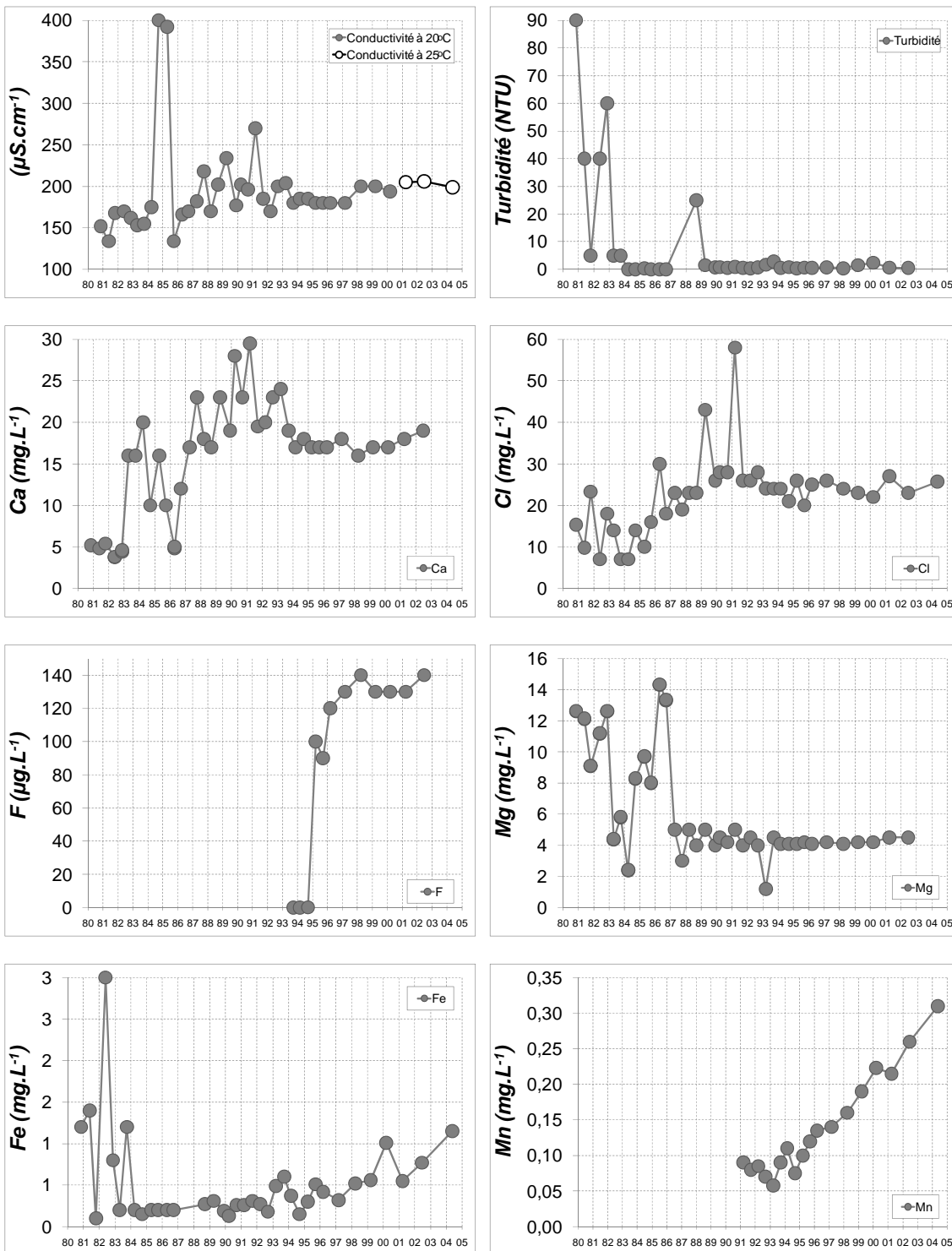


Illustration 24 : Chroniques d'analyses du forage de Longeville-lès-Saint-Avoid de code BSS 01653X0107/242 (1^{ère} partie ; données de la SEE).

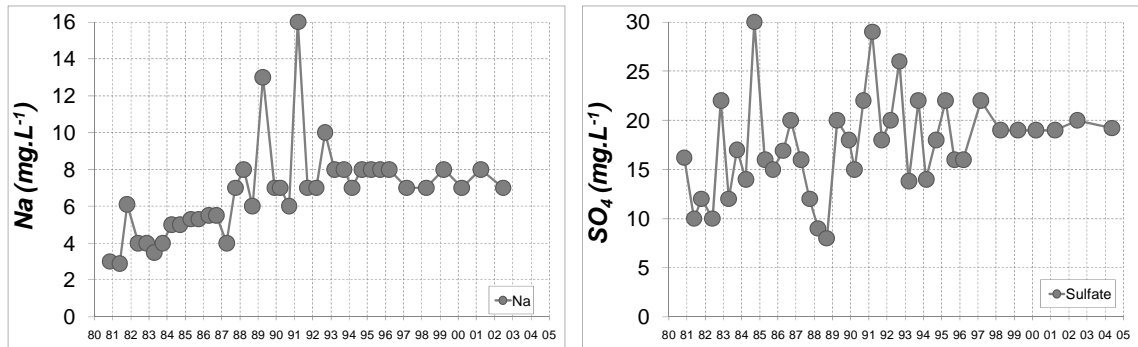


Illustration 25 : Chroniques d'analyses du forage de Longeville-lès-Saint-Avoid de code BSS 01653X0107/242 (2^{ème} partie ; données de la SEE).

La concentration en manganèse a également beaucoup augmenté de 1991 à 2004 (elle est passée de 58 à 310 $\mu\text{g.L}^{-1}$). Elle dépassait la référence de qualité des eaux destinée à la consommation humaine fixée à 50 $\mu\text{g.L}^{-1}$, celle-ci ne devant cependant pas être utilisée puisque le captage sert à l'AEI. Dans les eaux souterraines le manganèse est souvent lié au fer avec lequel il peut coprécipiter, et une augmentation de la concentration en fer a aussi eu lieu dans une moindre mesure, à partir des années 1990. Ces évolutions des concentrations en fer et en manganèse pourraient traduire un changement des conditions d'oxydoréduction (oxygénation, mélange avec une eau de composition chimique différente...).

De son côté, la turbidité a connu des valeurs très importantes au début de l'exploitation du forage, de 1980 à 1982. Cela pourrait éventuellement avoir été la conséquence d'un nettoyage insuffisant de l'ouvrage, qui se serait résorbé au fil de l'utilisation du forage. D'autant que le débit du pompage a globalement diminué au cours du temps devenant moins propice à l'entraînement des fines. La nouvelle valeur importante de la turbidité en 1988 pourrait quant à elle correspondre à une chasses des fines, suite à la rehausse du débit d'exploitation (voir plus loin l'illustration 31). Mais la turbidité du début des années 1980 pourrait avoir une autre origine et provenir de la précipitation d'hydroxydes de fer, étant donné les fortes concentrations en fer qu'il y avait pendant cette période (les résultats d'analyses ne précisent cependant pas la forme du fer mesuré). Là encore, les conditions d'oxydoréduction pourraient avoir joué un rôle comme lors du dégazage de CO_2 induit par l'accélération de l'eau dans la pompe.

c) Forage de Saint-Avoid de code BSS 01398X0033/F3W

Les évolutions marquées des chroniques de qualité que l'on peut tracer pour les eaux prélevées dans le forage de Saint-Avoid (57) de code BSS 01398X0033/F3W concernent de nombreux paramètres (voir les illustrations 26 et 27 qui suivent). Il s'agit aussi d'un ouvrage destiné à l'AEI, mais les eaux qu'il capte sont beaucoup plus minéralisées que celles du forage précédent de Longeville-lès-Saint-Avoid. Pour les principales variations, on remarque que la conductivité de l'eau à 20 °C passe d'environ 700 $\mu\text{S.cm}^{-1}$ dans les années 1980 à près de 1600 $\mu\text{S.cm}^{-1}$ en 2000, tandis que la dureté totale passe d'à peu près 25 °F à 70 °F, et le résidu sec (à 180 °C) d'environ 500 mg.L^{-1} à 1200 mg.L^{-1} .

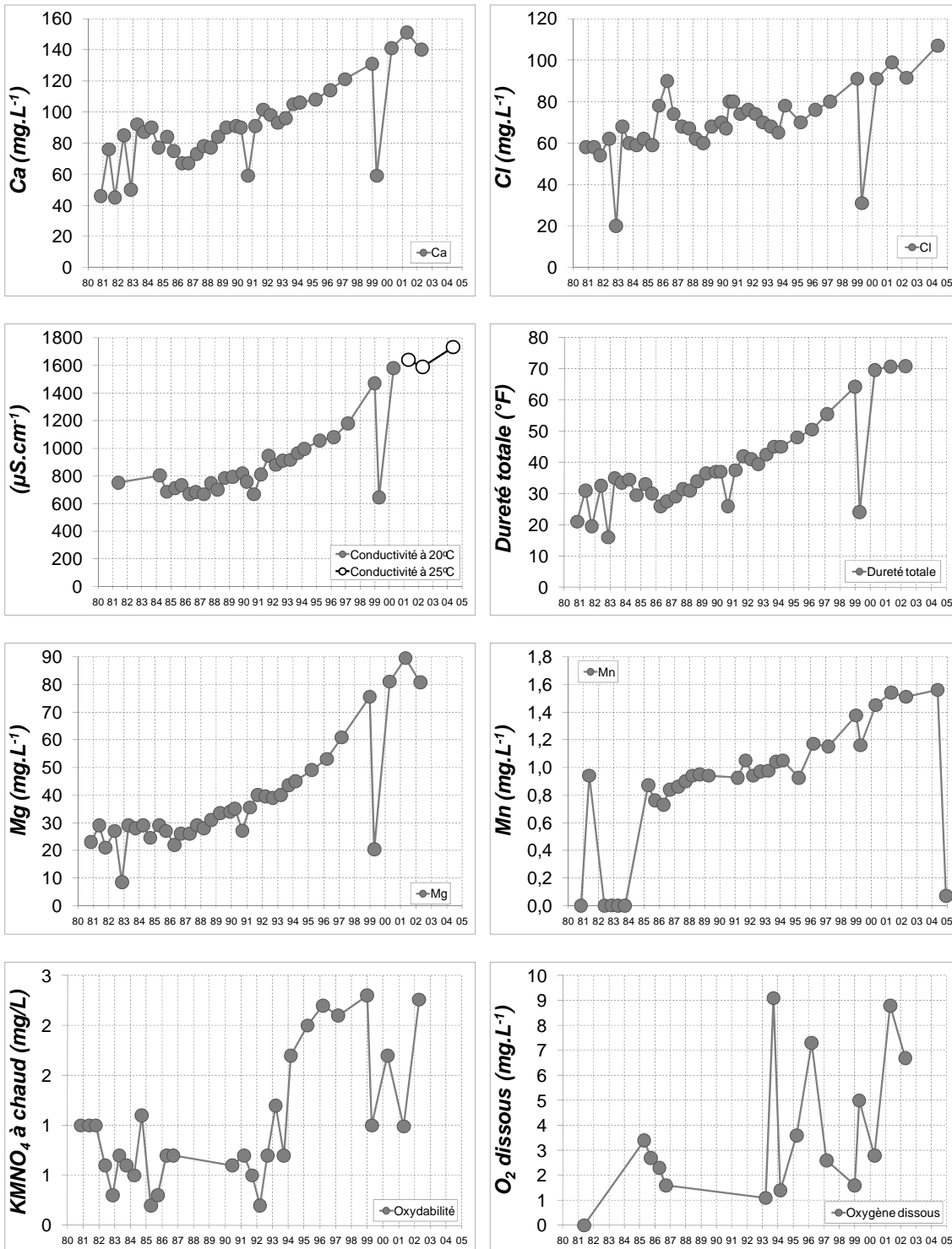


Illustration 26 : Chroniques d'analyses du forage de Saint-Avoid de code BSS 01398X0033/F3W (1^{ère} partie ; données de la SEE).

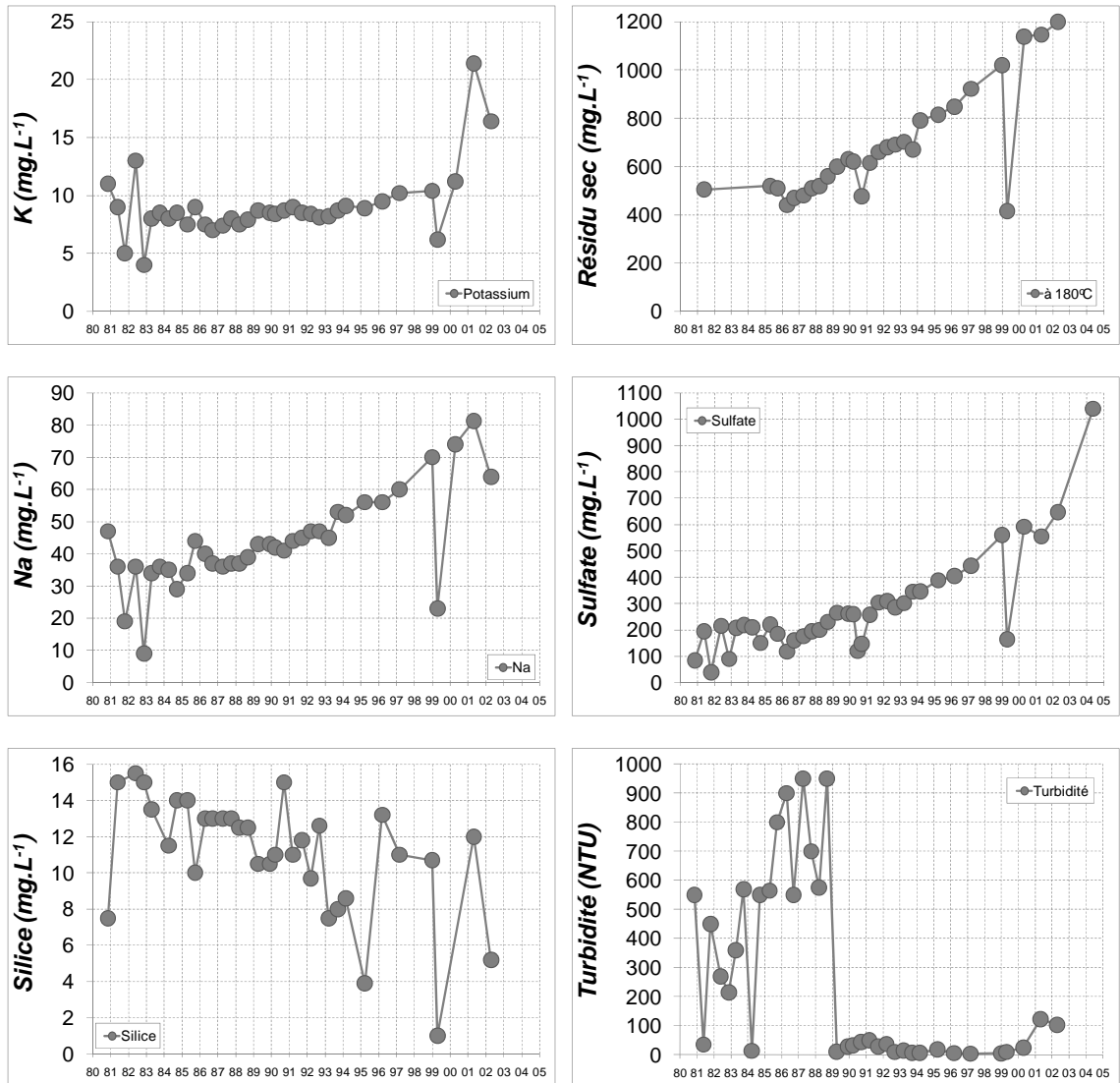


Illustration 27 : Chroniques d'analyses du forage de Saint-Avoid de code BSS 01398X0033/F3W (2^{ème} partie ; données de la SEE).

De plus, la concentration en manganèse connaît des oscillations importantes et passe par des valeurs élevées en atteignant plus de 1,5 mg.L⁻¹. La concentration en sulfate partant de valeurs proches de 50 à 200 mg.L⁻¹, atteint plus de 1000 mg.L⁻¹. Ce forage qui est suivi de près par son propriétaire a fait l'objet d'un entretien régulier du fait de son colmatage et de sa corrosion récurrents. Son tubage a même été percé, ce qui a nécessité le rechemisage du forage par une crépine en PVC lors d'une opération de maintenance en 2009.

La perforation n'est pas à mettre en relation avec la présence d'évaporites. L'ouvrage d'eau est implanté dans la boutonnière du Warndt et il ne traverse que les grès du Trias inférieur. En outre, la régression linéaire que l'on obtient sur le diagramme binaire ci-dessous entre les concentrations molaires du calcium et du sulfate est dans un rapport de 2,3. Cela indique que la dissolution du gypse ($\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$) ne peut être responsable de l'augmentation du sulfate que de façon minoritaire. Une origine anthropique est plus vraisemblable.

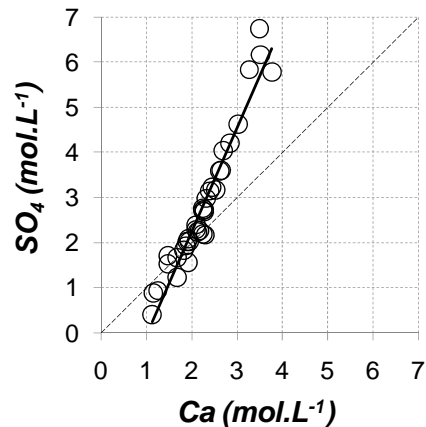


Illustration 28 : Comparaison des concentrations en calcium et en sulfate (données de la SEE).

Il a aussi été montré que les concentrations en sulfate contrôlées dans le cadre du suivi d'installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE) implantées sur la masse d'eau souterraine de code 2028 des « Grès du Trias inférieur du bassin houiller » étaient souvent supérieures à celles du fond hydrochimique de la nappe (Nguyen-Thé *et al.*, 2009). Ce dernier a ainsi été estimé pour l'année 2004 à une centaine de mg.L^{-1} au droit du forage 01398X0033/F3W, alors que la concentration qui a réellement été mesurée dans le forage a atteint 1040 mg.L^{-1} , soit presque 10 fois plus. Ce résultat confirme la contribution non naturelle importante dans l'origine du sulfate observé au forage. Notons enfin la brutale diminution de la turbidité au forage F3W en 1989, sans que les modalités de pompage n'aient apparemment été modifiées.

d) Forage de Saint-Avold de code BSS 01653X0063/F4

Les paramètres pour lesquels des évolutions importantes ont été observées pour le forage de Saint-Avold (57), de code BSS 01653X0063/F4, sont le manganèse et le sulfate (illustration 29). La concentration en manganèse a été multipliée par 10 en presque 8 ans. Elle est passée de $17 \mu\text{g.L}^{-1}$ en septembre 2000 à $180 \mu\text{g.L}^{-1}$ en décembre 2008, dépassant ainsi la limite de qualité des eaux destinées à la consommation humaine fixée à $50 \mu\text{g.L}^{-1}$. La concentration en sulfate a augmenté régulièrement de plus de 60 % sur la même période, passant de 42 à 68 mg.L^{-1} .

La qualité des eaux captée au forage est aussi affectée par la présence de cadmium et de nickel, bien que leurs concentrations ne présentent pas d'augmentation marquée. En effet, la concentration en cadmium a atteint $4,5 \mu\text{g.L}^{-1}$, pour une limite de qualité de $5 \mu\text{g.L}^{-1}$, et celle en nickel est montée jusqu'à $30 \mu\text{g.L}^{-1}$ en dépassant ainsi la limite de qualité de $20 \mu\text{g.L}^{-1}$. Ce captage d'alimentation en eau potable a été identifié par l'Administration comme devant être abandonné. Il a aussi été montré que le cadmium avait une origine naturelle et provenait de minéralisations en métaux présentes localement dans les roches sédimentaires (Nguyen-Thé *et al.*, 2001).

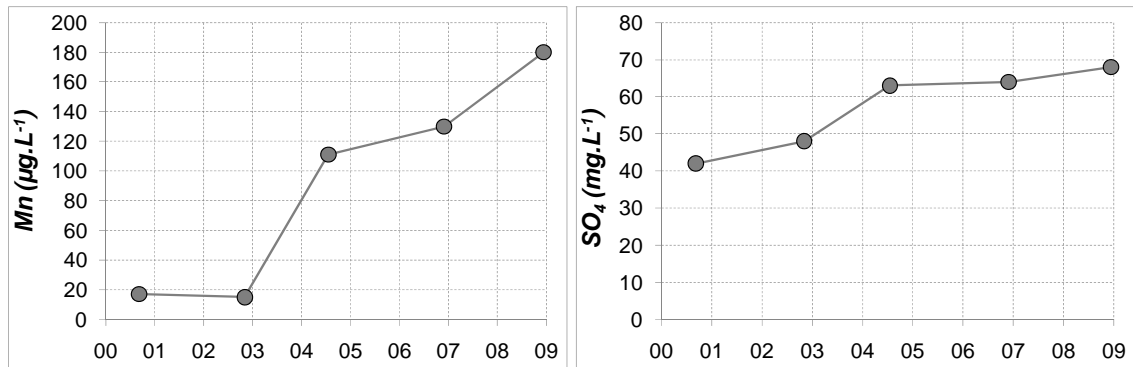


Illustration 29 : Chroniques d'analyses du forage de Saint-Avoid de code BSS 01653X0063/F4 (données issues d'ADES).

e) Forages de Voellerdingen de codes BSS 01668X0120/S et 01668X0121/F

A partir des données analytiques disponibles pour le forage d'AEP de code BSS 01668X0121/F situé dans le département du Bas-Rhin à Voellerdingen (67), on n'observe que des évolutions modérées des paramètres contrôlés. Les plus significatives, mais qui restent tout de même très modestes, concernent la conductivité de l'eau, la concentration en oxygène dissous, et la concentration en magnésium. Pour le captage d'AEP voisin de code BSS 01668X0120/S la conductivité a aussi augmenté au cours du suivi. Les chroniques de ces paramètres sont représentées sur l'illustration 30. La diminution de l'oxygène dissous pourrait provenir de la présence des bactéries aérobies qui ont été observées à plusieurs reprises, bien qu'elles ne semblent pas avoir proliféré au fil des contrôles.

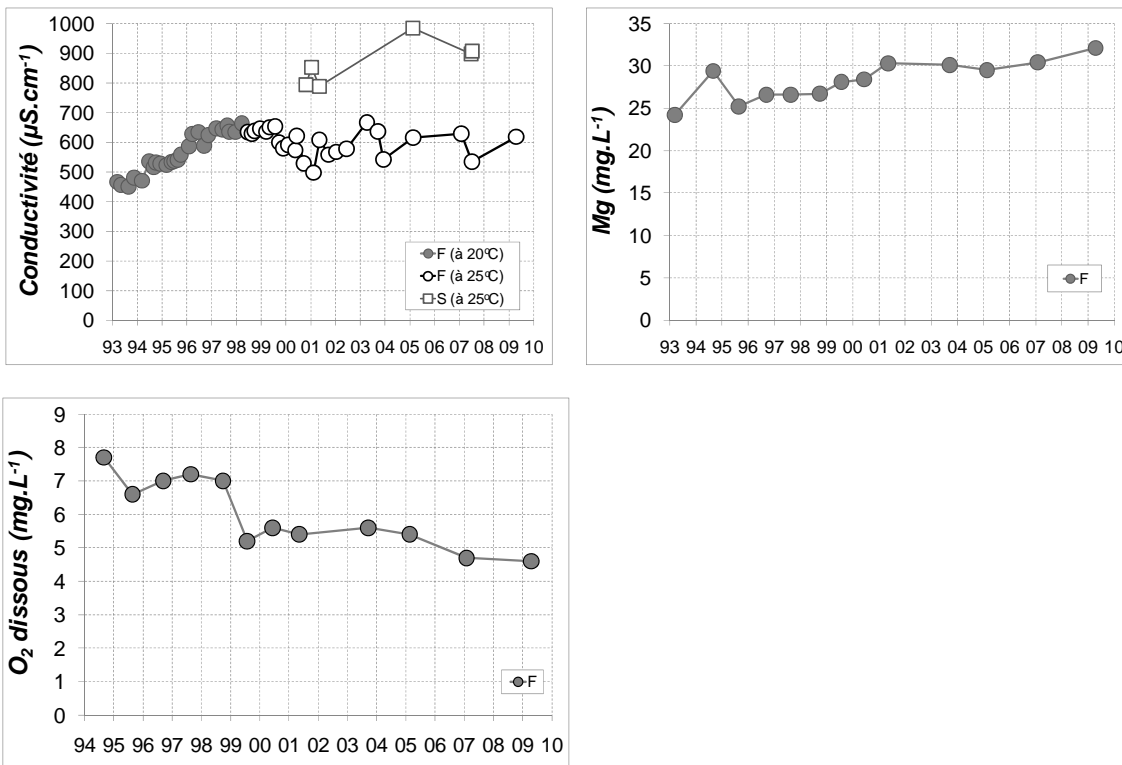


Illustration 30 : Chroniques d'analyses des forages de Voellerdingen des codes BSS 01668X0120/S et 01668X0121/F (données issues d'ADES et du SDEA).

f) Forage de Godoncourt de code BSS 03742X0001/F

Pour le forage d'AEP de code BSS 03742X0001/F de Godoncourt (88), seuls deux paramètres ont présenté des tendances d'évolution nettes lors des différents contrôles de la qualité des eaux qui ont été réalisés. Il s'agit de la conductivité dont les résultats sont disponibles pour la période 1987-1998, et de la concentration en manganèse dont les valeurs sont disponibles pour les années 2004 à 2009 (illustration ci-dessous).

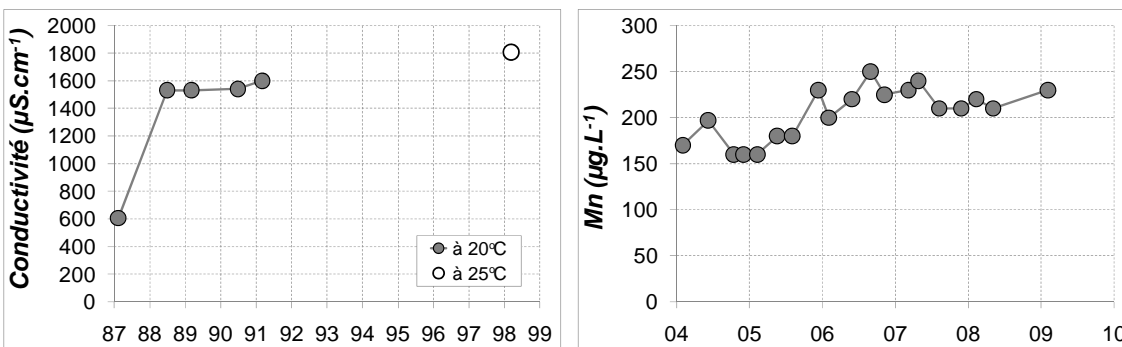


Illustration 31 : Chroniques d'analyses du forage de Godoncourt de code BSS 03742X0001/F (données issues d'ADES).

La conductivité de l'eau à 20 °C est ainsi passée de 606 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ en 1987 à 1531 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ en 1988. Elle pourrait rendre compte de l'intrusion en tête de forage depuis le Muschelkalk inférieur d'eaux plus minéralisées que celles de la nappe des grès du Trias inférieur. La mauvaise isolation du forage dans les morts-terrains a en effet été mentionnée par la suite avec la probabilité de la perforation du tubage, compte tenu de l'occurrence vraisemblable d'un éboulement dans l'ouvrage (Cachet-Marly, 2006). Une perturbation de la deuxième cimentation du forage de 2 à 16 m de profondeur environ avait d'ailleurs déjà été suspectée lors de la réalisation de celui-ci, ce qui pouvait remettre en cause son étanchéité (Minoux, 1969). Il est à noter, concernant les résultats analytiques disponibles, que l'unité de ceux relatifs au fer semble incohérente.

4.5.3. Ensemble des problèmes de qualité recensés

En plus des dérives de paramètres qui viennent d'être passées en revue dans la partie précédente, et de celles vues précédemment mettant en évidence une perforation du tubage du forage de code BSS 02693X0001/F de Manonviller (*confer* la partie 3.1), des augmentations des concentrations en sulfate ont également été constatées aux captages des codes 03044X0010/F de Rehaincourt et 02323X0006/F de Sarrebourg. Elles ont aussi mis en avant les perforations vraisemblables des tubages.

Les autres problèmes de qualité des eaux recensés (voir la partie 4.5.1) peuvent concerner la qualité de la nappe elle-même. La minéralisation de l'eau a parfois atteint plusieurs $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, comme au forage de code BSS 01665X0026/F de Puttelange-aux-Lacs où elle pouvait avoir une origine synsédimentaire (Maïaux *et al.*, 1979).

Des métaux lourds ont aussi été fréquemment observés dans les eaux captées. Il s'agit par exemple du nickel qui a été retrouvé aux forages des codes 01653X0148/F6 et 01653X0149/F7 de Longeville-lès-Saint-Avold, ou 01653X0063/F4 de Saint-Avold ; du cadmium dont l'existence dans la nappe a été mise en évidence aux forages des codes 01653X0043/F2, 01653X0044/F3, 01653X0063/F4 et 01653X0066/2BIS de Saint-Avold ; et de l'arsenic retrouvé aux captages des codes 03742X0001/F de Godoncourt et 01685X0001/F de Philippsbourg. Pour ce dernier, une origine naturelle est là encore pressentie : les eaux souterraines circulant dans le socle granitique et se chargeant en arsenic remonteraient préférentiellement dans les vallées où les grès sont peu épais, entraînant leur contamination (Ballin, 2002).

Du fer et/ou du manganèse ont été retrouvés dans de nombreux forages. C'est le cas des ouvrages des codes 02315X0001/F de Bienville-la-Petite, 02302X0098/F de Bouxières-aux-Chênes, 01656X0015/F2 de Créhange, 03742X0001/F de Godoncourt, 01654X0011/25 et 01654X0013/29 de Homourg-Haut, 01652X0158/H4 de Longeville-lès-Saint-Avold, et 01398X0033/F3W et 01398X0110/F2 de Saint-Avold. Des concentrations notables en fer et manganèse sont rencontrées naturellement dans la nappe des GTI. L'exploitation intermittente des forages provoque une alternance de conditions réductrices et oxydantes, favorable à l'oxydation et à la précipitation de ces métaux, ce qui conduit à l'entartrage des captages. Le fer peut également rendre compte de la corrosion de l'équipement des forages.

La présence de bactéries a été reconnue aux forages des codes 03381X0008/F de Bulgnéville, 02697X0030/F de Deneuvre, 01652X0114/F2 de Longeville-lès-Saint-Avoid, 03044X0010/F de Rehaincourt et 01668X0121/F de Voellerdingen. Leur développement peut être favorisé par la température de l'eau, par la composition chimique de l'eau, ou par la faible profondeur de la ressource. Elles peuvent aussi provenir de la boue de forage utilisée lors de la foration ou de l'intrusion d'eaux de surface contaminées. Suivant les cas, les micro-organismes pourront être éliminés en procédant à un entretien régulier des captages par désinfection. Dans le cas contraire, les bactéries pourront dégrader la qualité de l'eau exploitée et colmater l'équipement des forages.

Des problèmes organoleptiques sont survenus pour les eaux captées par plusieurs forages aux GTI. Ils concernaient les captages des codes 02311X0017/F de Bathelmont-lès-Bauzémont, 02315X0001/F de Bienville-la-Petite, 02302X0098/F de Bouxières-aux-Chênes et 02693X0001/F de Manonviller. Ces problèmes d'odeur et de saveur des eaux pouvaient provenir de l'existence de bactéries dans les forages d'exploitation, de la précipitation d'hydroxyde de fer, ou d'intrusions d'eaux extérieures à la nappe suite aux mauvaises étanchéités des forages (Nguyen-Thé *et al.*, 2003).

4.5.4. Résultats analytiques complémentaires d'autres captages du département des Vosges

Pour aller plus loin dans l'analyse des données analytiques, il est possible de se référer à des analyses chimiques concernant d'autres captages d'eau et notamment des sources. Il a en effet été mentionné dans les paragraphes précédents que les problèmes de qualité des eaux rencontrés pouvaient provenir de la ressource en eau, et non des forages eux-mêmes. Il est en conséquence utile de s'intéresser aux cas de quelques sources de la nappe des GTI qui sont captées.

