

Document public



Risques de pollution des nappes de l'Albien et du Néocomien par les forages profonds du bassin parisien

Rapport final

BRGM/RP-66820-FR
juin 2017

Étude réalisée dans le cadre des opérations de Service public du BRGM

J.F. Vernoux, J.C. Manceau
Avec la collaboration de
CFG Services

Vérificateur :

Nom : T. Le Guéan
Fonction : Resp. de programme
Date : 20/09/2017

Signature :

Approbateur :

Nom : P. Audigane
Fonction : Resp. d'unité
Date : 22/09/2017

Signature :

Le système de management de la qualité et de l'environnement est certifié par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.



Mots-clés : Albien, Néocomien, forage profond, risque de pollution, bassin parisien, scénario de fuite, analyse de risque, modélisation, hydrocarbures, géothermie, stockage de gaz

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

Vernoux J.F., Manceau J.C. (2017) – Risques de pollution des nappes de l'Albien et du Néocomien par les forages profonds du bassin parisien. Rapport final BRGM/RP-66820-FR, 98 p., 31 ill., 16 tabl., 2 ann.

Synthèse

L'étude « **Risques de pollution des nappes de l'Albien et du Néocomien par les forages profonds du bassin parisien** » présentée dans ce rapport est à l'initiative de la DRIEE Ile-de-France et a obtenu le soutien financier de l'Agence de l'Eau Seine-Normandie. Ses objectifs initiaux étaient les suivants :

- 1- **Evaluer l'état des cimentations des tubages des forages profonds et leur évolution** au cours du temps, ainsi que **l'état des bouchons de ciment** mis en place lors de la fermeture des ouvrages ;
- 2- Les risques de contamination dépendant de l'état des ouvrages mais aussi des pressions des réservoirs au regard des pressions des nappes de l'Albien et du Néocomien, **connaître les caractéristiques des nappes de l'Albien-Néocomien et des réservoirs profonds, et, en particulier, les niveaux piézométriques et les pressions de gisement.**
- 3- A partir de ces éléments, **mener une étude de risques**, permettant de **donner des ordres de grandeur concernant les impacts potentiels des fuites** dans l'Albien et dans le Néocomien.

L'analyse des cimentations des tubages et des bouchons de ciment n'a pu être réalisée que **sur un nombre limité de forages** (5 pour l'analyse des cimentations des tubages et 1 pour les bouchons de ciment). **Il s'est avéré au final difficile de trouver des diagraphies de cimentation (CBL) à la fois disponibles à différentes périodes, couvrant l'ensemble des formations et de bonne qualité. La méthode d'analyse apparaît néanmoins intéressante** si on dispose des données nécessaires. Sur les 5 forages traités, on observe plutôt une amélioration de la cimentation mais également quelques cas de détérioration. On observe dans certain cas, sans que cela soit systématique, une relation entre amélioration de la cimentation et présence de formations argileuses ou marneuses susceptibles d'avoir fluées. **Concernant l'analyse de la qualité des bouchons de ciment, on observe que les informations nécessaires n'ont pu être obtenues.** Dans l'optique d'une telle analyse dans le futur, une liste des informations à fournir est indiquée.

Pour étudier les risques de fuite d'eau géothermale et d'hydrocarbures dans les nappes de l'Albien et du Néocomien, nous sommes partis de **3 types de scénarios susceptibles de conduire à une pollution de ces nappes.** Ces scénarios ont été affinés et validés **lors d'un atelier d'experts** :

- **Scénarios de type 1** : ils s'appliquent aux puits de géothermie, d'hydrocarbures et de stockage de gaz. Ils consistent en une migration de fluides vers les nappes de l'Albien-Néocomien du fait de l'existence d'une voie de fuite à l'extrados d'un puits (annulaire, cimenté ou non).
- **Scénarios de type 2** : ils s'appliquent uniquement aux puits de géothermie. Ils consistent en une migration de fluides vers les nappes de l'Albien-Néocomien du fait de l'existence de perforations sur un puits en exploitation.
- **Scénarios de type 3** : ils concernent les puits de géothermie, d'hydrocarbures et de stockage de gaz. Ils consistent en une migration de fluides vers les nappes de l'Albien-Néocomien du fait d'une migration verticale à l'intérieur d'un puits qui n'est plus exploité conjuguée à l'existence de perforations sur ce puits

Ces scénarios ont ensuite été évalués à la fois en terme de **vraisemblance** et **d'estimation des impacts**. L'estimation de la vraisemblance des scénarios est basée sur une classification

normalisée, avec 5 classes d'évènements, depuis A) l'évènement courant jusqu'à E) l'évènement possible mais extrêmement peu probable. Cette vraisemblance a également été discutée lors de l'atelier d'expert. Les scénarios de type 1 s'avèrent possibles mais extrêmement peu probables (E) pour la géothermie, très improbables (D) pour les hydrocarbures et le stockage de gaz. Les scénarios de type 2 s'avèrent extrêmement peu probables (E) ou très improbables (D). Enfin les scénarios de type 3 s'avèrent extrêmement peu probables (E) pour la géothermie, très improbables (D) à extrêmement peu probables (E) pour les hydrocarbures et extrêmement peu probables (E) pour le stockage de gaz.

L'estimation des débits de fuite a été réalisée avec le modèle SAMBA du BRGM, pour quantifier un débit de fuite d'eau ou d'hydrocarbures au niveau d'un puits défailant, une fois le régime permanent atteint. Pour les scénarios de type 1, les fuites d'eau géothermale varient de quelques m³/an à quelques centaines de m³/an en fonction de l'épaisseur du défaut permettant la fuite (micro-annulaire de 50, 100 ou 350 µm) et du fait que le puits soit en exploitation ou non. Les fuites d'hydrocarbures sont plus faibles, de quelques dixièmes à quelques dizaines de m³/an et uniquement dans les conditions initiales. En phase d'exploitation, dans le cas d'une baisse significative et pérenne des pressions des champs exploités, aucune fuite vers les nappes de l'Albien et du Néocomien n'est possible. Pour les scénarios de type 2, qui ne concernent que l'exploitation géothermique, les fuites d'eau géothermale sont plus importantes, plusieurs centaines, voire milliers de m³/an, pour les puits injecteurs qui entraînent les plus forts débits. Enfin pour les scénarios 3, une fuite d'hydrocarbures sera très faible si un bouchon existe (quelques m³/an), même en présence de perforations. L'absence de bouchon rend à l'inverse le puits vulnérable à l'apparition d'une fuite de plus grande ampleur (plusieurs centaines, voire milliers de m³/an) par d'éventuelles perforations.

L'estimation des impacts d'une fuite a été réalisée avec un modèle COMSOL, afin de déterminer l'extension de la zone impactée par la réinjection de fluides fuyards issus du Dogger, ou du Trias via des puits géothermiques ou d'hydrocarbures, à partir des estimations faites des débits de fuite. Différents types d'impacts ont été estimés à partir des 3 types de scénarios susceptibles de conduire à une pollution : les impacts chimiques liés à la migration d'eau salée dans l'Albien/Néocomien, les impacts chimiques liés à la migration d'hydrocarbures, et les impacts thermiques liés à la migration d'eau plus froide ou plus chaude que celle des nappes. Une approche conservatrice a été choisie, utilisant les débits maximaux des différents scénarios de fuite identifiés simulant les fuites sur des périodes relativement longues. Les zones impactées seraient au maximum de l'ordre de grandeur du kilomètre (2 km après 50 ans de fuite pour le pire des cas simulés). Il est intéressant de signaler qu'au regard des volumes fuyards estimés, l'extension des zones impactées dépend clairement des paramètres hydrodynamiques choisis, mais semble, dans la gamme des fuites qui ont été simulées, être moins influencée par les caractéristiques de la fuite, en particulier par le débit de fuite.

Sommaire

1. Introduction	11
2. Analyse des cimentations des tubages et des bouchons de ciment.....	13
2.1. QUALITE DES CIMENTATIONS DES TUBAGES	13
2.1.1. Méthodologie d'évaluation quantitative des contrôles de cimentation CBL.....	14
2.1.2. Forage GHLR1	17
2.1.3. Forage GCHL1	19
2.1.4. Forage VPU O11	21
2.1.5. Forage VPU M31	22
2.1.6. Forage B27	24
2.1.7. Conclusion.....	26
2.2. QUALITE DES BOUCHONS DE CIMENT	27
2.2.1. Méthodologie d'analyse	27
2.2.2. Liste des informations nécessaires et ordres de grandeur attendus.....	27
2.2.3. Analyse du cas CQL1	28
2.2.4. Conclusion.....	30
3. Caractéristiques des nappes de l'Albien-Néocomien et des réservoirs profonds ..	31
3.1. CARACTERISTIQUES HYDROGEOLOGIQUES ET HYDRODYNAMIQUES DES NAPPES DE L'ALBIEN-NEOCOMIEN	31
3.2. CARACTERISTIQUES DES RESERVOIRS PROFONDS	35
3.2.1. Géothermie.....	35
3.2.2. Exploitation d'hydrocarbures.....	38
3.2.3. Stockage de gaz naturel	44
4. Etude des risques de pollution des nappes de l'Albien et du Néocomien par les forages profonds : approche proposée	45
5. Etude des risques - Etape 1 : Recensement des scénarios redoutés	47
5.1. ETABLISSEMENT D'UNE LISTE DE SCENARIOS ETABLIE A PARTIR DU REX ...	47
5.2. VALIDATION DES SCENARIOS LORS D'UN ATELIER D'EXPERTS	48
6. Etude des risques - Etape 2a : Estimation de la vraisemblance des scénarios.....	51
7. Etude des risques - Etape 2b : Estimation des débits de fuite potentiels.....	57
7.1. CHOIX DES SCENARIOS A ANALYSER	57
7.2. MODELE UTILISE POUR L'ESTIMATION DES DEBITS DE FUITE	60

7.3. PARAMETRES INITIAUX POUR L'ESTIMATION DES DEBITS DE FUITES	61
7.3.1. Caractéristiques du réservoir géothermal du Dogger	61
7.3.2. Caractéristiques des champs pétroliers du bassin de Paris	62
7.3.3. Caractéristiques des nappes de l'Albien et du Néocomien.....	63
7.3.4. Géométrie des puits.....	64
7.3.5. Propriétés des défauts	65
7.4. RESULTATS DE L'ESTIMATION DES DEBITS DE FUITE.....	66
7.4.1. Scénario de type 1: Quantification d'un débit de fuite de saumure / d'huile depuis le réservoir géothermal / pétrolier jusqu'aux nappes de l'Albien et du Néocomien par un micro-annulaire continu situé à l'extrados d'un puits géothermal / d'hydrocarbure générique.....	67
7.4.2. Scénario de type 2 : Quantification d'un débit de fuite de saumure vers les nappes de l'Albien-Néocomien du fait de l'existence de perforations sur un puits en exploitation.....	71
7.4.3. Scénario de type 3 : Migration de fluides vers les nappes de l'Albien-Néocomien du fait d'une migration verticale à l'intérieur d'un puits qui n'est plus exploité conjugué à l'existence de perforations sur ce puits	72
8. Etude des risques - Etape 2c : Estimation des conséquences d'une fuite potentielle sur les nappes de l'Albien/Néocomien.....	79
8.1. CHOIX DES TYPES D'IMPACTS A ESTIMER.....	79
8.2. MODELE UTILISE POUR L'ESTIMATION DES IMPACTS D'UNE FUITE	79
8.3. PARAMETRES INITIAUX POUR L'ESTIMATION DES IMPACTS D'UNE FUITE	81
8.3.1. Paramètres hydrodynamiques et thermiques du modèle numérique	81
8.3.2. Caractéristiques de la fuite.....	82
8.4. RESULTATS DE L'ESTIMATION DES IMPACTS.....	83
8.4.1. Impacts chimiques de l'ion chlorure dans le cas d'une fuite d'eau salée issue du Dogger ou du Trias	83
8.4.2. Impacts thermiques dans le cas d'une fuite d'eau géothermale issue du Dogger au droit d'un puits d'injection ou de production en exploitation	87
8.4.3. Impacts chimiques dans le cas d'une fuite d'hydrocarbures.....	90
8.5. SYNTHESE	91
9. Conclusion.....	93
10. Bibliographie	97

Liste des figures

Illustration 1 – Zone de répartition des eaux pour les nappes de l'Albien et du Néocomien (source DRIEE IDF)	12
Illustration 2 – Correspondance entre l'amplitude et la résistance à la compression d'après Schlumberger.....	16
Illustration 3 – Log géologique du forage GHRL1 (source Infoterre)	17
Illustration 4 – Log géologique du forage GCHL1 (source Infoterre)	19
Illustration 5 – Log géologique du forage VPU O11 (source Total Exploration)	21
Illustration 6 – Log géologique du forage VPU M31 (source Total Exploration)	23
Illustration 7 – Log géologique du forage B27 (source Infoterre)	25
Illustration 8 - Succession lithostratigraphique synthétique du Crétacé Inférieur du Bassin parisien (Vernoux et al., 1997)	32
Illustration 9 – Profondeur du substratum, épaisseur, piézométrie et température de la nappe de l'Albien (d'après Seguin et al., 2015).....	33
Illustration 10 – Profondeur du substratum, épaisseur, piézométrie et température de la nappe du Néocomien (d'après Seguin et al., 2015)	34
Illustration 11 – Localisation des puits géothermaux atteignant le Dogger dans la zone d'étude (d'après la base de données Dogger http://dogger-idf.brgm.fr)	35
Illustration 12 - Profondeur du toit, épaisseur, pression au toit du réservoir et température de la formation du Dogger au niveau des puits géothermaux référencés dans la base de données d'exploitation du Dogger	37
Illustration 13 – Localisation des puits pétroliers dans la zone d'étude (Base de Données Vernoux et al., 2003)	39
Illustration 14 – Formations géologiques du Bassin de Paris susceptibles de contenir des réservoirs d'hydrocarbures (SNEAP, 1991)	40
Illustration 15 - Gisements de pétrole et de gaz du bassin de Paris (source www.developpement-durable.gouv.fr).....	41
Illustration 16 - Profondeur du toit, épaisseur, pression au toit du réservoir et température de la formation du Dogger au niveau des puits d'hydrocarbures exploitant le Dogger référencés dans la synthèse du Comité des techniciens de la Chambre syndicale de la recherche et de la production du pétrole et du gaz naturel (1991 avec mise à jour en 1993).....	42
Illustration 17 – Profondeur du toit, épaisseur, pression et température de la formation du Trias au niveau des puits d'hydrocarbures référencés dans la synthèse du Comité des techniciens de la Chambre syndicale de la recherche et de la production du pétrole et du gaz naturel (1991 avec mise à jour en 1993)	43
Illustration 18 – Stockage de gaz naturel dans le bassin de Paris (SIGES Seine-Normandie, 2017)	44
Illustration 19 – Approche globale suivie pour l'étude des risques : différentes étapes et outils nécessaires à sa mise en place.....	46
Illustration 20 – Exemple de scénario de fuite pour chacun des types possibles	48
Illustration 21 – Exemple de simulation de l'évolution de la pression de gisement après l'arrêt de l'exploitation .(Mainguy et al., 2007)	63
Illustration 22 – Résultats de l'estimation des débits de fuite pour un scénario de type 1 correspondant à une fuite de saumures ou d'hydrocarbures depuis le réservoir géothermal du Dogger jusqu'aux nappes de l'Albien et du Néocomien par un micro-	

annulaire continu situé à l'extrados d'un puits géothermal ou d'un puits d'hydrocarbure générique	70
Illustration 23 – Résultats de l'estimation des débits de fuite pour un scénario de type 1 correspondant à une fuite de saumures vers les nappes de l'Albien-Néocomien du fait de l'existence de perforations sur un puits géothermique en exploitation ...	72
Illustration 24 – Résultats de l'estimation des débits de fuite pour un scénario de type 3 correspondant à une migration verticale à l'intérieur d'un puits d'hydrocarbure qui n'est plus exploité conjuguée à l'existence de perforations sur ce puits	75
Illustration 25 – Discrétisation ou maillage horizontal du domaine 2D modélisé	81
Illustration 26 - Estimation de l'extension des impacts chimiques au droit de l'Albien (à gauche) et du Néocomien (à droite) après 25 et 50 ans d'une fuite d'eau du Dogger, puis 25 ans, 50 ans et 100 ans après l'arrêt de la fuite. La limite de potabilité est indiquée par une ligne rouge.	85
Illustration 27 – Estimation de l'extension des impacts chimiques au droit de l'Albien (à gauche) et du Néocomien (à droite) après 25 et 50 ans d'une fuite d'eau du Trias, puis 25 ans, 50 ans et 100 ans après l'arrêt de la fuite. La limite de potabilité est indiquée par une ligne rouge.	86
Illustration 28 – Estimation de l'extension des impacts chimiques (à gauche) et thermique (à droite) au droit de l'Albien pour un puits injecteur au Dogger après 2 ans de fuite et 5, 10 et 15 ans après l'arrêt de la fuite	88
Illustration 29 – Estimation de l'extension des impacts chimiques (à gauche) et thermique (à droite) au droit de l'Albien pour un puits producteur au Dogger après 2 ans de fuite et 5, 10 et 15 ans après l'arrêt de la fuite [attention les échelles de couleur varient].....	89
Illustration 30 – Estimation de l'extension des impacts chimiques d'une fuite d'hydrocarbure dans l'Albien, considérant le gradient hydrogéologique moyen (illustration du haut) et ne considérant aucun gradient (illustration du bas). Les limites en rouge sont données pour des saturations de 1% (limite la plus large), 25%, 50%, 75% et 90%.	91
Illustration 31 – Risque de contamination d'un captage à l'Albien par rapport à l'extension de sa zone d'appel.....	92

Liste des tableaux

Tableau 1 – Liste des informations nécessaires et ordres de grandeur attendus pour l'analyse de la qualité des bouchons de ciment lors d'une réouverture de puits.	28
Tableau 2 – Résultat de l'analyse de la qualité des bouchons de ciment dans le cadre de la réouverture du puits CQL1	28
Tableau 3 – Scénarios de risques identifiés pour l'analyse générique des risques.....	50
Tableau 4 – Résultats de l'estimation de la vraisemblance des types de scénarios identifiés ...	52
Tableau 5 – Choix de quantification pour l'estimation des débits de fuite	58
Tableau 6 – Sous-scénarios quantifiés pour le scénario de type 1.....	67
Tableau 7 – Sous-scénarios quantifiés pour le scénario de type 2.....	71
Tableau 8 – Sous-scénarios quantifiés pour le scénario de type 3.....	73
Tableau 9 – Synthèse de l'estimation de l'intensité des débits de fuite pour les différentes catégories de scénarios identifiées	77
Tableau 10 – Paramètres hydrodynamiques retenus pour les modélisations	81
Tableau 11 – Paramètres thermiques retenus pour le scénario de type 2	82

Tableau 12 – Résultats de l'estimation de l'extension des impacts chimiques de l'ion chlorure dans le cas d'une fuite d'eau salée issue du Dogger ou du Trias. Ces résultats correspondent à des modélisations de fuite utilisant les débits maximum de fuites de saumure obtenus pour les scénarios de type 1 et 3.....	83
Tableau 13 – Résultats de l'estimation de l'extension des impacts chimiques de l'ion chlorure dans le cas d'une fuite d'eau salée issue du Dogger. Ces résultats correspondent à des modélisations de fuite utilisant les débits maximum de fuites de saumure obtenus pour les scénarios de type 2.....	84
Tableau 14 – Résultats de l'estimation de l'extension des impacts chimiques de l'ion chlorure dans le cas d'une fuite d'eau salée issue du Dogger : comparaison entre les résultats obtenus pour les débits maximaux et ceux obtenus pour des débits plus faibles.	87
Tableau 15 – Résultats de l'estimation de l'extension des impacts thermiques dans le cas d'une fuite d'eau géothermale issue du Dogger au droit d'un puits d'injection ou de production en exploitation.....	87
Tableau 16 – Résultats de l'estimation des impacts chimiques dans le cas d'une fuite d'hydrocarbures	90

Liste des annexes

Annexe 1 Résultats des comparaisons des diagraphies CBL

Annexe 2 Comparaison entre les teneurs en espèces toxiques et indésirables de l'eau potable et de l'eau géothermale (Abou Akar, 1994)

1. Introduction

La perception des risques de pollution des nappes d'eau souterraine par des fuites au droit des forages profonds du bassin parisien, pour l'exploitation des hydrocarbures, l'énergie géothermique ou le stockage de gaz, est présente dans l'opinion publique même si les cas avérés de fuite sont actuellement quasiment inexistants (Vernoux et al., 2002).

Au vu de la mobilisation de la société civile, des acteurs du territoire et des pouvoirs publics autour de l'environnement et notamment en ce qui concerne l'exploitation des hydrocarbures et de l'énergie géothermique profonde, il apparaît nécessaire de disposer d'éléments techniques complémentaires sur l'évolution des forages au cours du temps (et en particulier de leurs cimentations) et sur l'impact potentiel d'une fuite sur la qualité de la nappe de l'Albien-Néocomien, considérée dans le SDAGE du bassin Seine-Normandie comme ressource en eau stratégique (ARRETE N°2003-248 du 21 février 2003).

L'étude présentée dans ce rapport est à l'initiative de la DRIEE Ile-de-France et a obtenu le soutien financier de l'Agence de l'Eau Seine-Normandie. Ses objectifs sont les suivants :

- 1- Evaluer l'état des cimentations des tubages des forages profonds et leur évolution au cours du temps, ainsi que l'état des bouchons de ciments mis en place lors de la fermeture des ouvrages ;
- 2- Les risques de contamination dépendant de l'état des ouvrages mais aussi des pressions des réservoirs au regard des pressions des nappes de l'Albien et du Néocomien, connaître les caractéristiques hydrodynamiques des nappes de l'Albien-Néocomien et des réservoirs profonds, et, en particulier, les niveaux piézométriques et les pressions de gisement.
- 3- A partir de ces éléments, mener une étude de risques, permettant de donner des ordres de grandeur concernant les impacts potentiels des fuites dans l'Albien et dans le Néocomien.

La zone d'étude correspond à l'emprise de la nappe de l'Albien-Néocomien telle que définie dans le décret ZRE (Illustration 1).

Le rapport est divisé selon les différentes étapes ayant été nécessaires pour répondre aux questions posées : la première partie (chapitre 2) est dédiée à l'évaluation, sur des ouvrages du bassin parisien, de la qualité des cimentations des tubages et des bouchons mis en place lors de la fermeture des puits. La seconde partie (chapitre 3) fournit les caractéristiques hydrogéologiques et hydrodynamiques des nappes de l'Albien et du Néocomien ayant pu être récoltées ainsi que les propriétés de réservoir des formations profondes exploitées dans le bassin. Les chapitres suivants présentent l'étude des risques de pollution des nappes de l'Albien et du Néocomien par les forages profonds : le chapitre 4 présente l'approche suivie ; le chapitre 5 décrit les types de scénarios choisis pour l'étude et susceptibles de conduire à une pollution ; ces scénarios ont ensuite été analysés à la fois en terme de vraisemblance (chapitre 6) et d'estimation des conséquences et des impacts (chapitres 7 et 8).

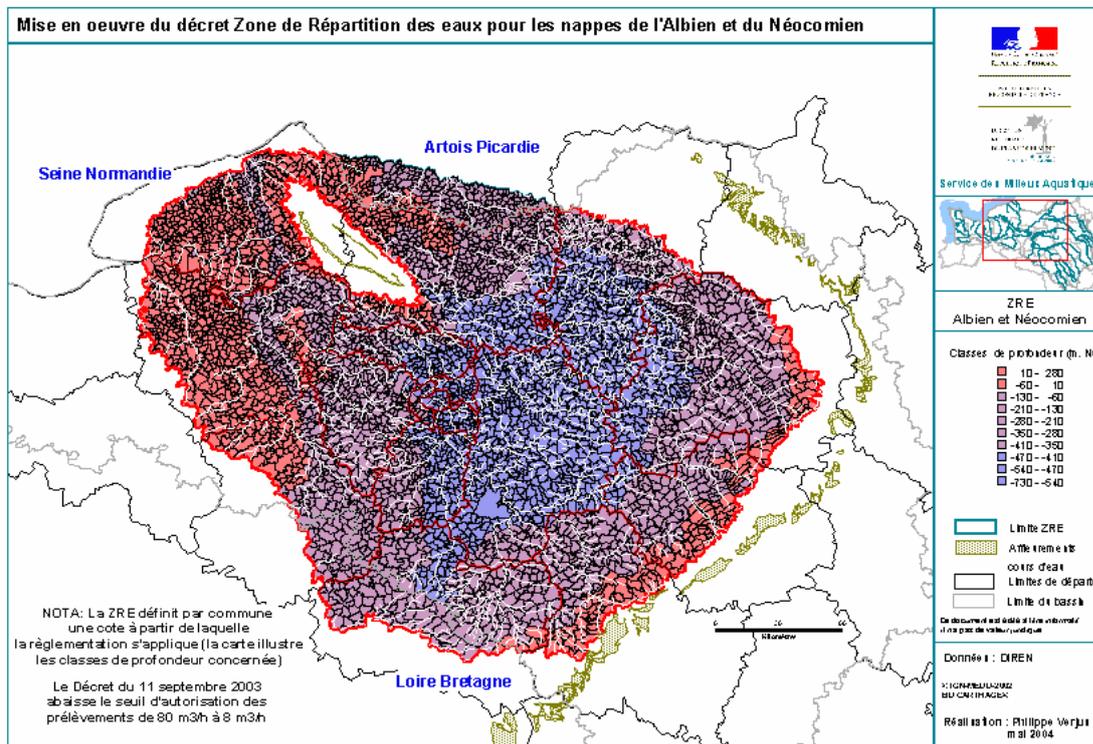


Illustration 1 – Zone de répartition des eaux pour les nappes de l'Albien et du Néocomien (source DRIEE IDF)

2. Analyse des cimentations des tubages et des bouchons de ciment

L'objectif de cette section est d'évaluer, sur des cas d'étude localisés dans le bassin parisien, l'évolution dans le temps de la qualité 1) des cimentations des tubages et 2) des bouchons de ciment installés lors des fermetures d'ouvrages. La qualité de ces cimentations est en effet primordiale pour éviter l'existence de voies de fuite et donc de connections potentielles entre aquifères. Ce chapitre présente les analyses menées sur ces deux volets (cimentation des tubages, bouchons de ciment) ainsi que les résultats pouvant en être tirés.

Pour des informations détaillées sur les forages profonds (conception, forage, cimentation, complétion, exploitation et fermeture), nous invitons le lecteur à consulter les rapports dédiés de l'INERIS (Lahaie, 2015) et du BRGM (Vernoux et al., 2002).

2.1. QUALITE DES CIMENTATIONS DES TUBAGES

Dans le bassin parisien, les forages profonds en cours d'exploitation (forages d'hydrocarbures, géothermiques et de stockage de gaz dont le nombre est estimé entre 400 et 500 sur le bassin de Paris) bénéficient de diagraphies réalisées :

- tous les 10 ans pour les forages d'hydrocarbures et de stockage de gaz ;
- tous les 3 ans pour les puits géothermiques injecteur et tous les 5 ans pour les puits géothermiques producteurs.

L'évaluation de l'état des cimentations et du tubage des forages profonds et leur évolution au cours du temps peut donc s'appuyer sur la comparaison des résultats de ces surveillances périodiques, mais cette comparaison nécessite d'accéder à ces données et que celles-ci soient de bonne qualité. La comparaison entre les données de cimentation acquises à deux temps distincts doit en effet permettre de suivre l'évolution de l'adhérence du ciment au tubage, caractérisée par le Bond Index afin de déterminer les améliorations ou détériorations de la qualité de la cimentation.

Les forages sur lesquels l'analyse a été menée ont été sélectionnés en fonction de la disponibilité de deux diagraphies de contrôle de cimentation réalisées à plusieurs années d'intervalle. **Le choix s'est au final avéré limité** et seulement 5 forages ont pu être sélectionnés :

- 2 forages géothermiques : 02193X0370 / GHLR1 (La Hay-les-Roses 1) ; 02193X0372 / GCHL-1 (Chevilly-Larue 1)
- 2 forages pétroliers : VPU O 11 / VPU147D (Villeperdue 147D) ; VPU M 31 / VPU153D (Villeperdue 153D)
- 1 forage de stockage de gaz : 01825X0039 / B27 (Beynes 27)

Ces analyses ont été réalisées plus particulièrement à l'aplomb des nappes de l'Albien et du Néocomien et au niveau des couches géologiques traversées sous-jacentes, en particulier les formations argileuses susceptibles d'assurer une étanchéité naturelle vis-à-vis des formations profondes exploitées.

2.1.1. Méthodologie d'évaluation quantitative des contrôles de cimentation CBL

Afin de caractériser l'évolution de la qualité de la cimentation entre mesures, la méthodologie suivante a été appliquée :

1- Digitalisation des courbes d'amplitude CBL, Temps de pointé et de rayonnement Gamma Naturel si disponible

Sur les anciens forages (forés avant les années 2000), les données de CBL (« Cement Bond Log ») acquises à la réception de l'ouvrage sont sous la forme de log papier, aucune version numérique des mesures n'étant disponible. Un travail de numérisation doit être entrepris sur ces logs afin d'accéder aux valeurs d'amplitude CBL, Temps de pointé et si possible du gamma-ray (pour connaître la géologie).

2- Contrôle qualité de la digitalisation

La digitalisation (généralement réalisée automatiquement par le logiciel de numérisation) peut être à l'origine d'erreurs :

- ancienneté du support qui peut le rendre partiellement illisible ;
- valeur dite overscale (valeur dépassant la limite supérieure de l'échelle de valeurs, entraînant un saut de la courbe vers les valeurs minimales) ;
- flottement du papier lors de la numérisation.

Le contrôle qualité de la digitalisation consiste à s'assurer que les valeurs des courbes après digitalisation correspondent aux courbes du log. A défaut, la digitalisation est effectuée manuellement sur les intervalles défectueux.

3- Contrôle qualité de la mesure

Le contrôle qualité consiste en premier lieu à s'assurer du centrage de la sonde, la mesure CBL étant très sensible à un excentrement de l'outil de mesure. La courbe du temps de pointé est analysée pour s'assurer que celui-ci est constant. Un excentrement de la sonde de mesure se traduit par une diminution du temps de pointé. Dans ce cas, la mesure est erronée (diminution de la valeur d'amplitude) et les valeurs d'amplitude ne peuvent être corrigées. L'interprétation doit tenir compte de cet excentrement lorsque des variations d'amplitudes sont observées entre deux mesures.

4- Normalisation de l'amplitude pour correspondre aux standards actuellement utilisés

Les diagraphies CBL doivent être calibrées en amplitude (mV) en fonction du diamètre du tubage (par exemple 62 mV pour une portion free-pipe ("tubage libre, pas d'adhérence du ciment au tubage") dans un tubage 7"). Sur les mesures anciennes, l'étalonnage n'est pas effectué correctement (valeurs qui ne sont pas en mV ou valeur de free-pipe erronée). Un réétalonnage est nécessaire avant comparaison entre les différentes mesures pour que le standard appliqué sur chaque mesure soit identique.

Cet étalonnage consiste à multiplier les valeurs erronées par un facteur constant afin que l'amplitude sur les portions free-pipe corresponde aux standards. A défaut de portion free-pipe sur le log, le facteur multiplicateur est ajusté afin de faire correspondre les anciennes mesures aux plus récentes (en considérant que les mesures récentes sont bien étalonnées).

5- Calcul de l'indice d'adhérence (bond-index)

La qualité de l'adhérence du ciment au tubage est caractérisée par un indice introduit par la société Schlumberger : le Bond Index (BI).

L'indice de Bond Index, exprimé entre 0 et 100% correspond physiquement au pourcentage de la circonférence du tubage qui adhère au ciment.

Le bond index est calculé selon la formule suivante :

$$BI = \frac{\log(A_0) - \log(A)}{\log(A_0) - \log(A_{100})}$$

Avec A_0 l'amplitude CBL pour un tubage free-pipe (62 mV pour un tubage 7"), A_{100} l'amplitude CBL pour un tubage parfaitement cimenté et A l'amplitude mesurée.

6- Calcul de la résistance à la compression

La résistance à la compression théorique du ciment peut être déterminée à partir des valeurs d'amplitude mesurées par la sonde CBL. La société Schlumberger a établi une correspondance entre les amplitudes mesurées et la résistance à la compression en fonction de l'épaisseur du tubage (des explications sont données à l'illustration 2).

CBL Interpretation Chart

M-1

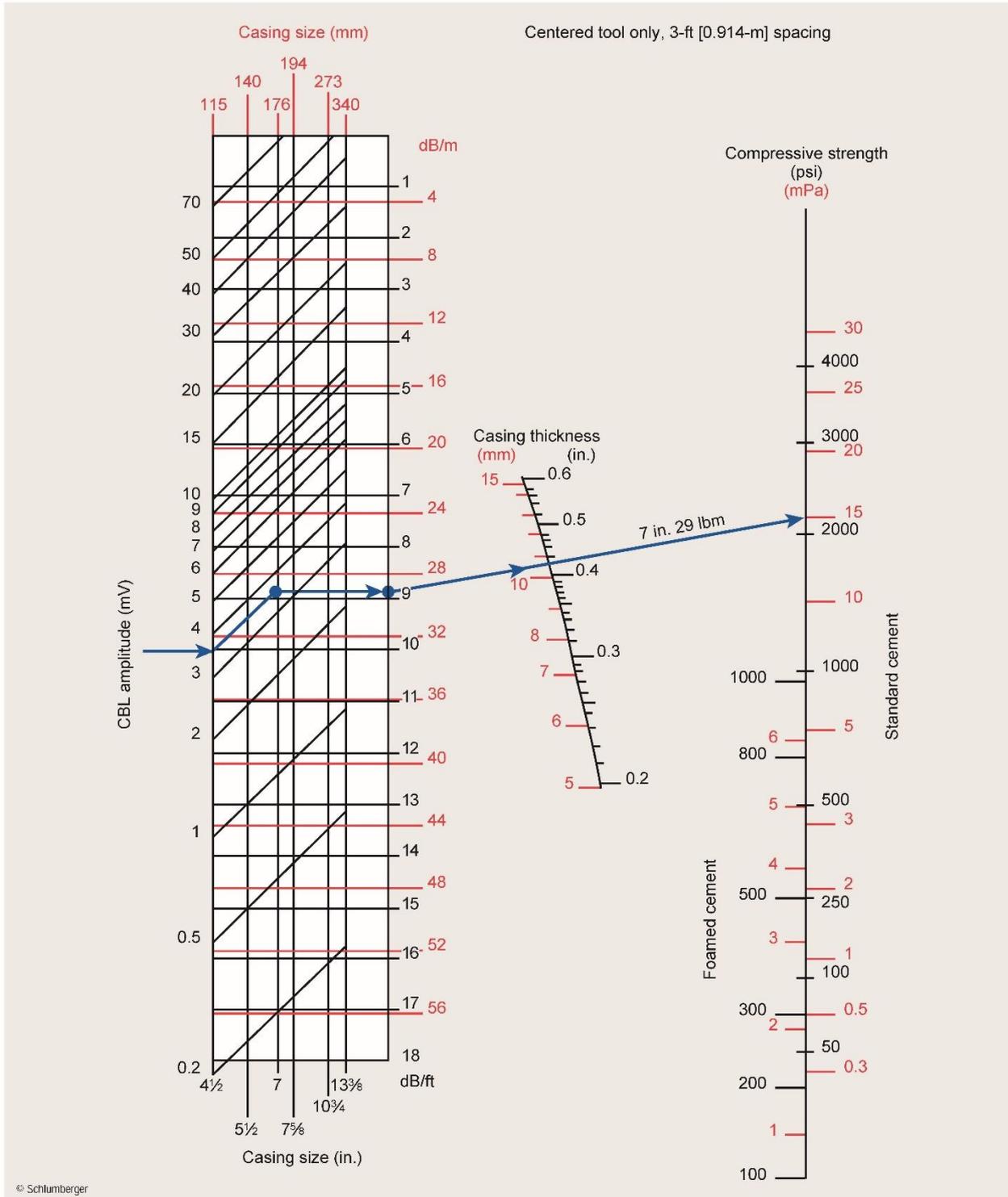


Illustration 2 – Correspondance entre l'amplitude et la résistance à la compression d'après Schlumberger

2.1.2. Forage GHLR1

Informations générales

Le forage GHLR1 est un forage d'exploitation géothermique de l'aquifère du Dogger (Calcaire du Bathonien) situé sur la commune de La Hay les Roses (94) (Illustration 3). C'est un forage dévié, réalisé en décembre 1984, utilisé pour la réinjection de l'eau géothermale.

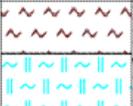
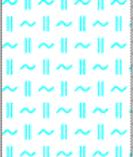
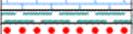
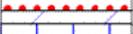
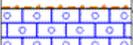
Profondeur	Formation	Lithologie	Lithologie	Stratigraphie	Altitude
115.00			Ensemble indifférencié de calcaire, argile, mame, sable : Limon en surface, Rupélien (Calcaire de Brie) à Yprésien supérieur (Argile plastique). Présence des Marnes de Meudon à la base ?	Paléogène	-27.00
			Craie blanche à silex, puis craie un peu argileuse : SENO-Turonien.	Crétacé supérieur	
590.50			Calcaire crayeux argilo-sableux, glauconie.	Cénomaniens	-502.50
666.40	Argiles du Gault		Argile gris noir micacée, avec lits sableux.	Albien	-578.40
696.00			Argile, sable et grès : Crétacé inférieur indifférencié.	Crétacé inférieur	-608.00
937.50			Calcaire dolomitique (Purbéckien).		-849.50
966.30			Calcaire, calcaire sableux, calcaire bioclastique, passées marnes.	Tithonien	-878.30
1084.80			Marnes et bancs calcaires.	Kimméridgien	-996.80
1215.35			Calcaire, calcaire oolithique, calcaire bioclastique, calcaire sableux.	Oxfordien supérieur	-1127.35
1435.30			Calcaire argileux, parfois silto-sableux, niveaux argilo-marneux silteux.	Oxfordien	-1347.30
1579.80			Calcaire argileux à oolithes ferrugineuses au sommet, puis argile calcaire silto-sableuse.	Callovien	-1491.80
1618.70			Calcaire, calcaire oolithique et graveleux.	Callovien inférieur	-1530.70
1623.90				Bathonien	-1535.90
1750.00					-1662.00

Illustration 3 – Log géologique du forage GHLR1 (source Infoterre)

Description des mesures

- Log de référence

Le log de référence est le log de la société Schlumberger enregistré le 20 décembre 1984. Seul le log chantier a été retrouvé dans les archives de la DRIEE. La copie papier est constituée du temps de transit (Travel-Time en μ s) et de l'amplitude (en mV).

Contrôle qualité du log de référence

En l'absence de VDL (« Variable Density Log ») (et d'enregistrement sous format numérique), les valeurs d'amplitude CBL ne peuvent être contrôlées. Le contrôle qualité sur le temps de pointé de la première arrivée montre que :

- le temps de pointé est constant sur l'intervalle 50 - 1870 m ;
- le temps de pointé est compris entre 301 et 315 μ s, conforme avec un tubage 9"5/8.

La fenêtre de pointé choisie est correcte. L'amplitude qui découle de ce choix peut également être considérée comme fiable.

L'amplitude mesurée varie entre 2 et 55 mV. Il est généralement admis que l'amplitude Free-pipe pour le tubage 9"5/8 est de 51 mV.

Pour établir une comparaison entre les mesures, une normalisation est appliquée sur le log pour ramener les amplitudes free-pipe à une valeur de 51 mV.

- **Log de comparaison**

Le log est une mesure réalisée pendant les travaux de work-over (reconditionnement) du puits après curage du tubage (2015). Les mesures d'épaisseur apparentes ont montré un tubage en très bon état général avec des épaisseurs proches de l'épaisseur théorique du tubage.

Contrôle qualité du log de référence

Les données au format numérique permettent de s'assurer que le temps de pointé est correct, que l'outil est correctement centré dans le tubage.

Analyse comparative des mesures

La comparaison entre les deux mesures est représentée sur le log fourni en Annexe 1.

Intervalle 0 - 400 m : les mesures d'amplitude et les valeurs de bond index qui en découlent montrent que la qualité de la cimentation n'a pas évolué dans l'entrefers entre les tubages 9"5/8 et 13"3/8. L'adhérence du ciment au tubage est demeurée mauvaise entre 1984 et 2015. Possible micro-annulaire liquide entre le tubage et le ciment qui ne s'est pas rétracté avec le temps.

Intervalle 400 - 520 m : Une amélioration de l'adhérence du ciment au tubage est visible sur les courbes d'amplitude (diminution d'environ 10 mV) qui se traduit par une augmentation de la valeur du bond index (passage de 10 à 20 %). Les formations traversées sont les formations crayeuses du Turonien.

Intervalle 520 - 820 m : On remarque une diminution de l'amplitude (et donc une amélioration du bond index) au niveau des passages argileux (principalement au niveau des argiles du Gault). Sur ce passage, l'indice de Bond Index passe de 15 à 35 %.

Intervalle 820 - 1870 m : La qualité de la cimentation a peu évolué entre 1984 et 2015 sur cet intervalle. Les valeurs d'amplitudes sont demeurées constantes. Quelques variations d'amplitudes sont visibles (légère amélioration ou détérioration de la qualité de la cimentation) sans qu'aucune corrélation ne puisse être établie avec la nature géologique des terrains à l'extérieur du tubage.

2.1.3. Forage GCHL1

Informations générales

Le forage GCHL1 est également un forage d'exploitation géothermique de l'aquifère du Dogger (Calcaire du Bathonien) situé sur la commune de Chevilly-Larue (94) (Illustration 4). C'est un forage dévié, réalisé en septembre 1984, utilisé pour la réinjection de l'eau géothermale.