Une campagne de prélèvements et d'analyses des eaux d'une trentaine d'ouvrages abandonnés situés dans le département des Vosges et captant la nappe des GTI a été entreprise par le BRGM en 2005. Il s'agissait de sources et de puits de faibles profondeurs. Les résultats analytiques obtenus ont été complétés par ceux de contrôles sanitaires réalisés en 2004 et 2005. L'objectif était de voir s'il serait possible d'exploiter à nouveau ces captages pour l'AEP.

Il est ressorti que les eaux d'une grande majorité des captages avaient une mauvaise qualité bactériologique et contenaient des phytosanitaires, ainsi que pour plus de la moitié des captages, les concentrations en nitrates dans l'eau étaient élevées. Ces mauvais résultats d'analyses étaient interprétés comme résultants des contextes hydrogéologiques des ouvrages, selon lesquels les eaux souterraines captées percolaient à des faibles profondeurs, rendant celles-ci sensibles aux pollutions de surface (Vaute *et al.*, 2007).

Le fait que les captages n'étaient plus entretenus ni désinfectés depuis leur abandon peut expliquer en partie la mauvaise qualité bactériologique de leurs eaux. En revanche, la mauvaise qualité des eaux concernant les produits phytosanitaires et les nitrates ne caractérise pas l'état des captages du point de vue de leur éventuelle dégradation ou de leur vieillissement, mais indique la présence de contaminations d'origine agricole.

4.5.5. Données hydrodynamiques et productivité des ouvrages

Le pendant d'une approche qualitative qui peut être menée sur les ouvrages d'eau, comme celles tentées dans les parties précédentes, est la réalisation d'une analyse critique des données et informations disponibles concernant l'hydrodynamique souterraine. La revue en partie 4.5.1 des problématiques qui affectent les captages aux GTI a permis d'identifier plusieurs cas de diminution de la productivité de forages. Cela s'est notamment produit pour les captages d'AEP situés à Betting-lès-Saint-Avoid (captage de code BSS 01654X0041/F2), Créhange (01656X0015/F2), Hombourg-Haut (01654X0011/25 et 01654X0013/29) et Longeville-lès-Saint-Avoid (01652X0044/F1).

Ces ouvrages sont implantés dans la zone d'affleurement des grès de la boutonnière du Wardnt, au niveau de laquelle se trouve le bassin houiller lorrain. Pour quatre de ces cinq forages, les documents consultés mentionnent qu'il existait en plus de la diminution de la productivité une baisse de la nappe des grès du Trias inférieur. Cette dernière était principalement due aux pompages d'exhaure minière. Le forage de Betting-lès-Saint-Avoid est notamment situé au droit du cône de dépression de Freyming-Merlebach.

Dans le contexte actuel de remontée de la nappe des GTI dans le secteur du bassin houiller lorrain avec l'arrêt des pompages d'exhaure, il est possible que certains forages, qui n'étaient plus exploités à cause d'une baisse excessive de leurs niveaux piézométriques, puissent être réutilisés avec l'inversion de la tendance.

Une baisse générale de la nappe des GTI a aussi lieu dans le secteur de Vittel-Contrexéville à cause d'une surexploitation de la nappe conjuguée à des conditions hydrogéologiques particulières. Cette diminution est notamment constatée au forage de code 03381X0008/F de Bulgnéville. Enfin une baisse de l'artésianisme a été observée au forage de code 02301X0017/F de Champigneulle. Elle semble être la conséquence du rabattement engendré par plusieurs pompages d'exploitation de la nappe des grès du Trias inférieur.

Une baisse générale d'une nappe peut avoir des répercussions sur la productivité des forages qui la captent. La baisse du débit artésien du forage de Créhange en est un exemple puisqu'il ne fait que refléter la baisse du niveau piézométrique artésien. On peut néanmoins démontrer, à partir du principe de superposition de l'équation de la diffusivité qui est valable pour les nappes captives, et qui est aussi admis pour les nappes libres dont l'épaisseur mouillée est importante comme dans le cas de la nappe des GTI, qu'une baisse de niveau piézométrique n'est pas suffisante pour expliquer une diminution de productivité.

Pour s'affranchir des fluctuations piézométriques, la productivité est ainsi étudiée en terme de rabattement, c'est-à-dire en termes de différence de niveau statique et de niveau dynamique (niveau sous l'influence d'un pompage). La SEE nous a gracieusement communiqué les valeurs moyennes annuelles des données hydrodynamiques de deux des ses forages situés à Saint-Avoid (de code BSS 01398X0033/F3W) et Longeville-lès-Saint-Avoid (01653X0107/242). Les chroniques du débit d'exploitation, du rabattement, et du débit spécifique, qui est le rapport des deux premiers paramètres, sont restituées sur l'illustration 32.

Rappelons que le débit spécifique se calcule en principe à partir de valeurs ponctuelles du rabattement et du débit, et non à partir de valeurs moyennes de ces paramètres. Celui du forage F3W a fluctué de 1980 à 2010. Partant de valeurs comprises entre 0,3 et 0,5 $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$, il est descendu vers des valeurs oscillant autour de 0,3 $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$, pour remonter passagèrement à plus de 0,5 $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$. Pour la première partie de la chronique, la diminution du débit spécifique était concomitante à l'existence d'une forte turbidité des eaux (*confer* l'illustration 26).

La remontée du débit spécifique au milieu des années 2000 provient de la diminution du rabattement, étant donné que le débit est resté quasiment stable pendant cette décennie. La baisse du rabattement a débuté en 2002. Elle pourrait provenir de la perforation de la crépine, qui a été constatée vers 70 m de profondeur lors d'une inspection vidéo réalisée cette même année, et qui a été confirmée au cours d'une autre inspection faite en 2009. S'il est classique que le rabattement décroisse en cas de perforation des crépines avec la diminution des pertes de charges au forage qui s'en suivent, en revanche, une augmentation simultanée de la turbidité a souvent lieu, ce qui ne semble pas être le cas ici. Le piquage et le percement de la crépine pourrait avoir été engendré par une corrosion électrochimique (LuxAquatec, 2009).

Le rabattement est reparti à la hausse dès 2007, ce qui a fait décroître de nouveau le débit spécifique. Les pertes de charges au forage sont probablement redevenues importantes à cause de la dégradation de l'état de celui-ci. En effet, les crépines du forage sont apparues comme étant fortement colmatées en 2009 lors de l'inspection vidéo. Le colmatage pourrait avoir été favorisé par l'augmentation importante de la minéralisation de l'eau (illustrations 26 et 27). Le rechemisage du forage a été réalisé en 2009.

Pour le forage 242, le débit spécifique a constamment diminué pendant toute la période du suivi, au cours des trois décennies. La baisse de la productivité s'est accompagnée par le colmatage de l'ouvrage par des hydroxydes de fer, ainsi que par l'accumulation de ces derniers sous la forme de particules fines au fond du forage. La présence d'hydroxydes pourrait avoir augmenté les pertes de charges au forage réduisant ainsi sa productivité. Le captage a fait l'objet d'un nettoyage régulier.

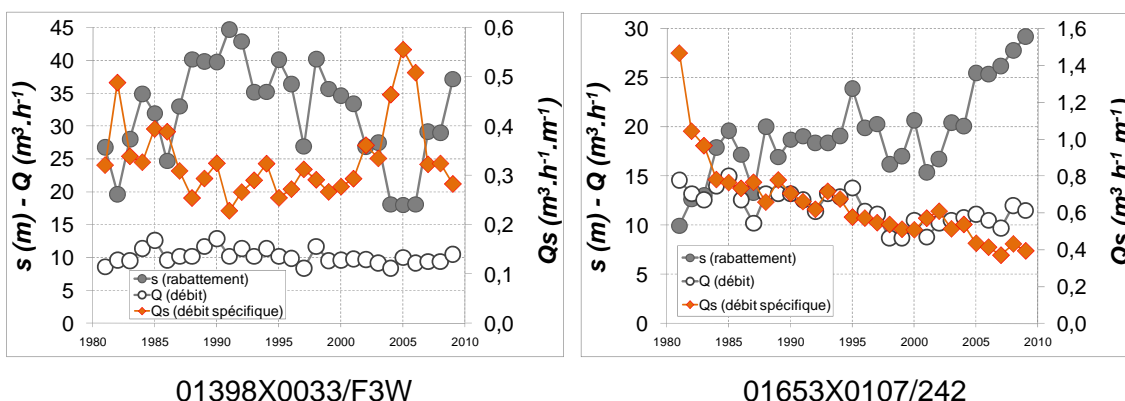


Illustration 32 : Chroniques de productivité de deux forages situés à Saint-Avold et Longeville-lès-Saint-Avold (données de la SEE).

4.5.6. Tubages et fonds des forages

Des défaillances d'ouvrage d'eau aux GTI ont été identifiées au niveau des tubes pleins ou crépinés et au niveau des fonds des forages. Elles ont été mises en évidence par l'analyse des données analytiques ou hydrodynamiques disponibles, par la réalisation de diagraphies, ou encore par des inspections par caméra vidéo, et certaines ont déjà été mentionnées dans les parties précédentes.

Les colmatages, encrassements, encroûtements, entartrages des crépines et tubages ou dépôts de concrétions recensés concernent les forages des codes BSS 02302X0098/F de Bouxières-aux-Chênes, 03381X0008/F de Bulgnéville, 01677X0001/F de Goetzenbruck, 01652X0114/F2, 01652X0131/F3 et 01653X0107/242 de Longeville-lès-Saint-Avold, 02305X0063/F3 de Nancy, 03044X0010/F de Rehaincourt, 01398X0033/F3W de Saint-Avold, et 01957X0008/F1 de Val-de-Bride.

Des défauts de cimentation, de la corrosion voire des perforations de tubages ont été constatés pour les forages des codes 03381X0008/F de Bulgnéville, 02301X0017/F de Champigneulle, 03742X0001/F de Godoncourt, 01677X0001/F de Goetzenbruck, 01652X0114/F2 et 01653X0107/242 de Longeville-lès-Saint-Avold, 02693X0001/F de Manonviller, 02305X0063/F3 de Nancy, 03044X0010/F de Rehaincourt, 01398X0033/F3W de Saint-Avold, 02323X0006/F de Sarrebourg, et 02307X0238/F de Varangéville.

Par ailleurs, de nombreux captages ont été réalisés sans la mise en place d'un équipement complet. Il s'agit des forages des codes 02311X0017/F de Bathelémont-lès-Bauzemont, 02315X0001/F de Bienville-la-petite, 02302X0098/F de Bouxières-aux-Chênes, 02301X0017/F de Champigneulle, 01656X0015/F2 de Créhange, 01677X0001/F de Goetzenbruck, 01652X0044/F1 de Longeville-lès-Saint-Avold, 02693X0001/F de Manonviller, 01665X0026/F de Puttelange-aux-Lacs, 01653X0043/F2, 01653X0044/F3, 01653X0063/F4 et 01653X0066/2BIS de Saint-Avold, 02323X0006/F de Sarrebourg, 01957X0008/F1 de Val-de-Bride, 01672X0002/F de Volmunster, et 01664X0012/F de Zetting pour lesquels on note une absence totale ou partielle des massifs filtrants.

Des crépines sont aussi totalement ou partiellement absentes pour les forages des codes 01656X0015/F2 de Créhange, 02693X0001/F de Manonviller, 01665X0026/F de Puttelange-aux-Lacs, 01653X0043/F2, 01653X0044/F3, 01653X0063/F4 et 01653X0066/2BIS de Saint-Avold, 02323X0006/F de Sarrebourg, 01957X0008/F1 de Val-de-Bride, 01672X0002/F de Volmunster, et 01664X0012/F de Zetting. L'équipement de certains de ces ouvrages a été complété lors d'une réhabilitation.

Des ensablements et des accumulations de sédiments ou concrétions ont été observées aux fonds des forages des codes 01652X0044/F1, 01652X0131/F3 et 01653X0107/242 de Longeville-lès-Saint-Avold, 01398X0033/F3W, 01653X0043/F2, 01653X0044/F3, 01653X0063/F4 et 01653X0066/2BIS de Saint-Avold, 01957X0008/F1 de Val-de-Bride, et 01672X0002/F de Volmunster. Quant aux ouvrages des codes 02302X0098/F de Bouxières-aux-Chênes, 01677X0001/F de Goetzenbruck et 01652X0114/F2 de Longeville-lès-Saint-Avold, les comblements des fonds des forages ont presque atteint ou ont dépassé 20 m.

L'absence de crépine ou de massif de graviers pour plusieurs de ces captages semble en partie responsable de leur ensablement. Un développement insuffisant des forages ou des débits d'exploitation trop importants peuvent de même contribuer à combler le fond des ouvrages. A terme, cela peut amoindrir la productivité des forages d'eau. Un constat similaire avait déjà été fait à partir d'un inventaire de forages profonds atteignant les grès du Trias inférieur, dont 43 % étaient dépourvus de crépines (Coiffet *et al.*, 1982).

Enfin pour le forage de code 02697X0030/F de Deneuvre, il existerait un « *décalage* » des tubages sur lequel la pompe buterait lors de sa descente (d'après les informations communiquées par la Mairie). Il pourrait s'agir d'un écrasement de tubage.

4.6. BILAN

L'objectif de l'étude était de tenter de dégager une typologie des problèmes des forages aux grès du Trias inférieur, dans l'optique de définir une démarche de surveillance et d'investigations à entreprendre sur ces forages. Le bilan que nous allons faire à partir des retours d'expériences dont les informations récupérées ont été analysées dans les parties précédentes se veut le plus déductif possible, de manière à refléter réellement les problématiques qui affectent les ouvrages aux GTI et ne pas se réduire uniquement à un texte général sur les forages qui s'éloignerait du cas présent. *A posteriori*, l'étude qui a été entreprise permet aussi d'établir des préconisations visant à anticiper la dégradation des forages et à améliorer leur longévité.

Nous avons vu que les contraintes tectoniques n'avaient pas d'influence globale sur l'occurrence de problèmes, de même que l'âge des forages constituait un facteur peu déterminant dans l'apparition des problèmes. Ces deux paramètres ne peuvent donc pas servir à définir une stratégie d'investigations ou de surveillance des forages.

Une part importante des ouvrages défaillants concerne des forages qui traversent des évaporites. *A contrario*, la majorité des forages à problème sont des ouvrages d'eau qui ne traversent pas d'évaporites (60 % des cas). Citons à titre d'exemple le forage de code BSS 02323X0006/F de Sarrebourg, dont le tubage a vraisemblablement été perforé alors qu'il ne recoupe pas d'évaporites. De même le forage de code 01398X0033/F3W de Saint-Avoid (avec une coupe géologique dépourvue d'évaporites) a été perforé à cause de la corrosion électrochimique. La présence d'évaporites vis-à-vis du risque de perforation des tubages semble ainsi être un critère important mais non nécessaire.

La baisse locale de la nappe des GTI peut s'accompagner d'une diminution de la productivité des ouvrages qui la captent, sans pour autant que l'état des forages ne soit remis en cause. La remontée de la nappe comme dans le secteur du bassin houiller lorrain pourrait permettre d'exploiter à nouveau des captages qui ne l'étaient plus. La diminution de la productivité des forages peut résulter du colmatage des crépines, qui est un problème recensé fréquemment. Le colmatage des forages est notamment contrôlé par la présence de boues et gels bactériens, par les conditions d'oxydoréduction, et par l'alternance des conditions réduites et oxydantes dans les forages produite par l'intermittence des pompages d'exploitation.

L'existence de bactéries est favorisée par la composition chimique des eaux, la température de celles-ci et leur faible profondeur. Elle peut être liée à la boue de forage utilisée, et elle peut traduire un mauvais entretien des ouvrages de prélèvement ou une étanchéité défectueuse des forages. En plus d'entraîner le colmatage de l'équipement des forages, elle conduit à dégrader la qualité de l'eau exploitée et peut avoir une incidence sur ses qualités organoleptiques.

La mauvaise qualité de la nappe, qui est parfois rencontrée, peut aussi provenir d'un contexte hydrogéologique particulier de pollution. Elle peut encore être due à la présence naturelle d'éléments indésirables dans l'eau, comme du fer, du manganèse ou du nickel, de l'arsenic en provenance du socle, ou encore du cadmium issu du lessivage de minéralisations en métaux lourds associées au Conglomérat principal. En zone d'affleurement, la nappe des GTI a des eaux agressives qui peuvent corroder les équipements des forages. L'origine de la minéralisation élevée de la nappe des GTI dans sa partie ouest et dans l'Est Mosellan est attribuée à la présence d'eaux connées, voire juvéniles, et à une alimentation par le Muschelkalk par drainance ou par l'intermédiaire de jeux de failles. La minéralisation de la nappe au forage de code 01665X0026/F de Puttelange-aux-Lacs pourrait par exemple être d'origine synsédimentaire. Ces eaux captées de mauvaise qualité ne traduisent donc pas des états dégradés des forages mais proviennent de la localisation des forages dans des secteurs où la qualité de la nappe est remise en cause pour certains usages.

En revanche, l'augmentation soudaine d'un paramètre du suivi qualitatif ou du suivi quantitatif qui sont pratiqués aux forages problématiques peut être indicatrice d'une dégradation des forages. Il s'agit des variations singulières des paramètres physico-chimiques (entre autres de la conductivité et des concentrations en Cl, Fe, Mn et SO₄), bactériologiques et organoleptiques, de la turbidité, et des paramètres hydrodynamiques (débit et/ou volume pompé, pression, niveaux statique et dynamique). L'élévation des concentrations en sulfate, qui a par exemple été constatée aux captages des codes 03044X0010/F de Rehaincourt et 02323X0006/F de Sarrebourg, a mis en évidence les perforations vraisemblables des tubages. Dans le cas de la situation de crise du forage de code 02693X0001/F de Manonviller, la trop forte salinité des eaux captées a même conduit à abandonner le forage.

Enfin parmi les forages à problèmes recensés, nombre d'entre eux sont sans massif filtrant ou même sans crépine. Cela peut être la cause de l'ensablement du fond de certains forages aux GTI, qui se produit parfois sur une épaisseur de plus de 20 m. Le comblement des forages peut évidemment avoir une répercussion sur leur productivité. Les autres problèmes d'équipement recensés sont des défauts de cimentation, la corrosion des tubages ou crépines et leur perforation, voire un écrasement de tubage. La perforation des tubages a également une incidence sur le débit spécifique des forages, et leur étanchéité médiocre peut même aller jusqu'à une situation extrême où un ouvrage d'eau défectueux entraîne la pollution de la nappe. Cela s'est déjà produit à Créhange et a notamment été constaté à partir du forage de code 01656X0015/F2.

4.7. RECOMMANDATIONS

4.7.1. Généralités

D'une manière générale, pour anticiper les aléas de chantier, il faut établir à l'avance une coupe prévisionnelle du forage comportant les cotes des toits et murs des éventuelles formations évaporitiques qui pourraient être rencontrées et des formations aquifères traversées, ainsi que les charges hydrauliques de ces dernières. Cela permet non seulement de prévoir des équipements adaptés aux contextes géologique et hydrogéologique, mais également d'anticiper les zones potentielles de pertes d'injection comme les zones karstiques, les saturations éventuellement nécessaires des fluides de forage pour éviter le cavage des évaporites, et les compositions adaptées des laitiers de ciment à employer.

Plusieurs anomalies du fond géochimique de la nappe des grès du Trias inférieur ont été étudiées. Du cadmium est notamment détecté dans les eaux de la nappe au sud du Wardnt ; des cartes des zones à risque de concentrations en arsenic, fer et manganèse dépassant certaines valeurs ont été établies (Allemmoz, 2001) ; les secteurs minéralisés de la nappe ont été cartographiés (*confer* la dernière délimitation de la limite de la salinité de la nappe qui pourrait éventuellement être affinée *in* Babot *et al.*, 2003). Le choix de l'implantation d'un nouveau forage devrait, dans la mesure du possible, prendre en compte ces indications géographiques concernant les anomalies naturelles de la qualité de la nappe des GTI. De même, en phase de projet, il est opportun de consulter les informations disponibles autour de la zone d'implantation prévue dans les bases de données publiques (ADES, BSS...), afin d'identifier si des incidents de toutes natures ont déjà été identifiés par le passé lors de la réalisation d'un forage.

Pour limiter autant que faire se peut les problèmes qui concernent les forages aux grès du Trias inférieur, il est recommandé de suivre intégralement les règles de l'art en matière de réalisation des forages d'eau et d'exploiter ces ouvrages de manière raisonnée. Les lignes directrices et les principes de ces règles sont précisées dans les textes réglementaire, normatif ou déjà consacré au GTI qui sont rappelés dans la partie bibliographique (voir notamment les références AFNOR, 2007 ; Coiffet *et al.*, 1982 ; JORF, 2003). Tout en sachant que chaque forage est un cas particulier, il s'agit notamment de :

- privilégier les forations en continu ;
- surveiller la viscosité de la boue de forage à son retour en surface pour détecter les zones perméables traversées ;
- forer à l'eau dans les grès pour éviter leur colmatage et les développements bactériens ;
- employer des aciers de bonne qualité pour l'équipement des forages, c'est-à-dire des matériaux inoxydables compte tenu des eaux corrosives de la nappe ;

- télescoper les tubages, utiliser des centreurs, et ne plus faire une cimentation sur un bouchon d'argile sur graviers ;
- soigner la cimentation, celle-ci devant être mise en place sous pression par le bas et avoir une épaisseur minimale de 4 cm ;
- mettre en place systématiquement des crépines, même en cas de bonne tenue des grès, et utiliser des centreurs ;
- installer une protection cathodique en cas de besoin pour éviter la corrosion électrochimique ;
- adapter le massif filtrant à la granulométrie des grès, en choisissant les courbes les plus contraignantes tout en écartant les coupures trop faibles qui pourraient favoriser le colmatage ;
- nettoyer et développer suffisamment les forages afin de chasser les fines, pour préserver les pompes et la colonne d'exhaure, et pour diminuer la vitesse d'entrée de l'eau dans les crépines ;
- désinfecter les forages pour éviter les développements bactériens ;
- adapter les caractéristiques de la pompe et son régime d'exploitation au forage et non aux besoins à assurer, en effectuant des essais de débits et un pompage de réception ;
- effectuer des contrôles des cimentations, et réaliser des diagraphies et une inspection par caméra vidéo à la réception du forage ;
- favoriser les exploitations de longue durée mais non continues à débit modéré en ne dénoyant jamais les crépines plutôt que la multiplication des cycles courts de pompage à débit élevé, pour réduire la vitesse de l'eau, limiter la précipitation des éléments et composés minéraux ou métalliques qui conduisent au colmatage des forages, et limiter la corrosion des équipements.

Les illustrations suivantes permettent de schématiser les coupes de forages ayant été correctement exécutés. La première concerne un ouvrage captant une nappe libre et la seconde un ouvrage captant une nappe captive.

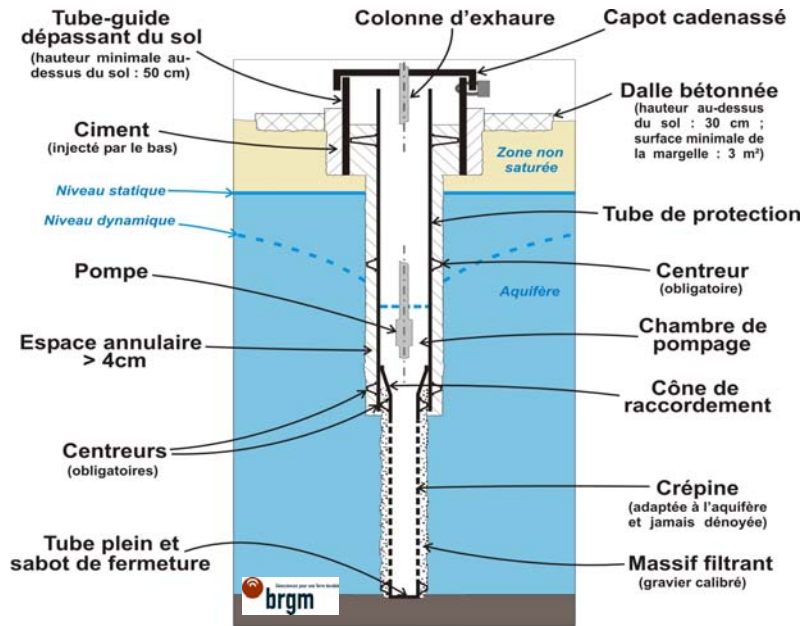


Illustration 33 : Coupe d'un forage d'eau en nappe libre (d'après Nguyen-Thé, Degouy, Bérard et Allemmoz, 2001 ; in BRGM, 2003).

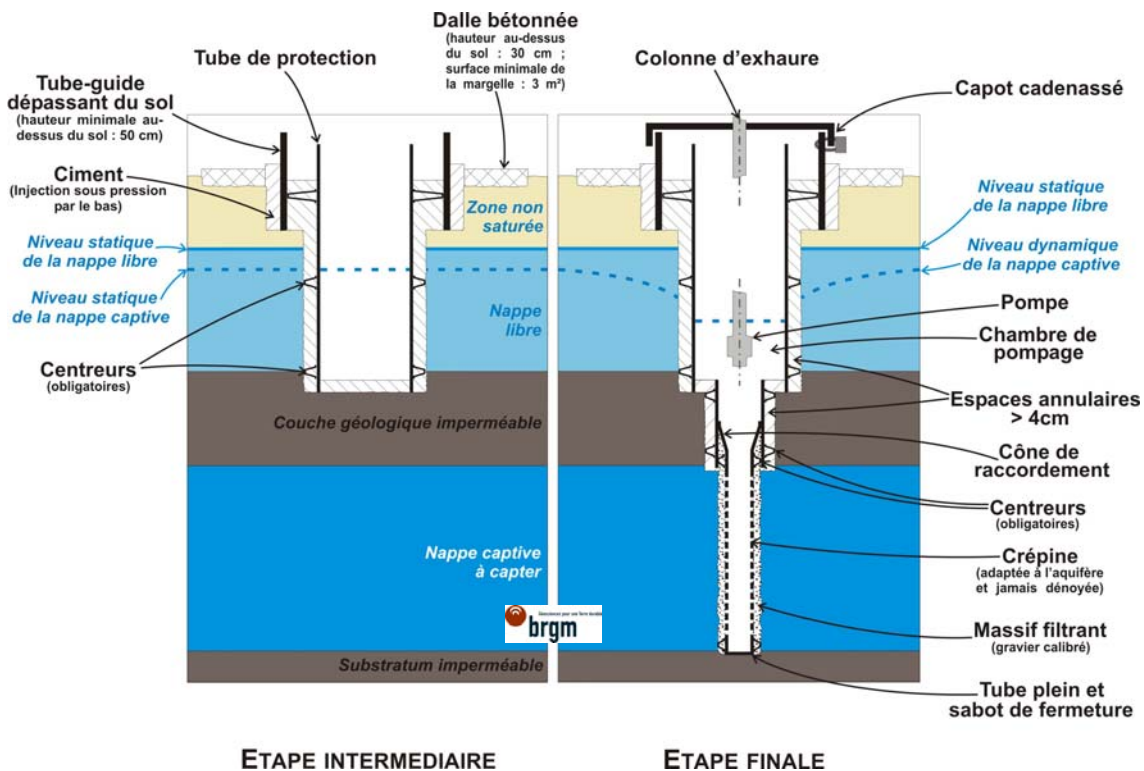


Illustration 34 : Coupe d'un forage d'eau en nappe captive (d'après Nguyen-Thé, Degouy, Bérard et Allemmoz, 2001 ; in BRGM, 2003).

Etant donné la vaste étendue des formations évaporitiques (gypse, anhydrite et sel gemme) qui sont situées dans les terrains de recouvrement des grès du Trias inférieur en Lorraine, le fait que les évaporites accélèrent la dégradation des forages qui les traversent, et la part importante des forages problématiques recensés qui recoupent des évaporites, des prescriptions particulières doivent être prises pour réaliser les forages dans ce type de formations géologiques. Elles consistent à :

- saturer en sel la boue de forage pour éviter le cavage des formations salifères ;
- doubler les tubages et la cimentation en regard des évaporites ;
- utiliser un ciment sursulfaté alumineux en regard des formations évaporitiques pour assurer sa résistance aux eaux séléniteuses et salées.

Une fois un forage d'eau réalisé, il faut assurer dans le temps un suivi qualitatif et quantitatif. Cela concerne pour les eaux captées le contrôle régulier de la conductivité, de la température, du pH, de la turbidité, de l'odeur, de la saveur, des paramètres microbiologiques, et des concentrations en ions majeurs, ainsi que le suivi des débit/volume de l'eau pompée, pression, niveau statique et niveau dynamique. Des essais par pompage peuvent être réalisés à intervalle de temps réguliers pour détecter des éventuelles modifications du débit spécifique des forages. Une évolution anormale d'un paramètre de qualité est davantage indicatrice d'une dégradation de l'état d'un forage, plutôt qu'une eau qui est de mauvaise qualité en permanence. Le suivi en continu ou à une fréquence élevée d'un paramètre qualitatif au cours d'un pompage peut s'avérer utile pour détecter une détérioration d'étanchéité.

Il est nécessaire de faire en sorte que le protocole d'échantillonnage et analytique soit reconduit d'une campagne d'analyses à une autre pour permettre un suivi qualitatif cohérent dans le temps. De la même manière, pour les approches comparatives de plusieurs forages d'eau, il est nécessaire d'homogénéiser le protocole entre tous les ouvrages d'eau. Rappelons qu'il faut réaliser des prélèvements d'eau brute pour faire des diagnostics de forage, et non prélever des échantillons dans les réseaux de distribution d'eau.

Il faut noter que s'il est intéressant d'effectuer un contrôle analytique sur les forages non exploités afin de détecter un éventuel défaut d'étanchéité, en revanche, le suivi régulier des forages exploités ne permet pas de prévoir s'ils seront les sujets d'une perforation à plus ou moins long terme.

Des diagraphies de plusieurs types peuvent être mises en œuvre sur les forages d'eau afin de vérifier leur état. Il s'agit de sondes pour mesurer la conductivité, l'oxygène dissous, le pH, le potentiel d'oxydoréduction, et la température de l'eau. Elles peuvent être regroupées en sondes multi-paramètres. L'analyse de leurs résultats permet de guider le choix des profondeurs auxquelles des prélèvements d'eau sont intéressants à réaliser. Les diagraphies soniques permettent d'évaluer l'adhérence de la cimentation et la sonde micromoulinet est utilisée pour la mesure des flux d'eau.

Un exemple d'utilisation de diagraphies est celui de l'accident du forage de code 02693X0001/F de Manonviller. Dans les années 1980, des diagraphies avaient mis en évidence des défauts d'adhérence francs de la cimentation en regard d'évaporites. Il avait toutefois été jugé à cette époque qu'il n'y avait pas « *de problèmes sérieux sur cet ouvrage* » (Maïaux *et al.*, 1985), ce qui n'augurait pas de la perforation qu'allait subir le forage deux décennies plus tard. Il ressort de l'historique de ce cas, qu'il est nécessaire d'entreprendre régulièrement des diagraphies afin d'être en mesure de détecter à l'avance une dégradation prononcée d'un ouvrage d'eau sans qu'elle n'aboutisse à une situation de crise aigüe.

Une diagraphie particulière permet de déterminer l'état global du tubage en indiquant quelle est la part approximative d'acier sain. Elle est utilisable pour les forages de diamètre suffisant et fournit des résultats par section verticale de quelques décimètres. Cet outil qui est basé sur le couplage d'une sonde électromagnétique et d'une sonde sonique, est utilisé ou en cours de développement par plusieurs opérateurs. Son emploi semble adapté à la prévision des perforations de tubage.

Les inspections des forages par caméra vidéo viennent compléter la palette d'outils d'investigation sur les forages. Elles permettent notamment d'ausculter précisément des sections de tubage dont l'état douteux a pu être ciblé par des diagraphies.