Profondeur	Formation	Lithologie	Lithologie	Stratigraphie	Altitude
120.00			Ensemble indifférencié de calcaire, argile, mame, sable : Rupélien (Sables de Fontainebleau) à Yprésien supérieur (Argile plastique). Présence des Mames de Meudon à la base ?	Paléogène	-27.00
			Craie blanche à silex, puis craie un peu argileuse : Séno-Turonien.	Crétacé supérieur	
607.70			Calcaire crayeux argilo-sableux, glauconie.	Cénomaniens	-514.70
681.00	Argiles du Gault		Argile gris noir micacée, avec lits sableux.	Albien	-588.00
712.60			Argile, sable et grès : Crétacé inférieur indifférencié.	Crétacé inférieur	-619.60
950.70			Calcaire dolomitique (Purbéckien).		-857.70
983.25			Calcaire, calcaire sableux, calcaire bioclastique, passées mameuses.	Tithonien	-890.25
1106.70			Mame et bancs calcaires.	Kimméridgien	-1013.70
1238.60			Calcaire, calcaire oolithique, calcaire bioclastique, calcaire sableux.	Oxfordien supérieur	-1145.60
1457.60			Calcaire argileux parfois silto-sableux, niveaux argilo-mameux silteux.	Oxfordien	-1364.60
1606.20			Calcaire argileux à oolithes ferrugineuses au sommet, puis argile à mame silto-sableuse.	Callovien	-1513.20
1647.40			Calcaire oolithique, graveleux, ou micritique.	Bathonien à Callovien	-1554.40
1750.00					-1657.00

Illustration 4 – Log géologique du forage GCHL1 (source Infoterre)

Description des mesures

- Log de référence

Log de la société Welex enregistré le 15 septembre 1984. La copie papier retrouvée dans les archives de la DRIEE représente le VDL du capteur 5' et l'amplitude CBL exprimée sur une échelle 0 - 1000 sans unité.

Après digitalisation de la courbe d'amplitude, les valeurs ont été converties sur une échelle 0 - 51 mV afin d'être comparées aux mesures réalisées en 2015.

Contrôle qualité du log de référence

En l'absence de la courbe du temps de pointé et l'impossibilité de digitaliser le VDL, le contrôle qualité porte sur la correspondance entre la courbe d'amplitude et l'allure du VDL :

- Le VDL ne montre pas d'excentrement de l'outil de mesure ;
 - Les passages présentant une diminution de l'amplitude mesurée montrent également sur le VDL une atténuation du signal tubage et un signal formation plus ou moins marqué ;
 - Sur les zones à fortes amplitudes, le VDL montre un signal tubage fort avec des joints de tubage bien marqués.
- **Log de comparaison**

Le log est une mesure réalisée pendant les travaux de work-over du puits après curage du tubage. Les mesures d'épaisseur apparentes ont montré un tubage en bon état général avec des épaisseurs de l'ordre de 7 - 8 mm, constante sur la longueur du tubage.

Contrôle qualité du log de référence

Les données au format numérique permettent de s'assurer que le temps de pointé est correct, que l'outil est correctement centré dans le tubage.

Analyse comparative des mesures

La comparaison entre les deux mesures est représentée sur le log fourni en Annexe 1

Intervalle 0 - 140 m : les amplitudes ont peu évolué entre 1984 et 2015. On note une légère amélioration du bond index autour de 80 - 90 m.

Intervalle 140 - 590 m : En 1984, les indices de présence de ciment dans l'annulaire étaient faibles. Une amélioration est visible sur les mesures de 2015 avec une diminution d'amplitude atteignant 20 mV. L'indice de bond index moyen passe de moins de 5 à environ 15-20 %. L'amélioration de l'adhérence du ciment au tubage est visible sur le VDL de 2015 notamment par une diminution de la propagation des chevrons de pattern des joints de tubage.

Intervalle 590 - 940 m : A partir du toit du Cénomaniens, les mesures de 1984 montrent une amélioration de l'adhérence du ciment au tubage notamment à la base du Cénomaniens et au niveau des argiles du Gault. Les mesures de 2015 montrent une nette amélioration de l'adhérence entre 660 et 690 m (base du Cénomaniens et toit des argiles du Gault). De 690 à 720 m, à la base des argiles du Gault, la cimentation n'a pas évolué et est demeurée moyenne à bonne. De 720 à 940 m, les valeurs d'amplitude montrent une légère amélioration du bond index (jusqu'à 10 %).

Intervalle 940 - 970 m : Au niveau des formations argileuses du Néocomien, les mesures de 2015 montrent une amélioration de l'adhérence du ciment au tubage jusqu'à + 35% de bond Index.

Intervalle 970 - 1225 m : Les amplitudes mesurées en 1984 et 2015 sont similaires. Excepté les pics au niveau des joints de tubages qui sont plus marqués sur le log de 2015, l'amélioration se limite à quelques pourcents sur la courbe du bond-index.

Intervalle 1225 - 1335 m : Ce passage montre une détérioration de la qualité de la cimentation sur les mesures de 2015 par rapport aux mesures de 1984 avec localement une augmentation

de plus de 25 mV de l'amplitude (Bond Index passant de 65 à 10 %). Cette dégradation de l'adhérence du ciment au tubage est située à la base des formations marneuses du Kimméridgien et au niveau des formations calcaires du Séquanien, potentiellement réservoir.

Intervalle 1335 - 1710 m : les mesures montrent une amélioration de la cimentation principalement au niveau des formations argileuses de l'Oxfordien. La diminution d'amplitude atteint plus de 20 mV (Bond index passant de 15 à plus de 50 %). Cette amélioration est également visible au niveau des formations calcaires du Rauracien et de l'Argovien mais le gain d'adhérence est plus faible qu'au niveau des formations de l'Oxfordien.

2.1.4. Forage VPU O11

Informations générales

Le forage VPU O11 (VPU 147D) est un forage de développement situé sur la concession de Villeperdue destiné à la production d'huile piégée dans les calcaires du Callovien inférieur. Il a été foré en déviation en février-mars 1990 et a atteint une profondeur verticale de 2053 m (Illustration 5).

Marqueur	Prof. Mesuree	Ep. (m)	Cte. N.M. (m)	Ep. (m)
SENONIEN	122.00	319.00	-86.70	318.58
TURONIEN	441.00	183.00	231.88	178.04
CENOMANIEN	624.00	104.00	409.92	102.45
ALB. ARGILEUX	728.00	71.00	512.37	70.51
ALB. SABLEUX	799.00	76.50	582.88	75.33
TOP SABLES	Non def.	Non def.	Non def.	Non def.
APTIEN	875.50	47.00	658.21	45.73
BARREMIEN	922.50	30.50	703.93	29.49
NEOCOMIEN	953.00	104.00	733.42	99.23
PURBECKIEN	1057.00	58.00	832.65	54.12
PORTLAN. INF.	1115.00	163.00	886.77	145.37
KIMMERIDGIEN	1278.00	219.50	1032.14	179.01
OXFORD. SUP.	1497.50	400.50	1211.15	312.20
OXFORD. INF.	1898.00	74.00	1523.35	64.70
CALLOV. SUP.	1972.00	53.70	1588.05	48.27
CALLOV. INF.	2025.70	0.60	1636.32	0.54
R11	2026.30	8.40	1636.86	7.64
R12	2034.70	1.70	1644.50	1.55
TOIT R2	2036.40	5.90	1646.05	5.38
R22	2042.30	4.70	1651.43	4.29
R23	2047.00	5.00	1655.72	4.58
MUR R2	2052.00	> 2.70	1660.30	> 2.48

Illustration 5 – Log géologique du forage VPU O11 (source Total Exploration)

Description des mesures

- **Log de référence**

Log de la société Schlumberger enregistré le 2 mai 1990. La copie papier fournie par la société Lundin représente le VDL du capteur 5' et l'amplitude CBL exprimée sur une échelle 0 - 50 mV. Les mesures concernent l'intervalle 800 - 1000 m et l'intervalle 1950 - 2050 m.

Après digitalisation de la courbe d'amplitude, les valeurs ont été converties sur une échelle 0 - 81 mV pour correspondre aux valeurs admises pour le tubage 4"1/2.

Contrôle qualité du log de référence

Le temps de pointé est constant et conforme au temps théorique d'arrivée du signal tubage. Le log VDL ne montre pas d'indice d'excentrement de la mesure, le signal tubage (quand il est présent) n'est pas perturbé.

- **Log de comparaison**

Log de la société SDP enregistré le 23 octobre 2009. La copie papier et les fichiers numériques (format las et pdf) ont été fournis par la société Lundin.

Les mesures concernent l'intervalle 167 - 1651 m.

Les valeurs d'amplitude, à l'origine sur une échelle 0-50 mV ont été converties sur une échelle 0 - 81 mV.

Un décalage de 25 m vers le bas a été appliqué aux mesures de 2009 pour les faire correspondre aux mesures de 1990.

Contrôle qualité du log de référence

Le temps de pointé est conforme avec celui d'un tubage 4"1/2. Aucune variation n'indique un excentrement de la mesure.

Analyse comparative des mesures

La comparaison entre les deux mesures est représentée sur le log fourni en Annexe 1.

Intervalle 800 - 870 m : les amplitudes ont diminué entre 1990 et 2009, améliorant l'adhérence au tubage. L'augmentation de l'indice d'adhérence (Bond Index) est plus importante au niveau des passages sableux.

Intervalle 870 - 915 m : Au droit des formations argileuses de l'Aptien, la cimentation a peu évolué. La cimentation, bonne en 1990, a conservé de bonnes caractéristiques.

Intervalle 915 - 1000 m : les amplitudes ont fortement diminué entre 1990 et 2009. La qualité apparente de la cimentation s'est ainsi améliorée.

2.1.5. Forage VPU M31

Informations générales

Le forage VPU M31 (VPU 153D) est également un forage de développement situé sur la concession de Villeperdue destiné à la production d'huile piégée dans les calcaires du Callovien inférieur. Il a été foré en déviation en avril-mai 1990 et a atteint une profondeur verticale de 1867 m (Illustration 6).

Marqueur	Prof. Mesuree	Ep. (m)	Cte. N.M. (m)	Ep. (m)
TERTIAIRE	Non def.	Non def.	Non def.	Non def.
SENONIEN	Non def.	Non def.	Non def.	Non def.
TURONIEN	Non def.	Non def.	Non def.	Non def.
CENOMANIEN	Non def.	Non def.	Non def.	Non def.
ALB. ARGILEUX	Non def.	Non def.	Non def.	Non def.
TOP SABLES	Non def.	Non def.	Non def.	Non def.
APTIEN	Non def.	Non def.	Non def.	Non def.
BARREMIEN	Non def.	Non def.	Non def.	Non def.
NEOCOMIEN	Non def.	Non def.	Non def.	Non def.
PORTLAN. INF.	Non def.	Non def.	Non def.	Non def.
KIMMERIDGIEN	Non def.	Non def.	Non def.	Non def.
OXFORD. SUP.	Non def.	Non def.	Non def.	Non def.
OXFORD. INF.	1774.50	74.00	1520.85	71.67
CALLOV. SUP.	1848.50	50.20	1592.51	49.19
CALLOV. INF.	1898.70	0.60	1641.70	0.59
R11	1899.30	7.00	1642.29	6.88
R12	Non def.	Non def.	Non def.	Non def.
TOIT R2	1906.30	8.20	1649.17	8.06
R22	1914.50	6.00	1657.23	5.90
R23	Non def.	Non def.	Non def.	Non def.
MUR R2	1920.50	> 5.50	1663.13	> 5.37

Illustration 6 – Log géologique du forage VPU M31 (source Total Exploration)

Description des mesures

- **Log de référence**

Log de la société Schlumberger enregistré le 19 mai 1990. La copie papier fournie par la société Lundin représente le gamma ray, le temps de pointé, le VDL du capteur 5' et l'amplitude CBL exprimée sur une échelle 0 - 50 mV. Les mesures concernent les intervalles 875 - 1045 m et 1840 - 2010 m.

Après digitalisation de la courbe d'amplitude, les valeurs ont été converties sur une échelle 0 - 81 mV pour correspondre aux valeurs admises pour le tubage 4"1/2.

Contrôle qualité du log de référence

Le temps de pointé est conforme avec celui d'un tubage 4"1/2. Aucune variation n'indique un excentrement de la mesure.

- **Log de comparaison**

Log de la société SDP enregistré le 16 janvier 2008. La copie papier et les fichiers numériques (format las et pdf) ont été fournis par la société Lundin. Les mesures concernent les intervalles 540 - 1255 m, 1440-1480 m, 1650 - 1680 m et 1840 - 1970 m.

Les valeurs d'amplitude, à l'origine sur une échelle 0-50 mV ont été converties sur une échelle 0 - 81 mV.

Contrôle qualité du log de référence

Le temps de pointé est conforme avec celui d'un tubage 4"1/2. Aucune variation n'indique un excentrement de la mesure.

Analyse comparative des mesures

La comparaison entre les deux mesures est représentée sur le log fourni en Annexe 1.

La comparaison a été effectuée sur les intervalles présentant des mesures communes, c'est-à-dire entre 880 et 1050 m et entre 1840 et 1970 m.

Intervalle 880 - 1050 m : les mesures montrent qu'au niveau des formations de l'Albien et du Néocomien, la cimentation, soit a peu évolué, soit montre une détérioration de l'adhérence du ciment au tubage sur les intervalles 880 - 895 m (formations argileuses d'après le rayonnement gamma naturel), 975 - 1005 m (sable argileux) et entre 1025 et 1050 m (argiles).

Intervalle 1840 - 1970 m : Dans les formations marneuses et argileuses de l'Oxfordien et du Callovien, les mesures montrent une amélioration de la qualité de la cimentation sur la quasi-totalité de l'intervalle. Les formations argileuses et marneuses semblent avoir fluées, ce qui améliore l'adhérence apparente (bond-index) sur le tubage.

2.1.6. Forage B27

Informations générales

Le forage B27 est situé sur le site de stockage souterrain de gaz naturel de Beynes, situé dans les Yvelines. Ce site est constitué de 2 réservoirs superposés, Beynes Supérieur (Crétacé inférieur) et Beynes Profond (Jurassique Supérieur). Le forage a été réalisé en 1958 et a atteint la profondeur de 463 m avec un objectif de stockage de gaz dans les sables du Wealdien¹ (Illustration 7).

¹ Dénomination fréquemment utilisée par les pétroliers pour désigner le Néocomien

Profondeur	Formation	Lithologie	Lithologie	Stratigraphie	Altitude
				Crétacé supérieur	
237.00					-125.04
				Cénomaniens	
285.60	Argiles du Gault		Albien supérieur. Argiles du Gault présumées	Albien supérieur	-173.64
310.00				Aptien à Albien	-198.04
			Aptien-Albien.		
364.50				Barrémien	-252.54
				Valanginien inférieur à Hauterivien supérieur	
415.00			Wealdien. Argile		-303.04
422.30	Faciès wealdien		Wealdien. Sables	Jurassique supérieur	-310.34
451.00			Jurassique		-339.04

Illustration 7 – Log géologique du forage B27 (source Infoterre)

Description des mesures

- **Log de référence**

Log de la société Schlumberger enregistré le 8 Mai 1978. La copie papier a été fournie par Storengy. Les mesures concernent l'intervalle 250 - 422 m.

Après digitalisation, les données ont été conservées sur une échelle 0 - 61 mV.

Contrôle qualité du log de référence

Le temps de pointé est constant et conforme au temps théorique d'arrivée du signal tubage. Le VDL étant de mauvaise qualité, il est difficile de vérifier que les amplitudes mesurées sont conformes avec le signal tubage.

- **Log de comparaison**

Log de la société Schlumberger enregistré le 9 décembre 2011. La copie papier a été fournie par Storengy. Les mesures concernent l'intervalle 8 - 423 m.

Après digitalisation, les données ont été conservées sur une échelle 0 - 61 mV.

Contrôle qualité du log de référence

Le temps de pointé est conforme au temps théorique du tubage 7". Les variations de temps de pointé sont vers les temps plus long au niveau des passages bien cimentés. La calibration "free-pipe" est faite sur la partie haute de l'intervalle mesurée (79 m).

Analyse comparative des mesures

La comparaison entre les deux mesures est représentée sur le log fourni en Annexe 1.

La comparaison a été effectuée sur l'intervalle présentant des mesures communes, à savoir l'intervalle 250 - 423 m.

Intervalle 250 - 423 m : Sur l'ensemble de l'intervalle, les mesures montrent une nette amélioration de l'adhérence du ciment au tubage. Les mesures de 1978 montraient un manque d'adhérence qui n'est plus présent sur les mesures de 2011.

2.1.7. Conclusion

La méthode appliquée sur les 5 puits testés a permis d'établir une comparaison entre les mesures de contrôles de cimentation afin d'évaluer l'évolution de l'adhérence du ciment au tubage. Sur les 5 puits analysés, une amélioration de la cimentation est visible au moins sur certains niveaux, mais on peut aussi observer une détérioration. Cette amélioration semble dans certains cas être liée à la nature des formations géologiques à l'extrados du tubage (formations argileuses ou marneuses) qui pourraient avoir fluées. On peut également observer une amélioration de la cimentation au droit de formations non argileuses sans éléments pour l'expliquer. On a enfin le cas où on observe une amélioration générale de la cimentation, mais qui peut être considérée comme un artefact dans le cas où la première diagraphie est réalisée avant la consolidation finale du ciment. Enfin deux puits présentent une détérioration partielle de la cimentation (VPU-M31 et GCHL-1).

Au-delà de ces résultats ponctuels qui pourraient ne pas être transposables à tous les puits du bassin, des enseignements plus généraux peuvent être tirés quant à l'applicabilité et l'intérêt de cette approche de comparaison des CBL dans le temps. En effet, le suivi régulier des puits, associé à la faisabilité technique de la comparaison quantitative de deux CBL différés dans le temps rendrait possible l'analyse systématique de l'évolution de la cimentation des tubages pour tous les puits en exploitation. Cette analyse systématique permettrait d'identifier les puits posant potentiellement problème et d'intervenir au besoin au cours de l'exploitation, voire avant la fermeture afin de pallier à une dégradation future dont les prémices seraient visibles.

Néanmoins, il faut souligner les difficultés potentielles de mise en œuvre de l'approche sur un puits particulier, qui expliquent, en partie, que l'analyse ait été faite, dans la présente étude, sur seulement 5 puits du bassin. Ces difficultés concernent principalement les diagraphies initiales et plus particulièrement leur disponibilité, leur qualité (les diagraphies ont parfois été faites avant la prise complète des cimentations), ainsi que leur emprise (les diagraphies sont parfois limitées à des horizons bien précis, empêchant la comparaison sur toute la hauteur de la cimentation).

2.2. QUALITE DES BOUCHONS DE CIMENT

2.2.1. Méthodologie d'analyse

Il existe actuellement dans le bassin parisien une dizaine de puits qui ont été réouverts après avoir été initialement bouchés ainsi que deux projets de réouverture en cours. La démarche appliquée a consisté à :

- identifier ces ouvrages ayant fait l'objet d'une fermeture suivie d'une réouverture plusieurs années après ;
- analyser les données disponibles notamment les paramètres d'installation et de reforage des bouchons ;
- comparer ces paramètres et évaluer, sur la base de ces informations, la tenue dans le temps des bouchons de ciment.

Au final, 5 puits pétroliers sur une dizaine d'opérations de réouverture récentes et pour lesquels nous avons pu disposer d'informations ont été identifiés : CQL 1, NVL101, STL4, STL1 et SJS1. **Seul l'ouvrage CQL1, pour lequel des informations suffisamment détaillées ont été trouvées sur les opérations de fermeture et de réouverture, a pu être analysé.**

2.2.2. Liste des informations nécessaires et ordres de grandeur attendus

Idéalement, les informations présentées dans le Tableau 1 sont nécessaires pour permettre de juger la qualité d'un bouchon de ciment. Ces informations devraient être précisées dans les DOE (Dossier des Ouvrages Exécutés) de fermeture/d'abandon et d'ouverture. Des ordres de grandeur de paramètres indicateurs d'un ciment de bonne qualité sont également précisés.

Tableau 1 – Liste des informations nécessaires et ordres de grandeur attendus pour l'analyse de la qualité des bouchons de ciment lors d'une réouverture de puits.

DOE d'abandon		DOE de réouverture	
Informations nécessaires	Type de données / ordres de grandeur attendus	Informations nécessaires	Type de données / ordres de grandeur attendus
Etat du tubage au droit du bouchon	Log caliper 40bras/40 mesures mini ou log ultrasonique Test en pression	Test en pression entre chaque bouchon foré	Test pendant 10 min minimum à quelques dizaines de bars
Cote du diffuseur lors de la mise en place du bouchon	Positionnement à la profondeur théorique de la base du bouchon	Caractéristiques de l'outil utilisé	Usure, diamètre, type
Volume de ciment pompé	Excès à calculer en fonction du caliper Dépend de la configuration du puits : trou tubé ou trou ouvert	Cotes de début et fin de forage	Cote du sommet et de la base de chaque bouchon
Caractéristiques du ciment pompé	Densité (mini 1.60sg), Log UCA, temps de séchage à la température de fond, résistance à la compression	Paramètres de reforage	Poids sur l'outil (1 à 5 T), vitesse de rotation (80-100 RPM), avancement (jusqu'à 8-10m/h max), débit
Temps de séchage	Dépend des caractéristiques du laitier utilisé. Doit être cohérent avec les tests labo.	Présence de pertes ou de gains	Débit, volume
Test en pression après attente séchage	Test pendant 10min minimum à quelques dizaines de bars		
Positionnement du top du bouchon après séchage	Test mécanique du bouchon en appliquant quelques tonnes (2T mini) sur le sommet du bouchon à l'aide du diffuseur		

2.2.3. Analyse du cas CQL1

Le puits pétrolier CQL1 (« La Conquille 1 ») a été foré dans le département de la Seine-et-Marne en 1991 puis mis en service. L'ouvrage a été fermé définitivement en 1994 pour cause de productivité insuffisante. La fermeture a consisté à installer 5 bouchons de ciment positionnés entre le réservoir et la surface.

En 2006 il a été procédé à la réouverture de l'ouvrage. L'analyse des éléments récupérés essentiellement dans le DOE de réouverture a permis d'évaluer la qualité des bouchons 12 ans après leur mise en place.

Une synthèse des données et résultats est proposée dans le Tableau 2.

Tableau 2 – Résultat de l'analyse de la qualité des bouchons de ciment dans le cadre de la réouverture du puits CQL1

Source	Données/paramètres	Commentaire

Dossier de déclaration d'abandon	Positionnement des bouchons : <ul style="list-style-type: none"> - Bouchon n°1 : 2595 à 2436m ; - Bouchon n°2 : 1916 à 1705m ; - Bouchon n°3 : 1375 à 1152m ; - Bouchon n°4 : 1002 à 805m ; - Bouchon n°5 : 180m à la surface 	Le DOE d'abandon n'étant pas disponible, il n'est pas possible de savoir si les cotes indiquées ont été contrôlées par un test mécanique. Les cotes sont donc considérées ici comme théoriques.
DOE réouverture	Reforage des 5 bouchons avec une même fraise (neuve) de type économill 6"1/8	Fraise couramment utilisée pour ce type d'opération
	Paramètre de reforage du <u>5^{ème} bouchon</u> : rotation – 80 à 100RPM, poids sur l'outil – 1 à 2T, Q – 600l/min, avancement – 6m/h Top bouchon n°1 : surface Base bouchon n°1 : 184,2m/sol Test pression entre bouchon 1 et 2 à 100b/15min - OK	Paramètres indicateurs d'une bonne qualité de ciment Cotes conformes à la mise en place Bouchons 2 à 5 étanches
	Paramètre de reforage du <u>4^{ème} bouchon</u> : idem bouchon n°1, avancement – rapide jusqu'à 850 puis 6m/h Top bouchon n°2 : 789,3m (possible présence de sédiments) Base bouchon n°2 : 998,4m/sol Test pression entre bouchon 2 et 3 à 100b/15min - OK	Paramètres indicateurs d'une bonne qualité de ciment à partir de 850m/sol Cotes conformes à la mise en place Bouchons 3 à 5 étanches
	Paramètre de reforage du <u>3^{ème} bouchon</u> : idem bouchon n°1, avancement –7-10m/h Top bouchon n°3 : 1189,3m Base bouchon n°3 : 1376,4m/sol Test pression entre bouchon 3 et 4 à 100b/15min - OK	Paramètres indicateurs d'une bonne qualité de ciment Cote sommet 30m plus profonde que la cote théorique de mise en place base conforme à la mise en place Bouchons 4 à 5 étanches
	Paramètre de reforage du <u>2^{ème} bouchon</u> : idem bouchon n°1, avancement –9m/h Top bouchon n°4 : 1705m Base bouchon n°4 : 1917,1m/sol Test pression entre bouchon 4 et 5 à 100b/15min - OK	Paramètres indicateurs d'une bonne qualité de ciment Cotes conformes à la mise en place Bouchon 5 étanche
	Paramètre de reforage du <u>1^{er} bouchon</u> : idem bouchon n°1, avancement –18m/h Top bouchon n°5 : 2391,1m Base bouchon n°5 : 2582m/sol	Paramètres indicateurs d'un ciment tendre, probable contamination par le fluide de formation lors de sa mise en œuvre (bouchon positionné au droit des perforations) Cote sommet conforme à la mise en place Cote base correspondant à la base des perforations

L'absence de DOE d'abandon et donc de données relatives à la mise en œuvre des bouchons ne permet malheureusement pas de comparer le positionnement exact des bouchons entre les opérations de fermeture et de réouverture. Cependant, les cotes de reforage sensiblement identiques aux cotes de pose théoriques ainsi que les paramètres de forage et les tests en pression positifs sont indicateurs d'une bonne qualité de ciment et d'une absence de détérioration au cours des 12 années écoulées entre la fermeture et la réouverture.

2.2.4. Conclusion

Il est difficile de tirer des conclusions générales en matière de qualité des bouchons de ciment sur les puits fermés du bassin puisqu'un seul cas de réouverture de puits, bénéficiant de suffisamment d'information, a pu être traité.

Néanmoins, l'intérêt d'utiliser les opérations de réouverture de puits comme test ponctuel de l'intégrité des bouchons de ciment semble réelle. En effet, dans l'optique d'une compréhension accrue du vieillissement des bouchons et de l'évolution de leur intégrité au cours du temps, le forage des bouchons nécessaire dans le cadre de ces opérations de réouverture donne des informations impossibles à obtenir par d'autres moyens. Certes les opérations d'ouvertures sont et seront limitées en nombre dans le bassin, mais les enseignements fournis, même sur un faible échantillon, semblent précieux pour comprendre les conditions d'une intégrité pérenne sur les autres puits.

En revanche, les travaux menés lors de cette étude montrent qu'il ne semble pas possible, dans la plupart des cas, d'évaluer l'intégrité des bouchons faute de données suffisantes, soit sur les conditions de fermeture, soit sur les conditions de réouverture. La liste donnée dans le Tableau 1 peut, à ce titre, jouer le rôle de recommandations en matière d'informations à consigner.

3. Caractéristiques des nappes de l'Albien-Néocomien et des réservoirs profonds

3.1. CARACTERISTIQUES HYDROGEOLOGIQUES ET HYDRODYNAMIQUES DES NAPPES DE L'ALBIEN-NEOCOMIEN

Les éléments présentés ci-dessous sont repris de la dernière étude en date de ces nappes, à savoir la réalisation d'un nouveau modèle hydrodynamique du système aquifère multicouche de l'Albien-Néocomien (Seguin et al., 2015).

Les nappes, en grande partie captives, de l'Albien et du Néocomien couvrent les deux tiers du bassin de Paris. La profondeur des réservoirs augmente des affleurements vers le centre du bassin : ainsi, la profondeur de l'Albien est maximale en Seine-et-Marne, dans le secteur de Coulommiers, où elle atteint 800 m ; à Paris, au forage de Grenelle, premier forage dans l'Albien captif (mis en service en 1841), le toit de la formation a été rencontré à 548 m de profondeur.

Ces nappes, au centre du bassin, sont donc bien protégées des pollutions de surface et, par conséquent, sont de très bonne qualité. Elles représentent une réserve stratégique d'eau potable à l'échelle de la région Ile-de-France et du Bassin Seine-Normandie et sont considérées, dans le Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE) du Bassin Seine-Normandie, comme une ressource ultime pour l'alimentation en eau potable en cas de crise majeure.

Sur le plan géologique, les aquifères de l'Albien et du Néocomien, sont formés par des bancs de sable plus ou moins continus, séparés par des niveaux argileux. Les formations argilo-sableuses de l'Aptien, globalement moins perméables, s'intercalent entre ces deux aquifères mais ne les isolent pas totalement et les nappes qu'ils renferment constituent, au plan hydrodynamique, un système unique : *l'Albien-Néocomien captif*.

Le schéma ci-dessous présente la succession litho-stratigraphique synthétique du Crétacé inférieur dans le centre du Bassin parisien.

	Cénomaniens		
Crétacé inférieur	Albien		Marnes de Brienne Argiles de Gault Sables de Frécambault Argiles Tégulines Sables de Drillons Argiles de l'Armance Sables verts (s.s)
	Aptien		Complexe argilo-sableux
	Barrémien	Néocomien Wealdien	Sables de Perthes
	Hauterivien		Sables de Châteaurenard Sables de Château-Landon Grès du Puiset
	Valanginien		Sables de Griselles
	Tithonien		

Illustration 8 - Succession lithostratigraphique synthétique du Crétacé Inférieur du Bassin parisien (Vernoux et al., 1997)

Les terrains du Crétacé inférieur renferment un ensemble complexe d'aquifères répartis dans plusieurs niveaux sableux. Les études géologiques ont montré que ces niveaux aquifères sont plus ou moins individualisés selon les secteurs.

L'aquifère de l'Albien est, par sa puissance, son extension et ses réserves en eau souterraine, le plus important du Crétacé inférieur. Comme mentionné au paragraphe précédent, il est constitué de trois formations sableuses plus ou moins bien séparées par des formations semi-perméables : les Sables verts, les Sables des Drillons et les Sables de Frécambault.

L'aquifère de l'Albien est isolé des formations de la Craie par les Argiles du Gault et il est séparé de celui du Néocomien par des formations d'argile à intercalations de grès peu consolidés et par les argiles et marnes de l'Aptien.

L'aquifère du Néocomien est constitué de séries argilo-sableuses plus ou moins bien individualisées montrant d'importantes variations latérales de faciès. Les faciès calcaires du sud-est ne sont pas considérés comme aquifères. Le Néocomien peut être en communication avec les niveaux sous-jacents du Jurassique supérieur (le Tithonien).

L'illustration 9 fournit les cartes de profondeur du substratum (toit de l'Aptien), d'épaisseur cumulée des formations, de piézométrie et de température pour la nappe de l'Albien.

L'illustration 10 fournit les cartes de profondeur du substratum (toit du Tithonien), d'épaisseur cumulée des formations, de piézométrie et de température pour la nappe du Néocomien.

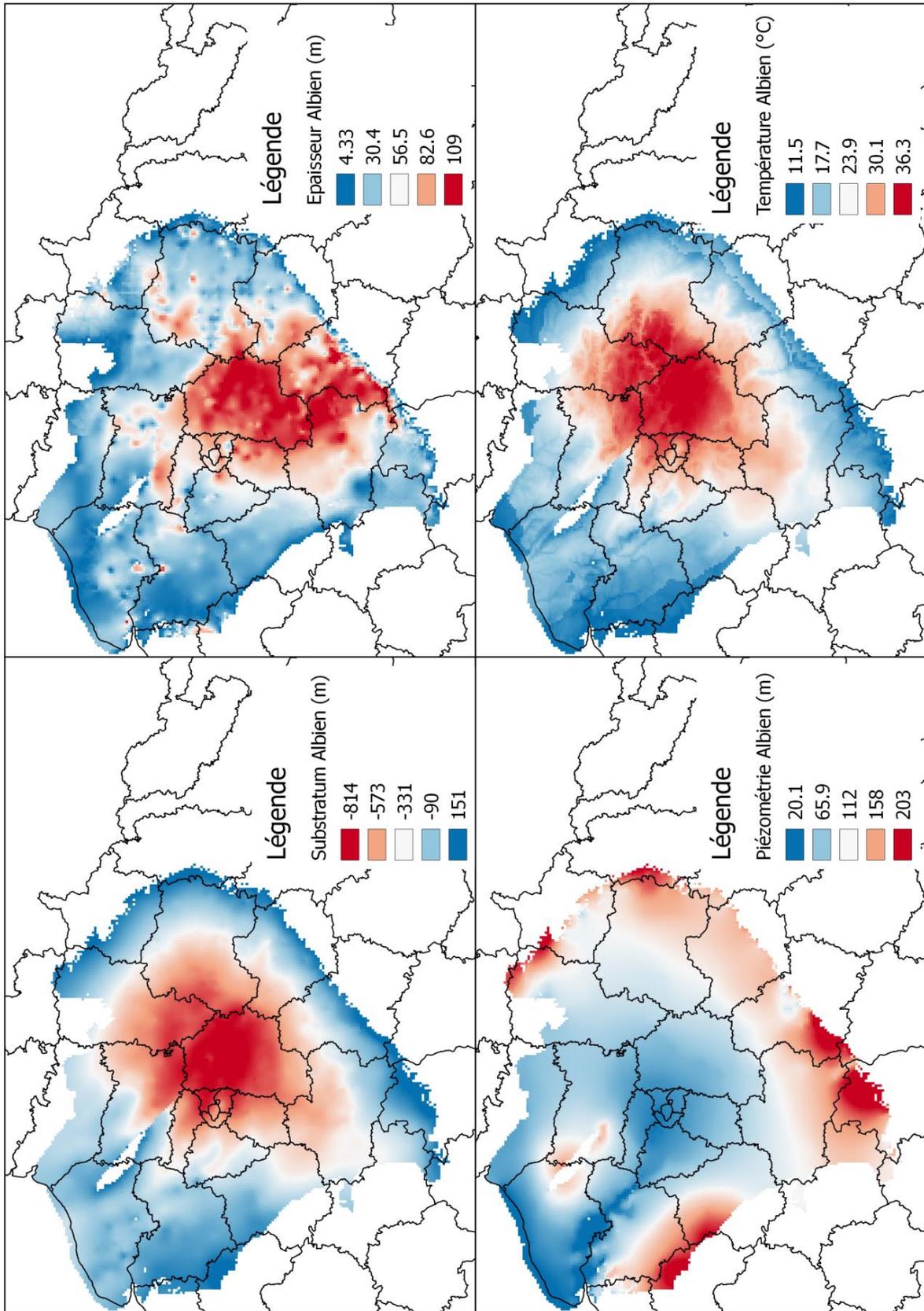


Illustration 9 – Profondeur du substratum, épaisseur, piézométrie et température de la nappe de l'Albien (d'après Seguin et al., 2015)

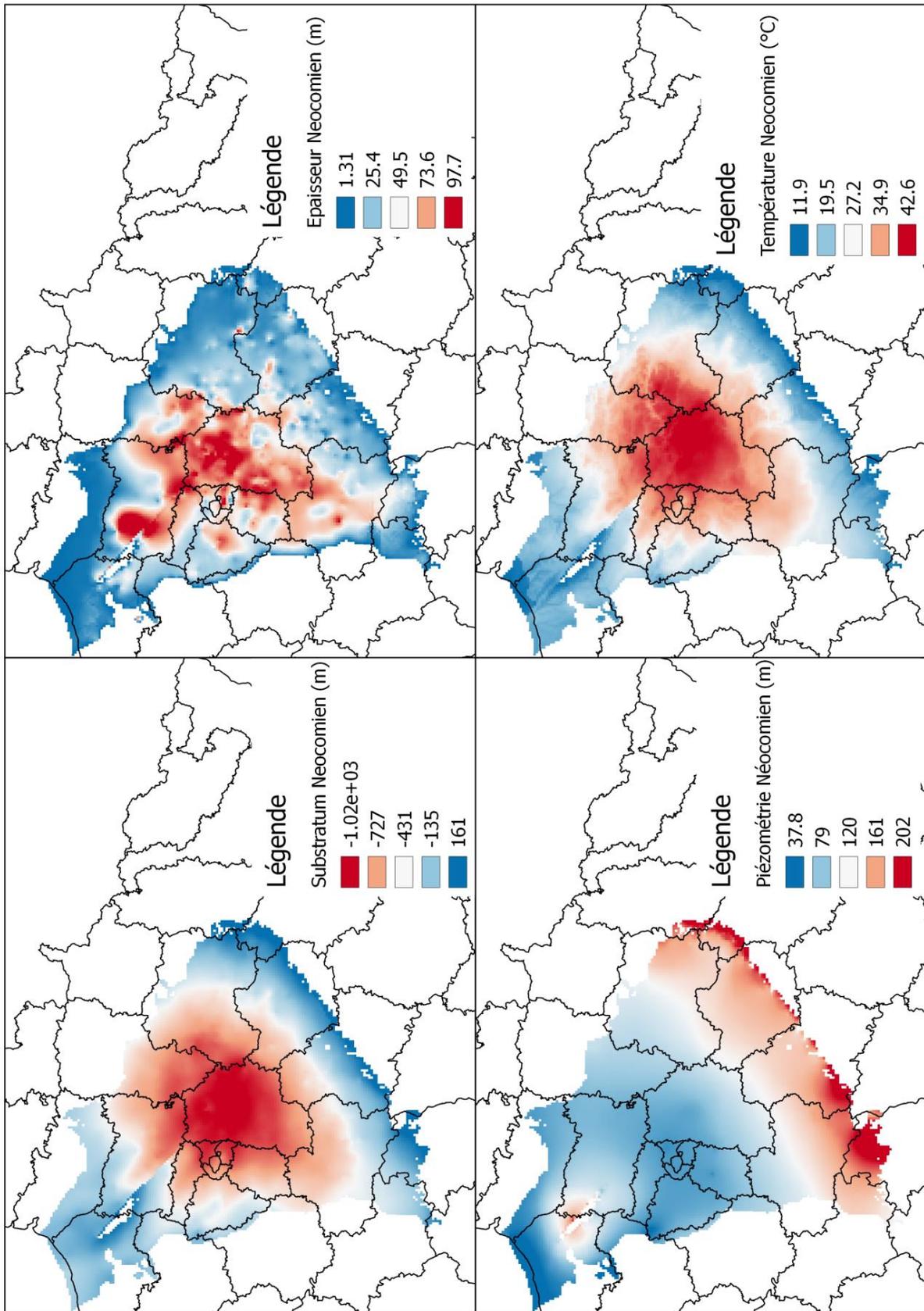


Illustration 10 – Profondeur du substratum, épaisseur, piézométrie et température de la nappe du Néocomien (d'après Seguin et al., 2015)

3.2. CARACTERISTIQUES DES RESERVOIRS PROFONDS

Les réservoirs profonds du bassin de Paris sont exploités pour trois types d'opérations principalement : l'exploitation géothermale, l'exploitation d'hydrocarbures ainsi que le stockage de gaz naturel. Dans cette section, on s'intéresse aux informations disponibles quant aux pressions de gisement, et plus généralement quant aux caractéristiques hydrodynamiques de ces réservoirs profonds.

3.2.1. Géothermie

Les réservoirs profonds du bassin parisien sont exploités dans le cadre de ce qui est appelé la géothermie de basse-énergie. C'est le réservoir géothermal du Dogger (Jurassique moyen) qui est le plus exploité (plus précisément la base du Callovien, le Bathonien et le toit du Bajocien), et ce depuis la fin des années 1970, selon la technique du doublet : le prélèvement de l'eau (« chaude ») de la formation est assuré par un puits de production et, après échange de chaleur en surface, sa réinjection est assurée par un puits d'injection. La base de données Dogger (<http://dogger-idf.brgm.fr>) recense les puits géothermaux atteignant le Dogger. Cette base compte à la date de réalisation de cette étude, 142 ouvrages tous localisés en Ile de France (cf. Illustration 11).

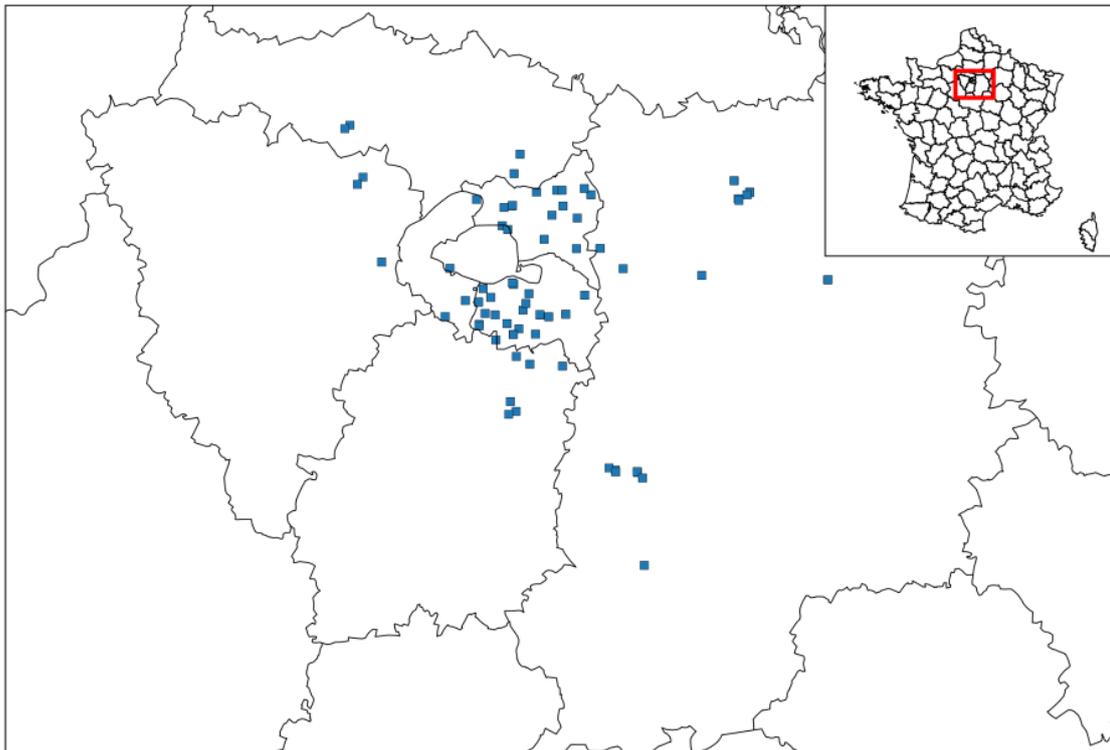


Illustration 11 – Localisation des puits géothermaux atteignant le Dogger dans la zone d'étude (d'après la base de données Dogger <http://dogger-idf.brgm.fr>)

Cette base contient les pressions de gisement initiales (pressions extrapolées lors des essais de fin de forage) du Dogger au niveau des ouvrages (cf. Illustration 12) ainsi que les caractéristiques

hydrogéologiques suivantes, utilisées pour la partie « Evaluation des scénarios de fuite et analyse de risque » de cette étude :

- Type de puits (producteur/injecteur) ;
- Profondeur du toit du Dogger (toit du Comblanchien) ;
- Epaisseur utile du Dogger ;
- Porosité du Dogger ;
- Transmissivité du Dogger ;
- Salinité des eaux du Dogger ;
- Température initiale (avant exploitation) au toit du Dogger.