La réhabilitation des ouvrages d'eau peut être entreprise pour pallier leur dégradation. Les actions de régénération envisageables sont très variées et souvent complémentaires, et elles dépendent des symptômes constatés. On peut citer le lavage à l'eau claire, les pompages classiques et surpompages, l'air-lift, le traitement physique à l'air comprimé, le lavage au jet, l'injection d'eau à forte pression, le pistonnage, le tir à l'explosif de faible puissance, le traitement par onde de choc à l'aide d'un gaz comprimé à très haute pression, le brossage et le grattage (dont l'intensité est à adapter au degré de corrosion du tubage), ou encore le curage du fond des forages. Il y a aussi les traitements chimiques et la stérilisation au chlore, aux polyphosphates, par hypochlorite de sodium, par acidification... Une protection cathodique peut être mise en œuvre par l'injection d'un courant électrique ou par l'ajout d'une anode anticorrosion, et il existe également des protections passives consistant à mettre en place une surcouche passive sur l'équipement.

En cas de dommages trop importants sur un forage d'eau, l'opération qui s'impose est son rechemisage partiel ou complet, suivant l'état de son tubage. Mais cette solution diminue considérablement le diamètre de l'ouvrage, ce qui a des conséquences sur son exploitation. De plus, le rechemisage doit être entrepris suffisamment tôt (d'où la nécessité de faire un suivi régulier de l'ouvrage d'eau) pour éviter par exemple que des circulations d'eau ne se forment verticalement à l'extrados du tubage, et pour empêcher le cavage prononcé des évaporites. Un procédé novateur consistant à fixer un manchon étanche en acier inoxydable, qui est déformé à l'aide d'un packer gonflé à très haute pression, permet de réduire la section interne des forages de moins de 20 mm. Cela permet éventuellement de garder la pompe préexistante et ainsi de conserver le débit d'exploitation de l'ouvrage réhabilité. Pour la plupart des captages aux GTI, cela correspond seulement à une diminution de 5 à 10 % de leurs diamètres internes.

Enfin, pour le cas extrême des forages qui ne peuvent plus être réhabilités et qui sont abandonnés, il convient de rappeler que leur rebouchage doit aussi être fait selon les règles de l'art. Il s'agit de combler le forage en regard de la crépine par du sable ou des graviers, puis de mettre en place un bouchon d'argile, de cimenter le tubage par le bas et sous pression, et enfin de recevoir la tête de l'ouvrage. Dans certains contextes particuliers, une cimentation intégrale du forage est nécessaire.

L'expérience montre que le surcoût d'une réalisation correcte d'un forage d'eau (matériel utilisé, techniques employées, moyens humains mobilisés...) et du suivi régulier d'un forage une fois mis en service, est amorti par les économies faites lors de l'exploitation du forage (entretien précoce et allégé, absence d'augmentation de l'énergie de pompage...) et l'allongement de sa durée de vie.

4.7.2. Proposition de protocole de suivi et d'investigations

Compte tenu de l'importance du parc de forages aux grès du Trias inférieur et de la large typologie de problèmes qui peuvent les affecter, toute procédure à mettre en place pour appréhender les défaillances de forages, en termes d'identification et de gestion, se veut nécessairement pragmatique du point de vue de sa mise en œuvre et de ses coûts. Dans cette optique, la stratégie suivante peut être proposée :

- 1) pour tous les forages aux GTI, qu'ils soient exploités ou non, mesurer *a minima* la conductivité et les concentrations en Cl, Fe, SO₄ de leurs eaux ; renouveler ces mesures tous les cinq ans ; consigner les résultats des mesures auprès de l'Administration ;
- 2) pour les ouvrages d'eau en exploitation, tous les cinq ans, réaliser des diagraphies de contrôle couplées à une inspection par caméra vidéo.

Le premier point pourrait par exemple être réalisé dans un délai de 2 ans afin de disposer d'un état initial pour tous les forages. Il permettrait le déclenchement d'une alerte pour les mauvais résultats de qualité. Celle-ci pourrait se traduire par l'engagement d'actions prioritaires, comme l'augmentation de la fréquence de renouvellement du contrôle analytique, l'auscultation plus fine des forages à problème de qualité identifié, *etc.* Pour les forages d'eau en exploitation, ce point est implicitement exécuté régulièrement et sur davantage de paramètres. Pour les forages non exploités qui n'ont pas été rebouchés, cela permettrait de détecter un défaut d'étanchéité et de limiter une éventuelle propagation de pollution saline dans la nappe.

La fréquence du deuxième point se cale sur celle minimale qui doit concerner la vérification de la colonne de refoulement et de la pompe de tout forage d'exploitation d'une nappe d'eau souterraine.

5. Conclusion

Les forages d'eau qui captent la nappe des grès du Trias inférieur sont très nombreux et la typologie des défaillances qui les affectent est variée. Il s'agit de colmatages, d'incrustations, de perforations, voire de l'écrasement des tubages et crépines. L'absence des crépines ou des massifs filtrants est aussi fréquente et peut conduire à l'ensablement des forages. Ces problèmes se traduisent parfois par des évolutions anormales de la qualité des eaux captées.

Il apparaît que les contraintes tectoniques n'ont pas d'influence globale sur l'occurrence des problèmes de forage, et que l'âge des forages constitue un facteur peu déterminant dans l'apparition de ces problèmes. Ces deux paramètres ne peuvent donc pas servir à définir une stratégie d'investigations ou de surveillance des forages.

Une part importante des ouvrages défaillants concerne des forages qui traversent des évaporites. De ce fait, il est recommandé pour les forages qui sont dans cette situation de saturer en sel la boue de forage, de doubler les tubages et la cimentation ainsi que d'utiliser un ciment sursulfaté alumineux en regard des formations évaporitiques. Par ailleurs, pour tous les ouvrages d'eau, il faut suivre les règles de l'art relatives à la réalisation des forages, dont les principales ont été rappelées dans la partie du rapport consacrée aux recommandations.

Il est aussi recommandé de suivre régulièrement l'état des forages aux GTI de manière à détecter toute dégradation qui pourrait remettre en cause leur pérennité. L'entretien régulier des forages et leur maintenance préventive étant préférables aux opérations curatives qui s'avèrent plus coûteuses.

Afin d'appréhender d'éventuels problèmes d'ouvrages d'eau, il est préconisé une stratégie pragmatique de surveillance du parc des forages aux grès du Trias inférieur, qui consisterait :

- pour tous les forages aux GTI, qu'ils soient exploités ou non, à mesurer *a minima* la conductivité et les concentrations en Cl, Fe, SO₄ de leurs eaux ; à renouveler ces mesures au moins tous les cinq ans ; à consigner les résultats des mesures auprès de l'Administration ;
- pour les ouvrages d'eau en exploitation, tous les cinq ans, à réaliser des diagraphies de contrôle couplées à une inspection par caméra vidéo.

6. Bibliographie

AFNOR (2007) – Forage d'eau et de géothermie, Réalisation, suivi et abandon d'ouvrages de captage ou de surveillance des eaux souterraines réalisés par forages. Norme française X 10-999, 55 p., 16 fig., 4 tabl., 3 ann.

Allemmoz M. (2001) – Extension de la contamination en arsenic dans la nappe des grès du Trias inférieur sous couverture. AERM, rapport ANTEA A 023427/A, 11 p., 12 ann.

Babot Y. (1978) – Forage HBL 602 de Créhange, Exhaure du puits de Faulquemont, Alimentation en eau potable du secteur de Faulquemont, Enquête géologique réglementaire, Etablissement des périmètres de protection. Houillères du Bassin de Lorraine, rapport BRGM 78 SGN SGAL - 0147, 8 p., 4 ann.

Babot Y. (1989) – Inspection vidéo du forage n° 2. Commune de Longeville-lès-Saint-Avold (Moselle), rapport BRGM SGR/LOR n° 89/115, 6 p., 3 ann.

Babot Y., Mangold C., Simler L. (1972) – Etude hydrogéologique de la nappe aquifère des grès infratriasiques dans le nord-est de la France. Rapport BRGM 72 SGN 047 SGAL, 63 p., 8 fig., 5 ann.

Ballin F. (2002) – Note de recherche d'un site d'implantation de forage, Commune de Philippsbourg (57). Commune de Philippsbourg, rapport ANTEA A26584/A, 6 p., 2 fig.

Bernert G., Rose P. (1992) – Réalisation d'un forage au Grès vosgien à Voellerdingen. Syndicat mixte de production d'eau potable de la région de Sarre-Union et des environs, rapport BRGM R35436 ALS 4S 92, 17 p., 8 fig., 4 ann.

Bouchet F. (2003) – Inspection vidéo de forage, Site de Goetzenbruck, Réalisée le 4 juillet 2003. Commune de Goetzenbruck, rapport EGS, 6 p.

Bouly S. (2005) – Périmètres de protection du forage AEP, Etude hydrogéologique préalable. SIVU du Grand Couronné, Département de Meurthe-et-Moselle (54), rapport définitif ASGA, 40 p., 5 ann.

BRGM (2003) – Des forages de qualité en région Lorraine, Préservons la ressource en eau. Plaquette d'information BRGM éditée par la DIREN Lorraine, 6 p., 3000 ex.

BRGM (1983) – Diagnostic sommaire sur les forages F1 et F2 Ugine-kuhlmann à Dieuze. Commune de Val-de-Bride, note BRGM de mars 1983, 4 p.

Cachet-Marly C. (2004) – Forage AEP syndical F1 situé sur la commune de Bulgnéville, Compte rendu de l'étude diagnostic. Syndicat des Eaux de Bulgnéville et de la vallée du Vair, rapport ASGA 04.012, 16 p., 6 ann.

Cachet-Marly C. (2006) – Recherche d'une ressource de substitution pour l'approvisionnement en eau potable, Etude hydrogéologique préliminaire. Syndicat des Eaux de Gondoncourt, rapport ASGA 06.044, 36 p., 10 ann.

Coiffait B., Ricour J. (1982) – Forages aux grès du Trias inférieur en Lorraine, Analyse des archives disponibles, Proposition pour une amélioration de la technologie de réalisation et d'équipement. Rapport BRGM 82 SGN 703 LOR, 22 p., 3 ann.

Cote E. (1997) – Enquête géologique réglementaire relative à la protection du point d'eau destiné à la consommation humaine du Syndicat des eaux de Volmunster, Propositions de l'hydrogéologue agréé en matière d'hygiène publique. Syndicat intercommunal des eaux de Volmunster, avis de l'hydrogéologue agréé, 14 p., 5 ann.

Demassieux L. (1978) – Compte rendu de fin des travaux sur le forage AEP du lieu-dit « Les Brûlés », Périmètres de protection. Commune de Deneuvre (54), rapport ENSG, 11 p., 8 ann.

Demassieux L., Noëlle F., Battarel J.M. (1974) – Contrôle géologique de la réalisation du forage de Bathelémont, Mars-avril 1974. Syndicat des Eaux d'Arraucourt, rapport ENSGAPM/LHHA, 11 p., 10 ann.

Durendeau B. (2008) – Réalisation d'un forage AEP de substitution (F2) dans la nappe des grès du Trias inférieur à Rehaincourt (88), Suivi hydrogéologique et rapport de fin de travaux, Dossier de l'ouvrage exécuté. Commune de Rehaincourt, rapport ANTEA A 51200/A, 30 p., 1 fig., 10 ann.

Durendeau B. (2009) – Travaux de désobstruction et de nettoyage du forage F1 à Dieuze (57), Résultats de l'inspection par caméra vidéo du 4 mars 2009. Ville de Dieuze, note ANTEA NACP 080094, 2 p.

EDACERE S.A. (1996) – Périmètres de protection des captages, Dossier préparatoire à la consultation de l'hydrogéologue agréé, rapport technique. SIE de Zetting-Woelfling, rapport EDACERE S.A. LB/GP, 14 p.,

EGEH (2006) – Etude hydrogéologique préalable à la mise en place des périmètres de protection de captage d'alimentation en eau potable (AEP). Etablissement du Génie de Nancy, Caserne Kléber, rapport EGEH, 115 p., 26 fig., 17 tabl., 16 ann.

Feuga B. (2007) – Abandon du forage AEP de Varangéville (54), Recommandations en vue d'éviter la dissolution de sel du Keuper inférieur par des remontées d'eau des GTI. Note GEODERIS E2007/303DE – 07EST7000, 6 p.

Gauthier B., Ouzounian G., Surand D. (1987) – Forage de géothermie assistée, Etude des comportements du fluide, Géochimie-Bactériologie-Corrosion. Caserne Kléber, rapport CFG, 38 p., 12 fig., 6 tabl., 2 ann.

GEOSUM (2002) – Etude préparatoire à l'instauration des périmètres de protection du forage d'alimentation en eau potable, Forage n° 269-7X-30, Rapport technique. Commune de Deneuvre, 24 p., 21 ann.

Griole C. (1991) – Méthode de diagnostic de l'état du tubage des forages par pompage. Généralisation à la mise en évidence des stratifications physico-chimiques de toute origine. SRAEL-DES n° 2520, 37 p., 16 fig., 4 ann.

Guillaume L. (1952) – Projet d'amélioration de l'alimentation en eau potable de la commune de Créhange et de l'agglomération de Flétrange-Cité (Moselle). Commune de Créhange, Université de Strasbourg, 4 p.

JORF (2003) – Arrêté du 11 septembre 2003 portant application du décret n° 96-102 du 2 février 1996 et fixant les prescriptions générales applicables aux sondage, forage, création de puits ou d'ouvrage souterrain soumis à déclaration en application des articles L. 214-1 à L. 214-6 du code de l'environnement et relevant de la rubrique 1.1.0 de la nomenclature annexée au décret n° 93-743 du 29 mars 1993 modifié. JORF n° 211 du 12/09/03, pp. 15635-15638, txt. 10.

Kirsch L., Nguyen-Thé D., Peltier A. (2002) – Etat d'avancement des aménagements préconisés sur d'anciens forages aux GTI. Rapport BRGM/RP-51873-FR, 19 p., 1 fig., 2 tabl., 1 ann.

Laugier R. (1962) – Compte rendu des travaux de forage. Syndicat intercommunal de Manonviller, rapport du Service du Génie Rural du Département de Meurthe-et-Moselle, 10 p.

Laugier R. (1964) – Compte rendu des travaux de captage de la nappe aquifère des Grès vosgiens. Grandes Brasseries de Champigneulle, rapport ENSGAPM/SRRH, 19 p., 3 ann.

Laugier R., Dague P. (1967) – Forage de Nancy-Thermal n° 3, Avril-décembre 1966. Ville de Nancy (54), Faculté des Sciences de Nancy, Laboratoire de Géologie, 9 p., 2 fig.

Laugier R., Dague P. (1968) – Contrôle géologique de la réalisation du forage du Syndicat des Eaux du Grand Couronné, 6 mai - 1^{er} août 1968. Commune de Bouxières-aux-Chênes, rapport du Service du Génie Rural, des Eaux, et des Forêts du Département de Meurthe-et-Moselle, 10 p., 1 ann.

Laurent A. (2000) – Carte de synthèse du SDAGE Rhin-Meuse sur les eaux souterraines. DIREN Lorraine, Carte à 1/25 000^e.

Le Boursicaud B. (2004) – AEP de la commune de Philippsbourg (57), Etude hydrogéologique de faisabilité d'une recherche d'eau à l'étang de Hanau (57). Commune de Philippsbourg, note de synthèse ANTEA NACP04165, 4 p., 3 ann.

Lebreton A., Revol P. (2004) – Captage communal 03044X0010/HY, Dossier préparatoire à l'avis de l'hydrogéologue agréé. Commune de Rehaincourt, rapport Cap Environnement, 33 p., 7 ann.

LuxAquatec (2008) – Opérations de maintenance du forage SEE242, Opérations réalisées du 16 au 22/09/2008. Société des Eaux de l'Est, rapport d'intervention LuxAquatec, 19 p.

LuxAquatec (2009) – Opérations de maintenance du forage F3W, Rapport d'intervention, Opérations réalisées du 18/08 au 15/10/2009. Société des Eaux de l'Est, rapport LuxAquatec, 32 p.

Maïaux Cl. (1981) – Compte rendu de surveillance hydrogéologique du forage AEP aux grès du Trias inférieur. Commune de Rehaincourt, rapport BRGM SGR/LOR n° 81/35, 16 p., 7 ann.

Maïaux Cl. (1981) – Recherche de nouvelles ressources en eau potable par forage aux grès du Trias inférieur, Enquête géologique et hydrogéologique préliminaire. Commune de Hombourg-Haut (57), rapport BRGM SGR/LOR n°81/71, 8 p., 1 ann.

Maïaux Cl. (1984) – Piscine de Nancy-Thermal, Forage n° 3, Opération d'auscultation de l'ouvrage, Compte rendu des travaux. Ville de Nancy (54), rapport BRGM SGR/LOR n° 84/52, 11 p., 5 ann.

Maïaux Cl. (1986) – Compte rendu des travaux d'auscultation par diagraphies du forage de la Ville de Sarrebourg (57) et compte rendu de visite du forage dit « des tissages » de Rambervillers (88). AERM, rapport BRGM SGR/LOR n° 86/107, 14 p., 2 fig., 5 ann.

Maïaux Cl. (1986) – Restructuration du forage n° 3 à la piscine de Nancy-Thermal et suivi du pompage de décontamination de la nappe, Compte rendu de l'opération. Ville de Nancy (54), Service Economie d'Energie, rapport BRGM SGR/LOR n° 86/77, 20 p., 4 fig., 5 ann.

Maïaux Cl. (1990) – AEP complémentaire : forage n° 3 aux grès du Trias inférieur, Compte rendu de surveillance des travaux, Avril 1993. Commune de Longeville-lès-Saint-Avold (Moselle), rapport BRGM SGR/LOR n° 90/41, 12 p., 7 ann.

Maïaux Cl. (1995) – Diagnostic du forage AEP de la commune. Commune de Rehaincourt (Vosges), rapport ANTEA A 04260, 11 p., 2 fig., 1 tabl., 1 ann.

Maïaux C., Babot Y. (1985) – Diagraphies de contrôle de forages captant la nappe profonde du Grès vosgien en Lorraine et en Alsace, Interprétation des mesures. Rapport BRGM 85 SGN 112 LOR, 48 p., 10 ann.

Maïaux Cl., Ricour J. (1979) – Commune de Puttelange-aux-Lacs, Comte rendu de surveillance hydrogéologique d'un forage aux grès du Trias inférieur. Syndicat des Eaux de Sarralbe, rapport BRGM 79 SGN 145 LOR, 9 p., 4 ann.

Mautort J., Guillaume M., Marcer J., Renaud J.C. (1965) – Forage de Metz, Rapport final de surveillance géologique des travaux. Ville de Metz, rapport BRGM DSGR.66.A5, 19 p., 6 ann.

Mégnien Cl., Debrand-Passard S. (1980) – Synthèse géologique du Bassin de Paris, Atlas. Mémoire du BRGM n° 102, 54 pl., 5 ann.

Meilhac A., Prost, Ungemach P. (1968) – Etude hydrodynamique des grès du Trias inférieur, Forage de Einville-au-Jard (54), Résultats des essais de débit effectués du 10 octobre au 14 novembre 1967 et caractéristiques physico-chimiques de l'eau captée. Rapport SGAL, 9 p., 11 ann.

Minoux G. (1961) – Surveillance hydrogéologique du forage d'alimentation en eau potable du Syndicat de Zetting, Wiesviller et Woelfling. Génie Rural de Moselle, BRGM compte rendu n° 2, GM/GL, 8 p.

Minoux G. (1969) – Forage de Godoncourt, Rapport final de surveillance hydrogéologique, Enquête réglementaire effectuée en application des circulaires ministérielles des 14 mars 1962 et 10 décembre 1968. Syndicat intercommunal de la région de Godoncourt, rapport BRGM 70 SGN 28 NES, 11 p., 2 ann.

Napa Services (1999) – Régénération du forage 242. Société des Eaux de l'Est, rapport d'intervention Napa Services, 9 p.

Nguyen-Thé D., Baubron J-C. (2001) – Anomalies en cadmium dans les eaux des forages AEP de Dourd'hal, Interprétation et remédiation. Rapport BRGM/RP-51196-FR, 42. p, 13 fig., 3 tabl., 6 ann.

Nguyen-Thé D., Hugues J-M., Durendeau B. (2009) – Suivi de la qualité des eaux souterraines en aval des installations classées situées dans le bassin Rhin-Meuse à l'ouest des Vosges, Synthèse des contrôles 2004. Rapport BRGM/RP-54517-FR, 131 p., 80 ill., 1 vol. hors-texte.

Nguyen-Thé D., Vaute L. (2003) – Problèmes d'odeur-saveur sur les eaux des captages AEP du SIE de Benamont et de collectivités voisines (54). Note technique LOR03N623, 17 p., 3 fig.

Noëlle F. (1988) – Définition des périmètres de protection du forage GTI de Bienville-la-Petite (231.5.1), Rapport hydrogéologique. Syndicat des Eaux d'Einville-au-Jard (54), rapport ASGA 88-053, 7 p., 5 ann.

Petit V., Rougieux L. (1994) – Diagnostic de l'état des forages profonds atteignant la nappe des grès vosgiens en Lorraine. Rapport BRGM N 1893, 10 p., 1 fig., 2 ann.

Ramon S. (1976) – Note sur la qualité des eaux des forages des houillères de Lorraine à Créhange (Moselle). AERM, note SR/JM du 10/12/1976, 4 p.

Revol P. (2003) – Périmètre de protection du captage d'eau potable, Forage « aux Brûlés » 02697X0030/F, Propositions de l'hydrogéologue agréé. Commune de Deneuvre (54), 17 p., 2 ann.

Ricour J. (1977) – Note complémentaire sur le forage de reconnaissance de Frécourt (57), Compte rendu de surveillance des pompages d'essai de juillet 1977. Syndicat mixte de production de Pange-Nord, rapport BRGM SGR/LOR n° 77/77, 5 p., 3 ann.

Ricour J. (1983) – Protection de la nappe des grès Vosgiens en Lorraine, Diagnostic sur l'état du parc de forages profonds sollicitant l'aquifère des grès de Trias sous couverture, Analyse des conséquences et des mesures de sauvegarde à mettre en œuvre. Rapport BRGM SGR/LOR n° 83/97, 13 p., 4 ann.

Ricour J., Marcer J. (1977) – Rapport de surveillance de l'exécution d'un sondage de reconnaissance aux grès du Buntsandstein et des pompages d'essai finaux sur le ban de la commune de Frécourt. Syndicat mixte de production de Pange-Nord, rapport BRGM 77 SGN 333 LOR, 9 p., 3 fig., 1 ann.

Roubault M., Dague P. (1967) – Forage à la nappe du Grès vosgien (Société le Forage Rationnel), Juillet-août 1966. Commune d'Einville-au-Jard (54), 9 p.

Rousson D. (2006) – SIE de Manonviller Ogeviller (UGE 0165), Exposition de la situation devant le comité syndical (séance plénière) et des résultats des études menées le 14 décembre 2006 sur le forage. Compte rendu SIE de Manonviller Ogeviller, 3 p.

SIF-BACHY (1976) – Situation de pompage de Bulgnéville, Reconnaissance par télévision du 28 octobre 1976. Commune de Bulgnéville, note AE.DM n° 6190 CHA.263, 8 p.

Simler L. (1973) – Alimentation complémentaire en eau potable, Forage n° II, Rapport final de surveillance hydrogéologique. Commune de Longeville-lès-Saint-Avold, rapport SGAL, 12 p., 8 ann.

Simler L. (1974) – Implantation d'un nouveau forage pour l'alimentation en eau potable du Syndicat des eaux de Seingbouse (57). DDAF 57, rapport SGAL, 5 p., 1 ann.

Simler L. (1976) – Rapport de surveillance géologique du forage de Bettin-lès-Saint-Avold. Syndicat des eaux de Seingbouse (57), rapport SGAL, 8 p., 7 ann.

Simler L., de Sèze R. (1966) – Note géologique concernant les perturbations observées au forage de Longeville-lès-Saint-Avold (Moselle). Commune de Longeville-lès-Saint-Avold, rapport SGAL, 6 p., 3 ann.

Simler L., de Sèze R., Babot Y. (1966) – Forage n° 29 et forage de Hombourg-Haut, Essais de pompage. Houillères du Bassin de Lorraine, rapport SGAL, 8 p., 4 ann.

Talbot A., Babot Y., Garadi A., Masquelier Q. (2002) – Atlas hydrogéologique du bassin Rhin-Meuse. AERM, 128 p.

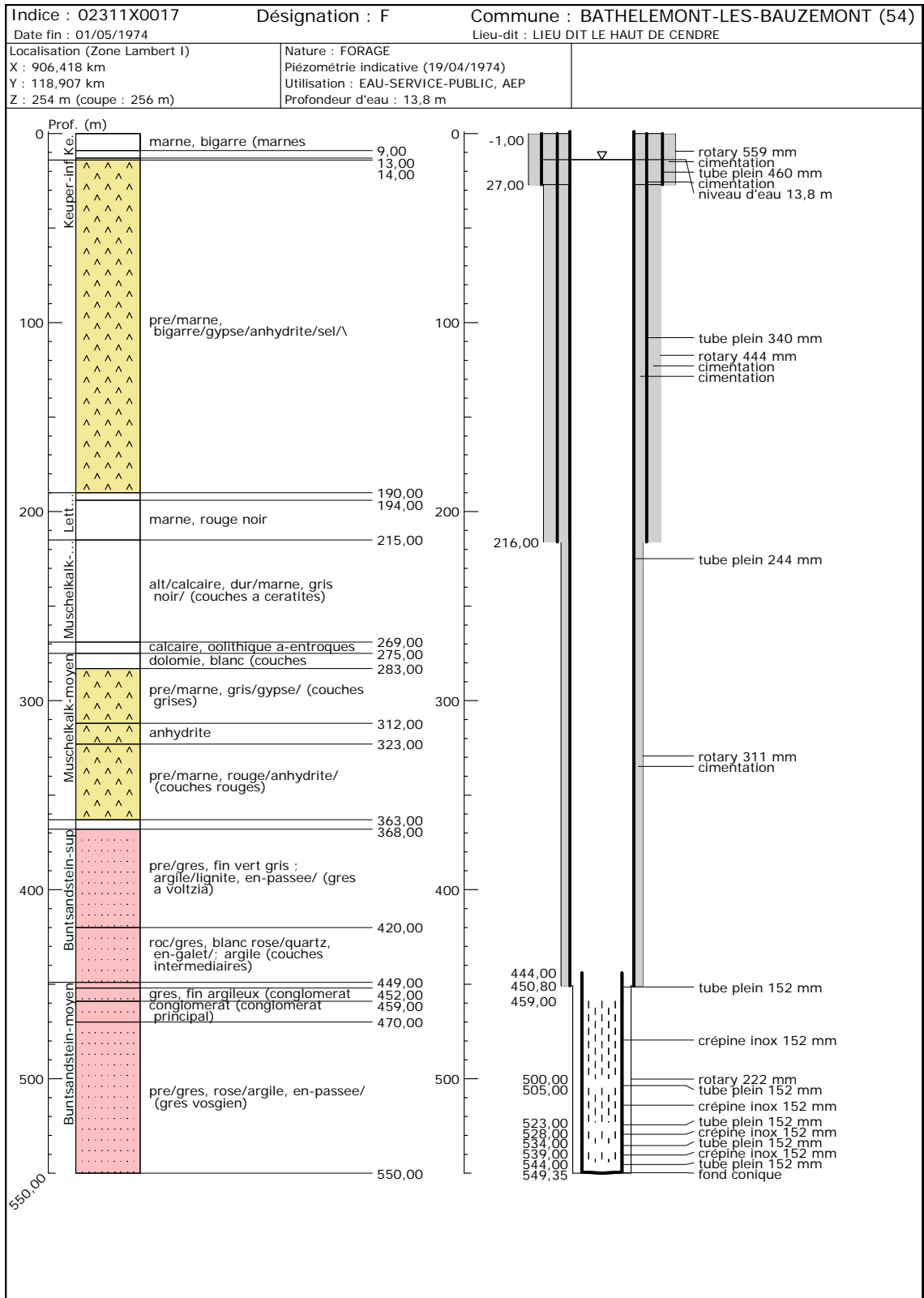
Thomas A., Rucquoi D., Le Roux J., Dabonville J.P., Gury M., Florentin L., Nys C., Thiebaut J.P., Flageollet J-C., Billoret R., Guillaume Ch., Vincent P. L., Haguenauber B., Timbal J., Ricour J. (1978) – Feuille géologique n°230 à 1/50 000^e de Nancy.

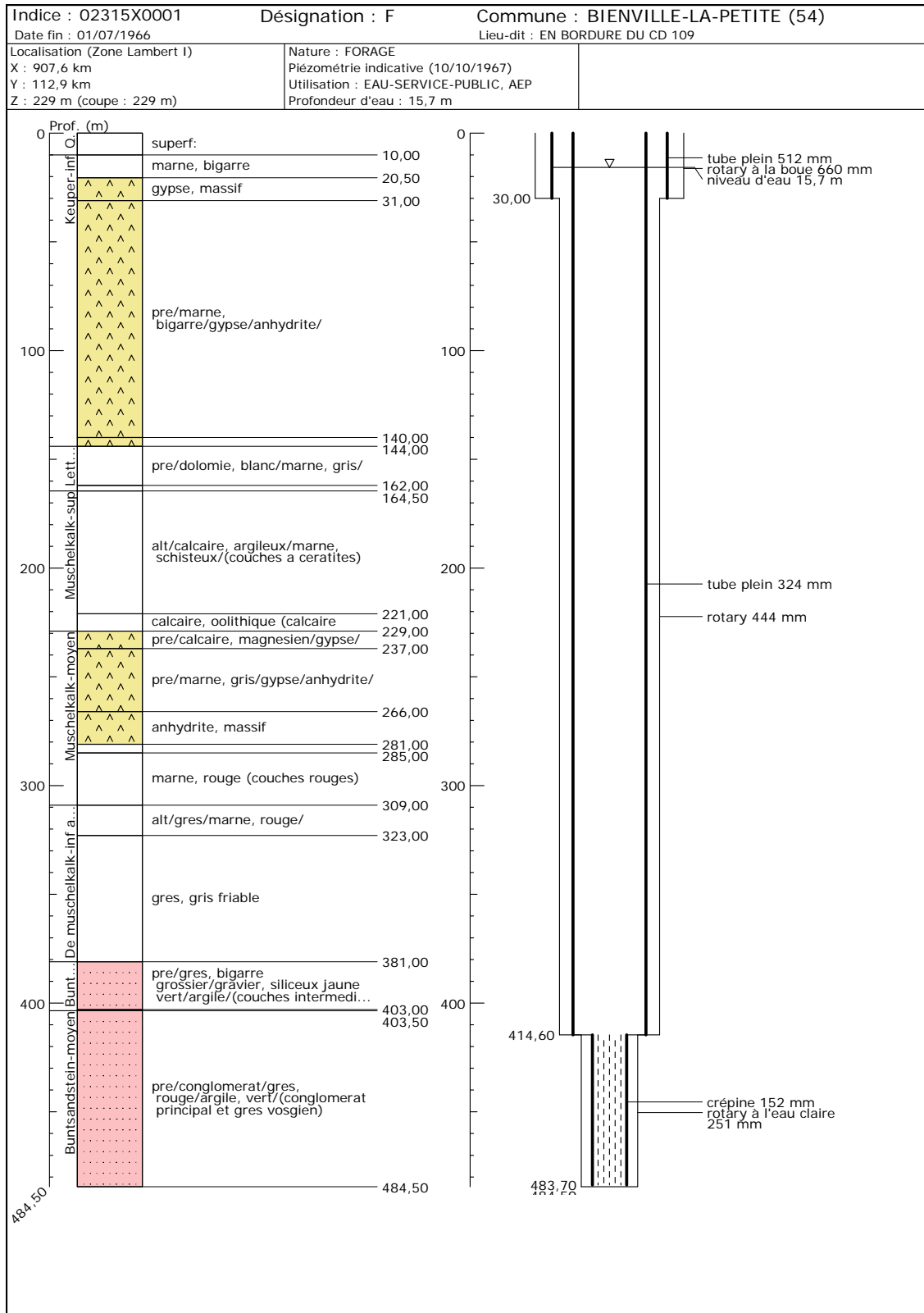
Vaute L., Gigneux S., Nguyen-Thé D. (2007) – Eaux souterraines du département des Vosges : caractérisation des principales ressources exploitables et révision du modèle de gestion de la nappe des grès du Trias inférieur. Rapport BRGM/RP-55653-FR, 147 p., 62 fig., 9 tabl., 3 ann.

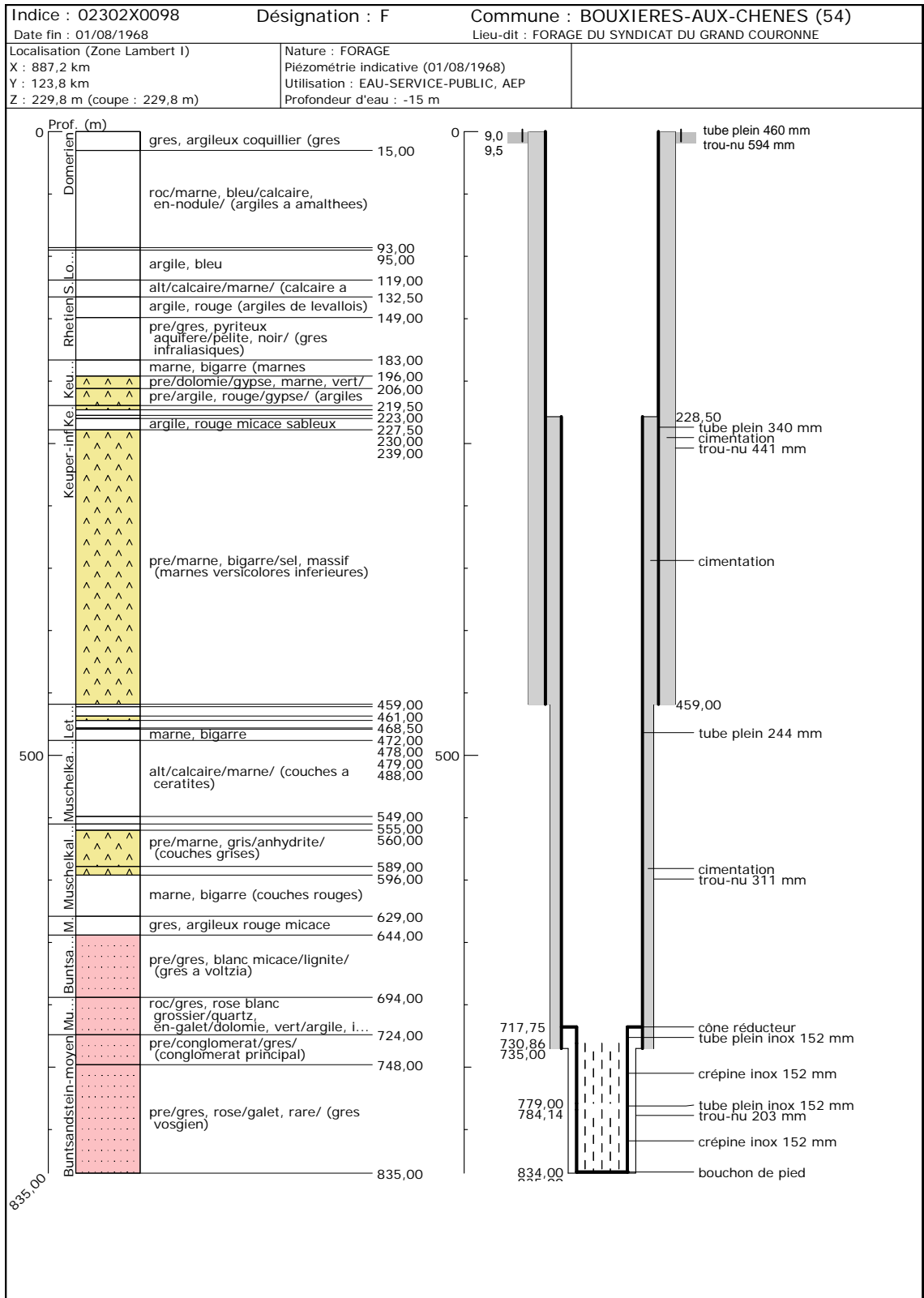
Vinson J. (2006) – SIE de Manonviller, Compte rendu de la réunion du 28/08/2006. Compte rendu DDAF 54, 4 p.

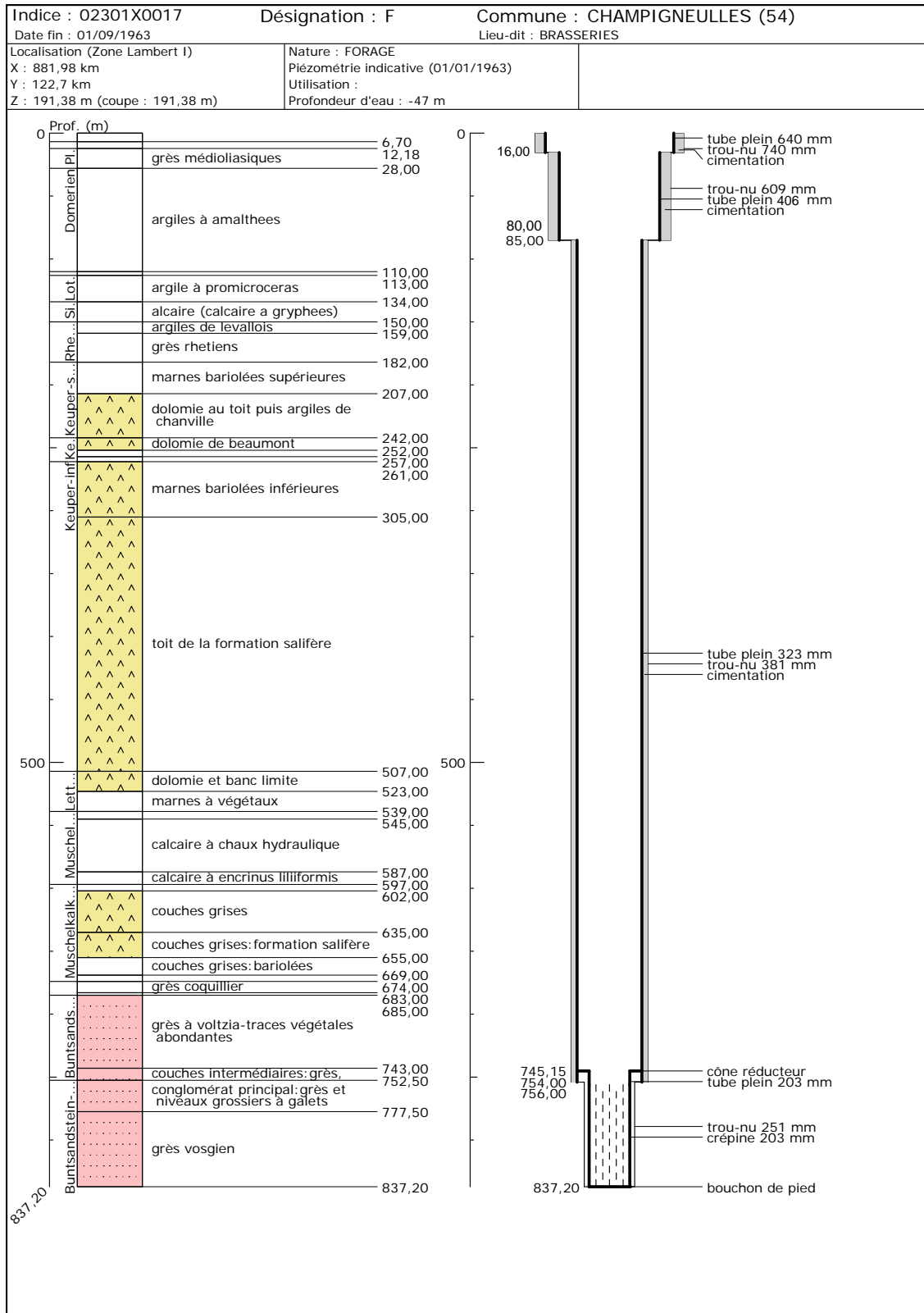
Annexe 1

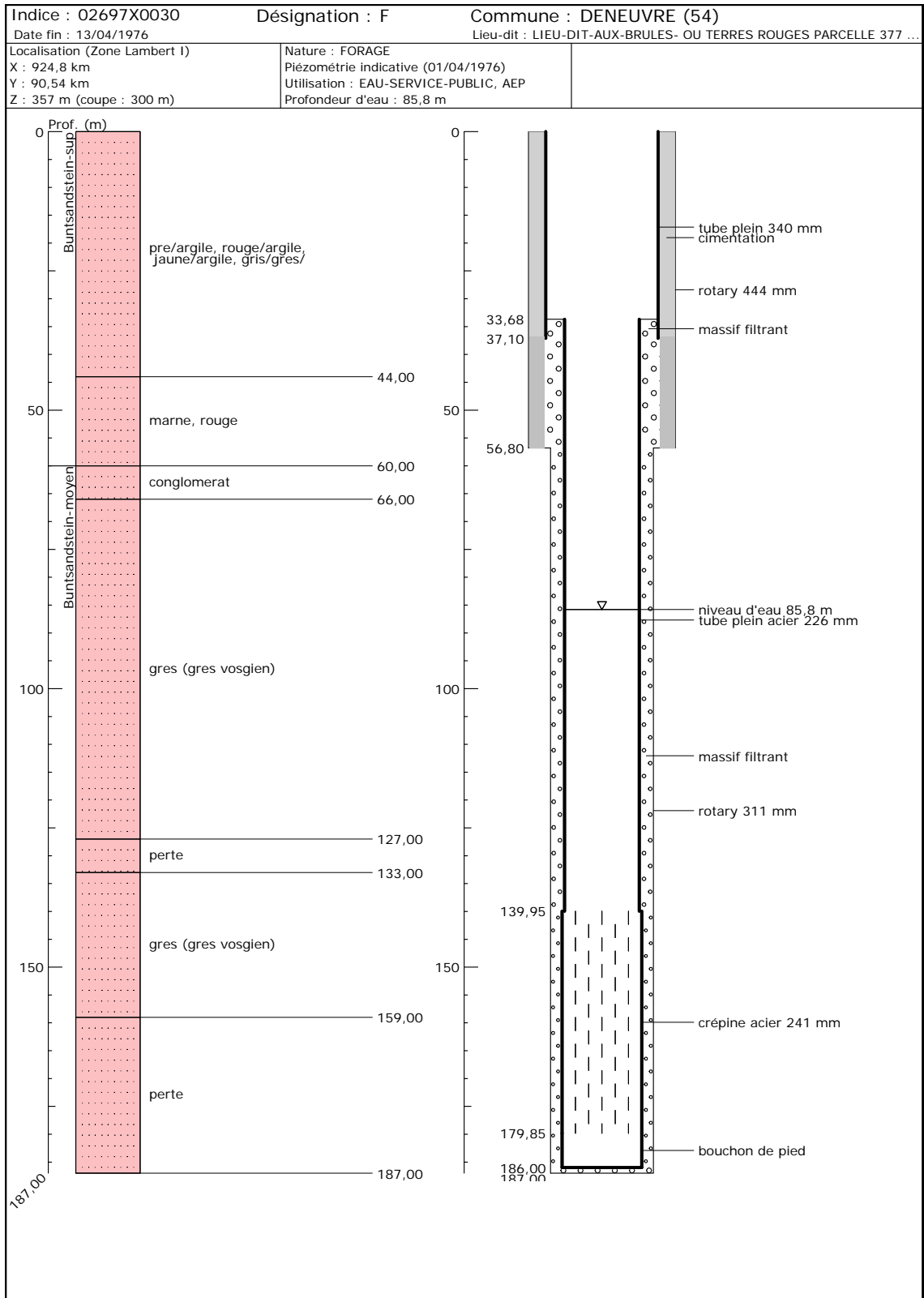
Coupes des forages de Meurthe-et-Moselle (classées par commune puis par code BSS)