Dans cette étude, nous nous intéressons aux doublets atteignant la formation du Dogger mais d'autres aquifères du bassin de Paris sont envisagés pour l'exploitation de la géothermie pour compenser la baisse attendue du potentiel géothermal du Dogger : on peut citer les grès du Trias (Bouchot et al., 2008), l'aquifère carbonaté du Lusitanien (Caritg et al., 2014), ou bien les nappes de l'Albien et du Néocomien (SIGES Seine Normandie, 2017²).

² <http://sigessn.brgm.fr/spip.php?article253>

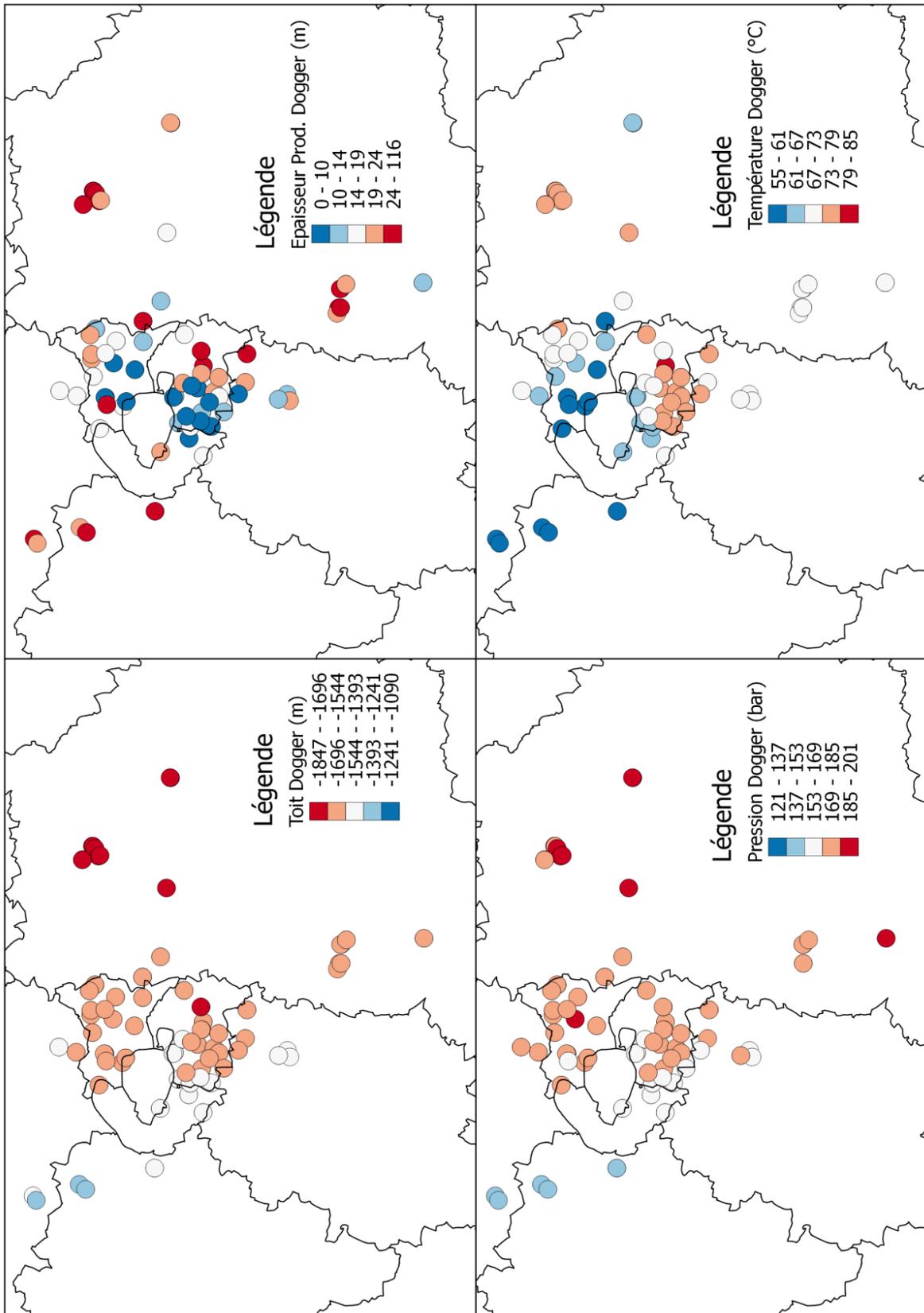


Illustration 12 - Profondeur du toit, épaisseur, pression au toit du réservoir et température de la formation du Dogger au niveau des puits géothermaux référencés dans la base de données d'exploitation du Dogger

3.2.2. Exploitation d'hydrocarbures

L'histoire de l'exploitation pétrolière dans le bassin de Paris commence réellement à l'après-guerre, avec la découverte, à la fin des années 1950, de gisements tout d'abord dans les carbonates du Dogger (Bathonien, Callovien), dans les sables du Néocomien et dans le Rhétien (Trias supérieur). Plus tard, à la fin des années 1970, le Keuper (Trias supérieur) sera également exploité (Chambre syndicale de la recherche et de la production du pétrole et du gaz naturel – Comité des techniciens, 1991 ; cf. Illustration 14).

D'après le Ministère de l'Environnement (2017³), 50 gisements ont été découverts dans le bassin de Paris, dont 34 toujours en exploitation aujourd'hui. La carte des gisements du bassin est fournie à l'illustration 15. Aussi, plus de 2000 puits ont été forés dans la région, comme le montre l'illustration 13.

Les caractéristiques des réservoirs exploités au niveau de tous les forages pétroliers n'ont pu être récupérées. Les seules informations disponibles pour cette étude sont celles contenues dans les « Monographies des principaux champs pétroliers de France » (Chambre syndicale de la recherche et de la production du pétrole et du gaz naturel – Comité des techniciens, 1991). Ces propriétés sont en général consignées pour un puits d'un champ donné, et que des informations existaient pour 29 champs différents. Plus précisément, les paramètres suivants ont pu être extraits :

- La formation géologique exploitée ;
- Le toit du réservoir ;
- La hauteur utile du réservoir ;
- La perméabilité intrinsèque du réservoir ;
- La porosité du réservoir ;
- La pression initiale (avant exploitation) du réservoir ainsi que la profondeur de mesure ;
- La température initiale (avant exploitation) du réservoir ainsi que la profondeur de mesure ;
- La salinité des eaux du réservoir.

Les caractéristiques des champs pétroliers ont été cartographiées pour le Dogger (Illustration 16) et le Trias (Illustration 17).

³ <http://www.developpement-durable.gouv.fr/ressources-en-hydrocarbures-france>

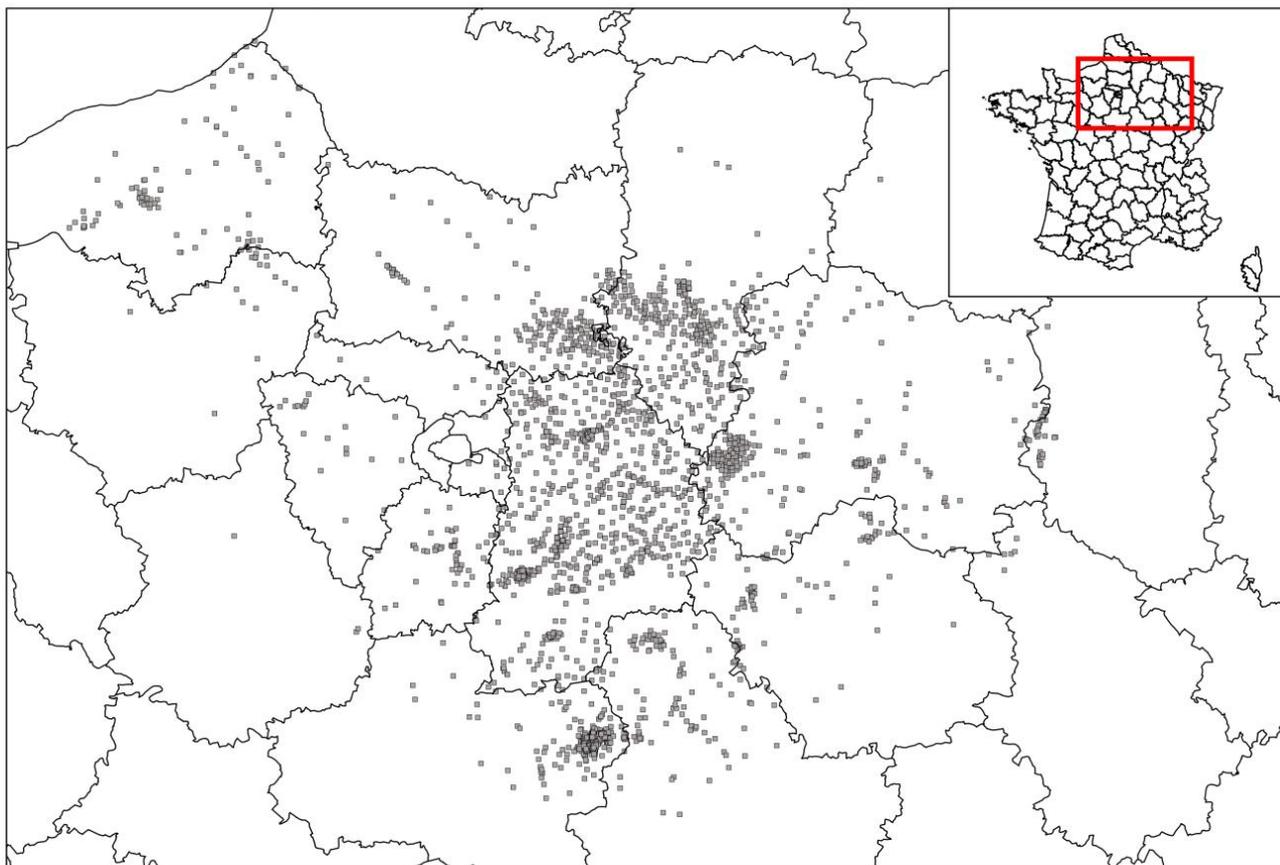


Illustration 13 – Localisation des puits pétroliers dans la zone d'étude (Base de Données Vernoux et al., 2003)

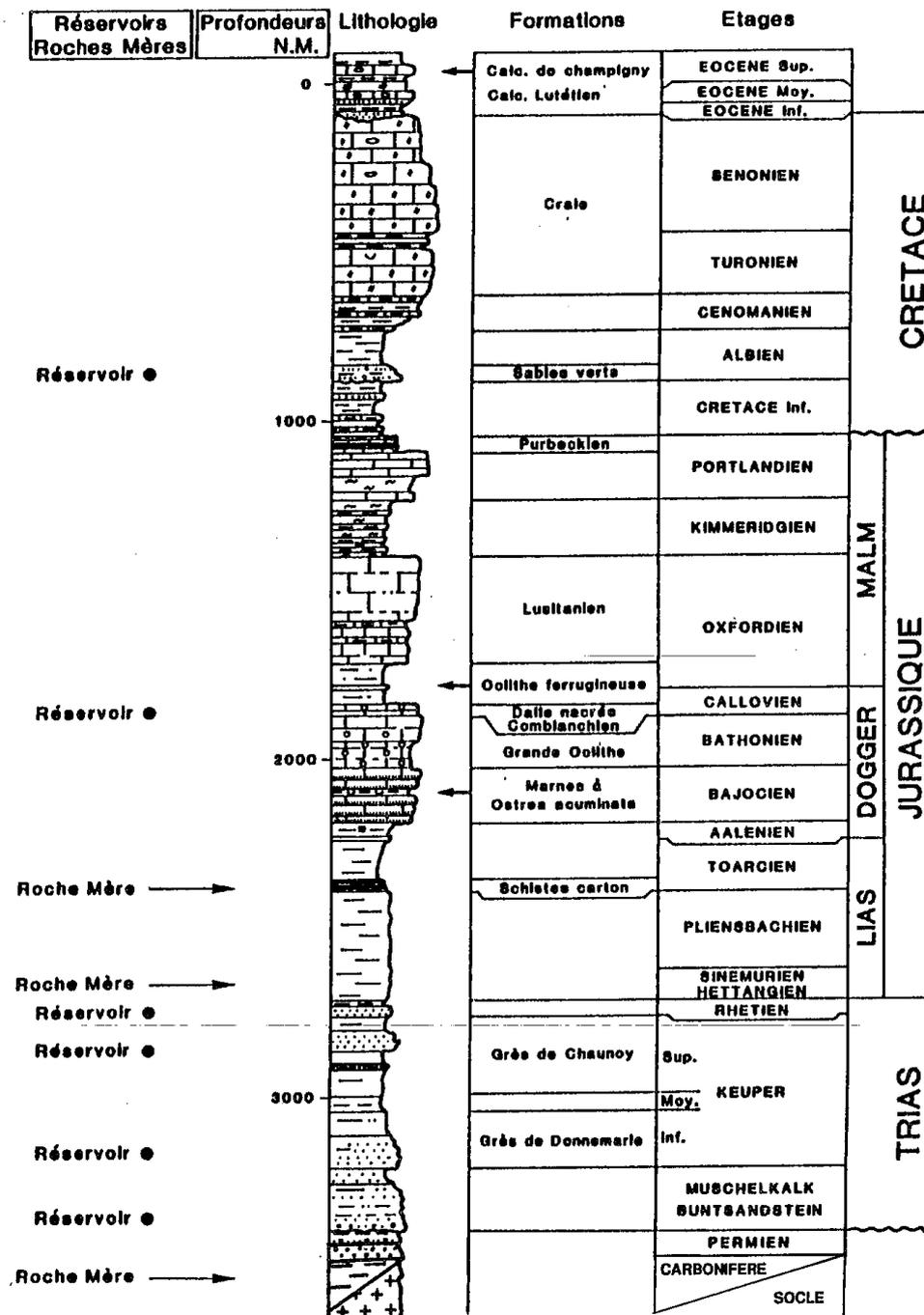


Illustration 14 – Formations géologiques du Bassin de Paris susceptibles de contenir des réservoirs d'hydrocarbures (SNEAP, 1991)

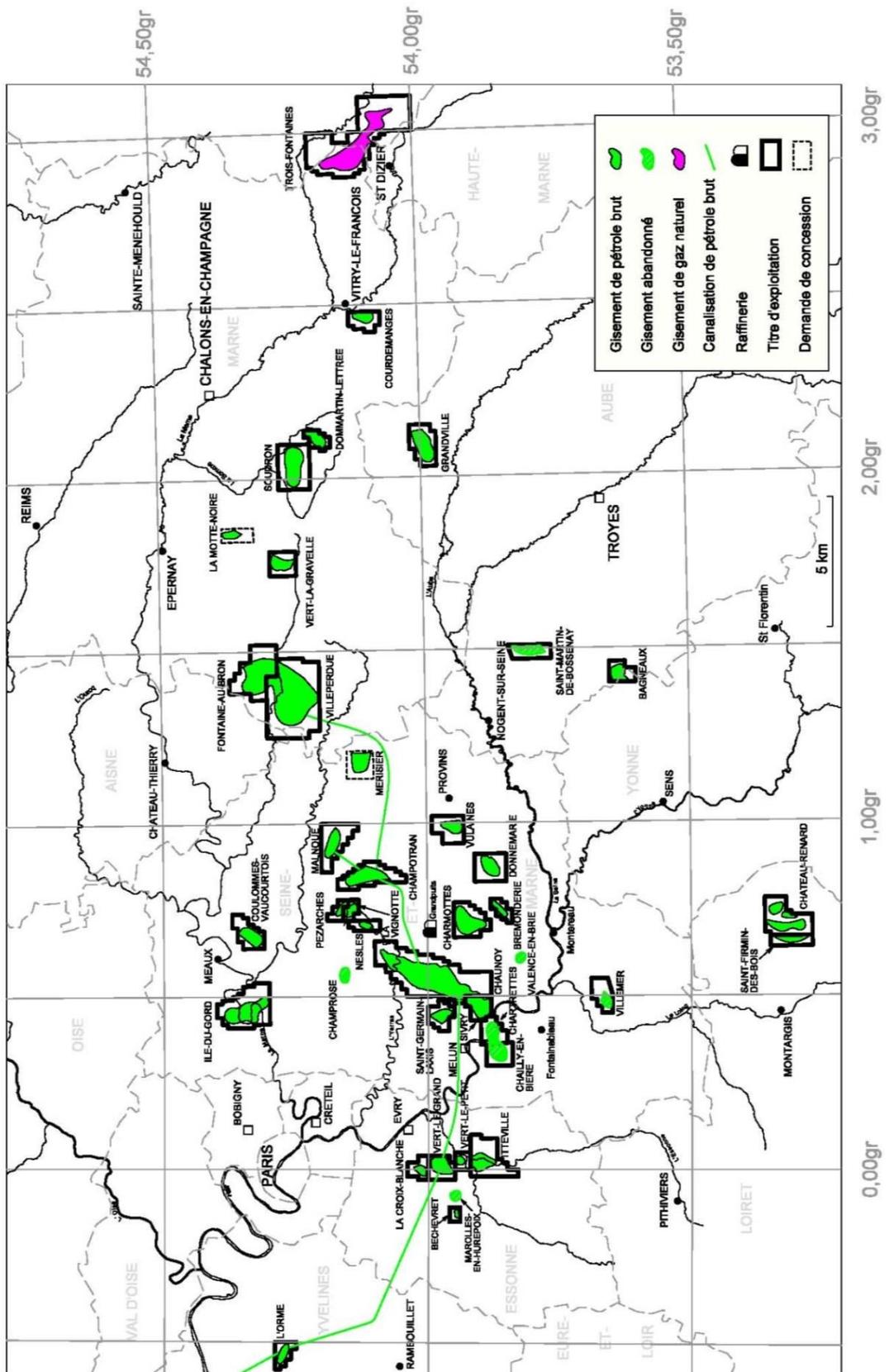


Illustration 15 - Gisements de pétrole et de gaz du bassin de Paris (source www.developpement-durable.gouv.fr)