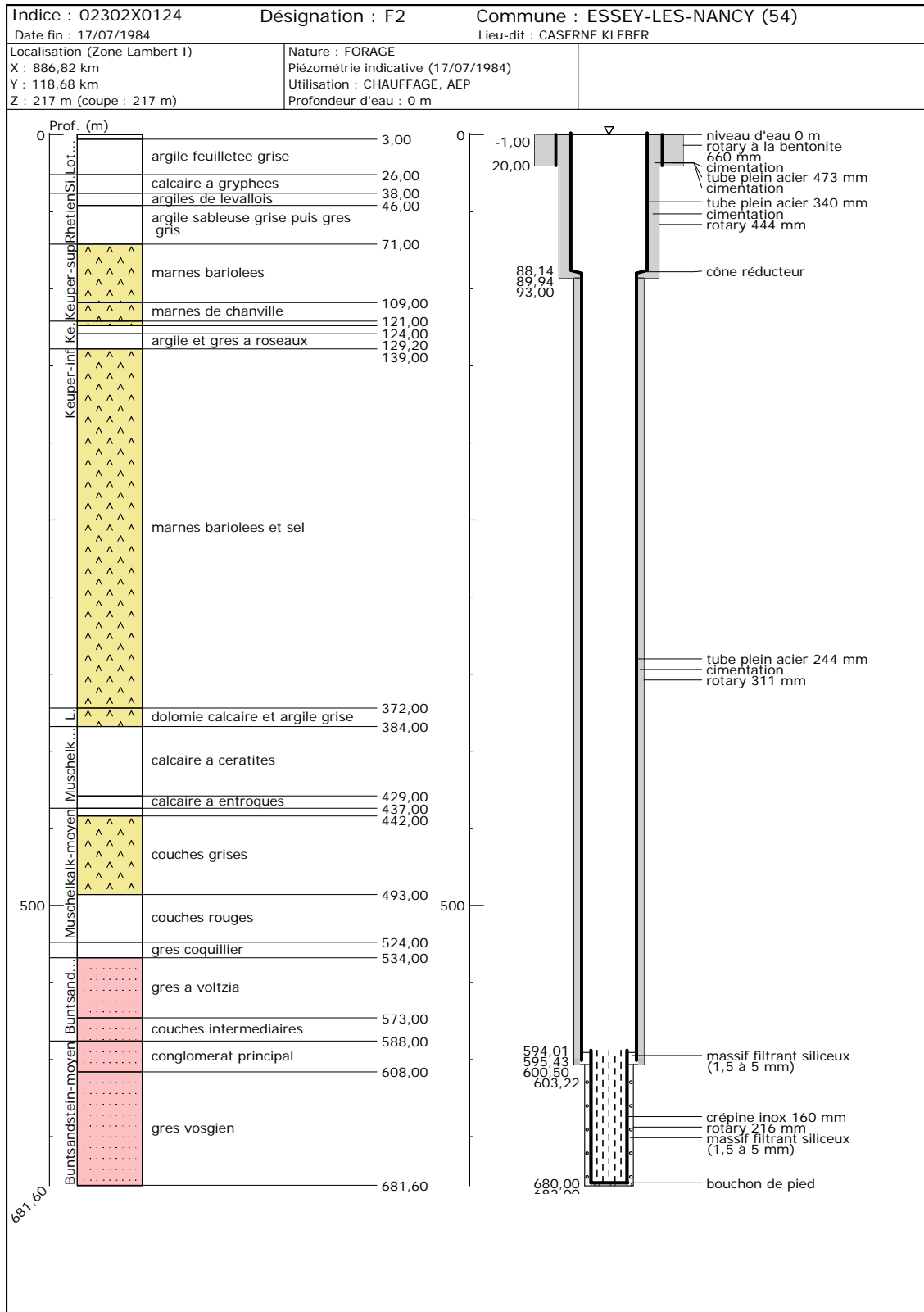


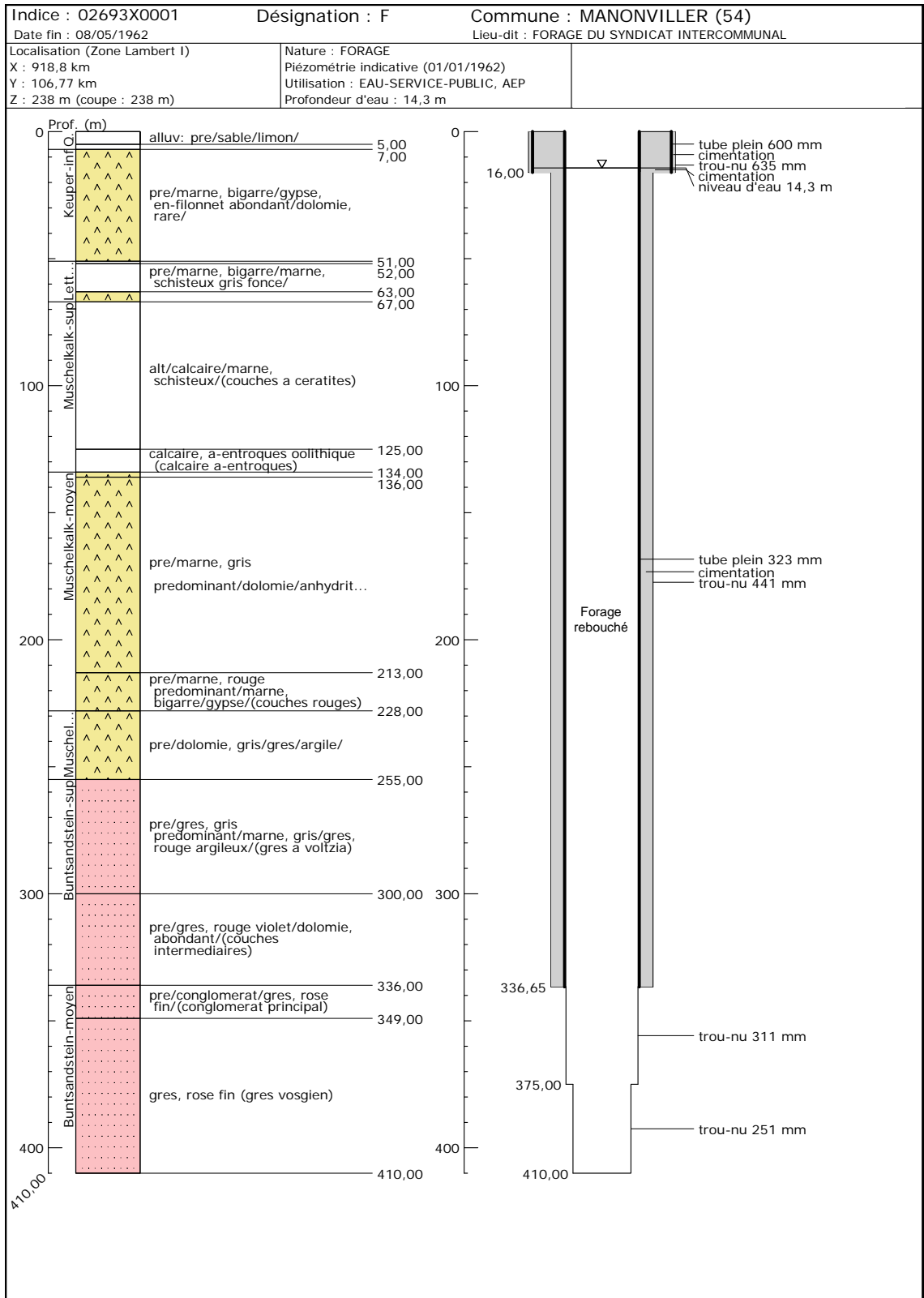


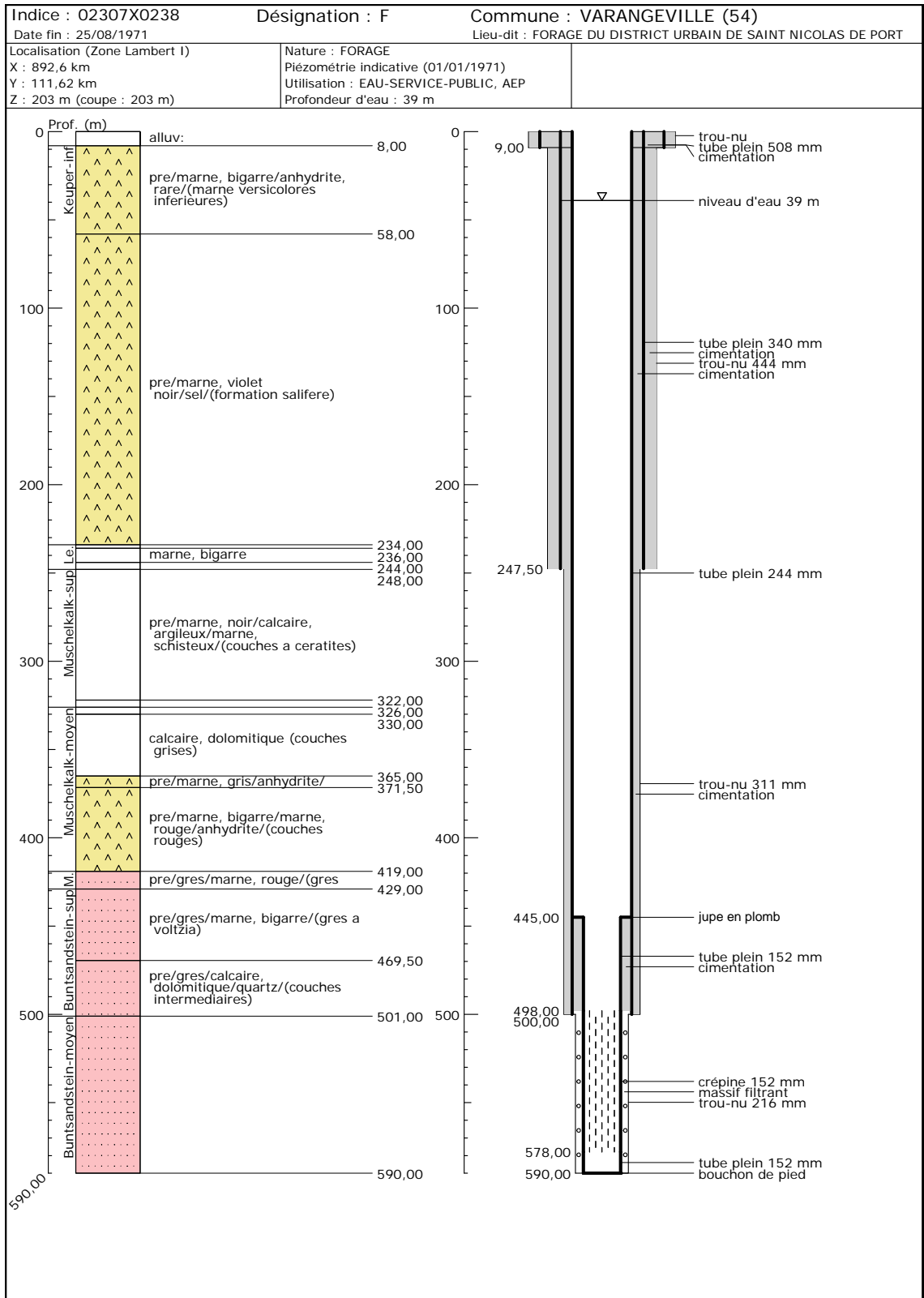






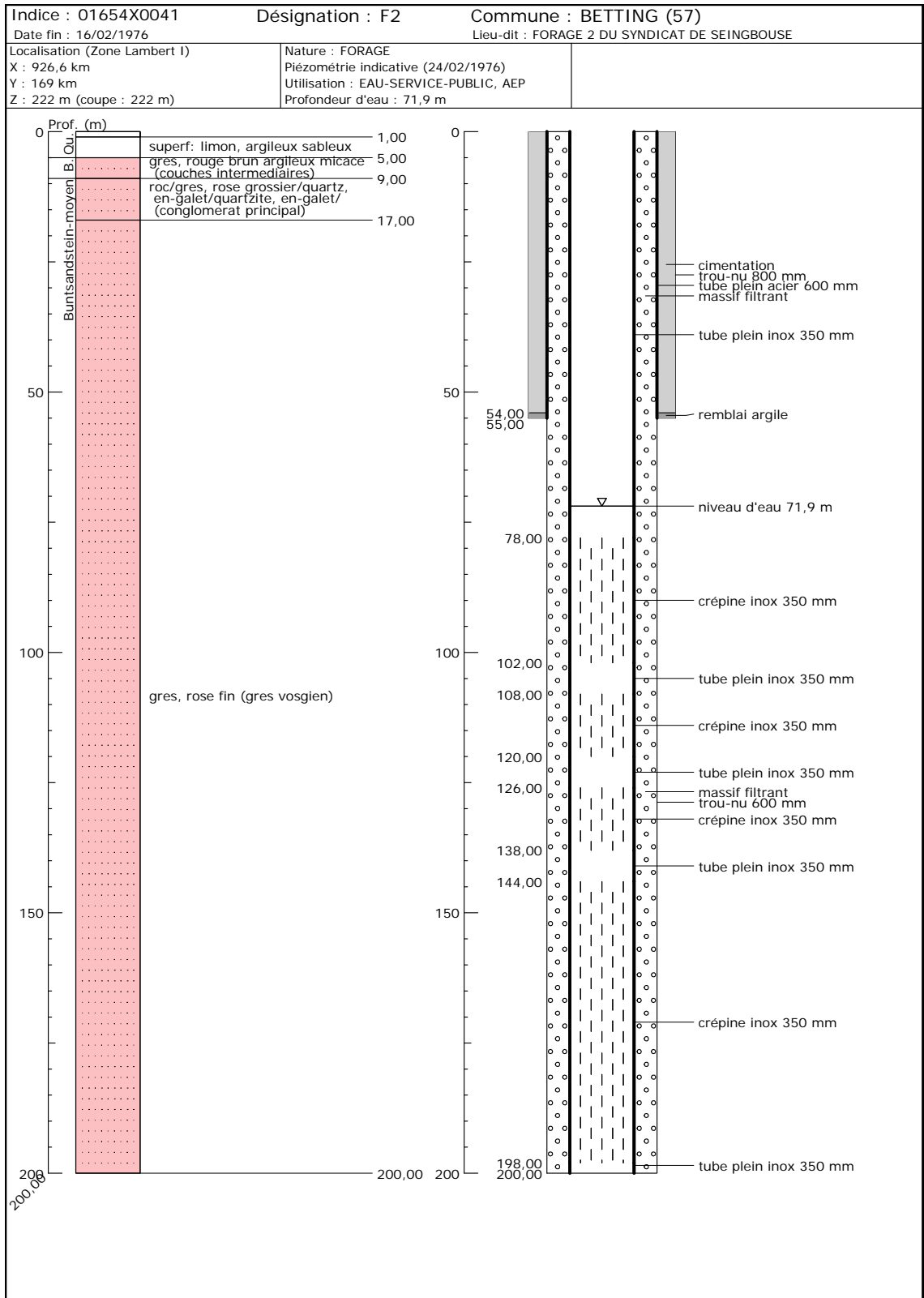


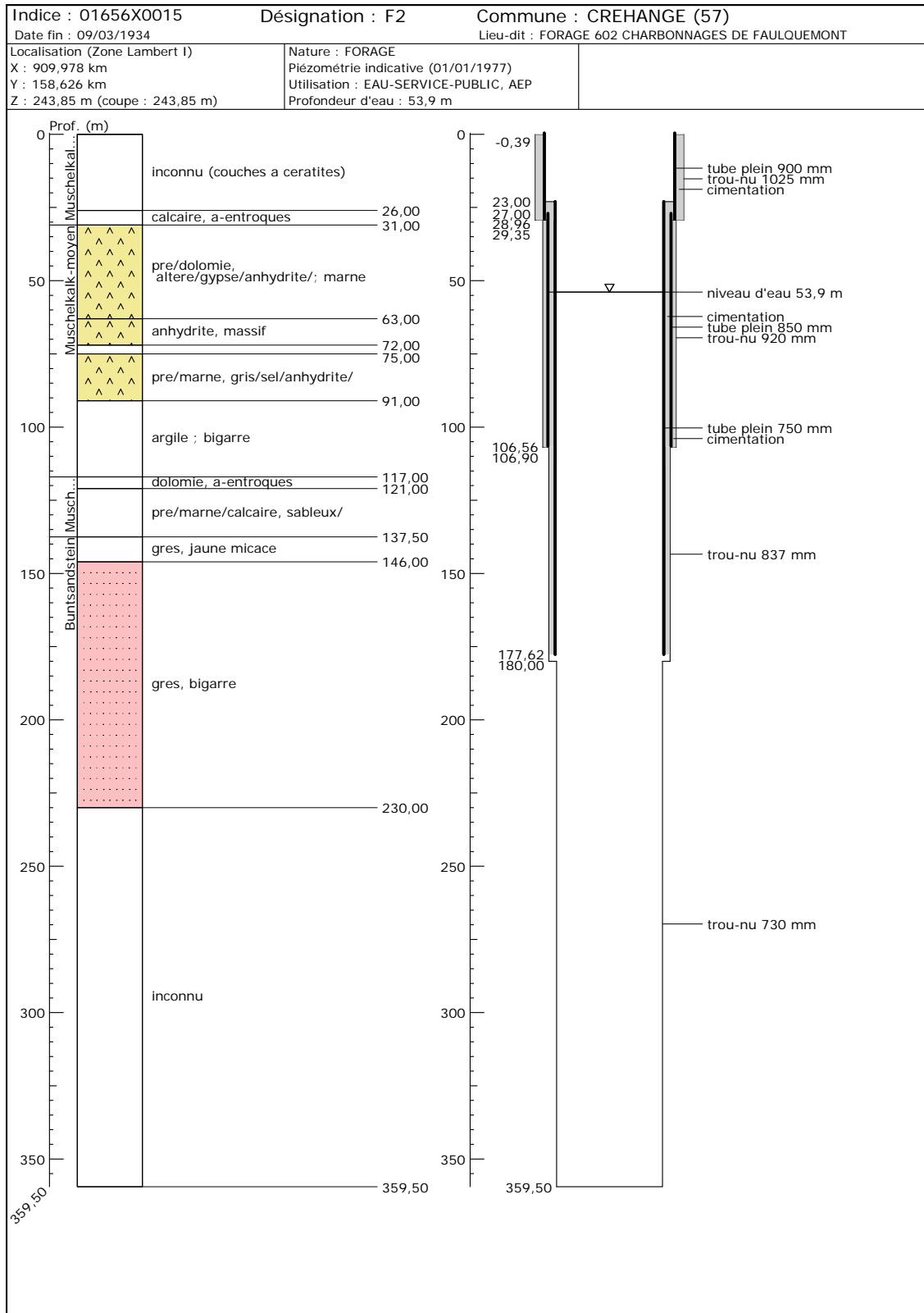


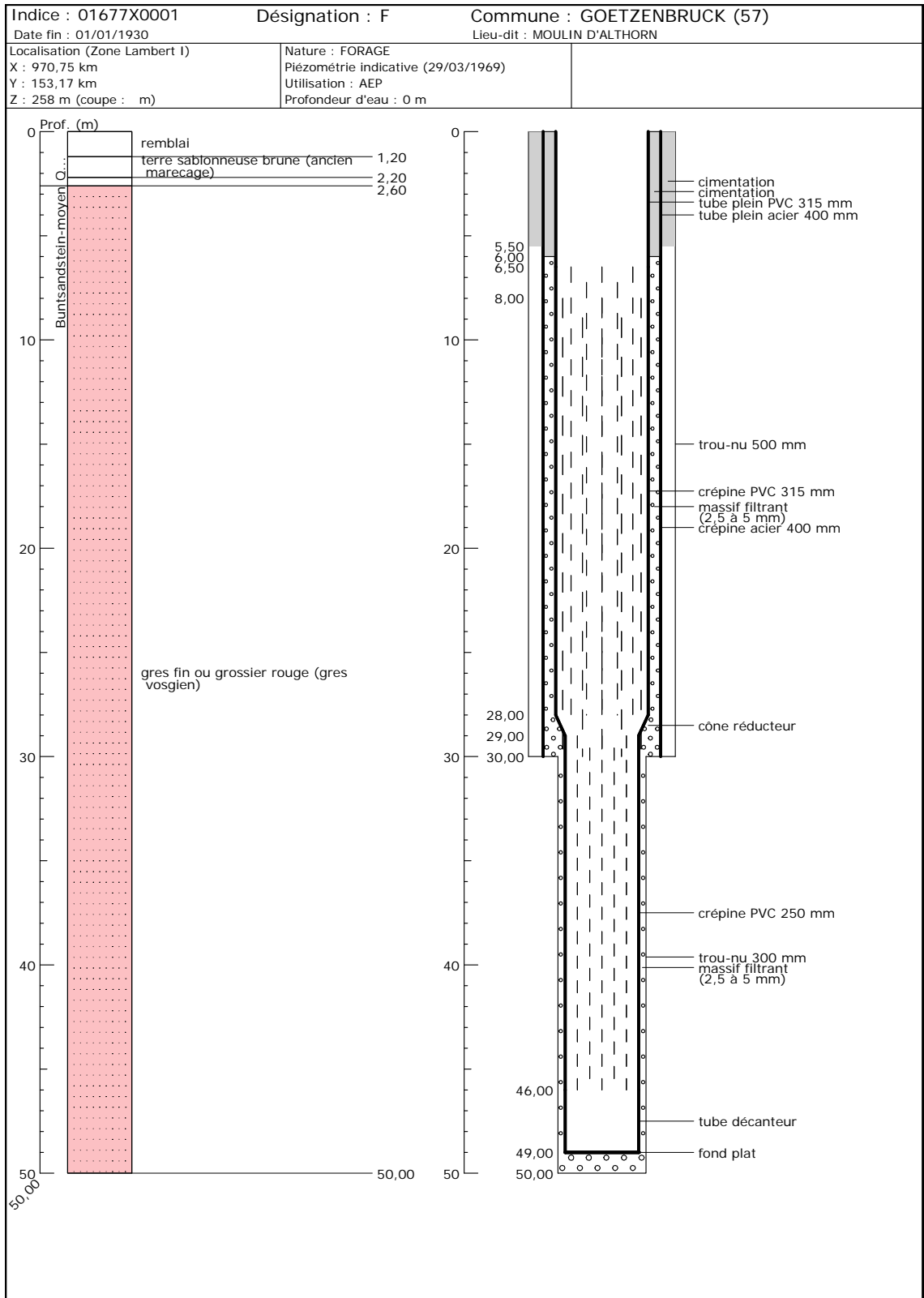


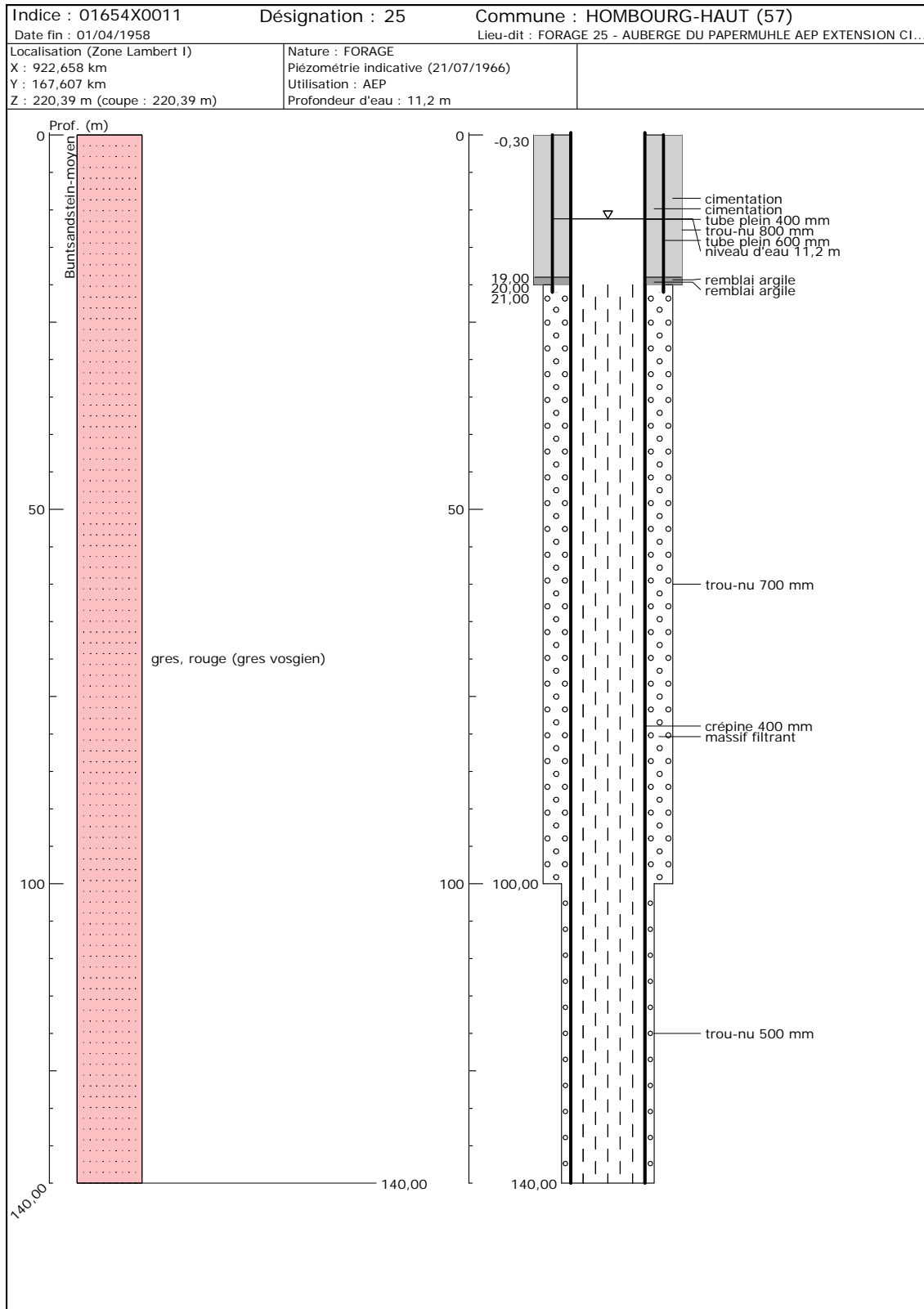
Annexe 2

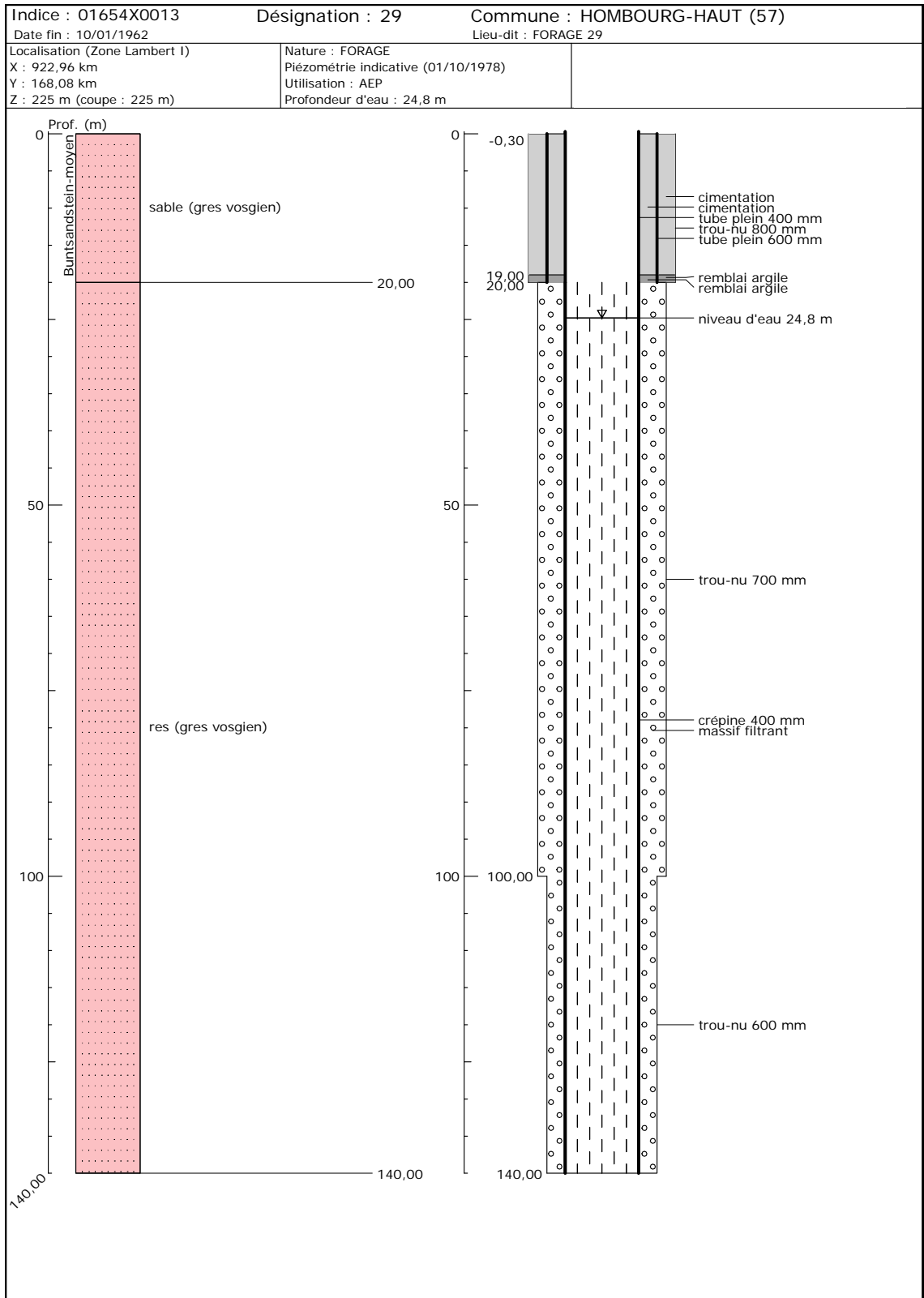
Coupes des forages de la Moselle (classées par commune puis par code BSS)

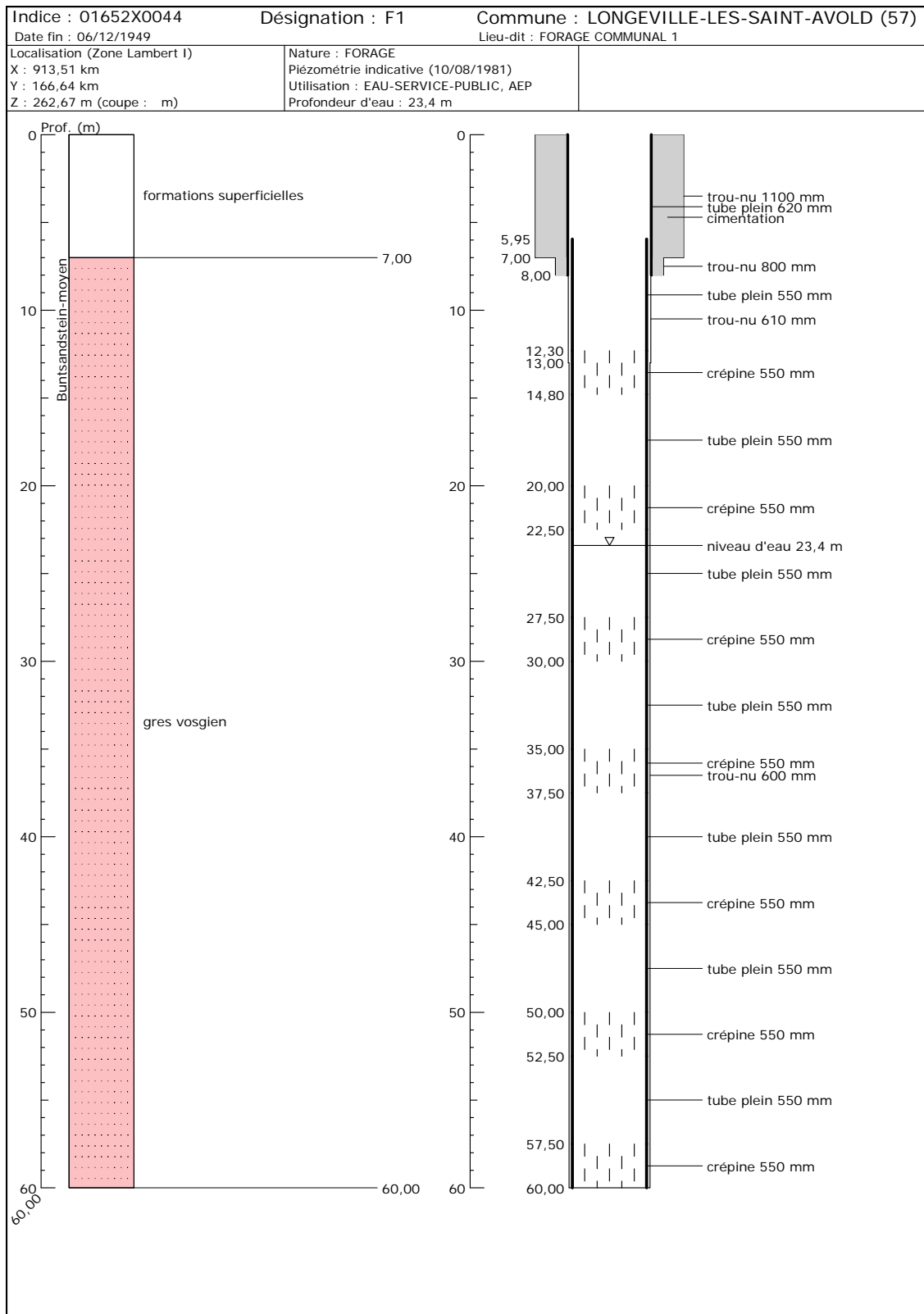


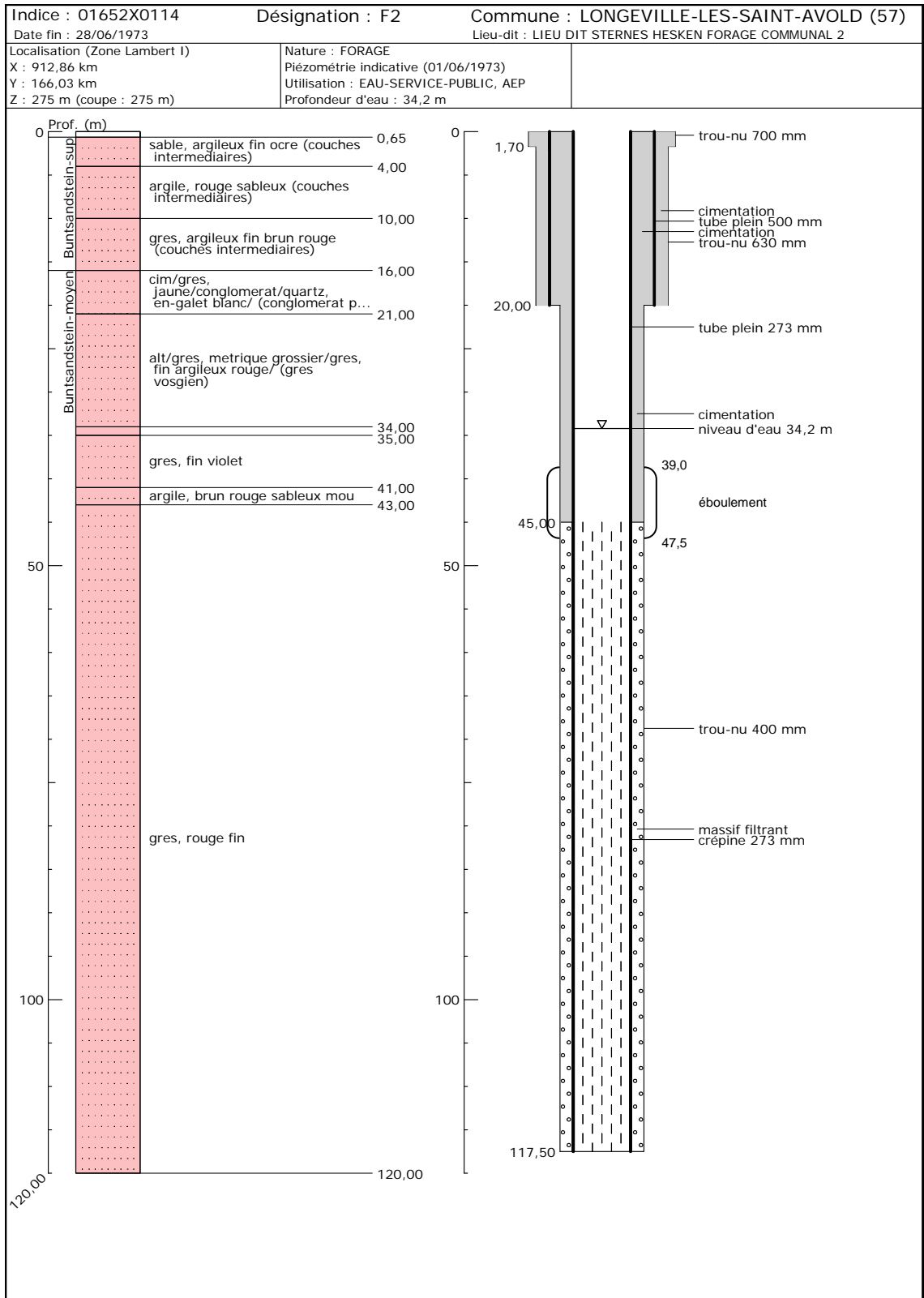


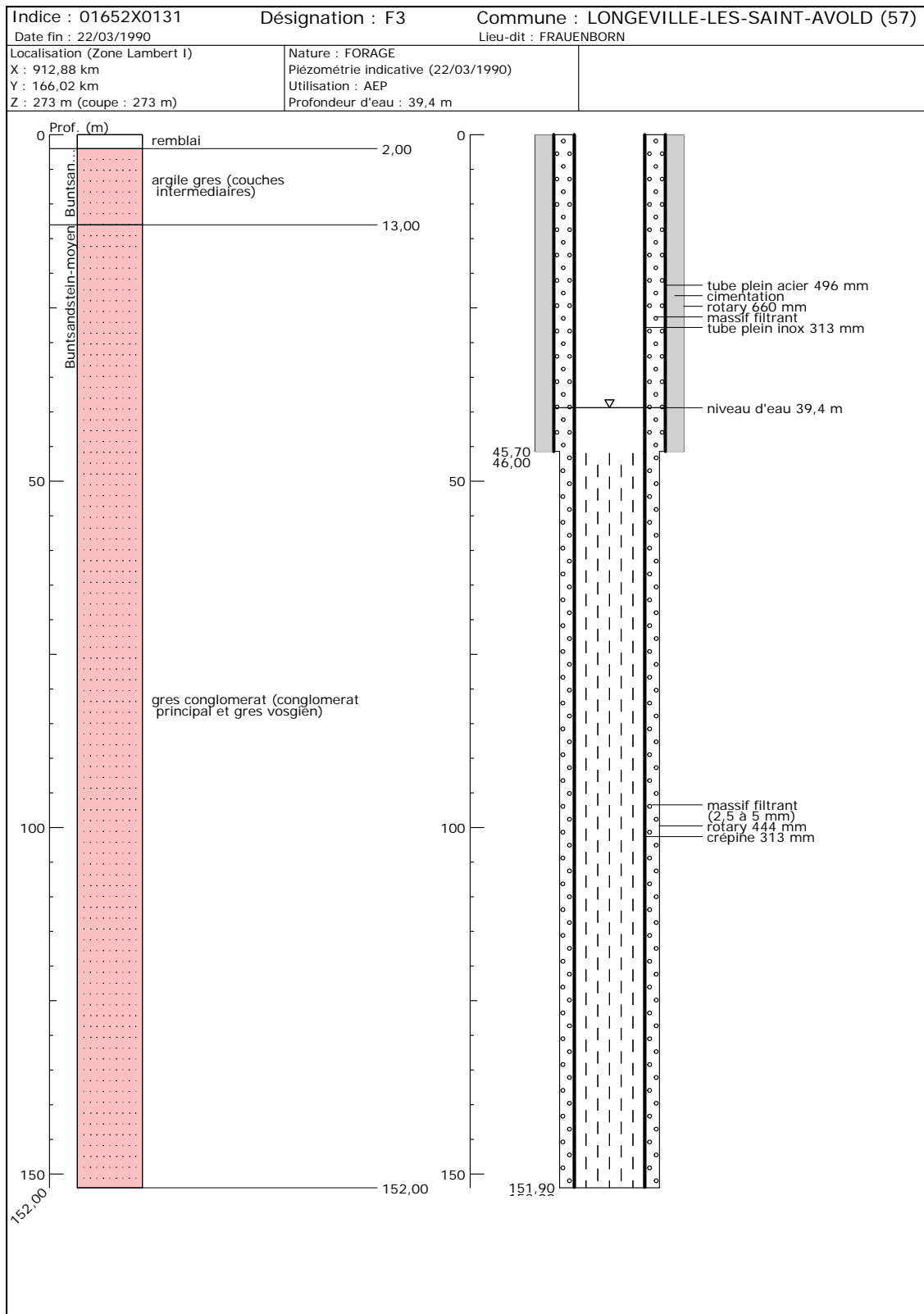


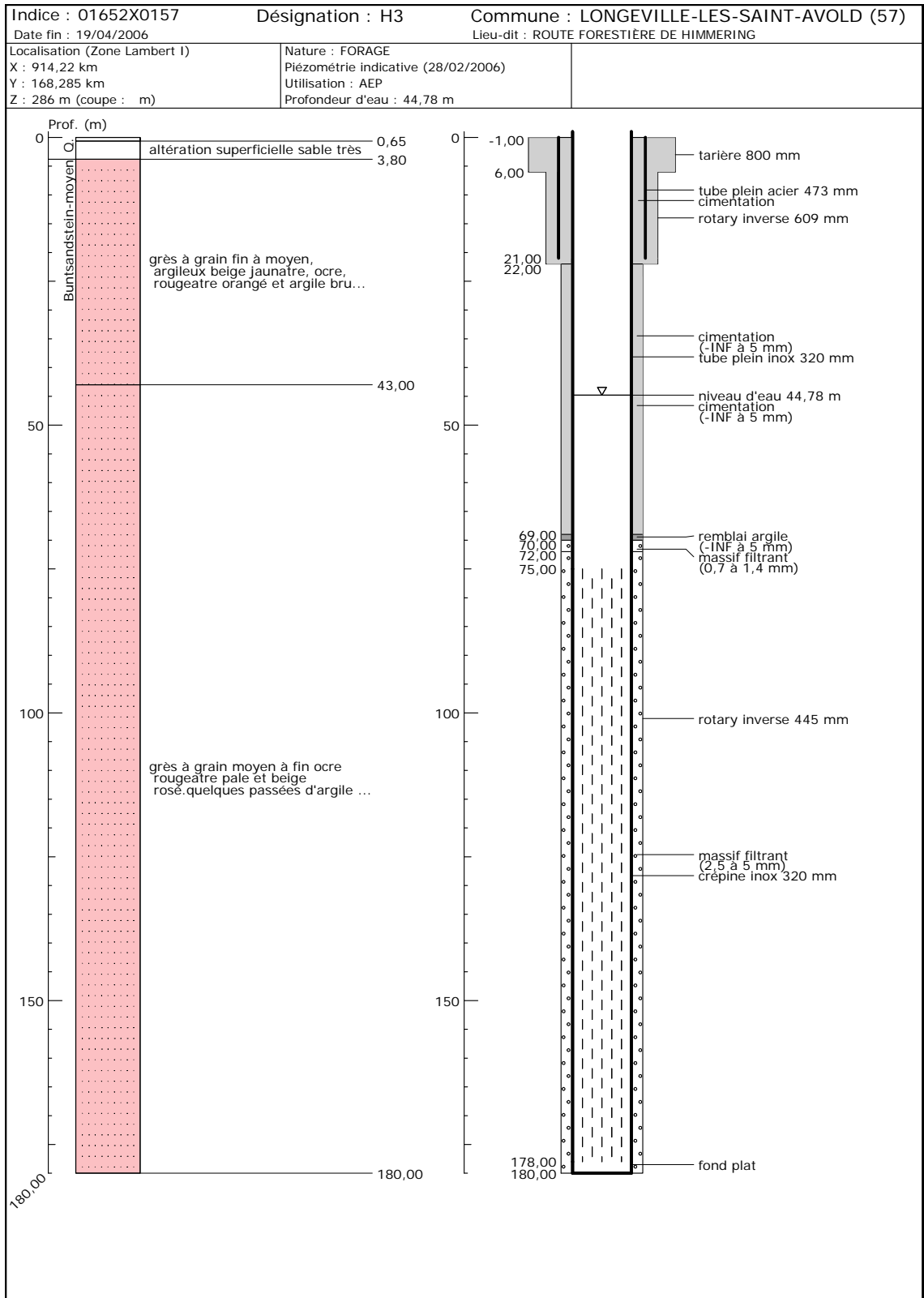


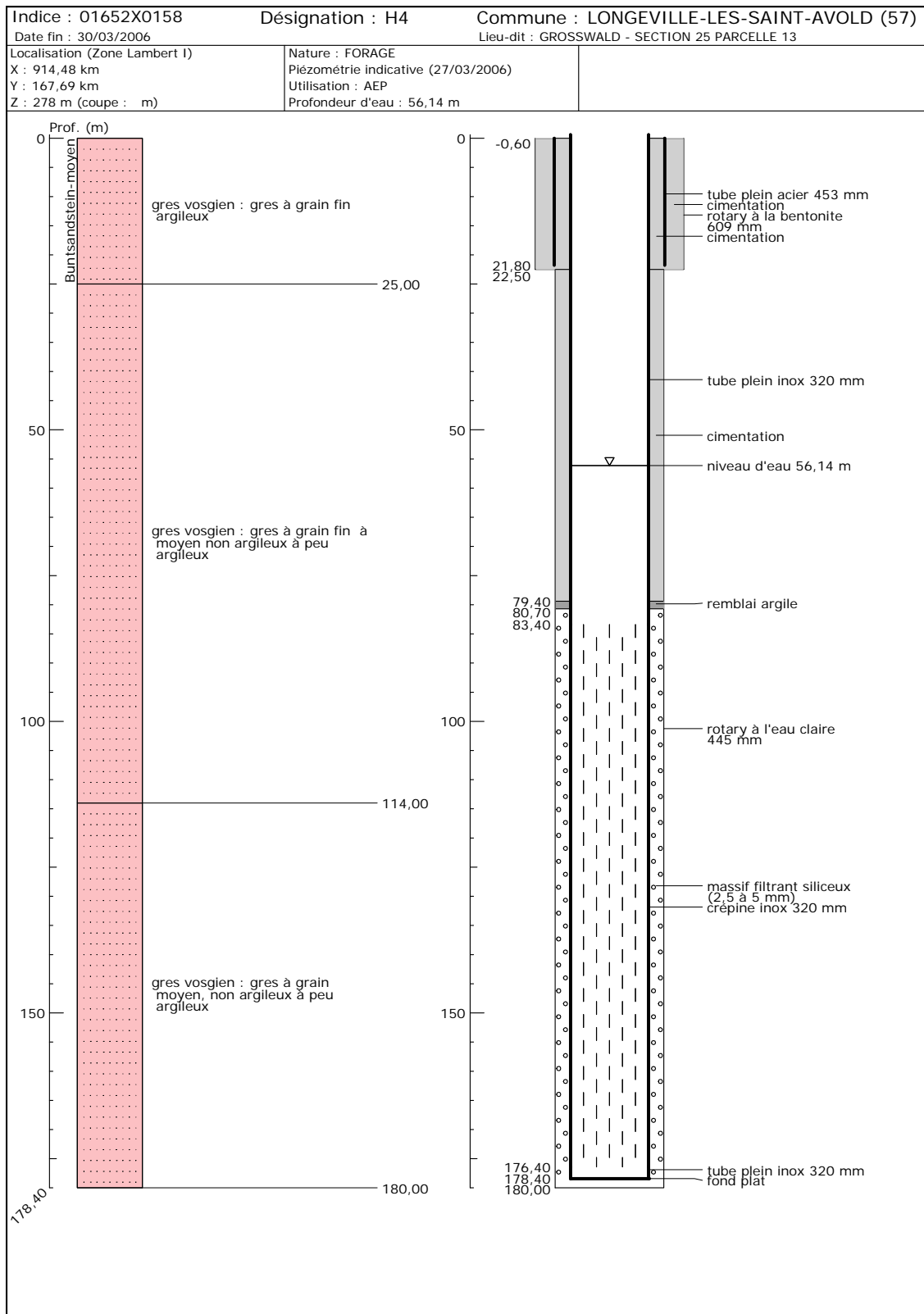


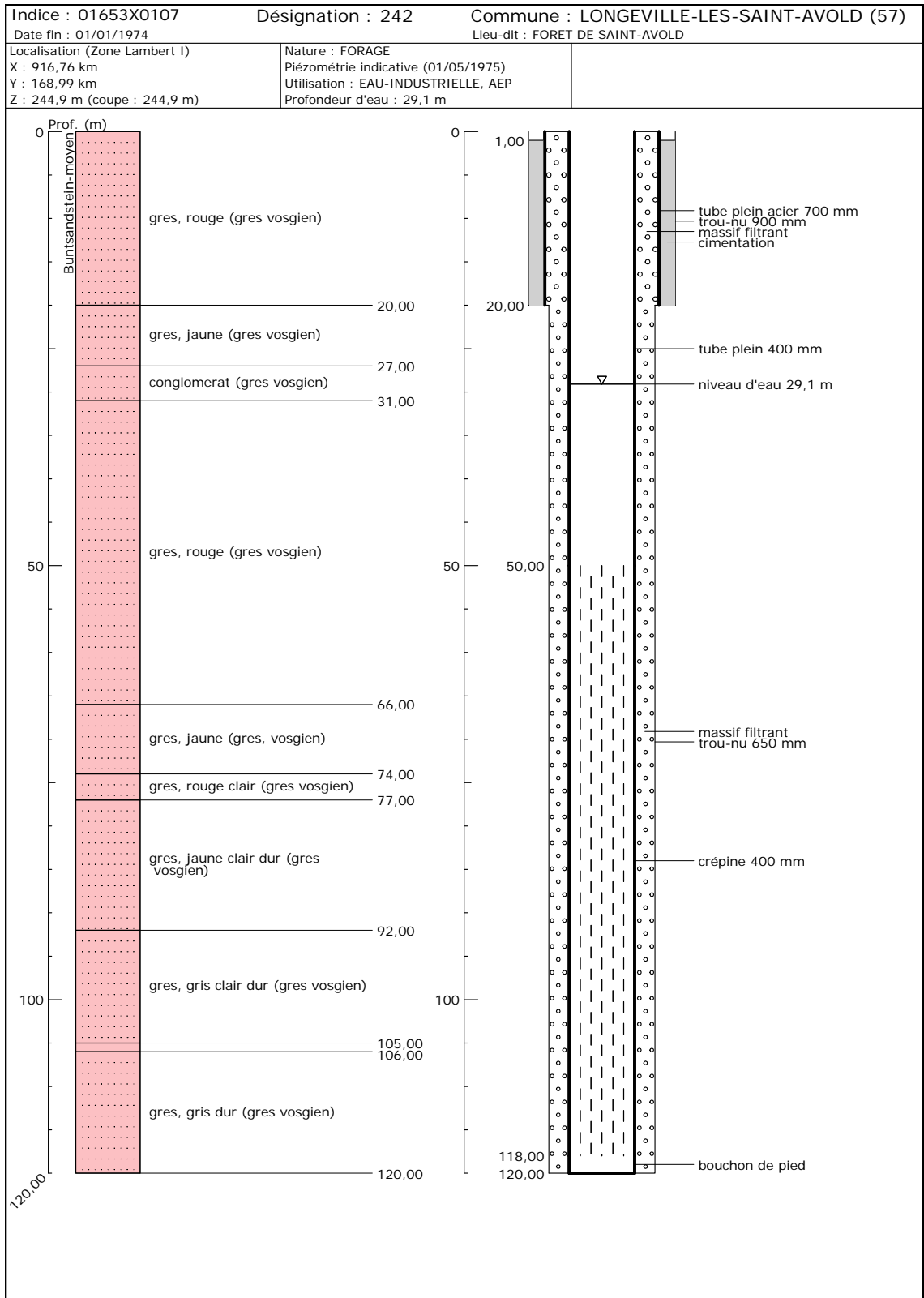


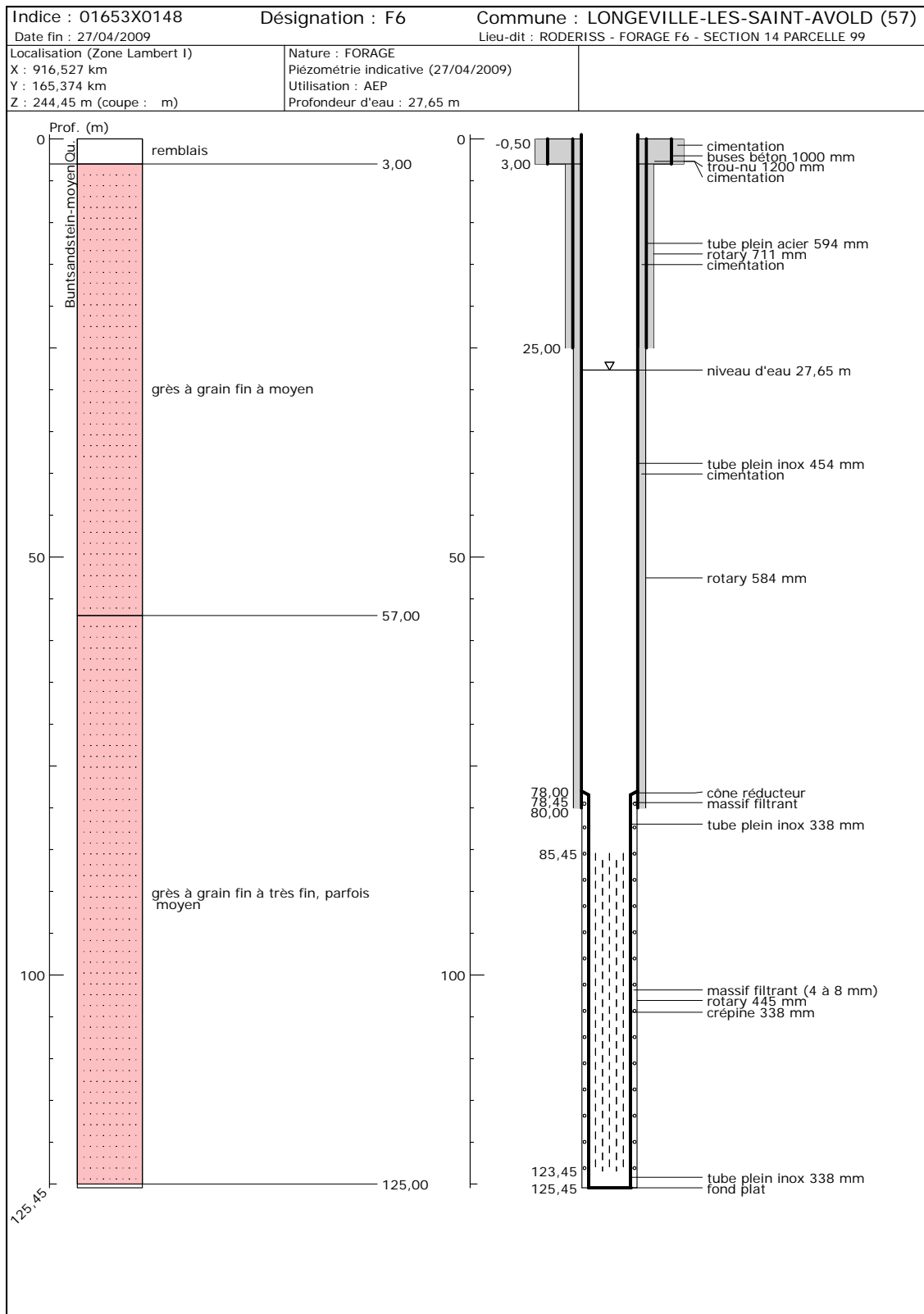


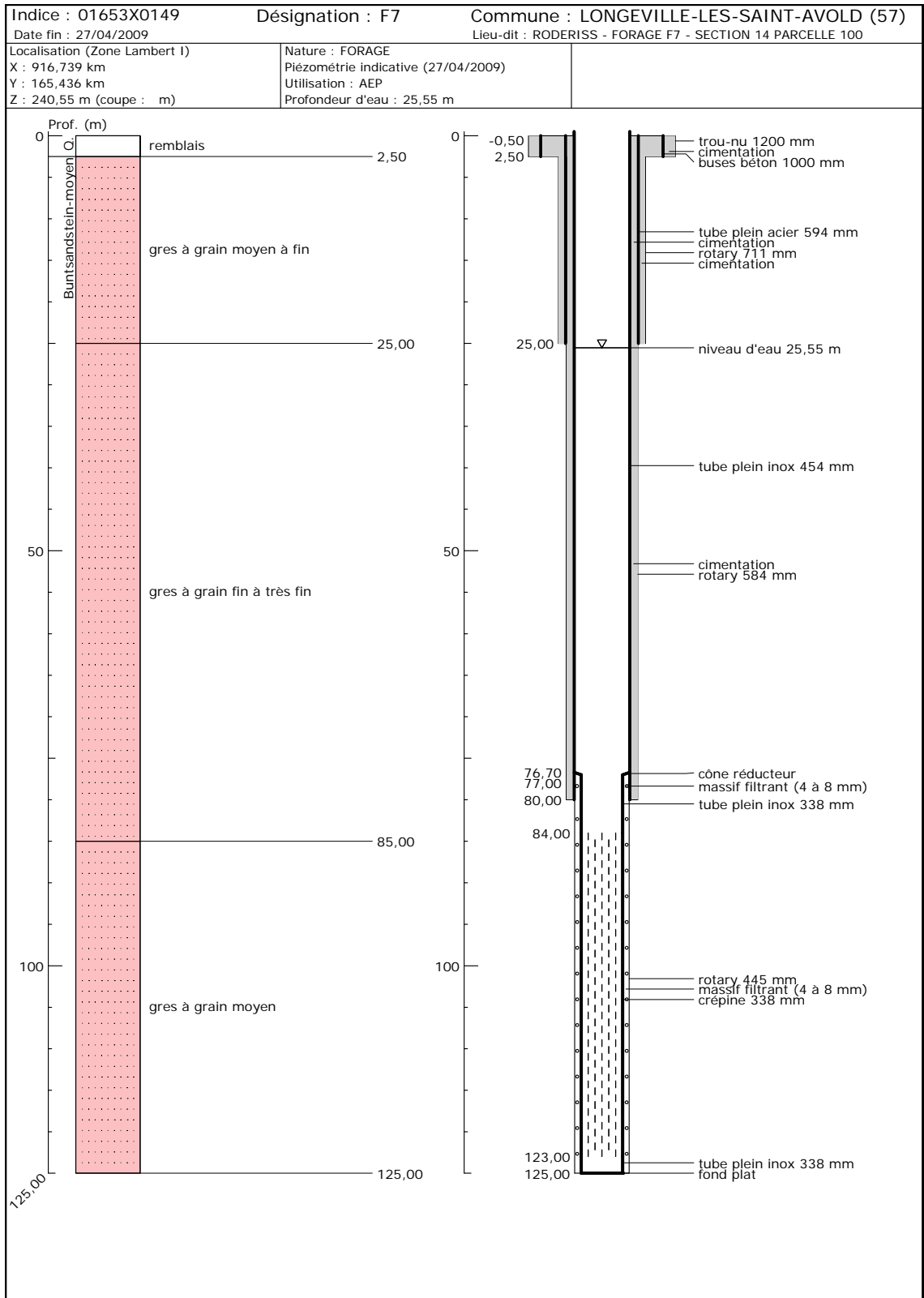


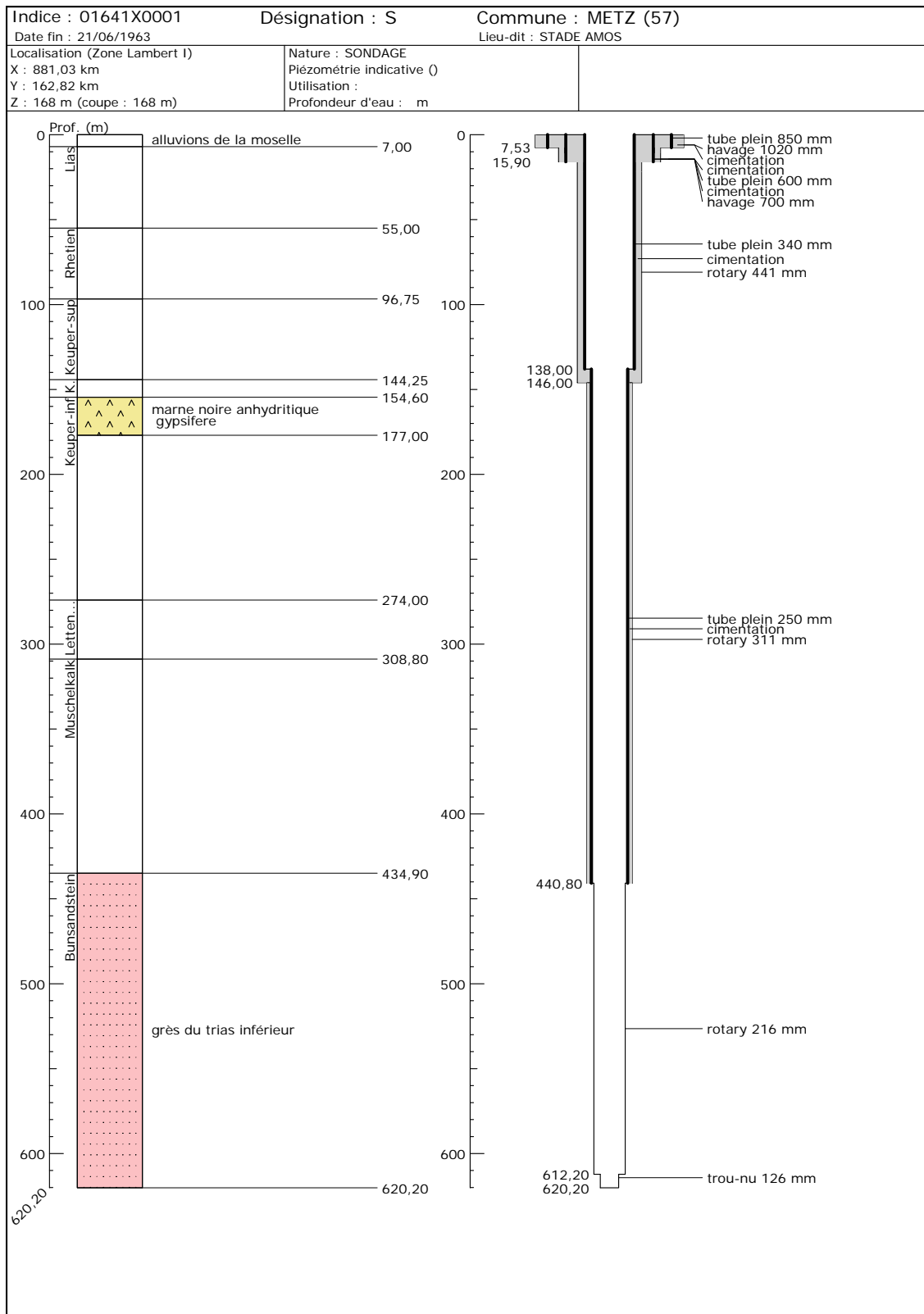


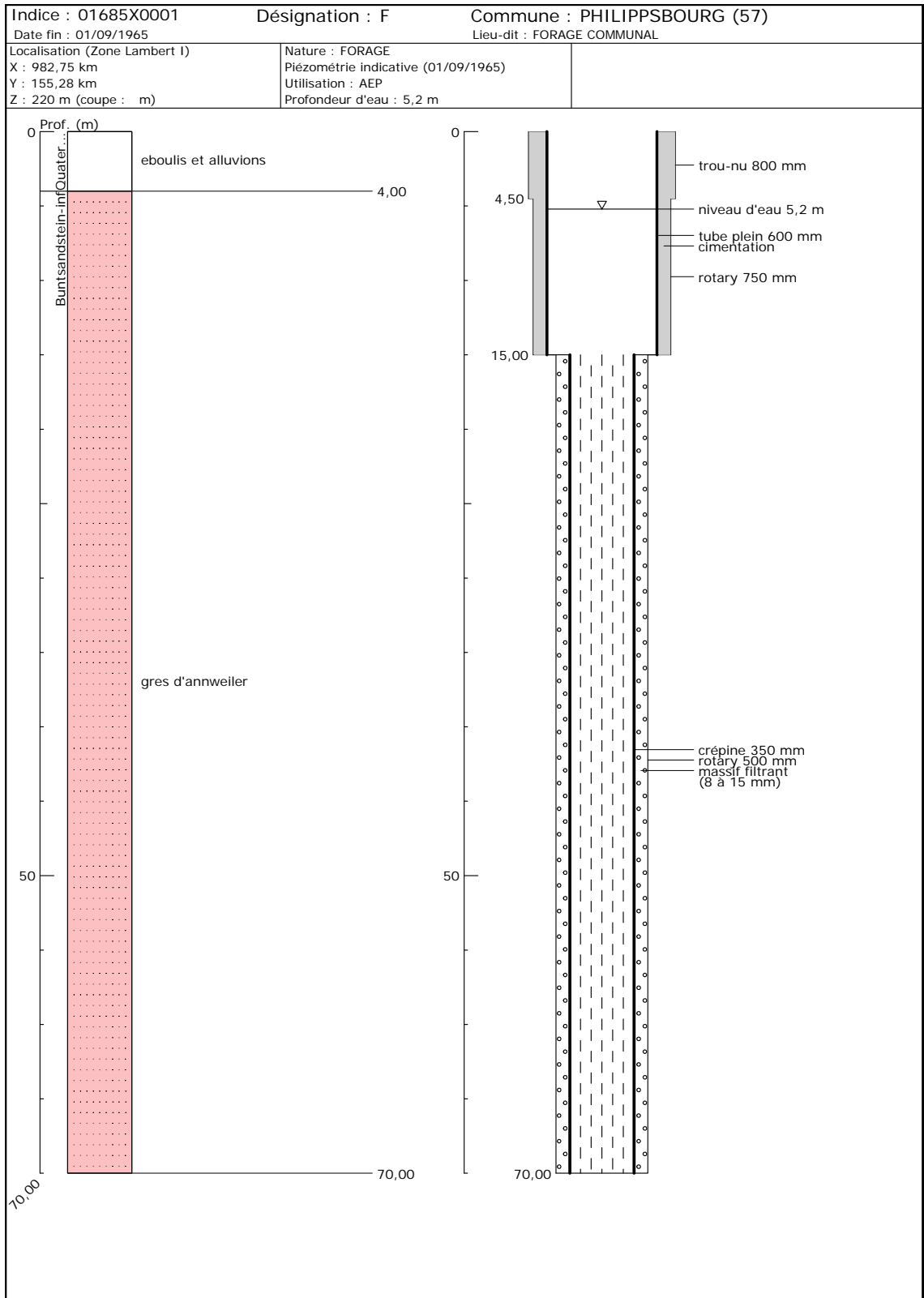


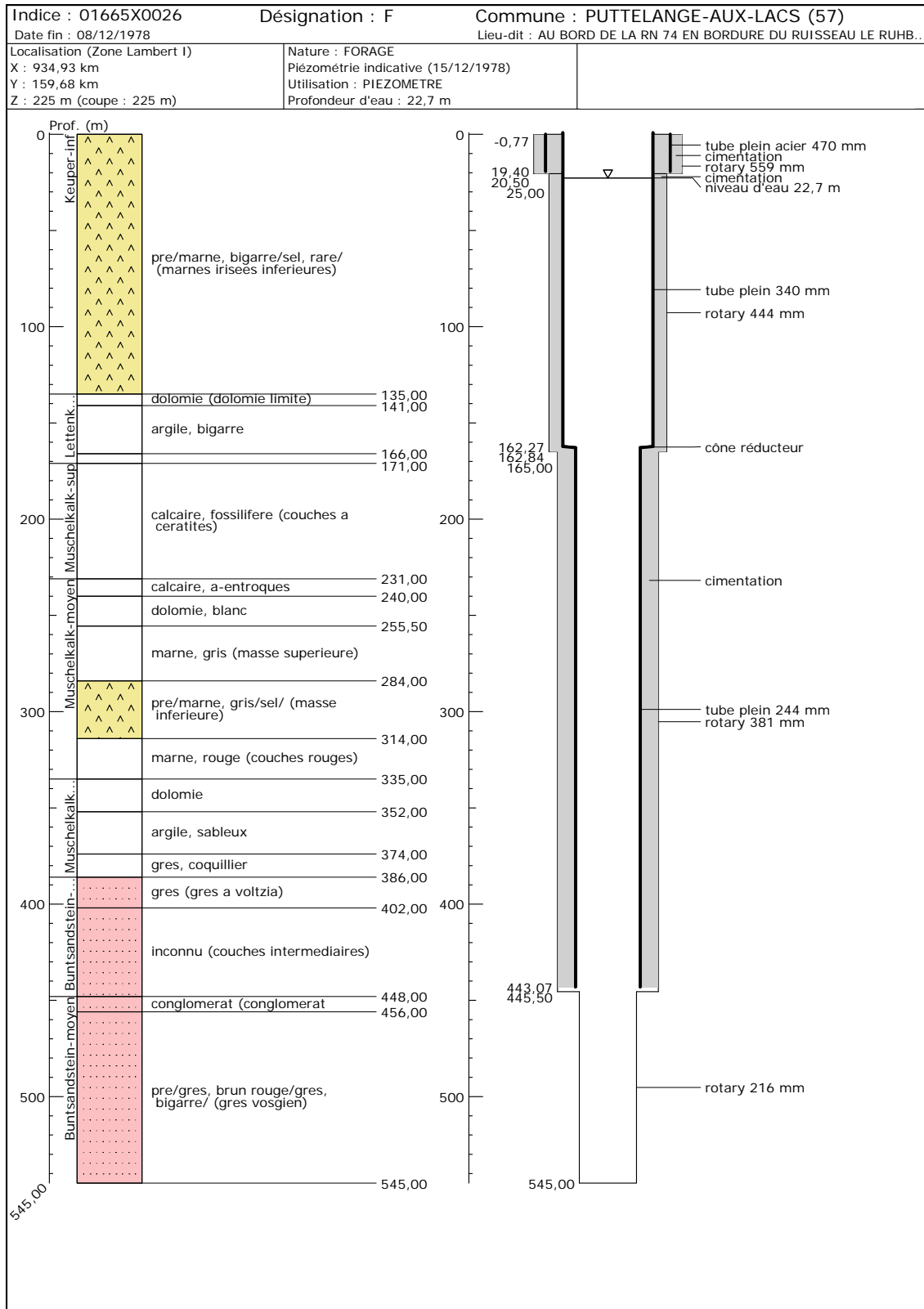


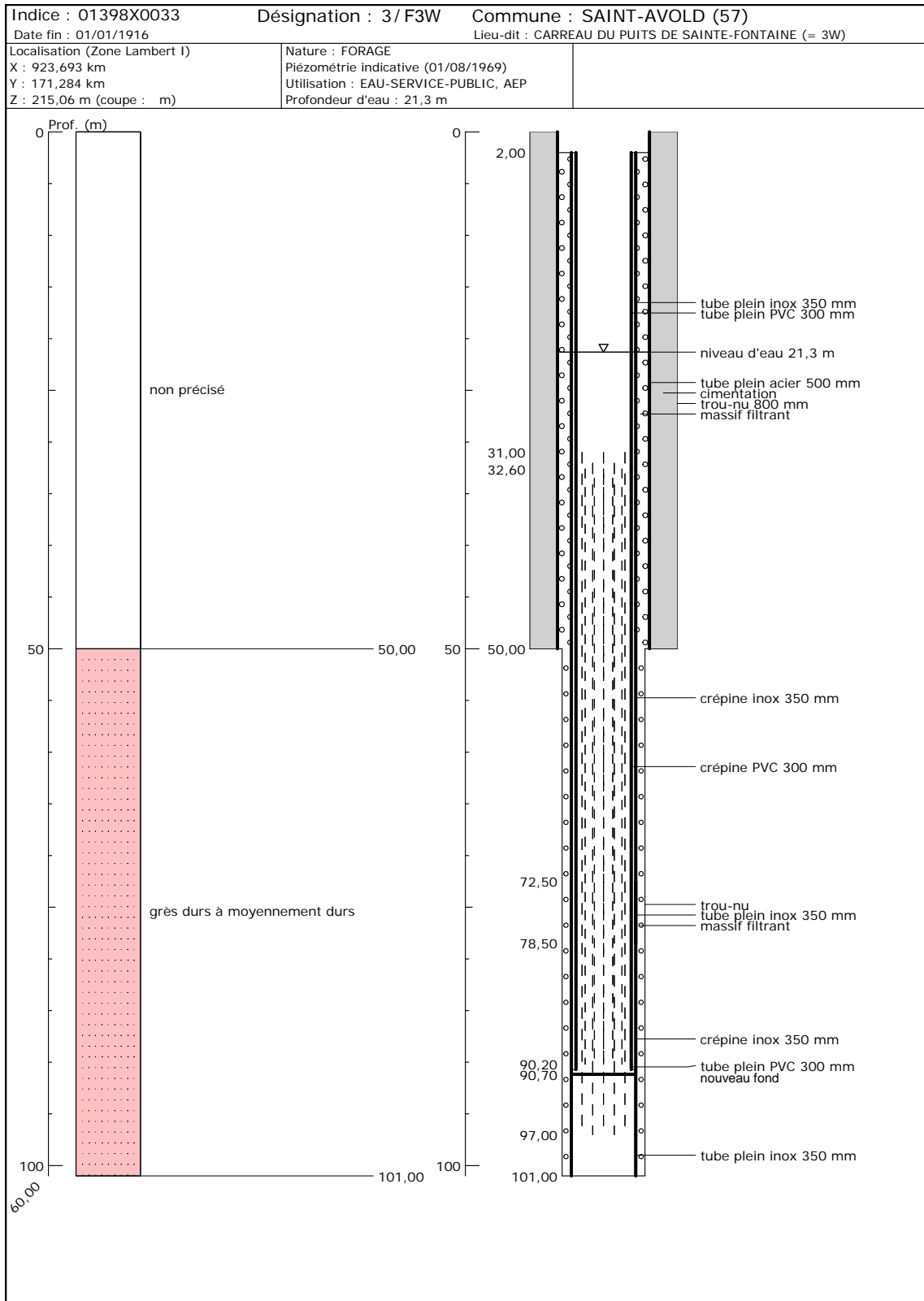


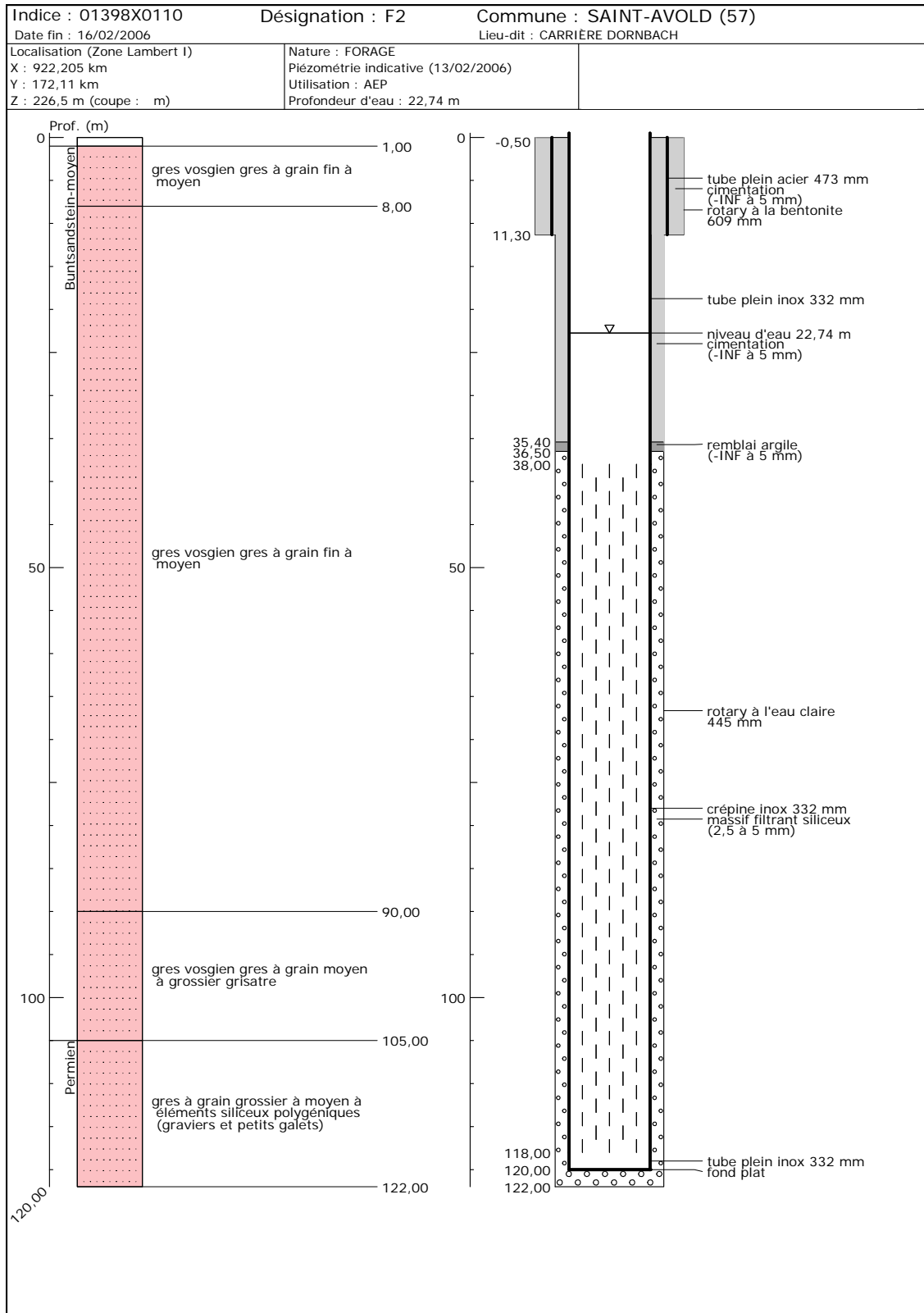


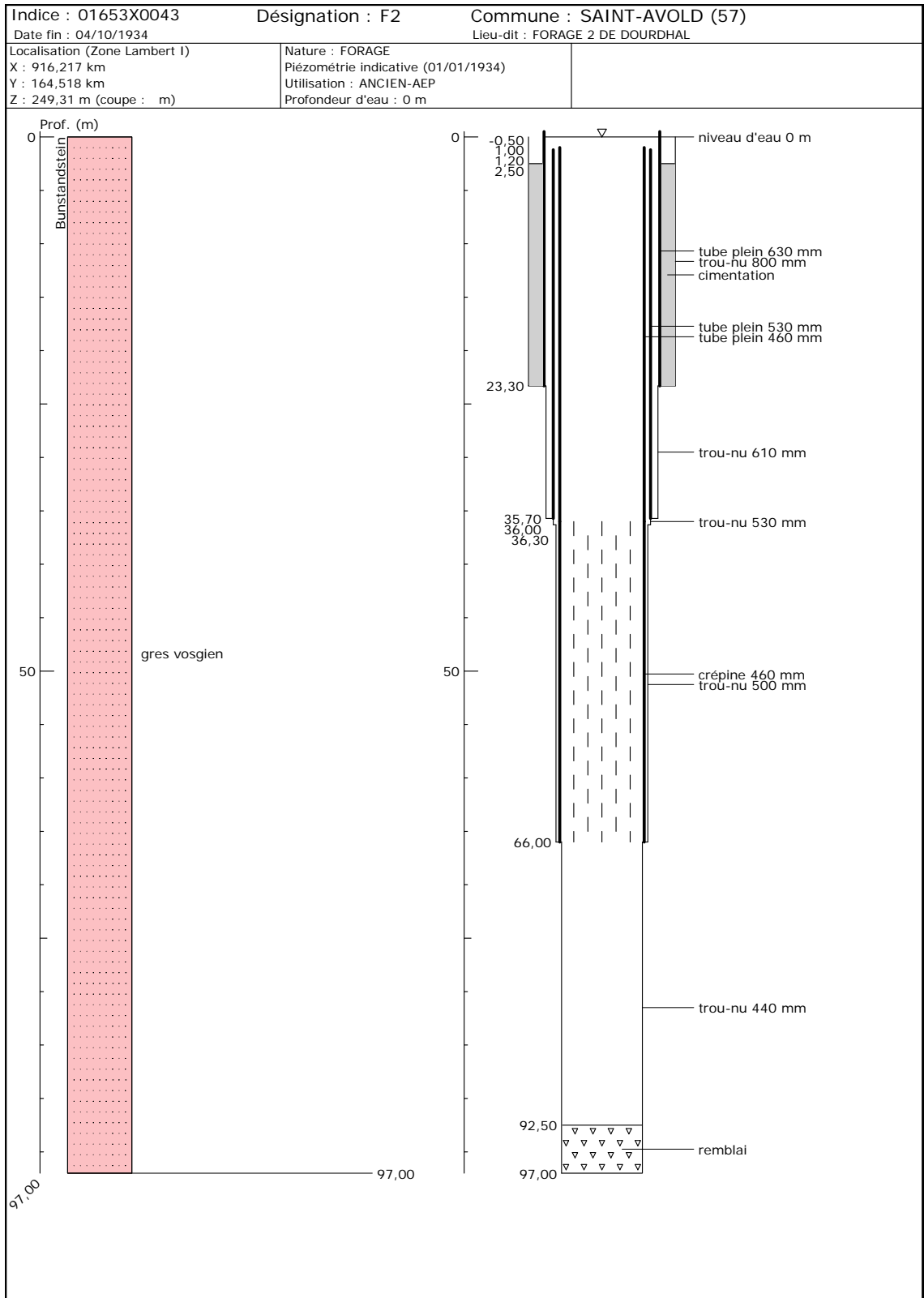


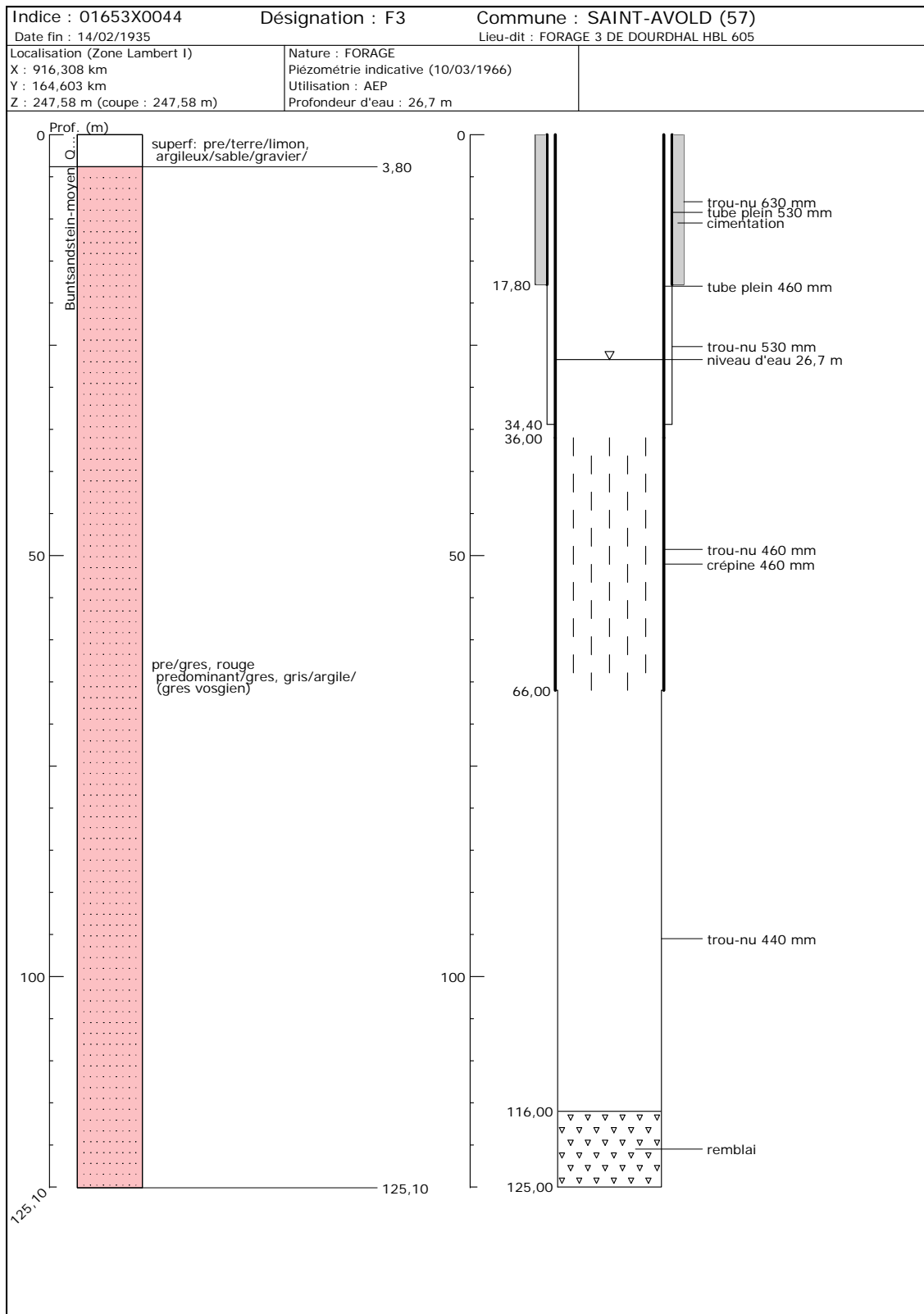


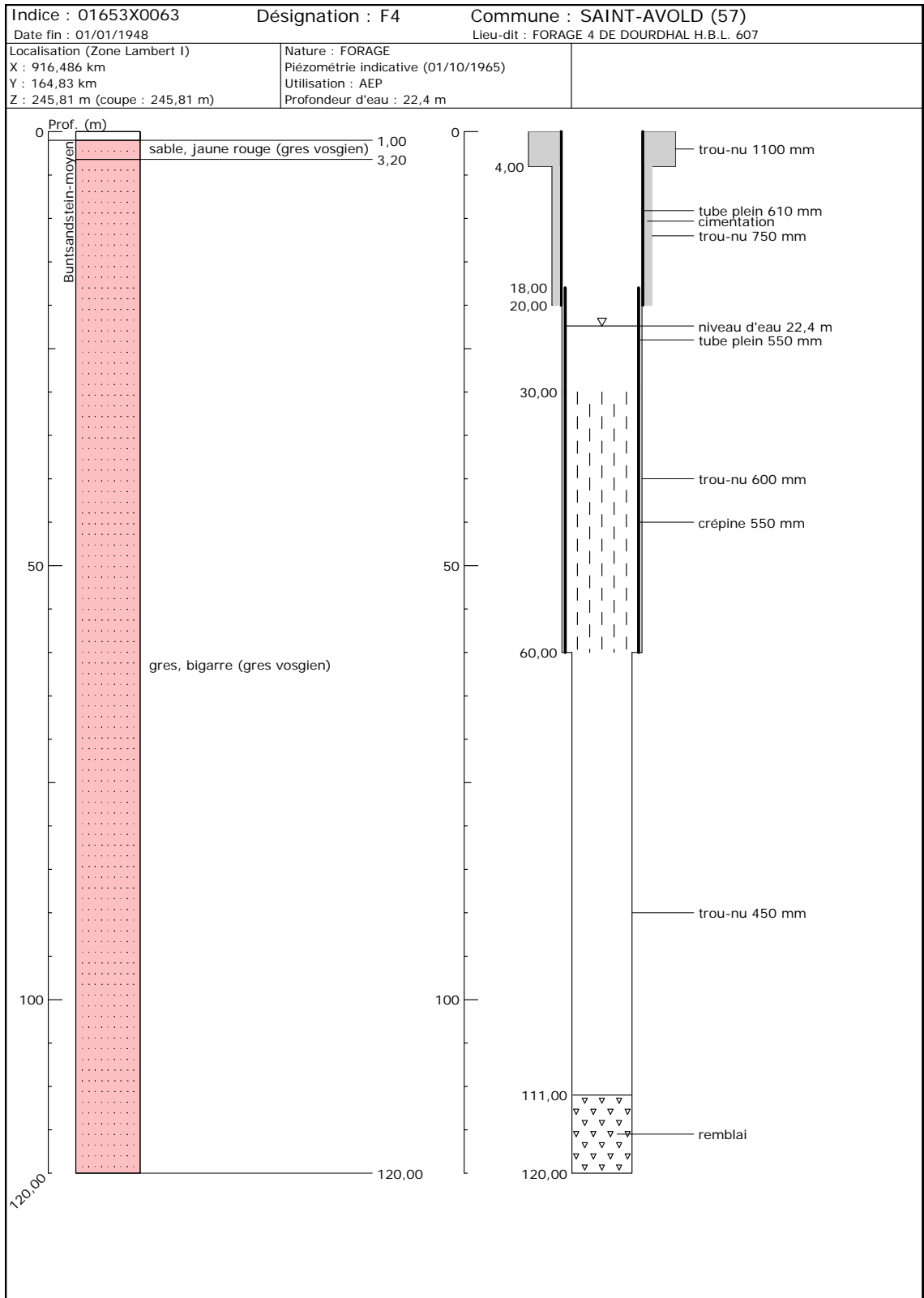


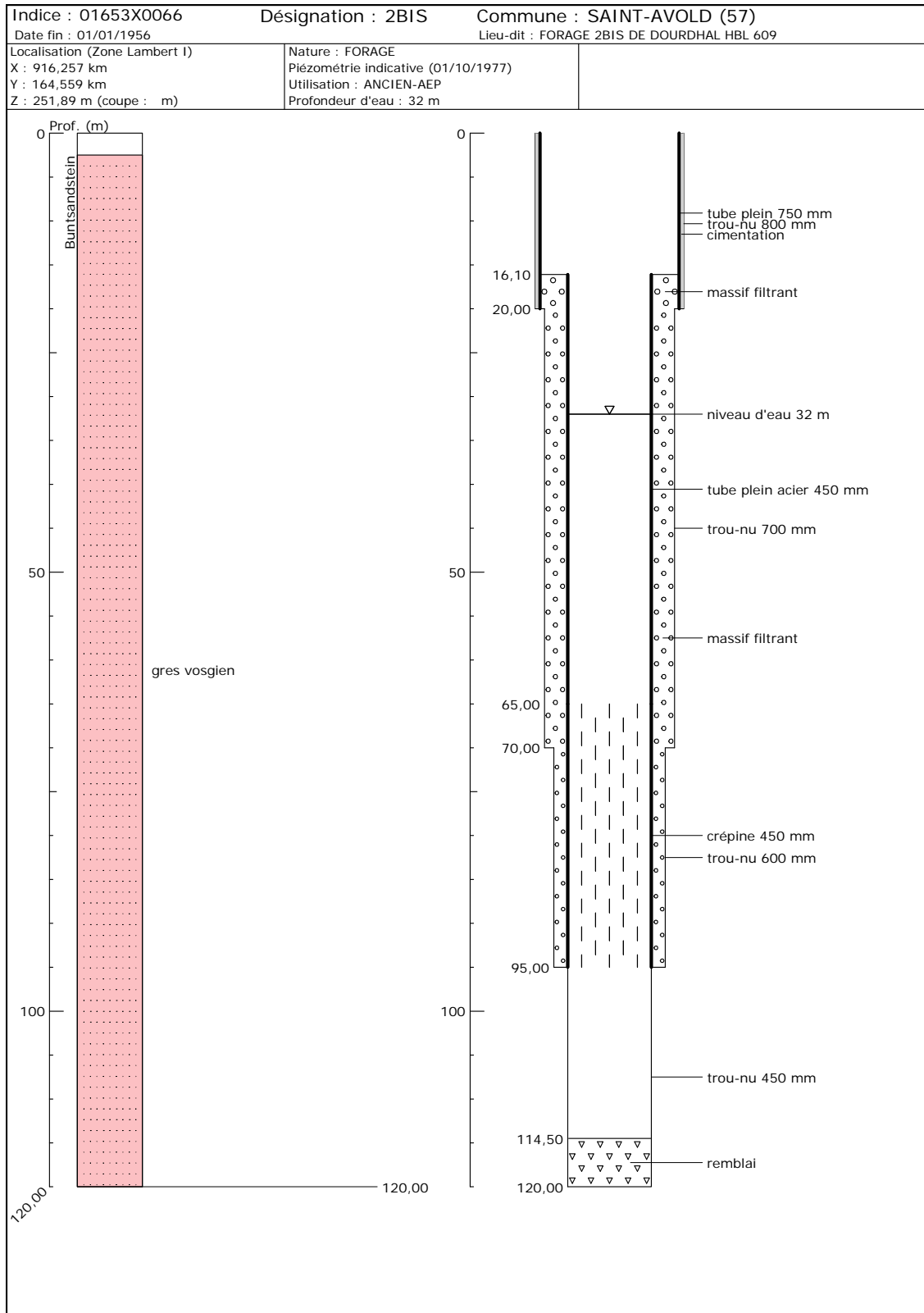


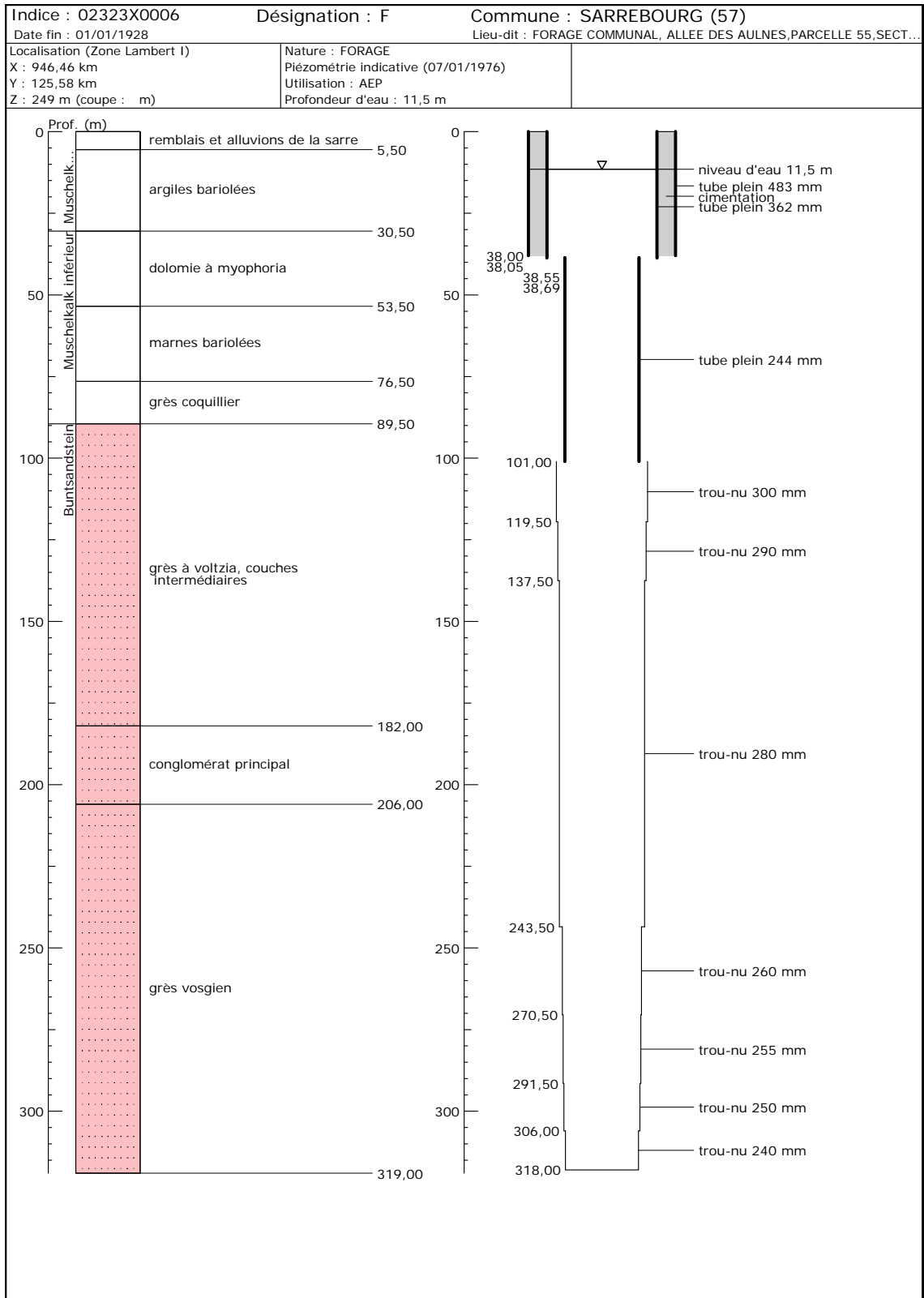