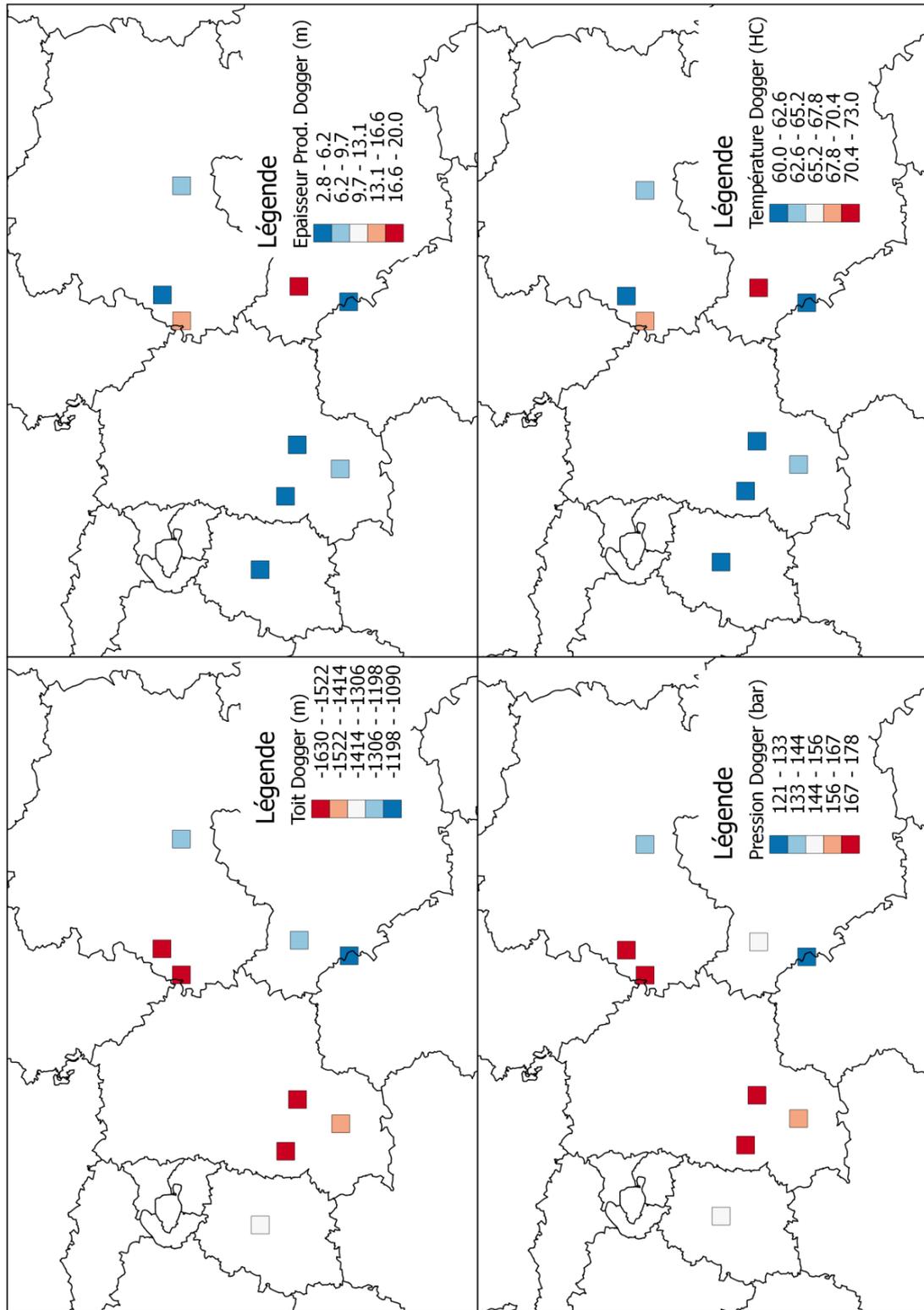


Illustration 16 - Profondeur du toit, épaisseur, pression au toit du réservoir et température de la formation du Dogger au niveau des puits d'hydrocarbures exploitant le Dogger référencés dans la synthèse du Comité des techniciens de la Chambre syndicale de la recherche et de la production du pétrole et du gaz naturel (1991 avec mise à jour en 1993)

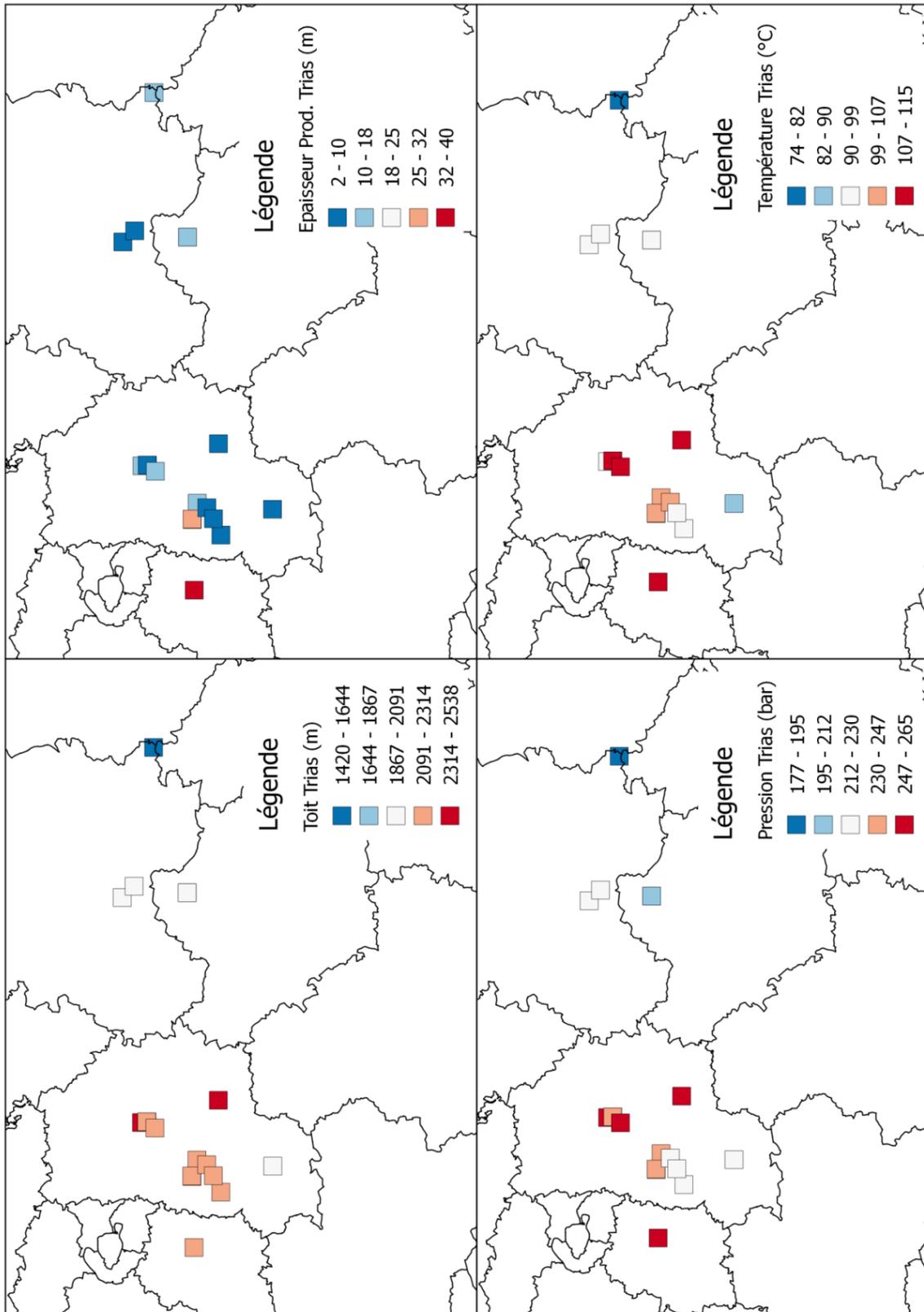


Illustration 17 – Profondeur du toit, épaisseur, pression et température de la formation du Trias au niveau des puits d'hydrocarbures référencés dans la synthèse du Comité des techniciens de la Chambre syndicale de la recherche et de la production du pétrole et du gaz naturel (1991 avec mise à jour en 1993)

3.2.3. Stockage de gaz naturel

Le stockage souterrain de gaz naturel a été développé afin d'ajuster l'offre à la demande de gaz naturel, ainsi que pour garantir la sécurité d'approvisionnement. En période de faible demande, le gaz est injecté dans le stockage souterrain et il est soutiré lorsque la demande est forte. L'exploitation du stockage présente donc la particularité d'être cyclique. Lorsque le cycle est annuel (stockage en été, soutirage en hiver), on parle de stockage saisonnier. Il existe principalement trois grands types de stockage souterrain de gaz naturel qui sont les stockages en nappes aquifères, en gisement d'hydrocarbures déplétés et le stockage en cavités (salines ou minées).

Dans le bassin de Paris, on compte 10 sites de stockage de gaz naturel comme le montre l'illustration 18. Les formations géologiques visées sont le Crétacé inférieur (Germigny-sous-Coulomb, Beynes), le Jurassique supérieur (Saint-Clair-sur-Epte, Saint-Illiers, Beynes, Gournay-sur-Aronde), et le Trias (Céré-la-ronde, Chémery / Soings-en-Sologne, Trois-Fontaines-l'Abbaye, Cerville).

Il n'a pas été possible, dans le cadre de cette étude, d'obtenir des pressions de gisements et d'exploitation des stockages de gaz.

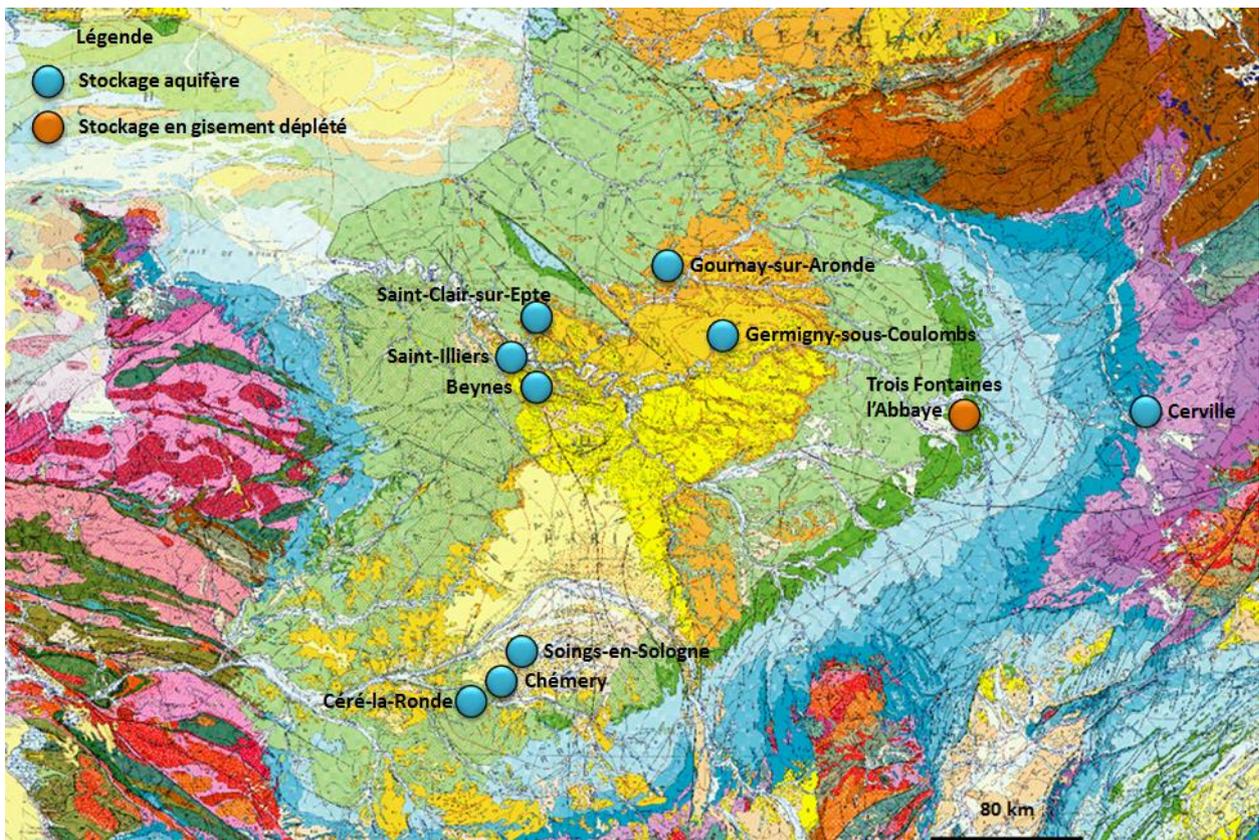


Illustration 18 – Stockage de gaz naturel dans le bassin de Paris (SIGES Seine-Normandie, 2017)

4. Etude des risques de pollution des nappes de l'Albien et du Néocomien par les forages profonds : approche proposée

L'approche proposée se base sur les principes de la méthodologie MARSE développée au BRGM. MARSE (de Lary et al., 2015) est une approche de gestion des risques pour les exploitations du sous-sol développée pour traiter des risques pour l'homme (santé et vie humaine) et l'environnement au sens large du terme (environnement naturel et humain –dont aquifère-, autres activités, etc.). L'approche proposée s'inscrit dans le respect des grands principes de la norme ISO 31000 : 2009 (Gestion des risques) en les déclinant et les appliquant aux spécificités du sous-sol. Cette approche a été développée pour analyser les risques sur un site particulier (ici, un site serait un forage). Dans le cadre de cette étude plus générale, l'estimation des risques est faite de manière générique sur toute la zone d'étude et la méthodologie MARSE est donc adaptée.

Plusieurs étapes ont été suivies pour cette étude :

- Etape 0 : L'établissement du contexte. Cette phase fournit les données de contexte nécessaires à l'analyse des risques. Cela concerne notamment le périmètre de l'analyse des risques (ici risques liés aux forages), les enjeux (ici les nappes de l'Albien et du Néocomien), et les caractéristiques du milieu (caractéristiques hydrodynamiques du Bassin de Paris). Les éléments correspondant au contexte ont été présentés dans les précédentes sections de ce rapport (cf. chapitre 3 notamment).
- Etape 1 : L'identification des risques. Cette phase recense les risques possibles de façon exhaustive et établit les priorités d'analyse. Cela concerne notamment l'identification de scénarios d'évolution altérée (ou scénarios de risques). Un scénario est défini comme une succession d'évènements depuis une cause jusqu'à une conséquence sur un ou des enjeux.
- Etape 2 : L'analyse des risques. Lors de cette phase, les scénarios retenus sont étudiés afin de pouvoir en évaluer les conséquences sur les enjeux identifiés dans le contexte et leur vraisemblance. Elle peut être menée avec des outils qualitatifs, semi-quantitatifs ou quantitatifs. L'estimation fine des risques nécessite des outils et des compétences multiples. Les résultats des analyses de risques doivent intégrer explicitement les différentes formes d'incertitudes identifiées.

L'identification des scénarios de risque (étape 1) a consisté à établir une liste de scénarios à partir du retour d'expérience d'incidents observés dans le bassin de Paris, et à discuter de ces scénarios lors d'un atelier d'expert pluridisciplinaire.

La première étape a permis d'établir des scénarios de risque réalistes et de prendre en compte l'expérience de plusieurs décennies d'exploitation pétrolière et géothermale en France. La seconde étape a permis de s'assurer de l'exhaustivité des scénarios, de les détailler et de discuter leur applicabilité aux différents types de puits. Elle est présentée au chapitre 5 de ce rapport.

L'objectif de l'analyse des risques (étape 2) est de comprendre les risques identifiés lors de la phase d'identification des risques. Cette compréhension peut être faite de différentes manières. Dans le cadre de cette étude nous réalisons cette analyse des risques en déterminant 1) la vraisemblance (ou la probabilité) d'occurrence des scénarios identifiés lors de l'étape n°1, et 2)

les conséquences potentielles de ces scénarios sur les nappes de l'Albien-Néocomien. Le risque peut en effet être vu comme la combinaison de la vraisemblance et de la gravité de ces conséquences.

Etant donné le peu d'évènements de fuites recensés dans le retour d'expérience sur les risques liés aux forages profonds dans la zone d'étude, le calcul de probabilités de défaillance n'est pas réalisable. Ainsi, nous proposons une estimation qualitative de la vraisemblance des scénarios, qui est présentée au chapitre 6 de ce rapport.

En revanche, au vu de la relative bonne connaissance des caractéristiques des aquifères profonds, une estimation quantitative des conséquences de fuites sur des puits aux caractéristiques génériques a pu être faite, afin de permettre une comparaison entre les différents scénarios sur ce point. Cette analyse quantitative a été réalisée en combinant avis d'experts, données bibliographiques et modélisation. Elle a été menée en deux temps. Dans un premier temps, des ordres de grandeurs de débits de fuite potentiels dans les nappes de l'Albien/Néocomien ont été estimés ; ces résultats sont présentés au chapitre 7 de ce rapport. Puis à partir de ces résultats, les conséquences de ces débits de fuite sur la qualité des eaux de ces nappes ont été estimées. Ce travail est l'objet du chapitre 8 de ce rapport.

L'approche globale suivie pour l'étude des risques est synthétisée à l'illustration 19.

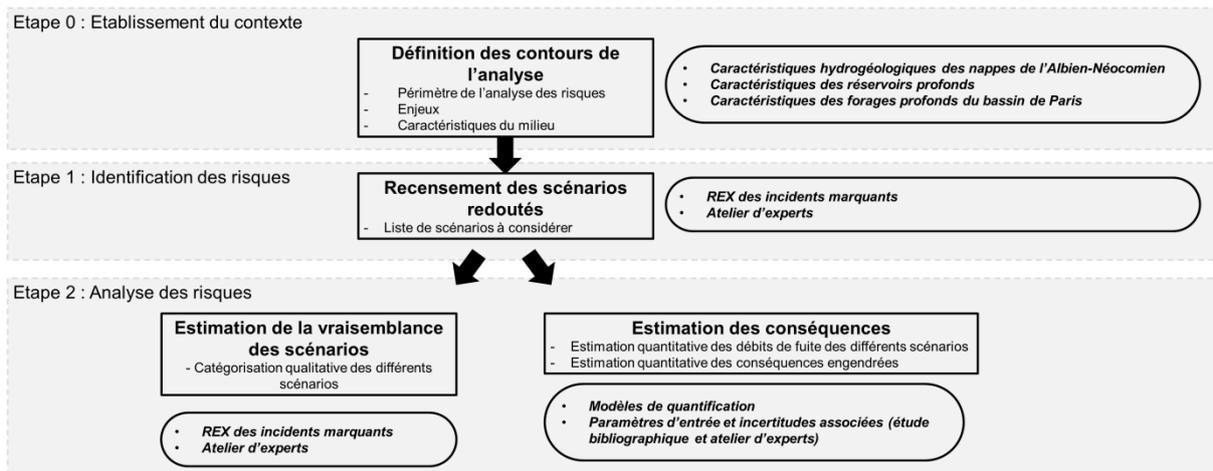


Illustration 19 – Approche globale suivie pour l'étude des risques : différentes étapes et outils nécessaires à sa mise en place.

5. Etude des risques - Etape 1 : Recensement des scénarios redoutés

5.1. ETABLISSEMENT D'UNE LISTE DE SCENARIOS ETABLIE A PARTIR DU REX

Les incidents marquants connus dans la zone d'étude sont les suivants (Vernoux et al., 2002) :

- Fuites de gaz à Saint-Illiers et Beynes (1962, 1966, 1969, 1970). Migrations de gaz depuis un stockage souterrain de gaz vers l'aquifère de l'Albien. Les migrations de gaz sont imputables à une cimentation des cuvelages défailante.
- Fuite d'eau géothermale sur le site de Coulommiers (1995-1996). Fuite d'eau géothermale dans un puits de réinjection vers des formations intermédiaires entre la surface et le réservoir exploité. La fuite est due à une perte d'étanchéité du cuvelage du fait de l'existence de perforations dans ce dernier.
- Fuite d'un mélange hydrocarbures/saumures au niveau du puits Chailly 48 (1978-1996). Fuite d'hydrocarbures et d'eau géothermale dans des aquifères intermédiaires entre la surface et le réservoir exploité par l'intermédiaire d'un puits fermé provisoirement. La fuite est due à la corrosion excessive d'un cuvelage ayant entraîné des perforations.
- Fuite d'un mélange hydrocarbures/saumures au niveau du puits Chailly 46 (1991). Observation d'une résurgence à la surface de saumures (avec fortes odeurs d'hydrocarbures) à proximité d'un puits fermé provisoirement. La fuite jusqu'à la surface est expliquée par l'existence de perforations sur les deux épaisseurs de cuvelages au niveau des aquifères du Tertiaire, vraisemblablement due à la corrosion des cuvelages par l'extérieur (eau aérée de la nappe du Tertiaire). Des migrations de fluides provenant du réservoir exploité vers les aquifères du Tertiaire ont également eu lieu.

A cette liste spécifique au bassin de Paris, un retour d'expérience récent au niveau du fossé de de la Limagne peut être ajouté : une fuite d'hydrocarbures (bitume + gaz) s'est produite en surface au niveau du puits Cébazat 1 (2012) après endommagement de la tête de puits lors de travaux (Vigneron et Deroualle, 2014). La remontée de fluide depuis les niveaux producteurs est expliquée par une perte d'étanchéité d'un annulaire cimenté.

A partir de ces incidents marquants, 3 grands types de scénarios ont été définis :

- Scénarios de type 1 : Migration de fluides depuis une formation géologique (formation exploitée ou non) vers les nappes de l'Albien-Néocomien du fait de l'existence d'une voie de fuite à l'extrados d'un puits (annulaire, cimenté ou non) ;
- Scénarios de type 2 : Migration de fluides depuis l'intérieur du puits vers les nappes de l'Albien-Néocomien du fait de l'existence de perforations sur un puits en exploitation (injection ou production) ;
- Scénarios de type 3 : Migration de fluides depuis une formation géologique (formation exploitée ou non) vers les nappes de l'Albien-Néocomien du fait d'une migration verticale à l'intérieur d'un puits qui n'est plus exploité conjuguée à l'existence de perforations sur ce puits.

L'illustration 20 présente un exemple pour chacune de ces catégories.