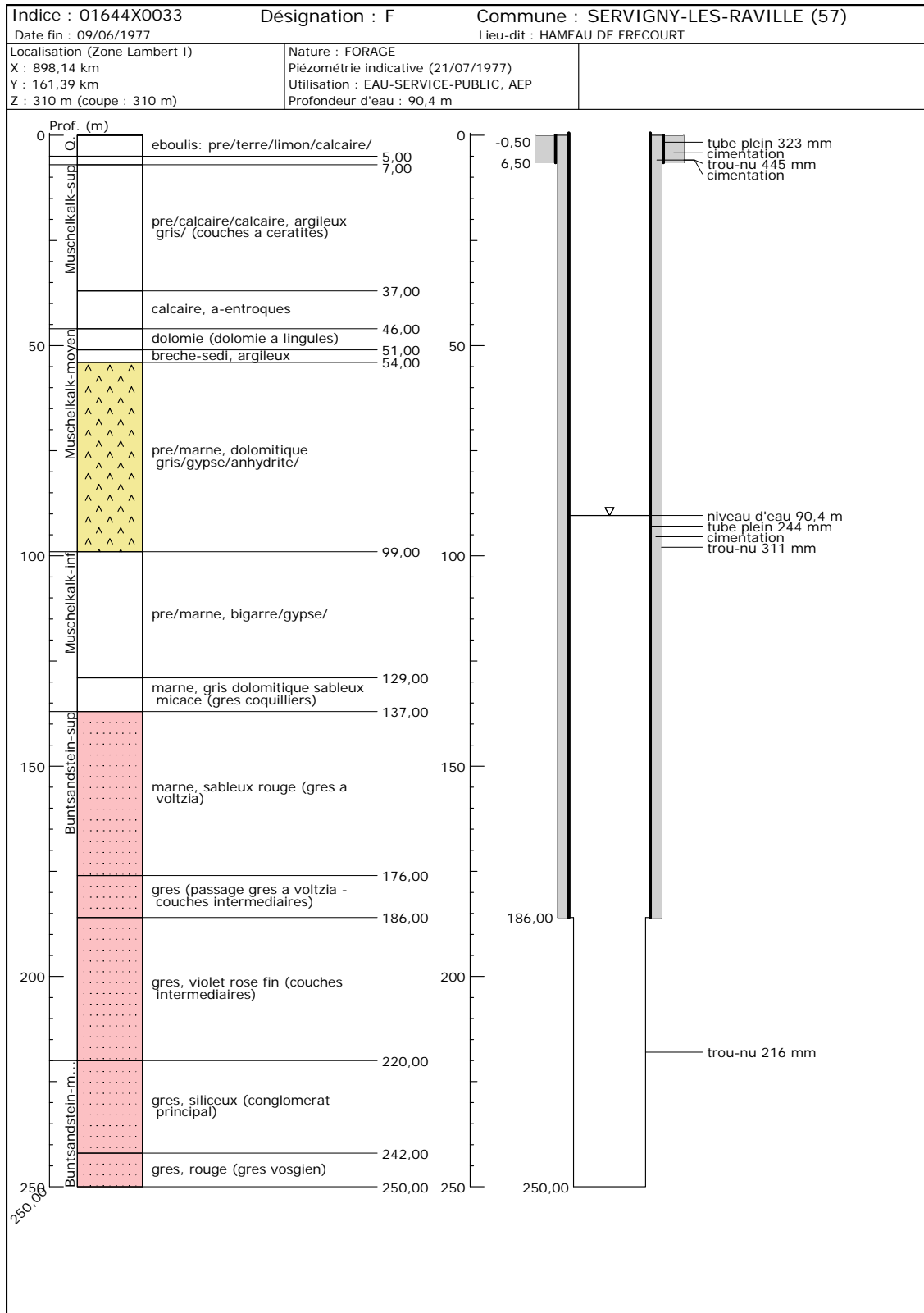


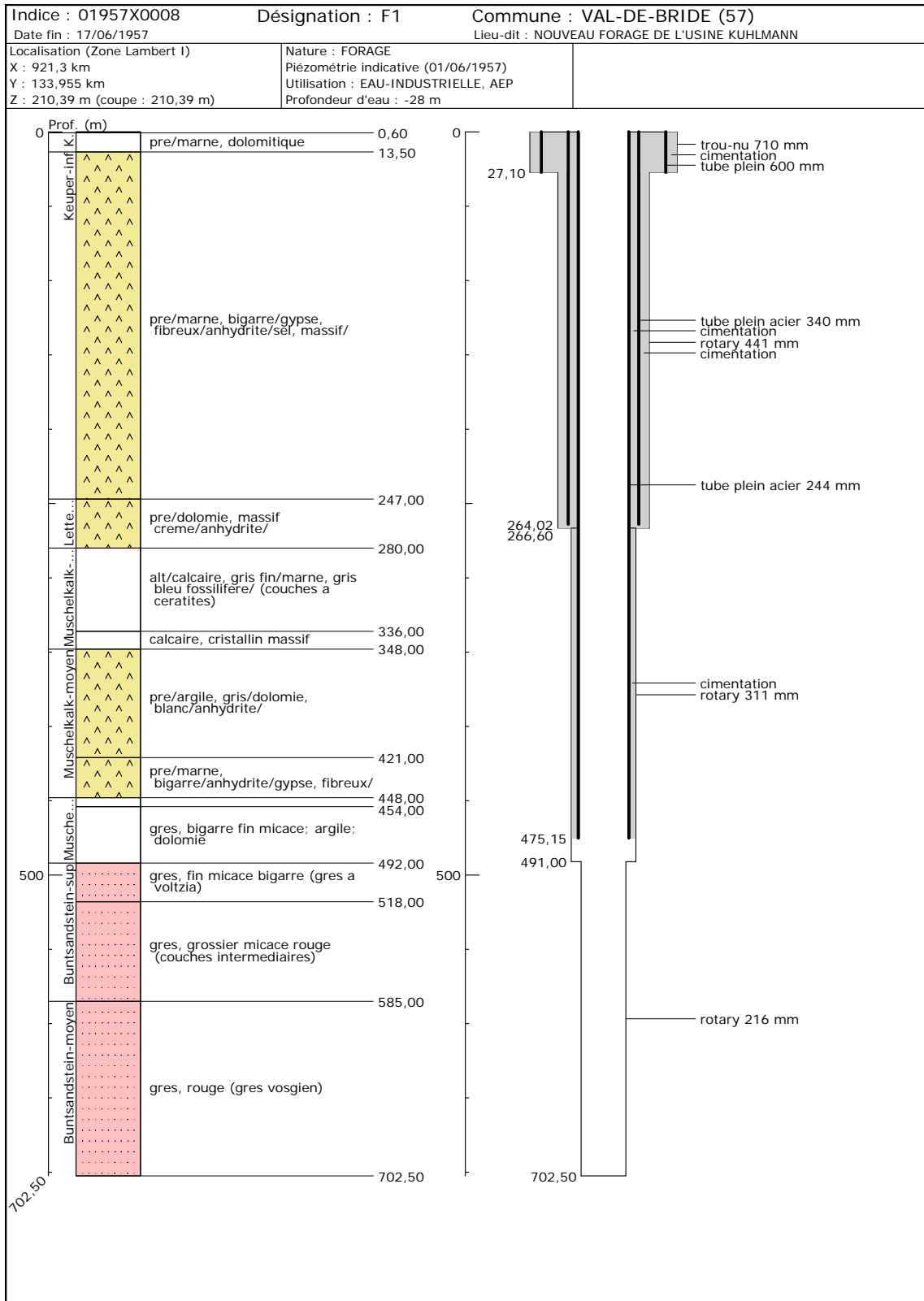


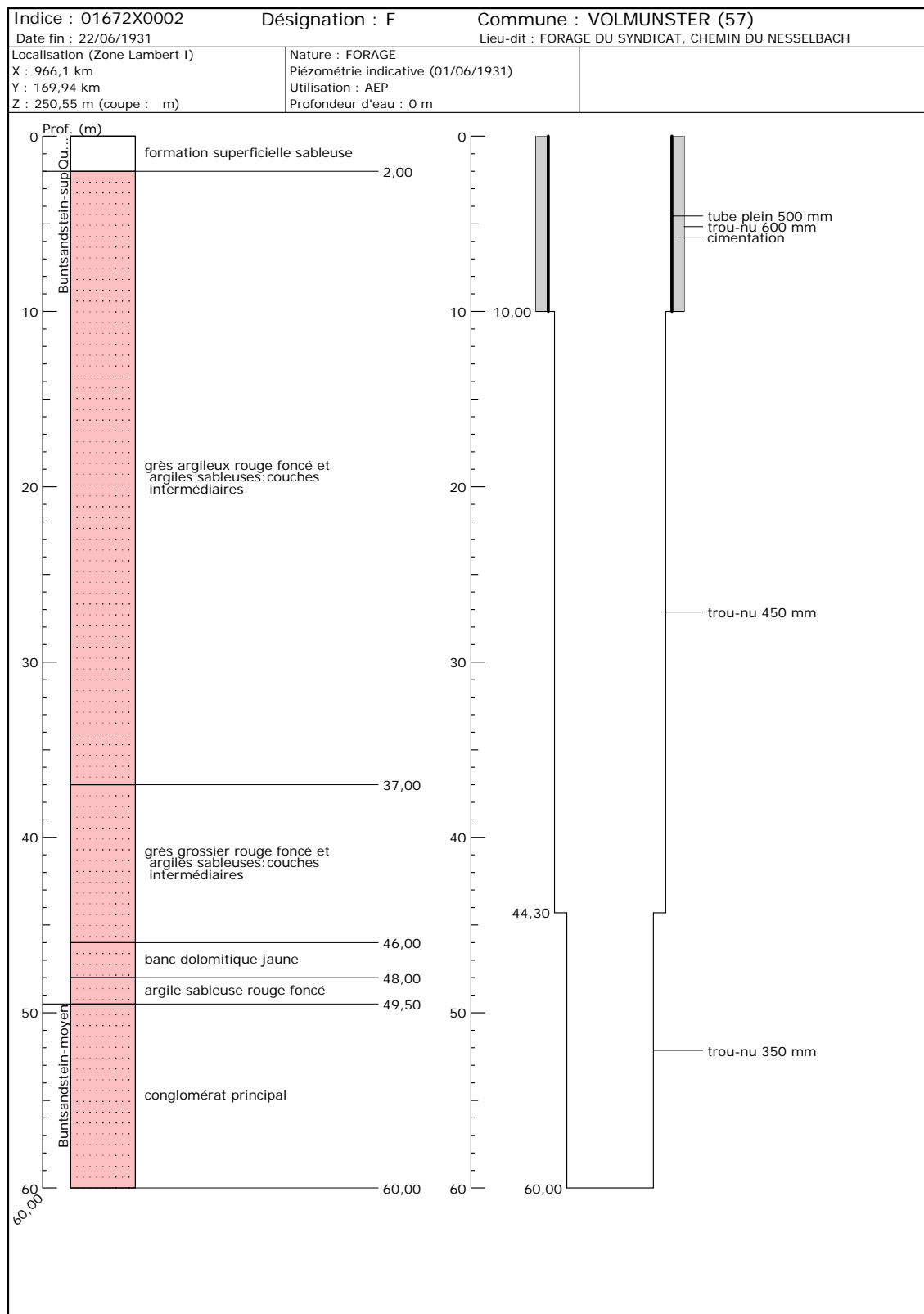


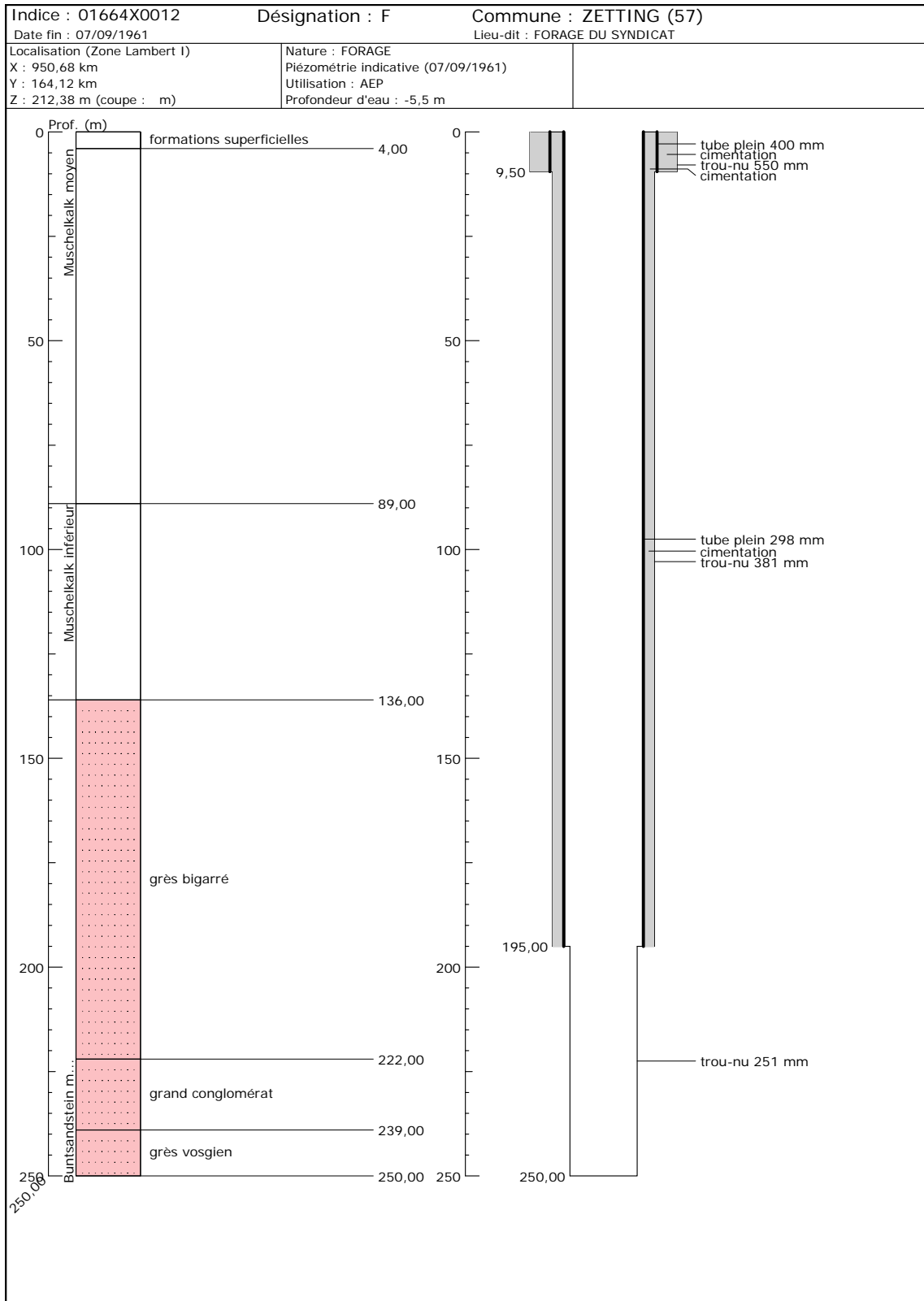






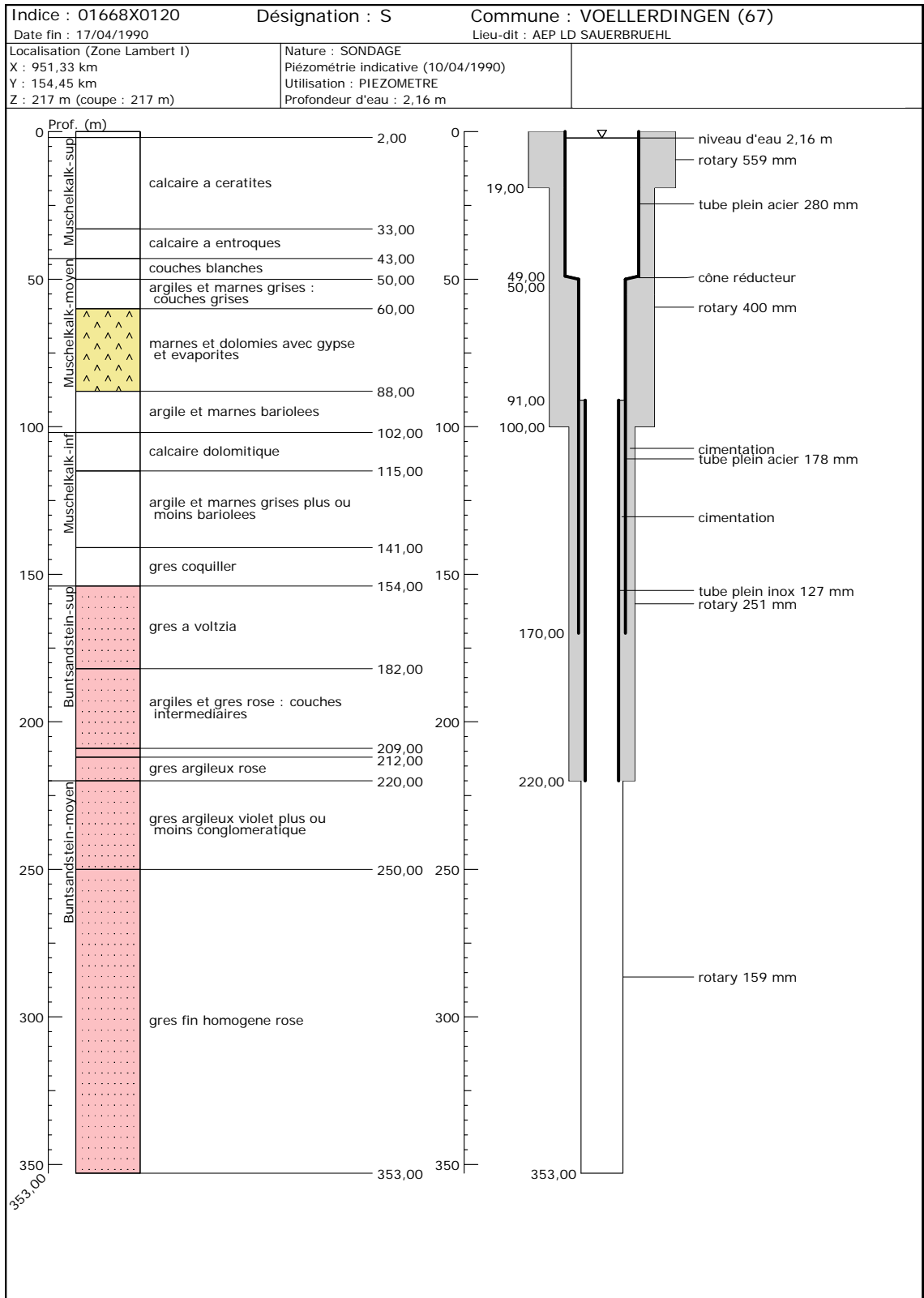


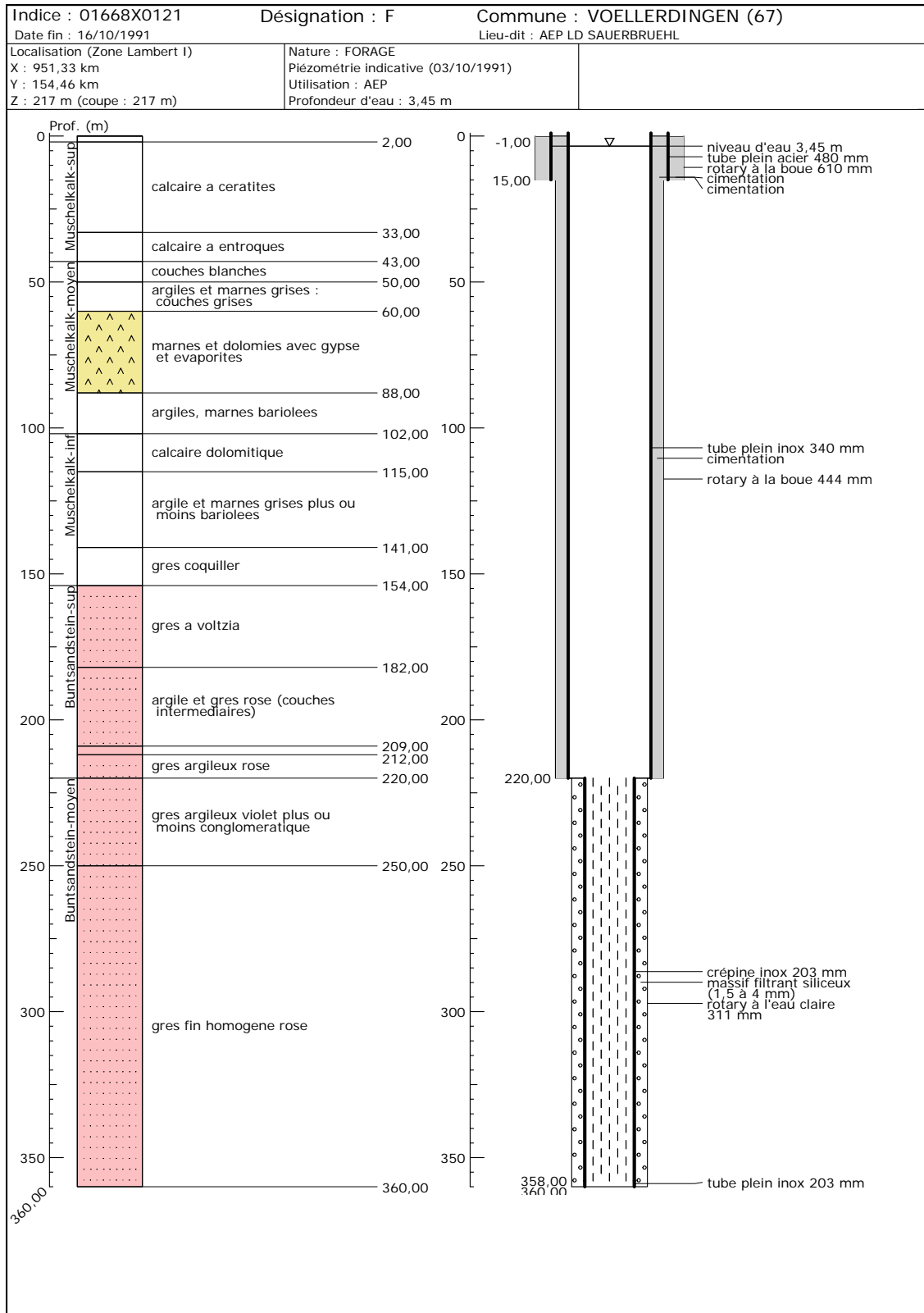




Annexe 3

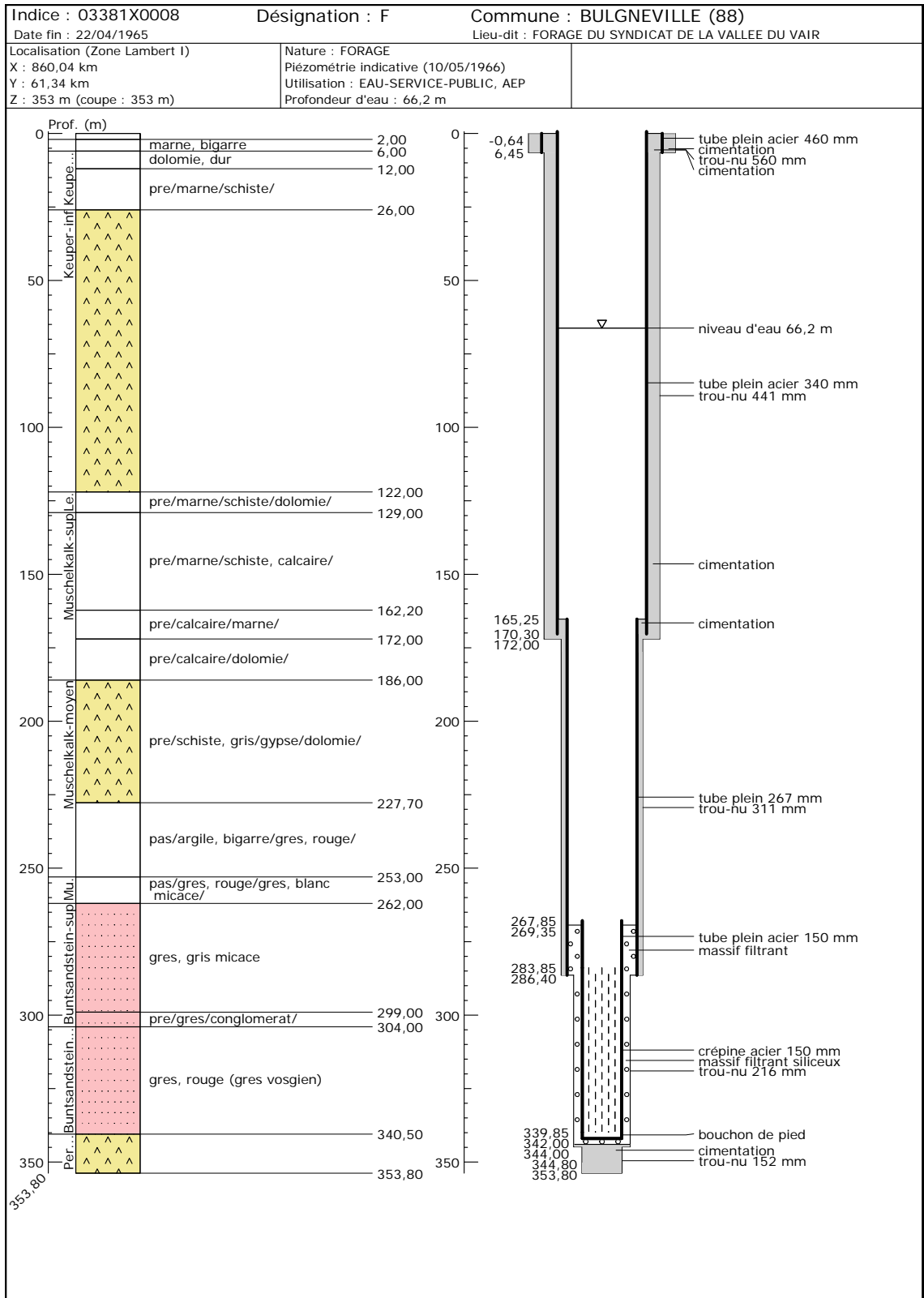
Coupes des forages du Bas-Rhin (classées par commune puis par code BSS)

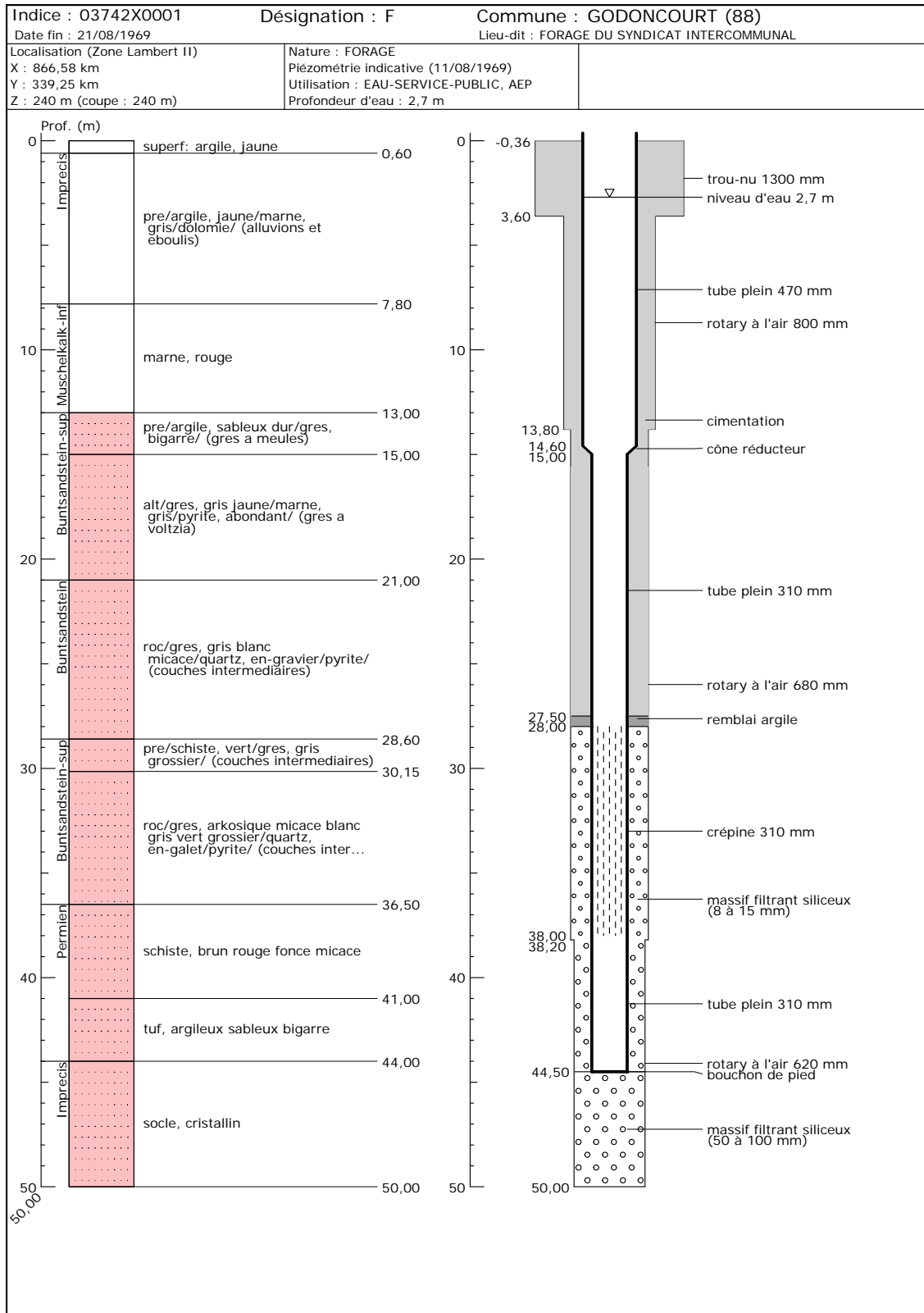


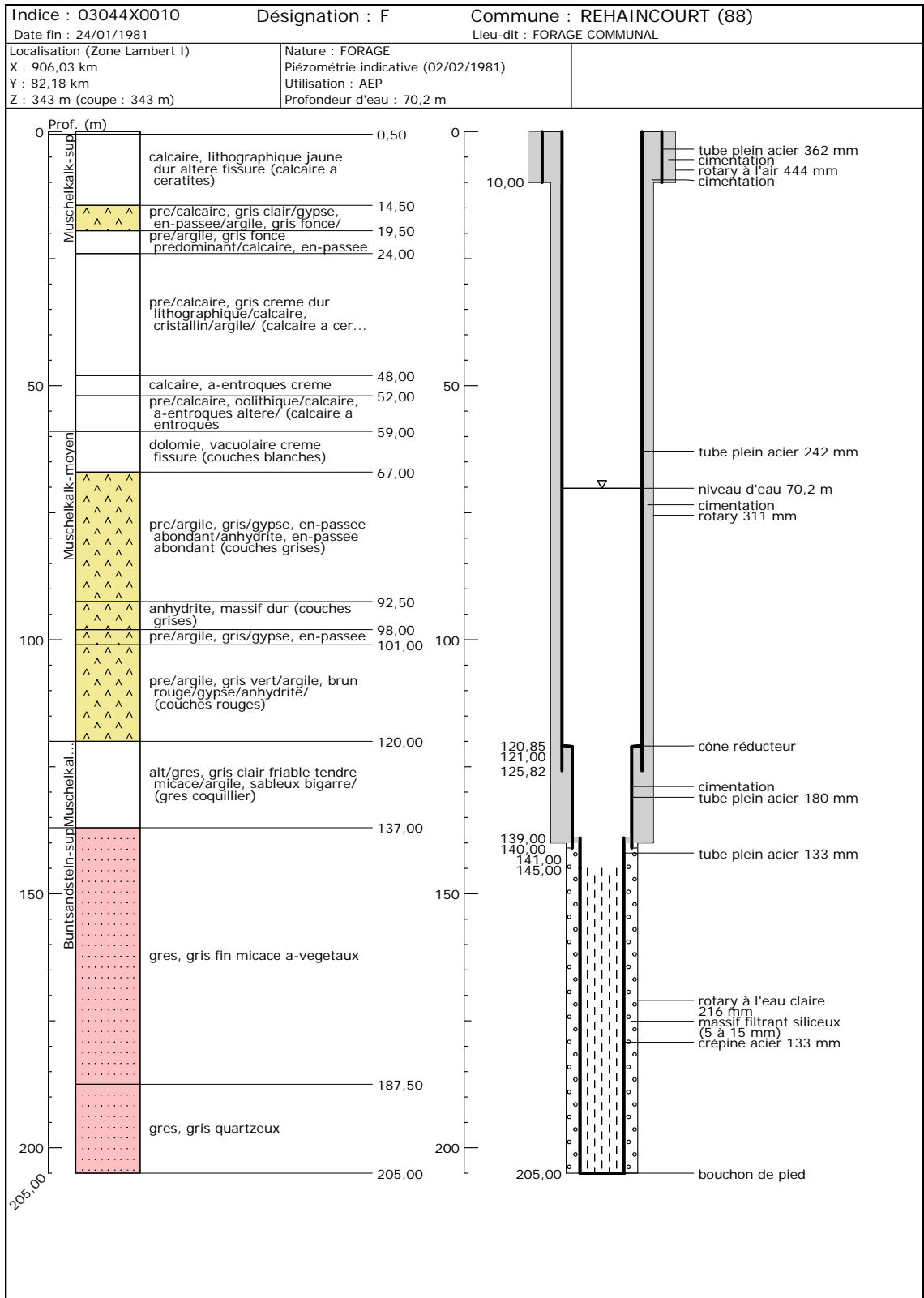


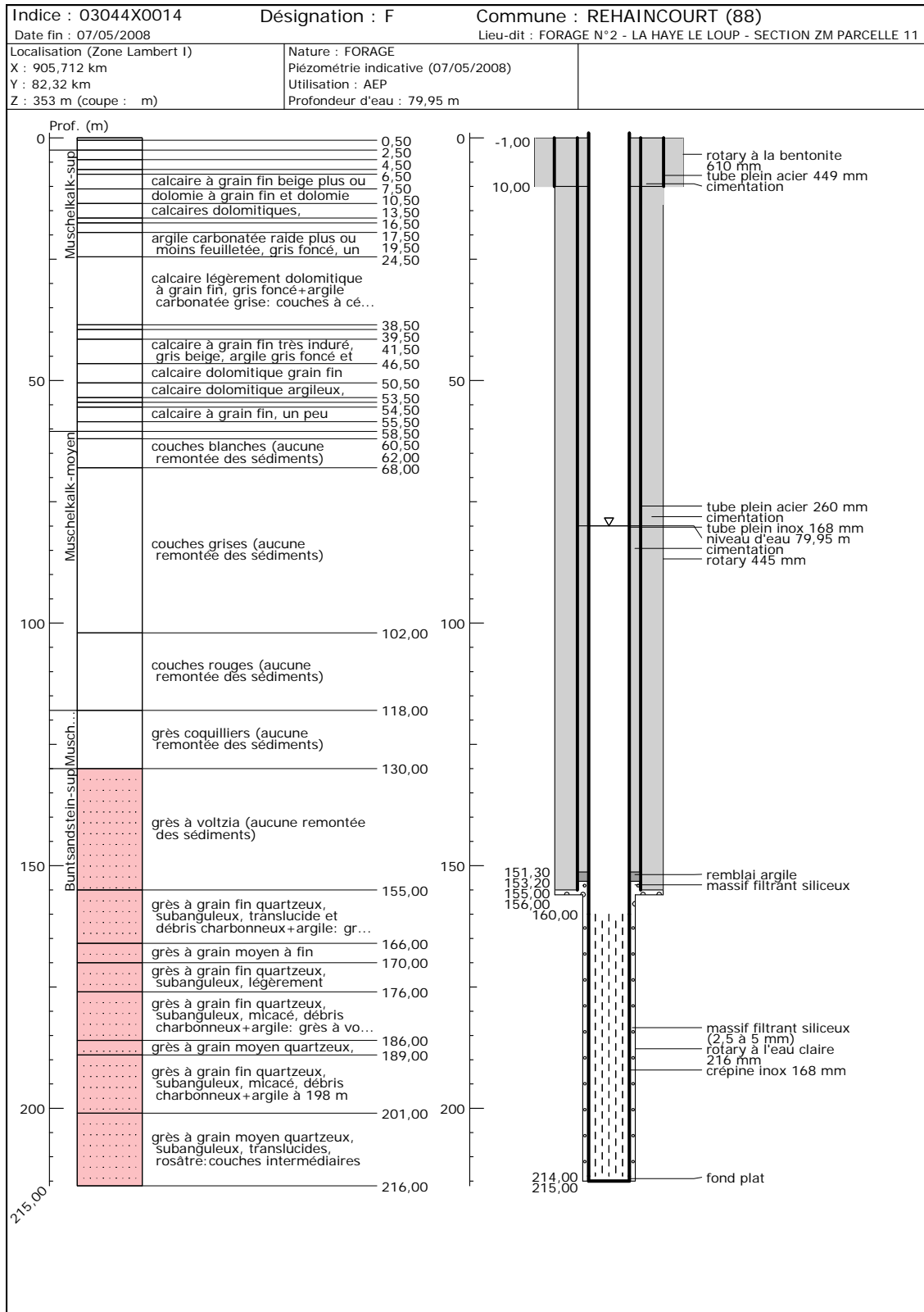
Annexe 4

Coupes des forages des Vosges (classées par commune puis par code BSS)



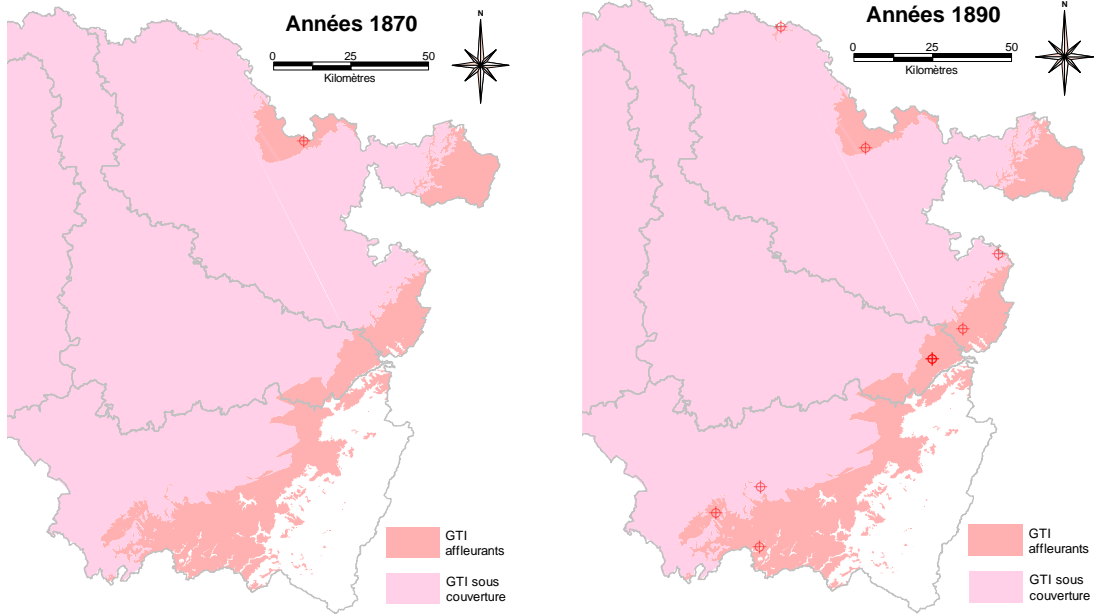




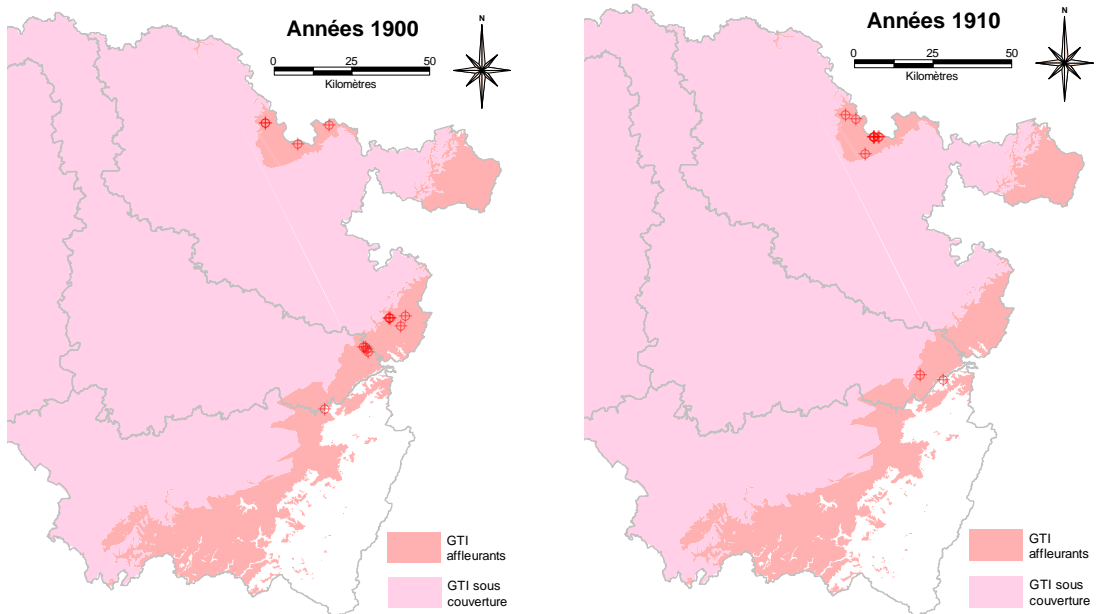


Annexe 5

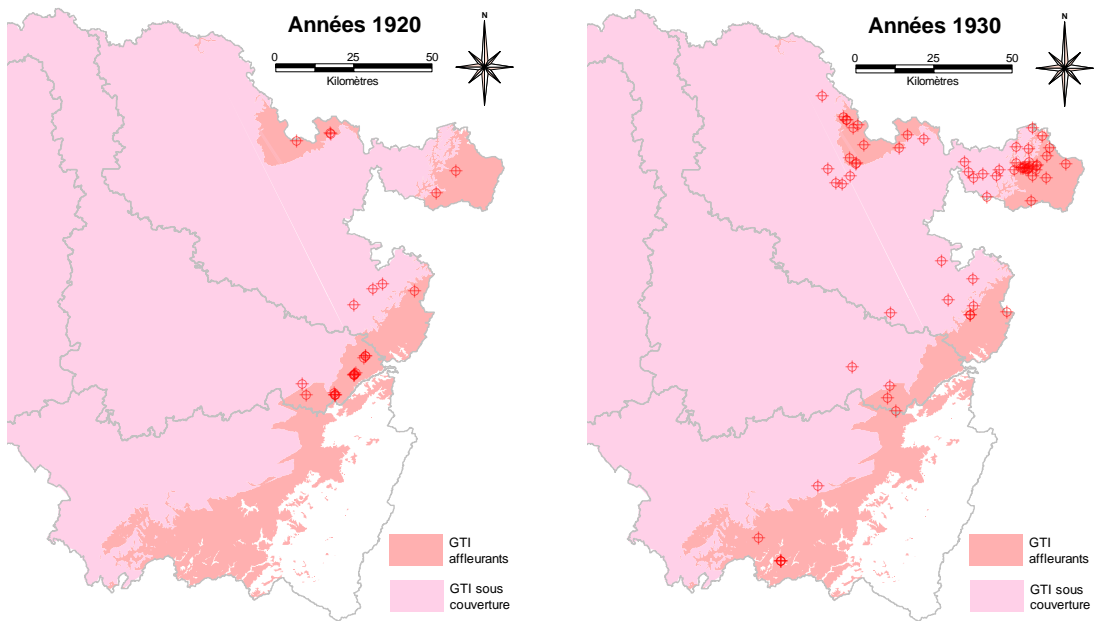
Répartition des ouvrages d'eau réalisés en Lorraine en fonction des décennies



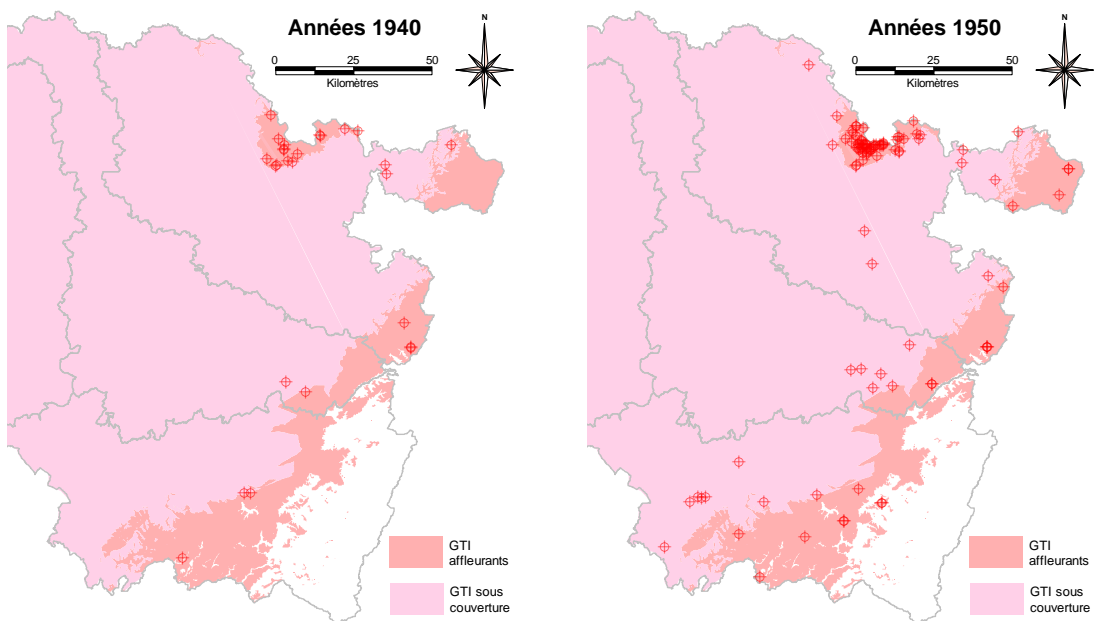
Répartition spatiale des ouvrages des années 1870 et 1890.



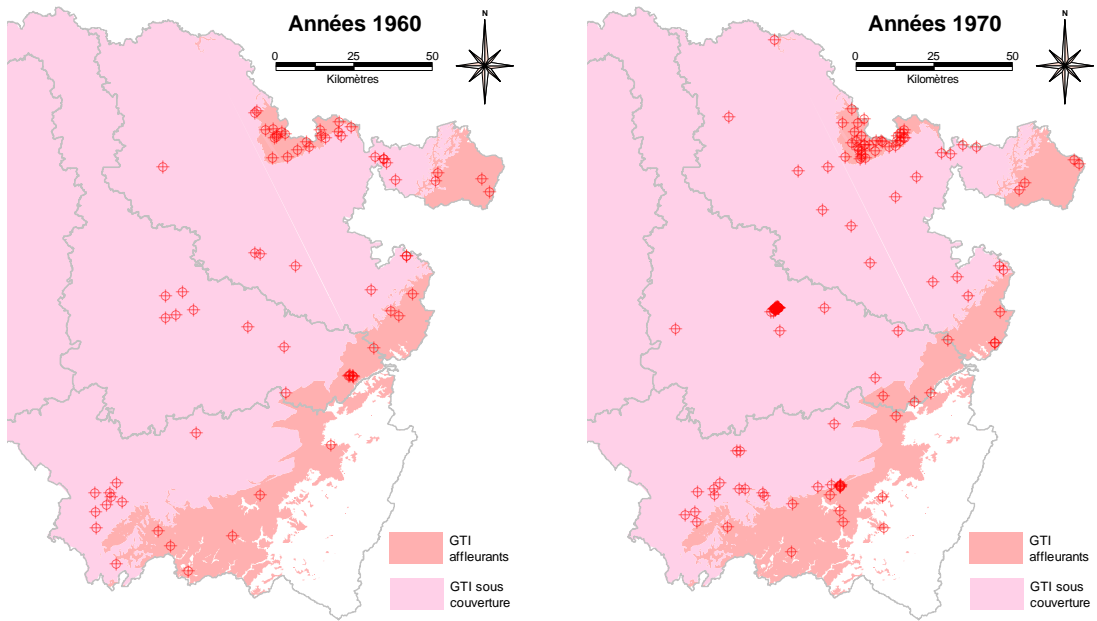
Répartition spatiale des ouvrages des années 1900 et 1910.



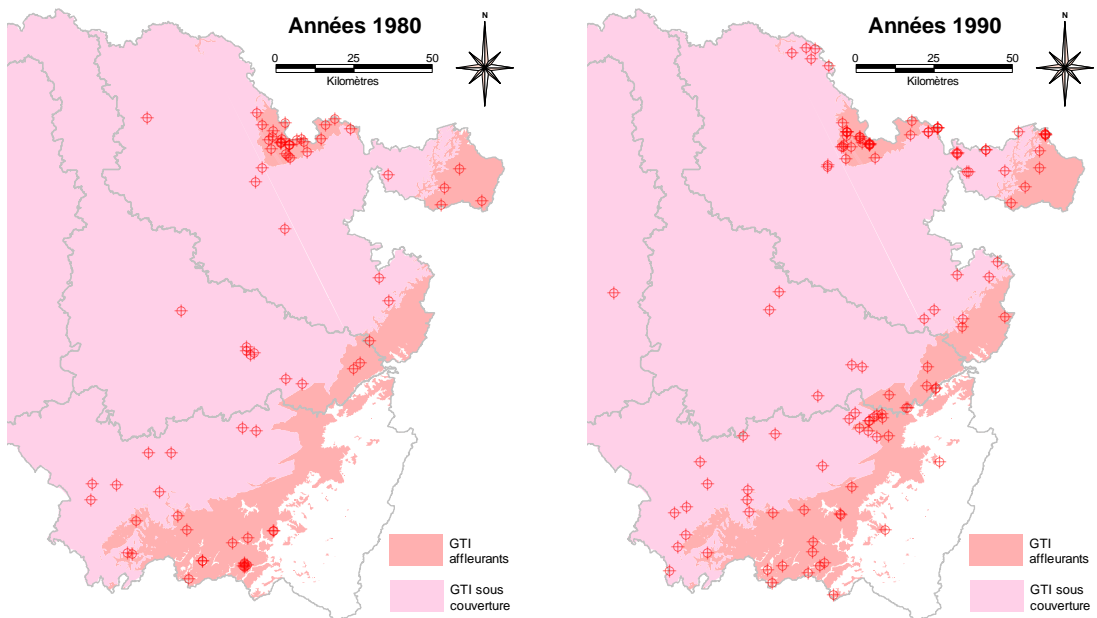
Répartition spatiale des ouvrages des années 1920 à 1930.



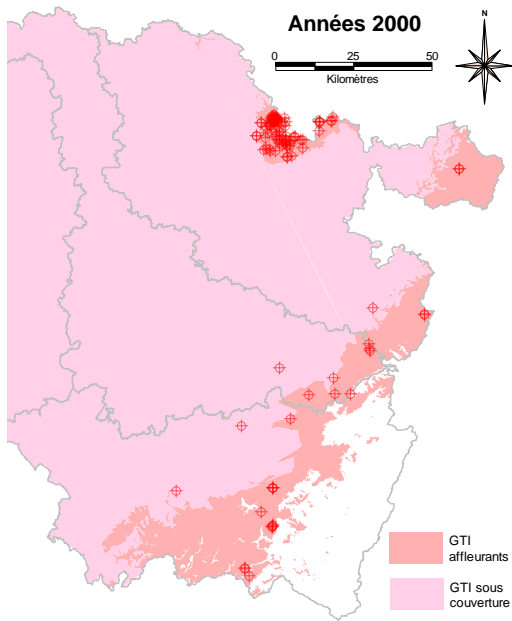
Répartition spatiale des ouvrages des années 1940 et 1950.



Répartition spatiale des ouvrages des années 1960 à 1970.



Répartition spatiale des ouvrages des années 1980 à 1990.



Répartition spatiale des ouvrages des années 2000.



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

Service géologique régional Lorraine
1, avenue du Parc de Brabois
54500 – Vandoeuvre-lès-Nancy – France
Tél. : 03 83 44 81 49