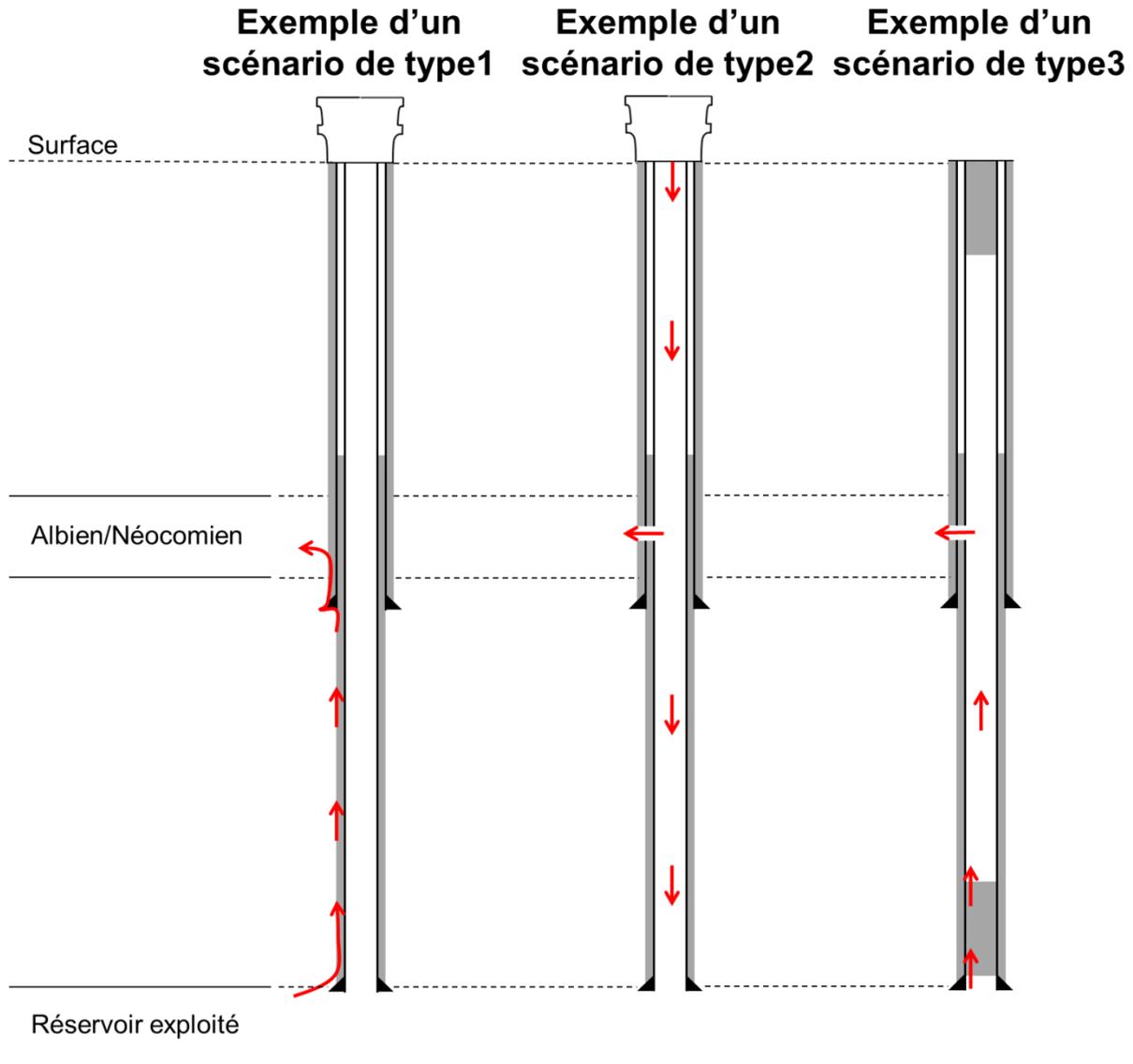


Illustration 20 – Exemple de scénario de fuite pour chacun des types possibles

5.2. VALIDATION DES SCENARIOS LORS D'UN ATELIER D'EXPERTS

L'atelier d'expert pluridisciplinaire a permis de valider ces scénarios et de préciser l'identification des risques en détaillant notamment les sources de contamination (localisation et composition), ainsi que les types d'exploitation et les types de puits concernés par ces risques. Cet atelier a réuni différentes compétences relatives à l'ingénierie de forage, l'hydrogéologie du bassin de Paris, la réglementation et l'analyse des risques⁴.

⁴ Personnes ayant participé à cet atelier: B. Lorenzi (DRIEE IDF), F. Lahaie (INERIS), O. Audouin (CFG services), F. Bugarel (BRGM), J.C. Manceau (BRGM), J.F. Vernoux (BRGM)

L'ensemble des scénarios qu'il a été décidé d'analyser dans la suite de l'étude (étape 2) est synthétisé dans le Tableau 3. Il est à noter que cette première étape consistait exclusivement à supprimer les scénarios irréalistes. L'analyse de la pertinence en termes de vraisemblance et de conséquences des scénarios jugés plausibles est faite à l'étape n°2.

Tableau 3 – Scénarios de risques identifiés pour l'analyse générique des risques

Grands types de scénarios		Scénarios de type1 : Migration de fluides vers les nappes de l'Albien-Néocomien du fait de l'existence d'une voie de fuite à l'extrados d'un puits (annulaire, cimenté ou non)	Scénarios de type2 : Migration de fluides vers les nappes de l'Albien-Néocomien du fait de l'existence de perforations sur un puits en exploitation	Scénarios de type3 : Migration de fluides vers les nappes de l'Albien-Néocomien du fait d'une migration verticale à l'intérieur d'un puits qui n'est plus exploité conjuguée à l'existence de perforations sur ce puits
Types d'exploitation	Géothermie	À ANALYSER	À ANALYSER	À ANALYSER
	Exploitation d'hydrocarbures	À ANALYSER	ÉLIMINÉ : Car production/injection par colonne	À ANALYSER
	Stockage de gaz	À ANALYSER	ÉLIMINÉ : Car production/injection par colonne	À ANALYSER
Types de puits	Puits d'injection en exploitation	À ANALYSER	À ANALYSER (pour l'exploitation géothermale)	ÉLIMINÉ : Car le scénario 3 ne concerne que les puits qui ne sont plus exploités
	Puits de production en exploitation	À ANALYSER	À ANALYSER (pour l'exploitation géothermale)	ÉLIMINÉ : Car le scénario 3 ne concerne que les puits qui ne sont plus exploités
	Puits fermé/abandonné	À ANALYSER	ÉLIMINÉ : Car le scénario 2 ne concerne que les puits en exploitation (voir le scénario 3 pour les puits abandonnés)	À ANALYSER
Sources de pollution	Saumures	À ANALYSER (pour tous les types d'exploitation)	À ANALYSER (pour l'exploitation géothermale)	À ANALYSER (pour tous les types d'exploitation)
	Hydrocarbures (huile)	À ANALYSER (pour l'exploitation d'hydrocarbures)	ÉLIMINÉ : Car production/injection par colonne	À ANALYSER (pour l'exploitation d'hydrocarbures)
	Hydrocarbures (gaz)	À ANALYSER (pour le stockage de gaz)	ÉLIMINÉ : Car production/injection par colonne	À ANALYSER (pour le stockage de gaz)

6. Etude des risques - Etape 2a : Estimation de la vraisemblance des scénarios

L'estimation de la vraisemblance est basée sur les discussions entre spécialistes ayant eu lieu lors de l'atelier d'experts mené pour l'identification des risques et pour leur analyse. Une échelle qualitative de vraisemblance de 5 niveaux a été choisie, similaire à celle donnée en annexe I de l'arrêté du 29/09/2005 relatif à l'évaluation et à la prise en compte de la probabilité d'occurrence, de la cinétique, de l'intensité des effets et de la gravité des conséquences des accidents potentiels dans les études de dangers des installations classées soumises à autorisation :

A – « événement courant » : s'est produit sur le site considéré et/ou peut se produire à plusieurs reprises pendant la durée de vie de l'installation malgré d'éventuelles mesures correctives ;

B – « événement probable » : s'est produit et/ou peut se produire pendant la durée de vie de l'installation ;

C – « événement improbable » : un événement similaire déjà rencontré dans le secteur d'activité ou dans ce type d'organisation au niveau mondial, sans que les éventuelles corrections intervenues depuis apportent une garantie de réduction significative de probabilité ;

D – « événement très improbable » : s'est déjà produit dans ce secteur d'activité mais a fait l'objet de mesures correctives réduisant significativement sa probabilité ;

E - « événement possible mais extrêmement peu probable » : n'est pas impossible au vu des connaissances actuelles, mais non rencontré au niveau mondial sur un très grand nombre d'années d'installation.

Le Tableau 4 présente les résultats de cette estimation qualitative de la vraisemblance pour chacune des grandes catégories de scénarios identifiés à l'étape 1. Les arguments pour justifier le niveau de vraisemblance choisi sont donnés également dans ce tableau.

Tableau 4 – Résultats de l'estimation de la vraisemblance des types de scénarios identifiés

	Scénarios de type1 : Migration de fluides vers les nappes de l'Albien-Néocomien du fait de l'existence d'une voie de fuite à l'extrados d'un puits (annulaire, cimenté ou non)	Scénarios de type2 : Migration de fluides vers les nappes de l'Albien-Néocomien du fait de l'existence de perforations sur un puits en exploitation	Scénarios de type3 : Migration de fluides vers les nappes de l'Albien-Néocomien du fait d'une migration verticale à l'intérieur d'un puits qui n'est plus exploité conjuguée à l'existence de perforations sur ce puits
Géothermie	<p>E - « événement possible mais extrêmement peu probable »</p> <p>La cimentation des cuvelages est faite sur toute leur hauteur. Par conséquent, l'existence d'une voie de fuite continue (micro-annulaire ou channeling) entre un aquifère plus profond et les nappes de l'Albien et du Néocomien est peu vraisemblable. Néanmoins, un défaut de cimentation ne peut pas être exclu: des dysfonctionnements de DV (« differential valve » dispositif de cimentation étagée), ainsi que l'utilisation de puits déviés sont des facteurs de risques potentiels.</p> <p>Types de puits : La vraisemblance de l'existence d'une voie de fuite sur l'extrados d'un puits de géothermie ne semble pas dépendre du type de puits. En particulier, les puits de géothermie sont relativement récents ce qui laisse présager une faible évolution des pratiques de complétion/cimentation et une certaine homogénéité dans la qualité des cimentations. En termes d'évolution de pratiques, l'utilisation de ciments légers ne nécessitant pas de DV peut quand même être notée.</p> <p>Sources de pollution : Pour ce scénario seules les saumures sont concernées. Les aquifères envisagés comme sources de la migration dans le cadre d'une exploitation géothermale sont les aquifères du Dogger et du Lusitanien. Dans la mesure où le Lusitanien est moins profond que le Dogger, la voie de migration continue nécessaire pour l'occurrence d'une migration vers les nappes de</p>	<p>D – « événement très improbable » à E - « événement possible mais extrêmement peu probable »</p> <p>Les migrations horizontales sont plus pertinentes pour les puits de géothermie que les migrations verticales discutées pour le scénario 1. Du fait de l'injection/production directement par le cuvelage, les puits de géothermie sont plus sensibles aux problèmes de corrosion. Des problèmes (corrosion galvanique) peuvent notamment exister au niveau des DVs (mais ceux-ci ne sont pas mis au niveau de l'Albien-Néocomien). Les zones de dépôts (par ex. au niveau des déviations) peuvent également être propices à la corrosion (bactériologique notamment).</p> <p>Types de puits : La vraisemblance de l'occurrence de ce scénario a diminué au cours du temps car des solutions ont progressivement été mises en place pour diminuer les risques de perforations :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Traitements inhibiteurs de corrosion, à partir des années 1990, qui permettent de diminuer d'un facteur 10 la vitesse de corrosion (qui est passée de 1 mm/an à 0.1 mm/an en moyenne). - La protection des aquifères superficiels et de l'aquifère de l'Albien-Néocomien par la mise en place de doubles cuvelages à partir de 1982-1983. - L'utilisation de ciments légers qui ne nécessitent pas l'utilisation de DV. <p>Néanmoins, la vraisemblance de l'existence de perforations ne semble pas dépendre grandement du caractère injecteur/producteur. Il peut toutefois être noté la présence d'une plus grande quantité de dépôts sur les puits producteurs que sur les puits</p>	<p>E - « événement possible mais extrêmement peu probable »</p> <p>Ce scénario semble moins vraisemblable que les scénarios 1 et 2 appliqués à la géothermie dans la mesure où il faudrait une combinaison entre une migration le long d'une cimentation défailante (espace annulaire cimenté entre deux cuvelages, ou bouchon de ciment), suivie de perforations (qui ont pu être initiées lors de l'exploitation). Néanmoins, il ne peut être éliminé.</p> <p>Types de puits : les puits de géothermie sont relativement récents ce qui laisse présager une faible évolution des pratiques de complétion / cimentation / fermeture et une certaine homogénéité dans la qualité des cimentations.</p> <p>Sources de pollution : Pour ce scénario seules les saumures provenant du Dogger sont concernées.</p> <p>Pas de REX connu dans la zone d'étude</p>

	<p>l'Albien et du Néocomien est de hauteur plus faible pour le Lusitanien et donc plus vraisemblable que pour le Dogger.</p> <p>Pas de REX connu dans la zone d'étude</p>	<p>injecteurs. De plus, la corrosion est plus importante au niveau de la chambre de production, mais celle-ci est située au-dessus de la nappe de l'Albien.</p> <p>Sources de pollution : Pour ce scénario seules les saumures sont concernées. Le seul aquifère envisagé comme source de la migration est le réservoir du Dogger. Dans le cadre de l'application de ce scénario à un puits producteur, les saumures proviendraient directement du réservoir ; pour un puits injecteur, elles proviendraient des infrastructures de surface.</p> <p>REX dans la zone d'étude (d'après Vernoux, 2002) : Fuite d'eau géothermale dans un aquifère superficiel sur le site de Coulommiers (1995-1996) due à la corrosion excessive du cuvelage simple ayant entraîné des perforations. Néanmoins, aucun REX connu dans la zone d'étude quant à une perforation fuyarde observée sur des puits avec double cuvelage.</p>	
<p>Exploitation d'hydrocarbures</p>	<p>D – « événement très improbable »</p> <p>Les puits pétroliers du bassin parisien ne bénéficient pas forcément d'une cimentation des cuvelages sur toute leur hauteur, ce qui rend l'existence d'une voie de fuite continue pour ces puits plus vraisemblable que pour les puits de géothermie. Néanmoins, les huiles produites dans le bassin parisien sont essentiellement mortes et hydratées : les variations de pression et de température induites au cours de l'exploitation, causes parfois de l'existence de micro-annulaires, y sont donc faibles.</p> <p>Types de puits : la vraisemblance de l'existence d'une voie de fuite sur l'extrados d'un puits d'exploitation d'hydrocarbures ne semble pas dépendre <i>a priori</i> du type de puits. Néanmoins, l'amélioration des pratiques de complétion/cimentation au cours du temps peut impliquer une plus faible vraisemblance de</p>		<p>D – « événement très improbable » à E - « événement possible mais extrêmement peu probable »</p> <p>Ce scénario semble moins vraisemblable que le scénario 1 appliqué à l'exploitation d'hydrocarbures dans la mesure où il faudrait une combinaison entre une migration le long d'une cimentation défailante (cuvelage cimenté, ou bouchon de ciment), suivie de perforations. Néanmoins, il ne peut être éliminé.</p> <p>Types de puits : concernant les puits fermés définitivement, la vraisemblance de l'existence d'une voie de fuite à l'intérieur du puits et de perforations ne semble pas dépendre <i>a priori</i> du type de puits. Néanmoins, l'amélioration des pratiques de complétion/cimentation au cours du temps peut impliquer une plus faible vraisemblance de l'occurrence d'une voie de fuite au sein des cimentations et des bouchons pour les puits les plus récents. La vraisemblance de ce scénario semble plus importante pour les puits fermés temporairement (puits</p>

	<p>l'occurrence d'une voie de fuite au sein de la cimentation pour les puits les plus récents.</p> <p>Sources de pollution : Pour ce scénario, les saumures et les huiles sont principalement concernées (peu de gaz est produit dans le bassin de Paris). Selon le puits étudié, la fraction d'huile varie et la vraisemblance d'avoir une migration d'huiles plutôt que de saumures est variable selon les champs et leur degré de déplétion.</p> <p>REX d'après Vignerot et Deroualle (2014) : Fuite d'hydrocarbures (bitume + gaz) en surface au niveau du puits Cébazat 1 due à une perte d'étanchéité d'un annulaire cimenté.</p>		<p>en sommeil, il semble en exister principalement dans le cadre de l'exploitation d'hydrocarbures). En effet, dans cette configuration, le nombre de bouchons et leur hauteur sont plus faibles que pour un puits fermé définitivement.</p> <p>Sources de pollution : Pour ce scénario, les saumures et les huiles sont principalement concernées (peu de gaz est produit dans le bassin de Paris). Selon le puits étudié, la fraction d'huile varie et la vraisemblance d'avoir une migration d'huiles plutôt que de saumures est variable selon les champs et leur degré de déplétion lors de l'arrêt de l'exploitation du puits.</p> <p>REX dans la zone d'étude (d'après Vernoux, 2002) : Fuites d'un mélange hydrocarbures/saumures au niveau du puits Chailly 48 (1978-1996) et Chailly 46 (1991), fermés provisoirement, du fait de l'existence de perforations dans les cuvelages. Néanmoins, aucun REX connu dans la zone d'étude quant à l'occurrence de ce scénario pour un puits fermé définitivement.</p>
<p>Stockage de gaz</p>	<p>D – « événement très improbable »</p> <p>Les puits de stockage de gaz du bassin parisien ne bénéficient pas forcément d'une cimentation des cuvelages sur toute leur hauteur, ce qui rend l'existence d'une voie de fuite continue pour ces puits plus vraisemblable que pour les puits de géothermie.</p> <p>Types de puits : la vraisemblance de l'existence d'une voie de fuite sur l'extrados d'un puits de stockage de gaz ne semble pas dépendre du type de puits. En particulier, les puits de stockage de gaz sont relativement récents ce qui laisse présager une faible évolution des pratiques de complétion / cimentation et une certaine homogénéité dans la qualité des cimentations.</p> <p>Sources de pollution : Pour ce scénario, les saumures et le gaz sont concernés, mais c'est</p>		<p>E - « événement possible mais extrêmement peu probable »</p> <p>Ce scénario semble moins vraisemblable que le scénario 1 appliqué au stockage de gaz dans la mesure où il faudrait une combinaison entre une migration le long d'une cimentation défailante (cuvelage cimenté, ou bouchon de ciment), suivie de perforations. Néanmoins, il ne peut être éliminé.</p> <p>Types de puits : les puits de stockage de gaz sont relativement récents ce qui laisse présager une faible évolution des pratiques de complétion/cimentation/fermeture et une certaine homogénéité dans la qualité des cimentations.</p> <p>Sources de pollution : Pour ce scénario, les saumures et le gaz sont concernés. Selon l'évolution de la saturation de gaz au niveau d'un puits donné, la vraisemblance d'une migration de gaz par rapport à la migration d'eau pourra varier.</p>

Risques de pollution des nappes de l'Albien et du Néocomien par les forages profonds du bassin parisien

	<p>la migration de gaz qui semble la plus vraisemblable au niveau des puits d'injection. Au niveau des puits de contrôle et selon la saturation de gaz, la vraisemblance d'une migration de gaz par rapport à la migration d'eau pourra varier.</p> <p>REX dans la zone d'étude (d'après Vernoux, 2002) : Fuites de gaz à Saint-Illiers et Beynes (1962, 1966, 1969, 1970) dues à une cimentation des cuvelages défailante.</p>		<p>Pas de REX connu dans la zone d'étude</p>
--	--	--	---

7. Etude des risques - Etape 2b : Estimation des débits de fuite potentiels

7.1. CHOIX DES SCENARIOS A ANALYSER

Pour estimer l'intensité des débits de fuite potentiellement induits par les grands types de scénarios de risque (type 1, 2 et 3), il a été décidé de quantifier ces débits pour un exemple représentatif pour chacun de ces types de scénarios, à la fois pour l'huile et pour l'eau salée (les fuites de gaz ne font pas l'objet d'analyse quantitative dans le cadre de cette étude). Pour chacun de ces exemples, les sources d'incertitudes ont été identifiées et prises en compte dans l'estimation de l'intensité des débits de fuite afin de fournir des résultats objectifs vis-à-vis de la connaissance actuelle. Le Tableau 5 présente les scénarios qui ont été analysés dans la suite de l'étude et comment les incertitudes ont été considérées.

Tableau 5 – Choix de quantification pour l'estimation des débits de fuite

	Scénarios de type1 : Migration de fluides vers les nappes de l'Albien-Néocomien du fait de l'existence d'une voie de fuite à l'extrados d'un puits (annulaire, cimenté ou non)	Scénarios de type2 : Migration de fluides vers les nappes de l'Albien-Néocomien du fait de l'existence de perforations sur un puits en exploitation	Scénarios de type3 : Migration de fluides vers les nappes de l'Albien-Néocomien du fait d'une migration verticale à l'intérieur d'un puits qui n'est plus exploité conjuguée à l'existence de perforations sur ce puits
Géothermie	<p>Quantification d'un débit de fuite de saumures depuis le réservoir géothermal du Dogger jusqu'aux nappes de l'Albien et du Néocomien par un micro-annulaire continu situé à l'extrados d'un puits géothermal générique.</p> <p>Prise en compte des incertitudes avec étude de la sensibilité de ce débit en fonction :</p> <ul style="list-style-type: none"> - De la taille du défaut (du micro annulaire) - Des conditions géologiques et hydrogéologiques dans la zone d'étude - De l'aquifère dans lequel se produit la fuite (nappe de l'Albien vs. nappe du Néocomien) - Du type de puits (injecteur vs. producteur) - Des conditions d'exploitation (conditions initiales vs. en exploitation) 	<p>Quantification d'un débit de fuite de saumures vers les nappes de l'Albien-Néocomien du fait de l'existence de perforations sur un puits en exploitation.</p> <p>Prise en compte des incertitudes avec étude de la sensibilité de ce débit en fonction :</p> <ul style="list-style-type: none"> - De la taille du défaut (de la perforation) - Des conditions géologiques et hydrogéologiques dans la zone d'étude - De l'aquifère dans lequel se produit la fuite (nappe de l'Albien vs. nappe du Néocomien) - Du type de puits (injecteur vs. producteur) 	<p>Pour l'étude de ce scénario, le cas « fermeture provisoire » est analysé. En effet cette situation est jugée plus contraignante en termes de risques que le cas « fermeture définitive » où plusieurs bouchons de hauteurs plus importantes sont mis en place, et quantification des impacts potentiels sur les nappes de l'Albien et du Néocomien. Dans la mesure où les fermetures provisoires concernent principalement l'exploitation d'hydrocarbures, il a été décidé d'analyser l'intensité de ce scénario sur les puits d'hydrocarbures seulement.</p>
Exploitation d'hydrocarbures	<p>Quantification d'un débit de fuite depuis un réservoir d'hydrocarbures jusqu'aux nappes de l'Albien et du Néocomien par un micro-annulaire continu situé à l'extrados d'un puits d'exploitation d'hydrocarbure générique.</p> <p>Prise en compte des incertitudes avec étude de la sensibilité de ce débit en fonction :</p>		<p>Quantification d'un débit de fuite depuis un champ d'hydrocarbures jusqu'aux nappes de l'Albien et du Néocomien par une migration verticale à l'intérieur d'un puits qui n'est plus exploité (cas de la fermeture provisoire), suivie de perforations fuyardes.</p> <p>Prise en compte des incertitudes avec étude de la sensibilité de ce débit en fonction :</p>

Risques de pollution des nappes de l'Albien et du Néocomien par les forages profonds du bassin parisien

	<ul style="list-style-type: none"> - De la taille du défaut (du micro annulaire) - Des conditions géologiques et hydrogéologiques dans la zone d'étude - De l'aquifère dans lequel se produit la fuite (nappe de l'Albien vs. nappe du Néocomien) - Des conditions d'exploitation (conditions initiales vs. en production) - Du fluide fuyard (huile vs. saumures) 		<ul style="list-style-type: none"> - De la taille des défauts (au niveau du bouchon et des perforations) - Des conditions géologiques et hydrogéologiques dans la zone d'étude - De l'aquifère dans lequel se produit la fuite (nappe de l'Albien vs. nappe du Néocomien) - Des conditions d'exploitation (conditions initiales vs. après exploitation) - Du fluide fuyard (huile vs. saumures)
--	---	--	--

7.2. MODELE UTILISE POUR L'ESTIMATION DES DEBITS DE FUITE

L'outil de quantification des débits de fuite utilisé dans cette étude est le Modèle SAMBA, développé par le BRGM. Une description exhaustive de l'outil Samba est donnée dans Réveillère (2013a, 2013b). Ce modèle a été développé pour estimer un débit de saumure fuyant d'un aquifère vers un autre par l'intermédiaire d'un puits vertical, ouvert ou poreux avec une perméabilité donnée, voire une combinaison des deux (fuite par l'intermédiaire d'un bouchon de ciment puis par l'intérieur d'un puits par exemple).

Les principales caractéristiques du modèle sont détaillées ci-dessous :

- Le sous-sol est modélisé comme une pile de couches perméables (aquifères) et imperméables (aquitards), typique des bassins sédimentaires.
- Tous les aquifères sont supposés homogènes, horizontaux, d'épaisseur constante et d'extension latérale infinie.
- Le chemin de fuite est composé d'une colonne poreuse, représentant par exemple un annulaire cimenté ou un bouchon de ciment défailant, sur laquelle on applique la loi de Darcy, et surmontée d'un puits non cimenté (puits ouvert, avec prise en compte possible des pertes de charge). En faisant varier les hauteurs de la colonne poreuse et du puits, on peut modéliser aussi bien un puits ouvert, une colonne poreuse, ou une combinaison des deux.
- Dans notre étude, la colonne poreuse est utilisée pour représenter une matrice cimentaire poreuse qui serait de mauvaise qualité et/ou l'existence de micro-annulaire entre le ciment et les cuvelages/terrains. Dans le cas où la colonne poreuse est utilisée pour représenter un micro-annulaire, il est nécessaire de renseigner ses propriétés équivalentes au micro-annulaire. Ainsi le couple perméabilité/surface équivalent au micro-annulaire est obtenu par l'intermédiaire de la loi cubique (hypothèse d'écoulement laminaire) : $k_{eq} \times S_{eq} = \frac{L \times e}{12}$. Avec k_{eq} et S_{eq} respectivement la perméabilité équivalente et la surface équivalente de la fuite, et L et e la longueur et l'épaisseur du microannulaire (dans le cas d'un microannulaire entre le cuvelage et le ciment, L est le périmètre du cuvelage). Pour obtenir une perméabilité équivalente de l'annulaire cimenté correspondant au micro-annulaire, S_{eq} peut être arbitrairement choisie comme la surface de l'annulaire cimenté. C'est le choix qui est fait ici. k_{eq} est déduite directement. Il est également nécessaire de renseigner la porosité équivalente du microannulaire, définie comme le rapport entre la surface du microannulaire et S_{eq} .
- La migration par une colonne poreuse dans l'aquifère sus-jacent se fait sur toute la hauteur de l'aquifère en question ; dans la situation où la migration se produit par l'intermédiaire de perforations au niveau d'un cuvelage, on considère que la migration a lieu dans un aquifère de hauteur équivalente à la surface cumulée des perforations.
- Le modèle prend en compte les gradients de pression, de température et de salinité entre le réservoir profond et l'aquifère en connexion ainsi que les effets de densité, viscosité et compressibilité sur les eaux associées.
- Les cônes de dépression dans l'aquifère fuyard et de surpression dans l'aquifère dans lequel la fuite se produit (effet limitant pour le débit de fuite) sont calculés utilisant la solution de Theis (Theis, 1935) adaptée aux nappes captives en régime transitoire.

Le modèle a été initialement développé pour estimer des débits de fuite liés à des différences de pression « provoquée », c'est-à-dire liées à l'exploitation (injection ou production de saumures) de l'un des aquifères en connexion induisant une surpression ou une dépression dans les aquifères. Ici, nous l'appliquons également dans des situations d'une différence de pression « naturelle », liée à la seule différence de piézométrie de ces aquifères. Il est à noter également que l'outil SAMBA ayant été développé pour les migrations de différentes salinités, toutes les configurations de migration de saumure/eau douce sont donc évaluables. L'outil a été modifié pour prendre en compte la situation où l'aquifère le plus profond serait un réservoir contenant un autre type de fluide que l'eau (ex. huile), de viscosité et densité constante au cours de sa migration et sans interaction avec les eaux environnantes. Néanmoins, le modèle avec ces hypothèses ne peut être utilisé pour la quantification des fuites de gaz du fait notamment de la forte compressibilité de celui-ci.

Dans cette étude, l'outil SAMBA est utilisé pour quantifier un débit de fuite d'eau ou d'hydrocarbures (en m³/an), une fois un régime permanent atteint.

7.3. PARAMETRES INITIAUX POUR L'ESTIMATION DES DEBITS DE FUITES

7.3.1. Caractéristiques du réservoir géothermal du Dogger

Afin d'être exhaustif et réaliste sur la variabilité des conditions géologiques et hydrogéologiques dans lesquels les doublets géothermaux sont implémentés dans le bassin de Paris, il a été décidé de considérer comme jeu de données pour ces paramètres, les valeurs au niveau de tous les doublets du bassin existant à la date de cette étude. Pour cela, la base de données sur les forages géothermiques du Dogger (Base Dogger - <https://dogger-idf.brgm.fr>) a été utilisée.

De cette base ont été extraits les paramètres suivants (paramètres d'entrée pour la quantification des débits de fuite) :

- Type de puits (producteur/injecteur) ;
- Profondeur du toit du Dogger ;
- Epaisseur utile du Dogger ;
- Porosité du Dogger ;
- Transmissivité du Dogger ;
- Salinité des eaux du Dogger ;
- Pression initiale (avant exploitation) au toit du Dogger ;
- Température initiale (avant exploitation) au toit du Dogger.

Les puits pour lesquels certaines de ces données n'étaient pas disponibles n'ont pas été considérés. Au total, le jeu de données nécessaire était complet pour 106 puits géothermaux sur 142 possibles.

La compressibilité des pores du Dogger a été considérée égale à $5.7 \times 10^{-10} \text{ Pa}^{-1}$ (valeur indiquée dans Laurent, 1974).

Les conditions d'exploitation géothermale ont été discutées lors d'un atelier d'experts et il a été décidé d'utiliser une surpression de +30 bars au niveau des puits injecteurs et une dépression de -10 bars au niveau des puits producteurs par rapport à leurs pressions de gisement initiales.

7.3.2. Caractéristiques des champs pétroliers du bassin de Paris

Comme précédemment pour le Dogger dans le cadre de l'exploitation géothermale, la variabilité des propriétés géologiques et hydrogéologiques des différents champs pétroliers devait être prise en compte pour la quantification de débits de fuite potentiels. Pour cela, les données sur les champs pétroliers du bassin de Paris contenues dans les « Monographies des principaux champs pétroliers de France » (rédigées par le Comité des techniciens de la Chambre syndicale de la recherche et de la production du pétrole et du gaz naturel, 1991 avec mise à jour en 1993) ont été extraites. Plus particulièrement, les paramètres suivants ont été considérés (pour le Dogger et le Trias):

- La formation géologique exploitée ;
- Le toit du réservoir ;
- La hauteur utile du réservoir ;
- La perméabilité intrinsèque du réservoir ;
- La porosité du réservoir ;
- La pression initiale (avant exploitation) du réservoir ainsi que la profondeur de mesure ;
- La température initiale (avant exploitation) du réservoir ainsi que la profondeur de mesure ;
- La salinité des eaux du réservoir.

Il est à noter que ces propriétés sont en général consignées pour un puits d'un champ donné : on a donc considéré 1 puits par champs pétrolier. Comme pour les puits géothermaux, les puits pour lesquels certaines de ces données n'étaient pas disponibles n'ont pas été pris en compte dans l'évaluation des débits de fuite potentiels. Au total, le jeu de données nécessaire était complet pour 23 puits pétroliers sur les 29 pour lesquels nous disposons d'information.

Les propriétés de l'huile en conditions de fond n'étaient pas renseignées pour un grand nombre de puits. Afin de conserver un plus grand nombre de puits pour l'étude, il a été choisi de conserver les puits pour lesquels ces propriétés étaient inconnues et de considérer :

- Une viscosité d'huile constante par réservoir et égale à la moyenne des données disponibles (Trias : 2.5 cP ou 2.5×10^{-3} Pa.s ; Dogger : 3.5 cP).
- Une densité d'huile constante pour tous les champs pétroliers et égale à la moyenne des données disponibles pour le réservoir du Trias (750 kg/m³), car une seule valeur a pu être trouvée pour le réservoir du Dogger.

Il est à noter que dans le cas de l'exploitation des hydrocarbures, la pression de gisement a tendance à baisser au fur et à mesure que la quantité d'huile produite augmente et cela plus ou moins rapidement selon les mécanismes naturels en place (présence d'un aquifère actif par exemple). D'autre part des puits injecteurs d'eau permettent de compenser en partie le volume produit et donc de maintenir en partie la pression de gisement.

La question qui se pose est donc de connaître la pression de gisement en fin d'exploitation et son évolution future. Il s'avère qu'il est difficile de répondre à cette question pour les forages pétroliers du bassin de Paris. Même s'il semble avéré que la pression de gisement en fin d'exploitation soit assez faible (quelques bars), on peut considérer qu'elle va évoluer dans le temps.

L'illustration 21 montre un exemple (qui n'est pas situé dans le bassin parisien) de simulation de l'évolution de la pression de gisement après l'arrêt de l'exploitation. La pression de gisement passe d'environ 450 bars à 200 bars en une dizaine d'année, correspondant à la période d'exploitation, puis remonte à 350 bars au bout de 150 ans. Même si cet exemple n'est évidemment pas généralisable aux réservoirs d'hydrocarbures du bassin de Paris, on peut imaginer qu'on observera sur le long terme une augmentation de la pression du réservoir initialement déplété, de par la présence de niveaux aquifères dans les formations du Jurassique et du Trias.

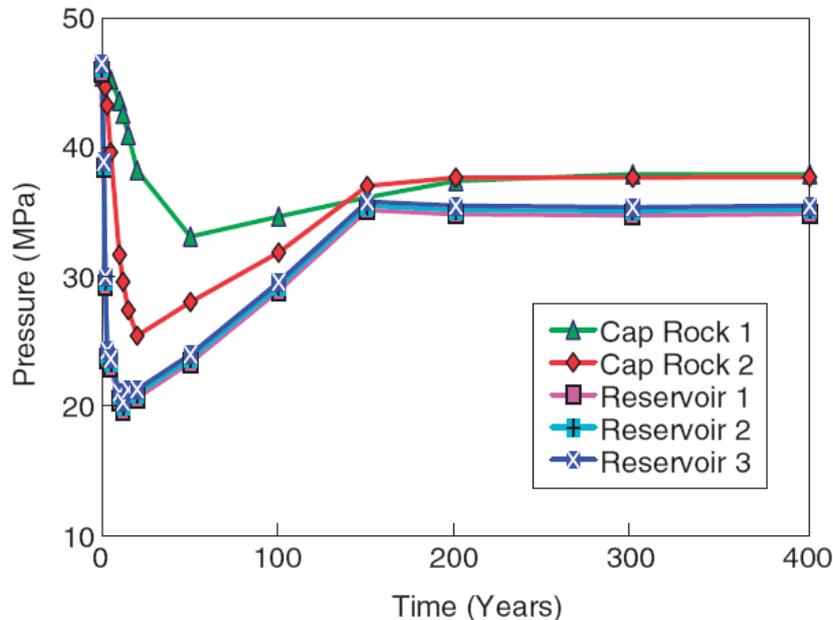


Illustration 21 – Exemple de simulation de l'évolution de la pression de gisement après l'arrêt de l'exploitation. (Mainguy et al., 2007)

7.3.3. Caractéristiques des nappes de l'Albien et du Néocomien

Les nappes de l'Albien et du Néocomien ont été modélisées dans le rapport Seguin et al. (2015). Les cartes issues de cette modélisation ont été utilisées pour définir les paramètres d'entrée en termes d'épaisseur des formations, de profondeur du mur des formations, de température et de piézométrie. Pour conserver la variabilité de ces paramètres sur les puits profonds du bassin, les valeurs au niveau de chaque puits profond considéré pour l'étude (géothermal ou pétrolier) ont été extraites de ces cartes. Les pressions des aquifères étant nécessaires pour la quantification des débits, elles ont été calculées à partir des niveaux piézométriques de chaque nappe au niveau des puits, avec une densité des eaux souterraines de 1000 kg/m^3 .

Certains paramètres hydrogéologiques de l'Albien et du Néocomien choisis pour la quantification de l'intensité des débits de fuite ont été considérés comme fixes à partir des résultats issus des modélisations de Seguin et al. (2015) :

- les valeurs hautes (c'est-à-dire les plus conservatrices en termes de risques⁵) de l'intervalle de variation de la perméabilité des nappes au niveau des puits considérés ont été prises en compte (8×10^{-5} m/s pour l'Albien et 2×10^{-5} m/s pour le Néocomien). Les données de perméabilité devant être renseignées en m², les propriétés de l'eau en surface ont été considérées pour effectuer la conversion (i.e. densité de 1000 kg/m³ et viscosité de 1 cP), ce qui permet de façon simple d'aboutir à 8×10^{-12} m² pour l'Albien et 2×10^{-12} m² pour le Néocomien ($K \left[\text{en } \frac{\text{m}}{\text{s}} \right] = k \left[\text{en } \text{m}^2 \right] \cdot \frac{\rho g}{\mu}$). Il est à noter que la viscosité des eaux de l'Albien et du Néocomien est moins élevée (respectivement ~ 0.7 et ~ 0.8 cP en moyenne) que la valeur considérée ici mais reste dans le même ordre de grandeur : cette simplification surestime légèrement la perméabilité intrinsèque des nappes mais cette surestimation est conservatrice en terme de risques.
- une valeur de 2×10^{-6} m⁻¹ pour le coefficient d'emmagasinement spécifique a été choisie pour la nappe de l'Albien et celle du Néocomien. La valeur du coefficient de compressibilité des pores (paramètre d'entrée du modèle) a été recalculée à partir du coefficient d'emmagasinement spécifique, utilisant la formule suivante (nappes captives) : $S_s = \rho g \omega (c_p + c_f)$, avec S_s le coefficient d'emmagasinement spécifique, ρ la densité du fluide (eau), ω la porosité, c_p le coefficient de compressibilité des pores et c_f le coefficient de compressibilité du fluide (celui des grains solides a été négligé). Le coefficient de compressibilité des pores a ainsi été déduit aux conditions moyennes des deux nappes : 3.2×10^{-10} Pa⁻¹ pour l'Albien et 3.1×10^{-10} Pa⁻¹ pour le Néocomien ;
- une salinité moyenne de 1 g/l de l'Albien et du Néocomien au niveau des puits profonds considérés a été prise en compte.

Les valeurs moyennes de porosité de l'Albien (30 %) et du Néocomien (28 %) données dans Vernoux et al. (1997) ont été retenues.

7.3.4. Géométrie des puits

Une géométrie unique et générique de puits a été considérée pour chacune des exploitations (géothermale et pétrolière). Il est à noter que dans le cadre de la quantification des débits de fuite potentiels depuis un réservoir profond jusque dans l'Albien-Néocomien, c'est la section du puits située entre l'Albien-Néocomien et le réservoir exploité qui doit être spécifiée.

D'après Hervé (2009), les cuvelages de production utilisés pour les puits de géothermie au Dogger sont, pour des raisons technico-économiques, soit de 7", soit de 9"5/8. Les diamètres de forage pour ces cuvelages sont de 8"1/2 ou 12"1/4 respectivement.

Ces géométries sont représentatives de la quasi-totalité des niveaux de l'Albien-Néocomien et du Dogger même si, pour les puits bénéficiant d'un double cuvelage jusqu'aux nappes de l'Albien-Néocomien, la partie supérieure de cette section bénéficie d'un cuvelage extérieur de diamètre plus important que celui du cuvelage de production. Il est de 9"5/8 (diamètre de forage de 12"1/4) dans le cas d'un cuvelage de production de 7" et de 13"3/8 (diamètre de forage de 17"1/2) dans le cas d'un cuvelage de production de 9"5/8.

Pour notre étude, nous avons considéré une section homogène entre les aquifères depuis l'Albien-Néocomien jusqu'au réservoir du Dogger, avec la géométrie du cuvelage de production

⁵ Avec le modèle utilisé, plus la perméabilité de la nappe est importante plus le débit de fuite entrant dans cet aquifère pourra être important.

la plus importante (conservatrice en termes de risques), c'est-à-dire avec un diamètre de forage de 12''1/4 (31.1 cm) et un cuvelage de 9''5/8 (diamètre extérieur de 24.45 cm et intérieur de 22.44 cm).

Concernant les puits pétroliers, les cuvelages sont globalement de moins grand diamètre que les cuvelages des puits de géothermie. Dans cette étude, nous avons considéré une section homogène depuis l'Albien-Néocomien jusqu'aux réservoirs de production, avec un cuvelage de production de 7'' (diamètre extérieur de 17.78 cm et intérieur de 15.24 cm) pour un diamètre de forage de 8''1/2 (diamètre de 20,45 cm).

Les puits sont considérés verticaux dans le modèle.

7.3.5. Propriétés des défauts

Il est à noter que chacun des grands types de scénarios de risque déterminés pour cette étude correspondent à des situations dégradées, par opposition à la situation normale (c'est-à-dire sans défaut important). Il s'agissait donc d'estimer des ordres de grandeurs pour les défauts envisageables dans ces situations dégradées.

Scénarios de type1

Pour évaluer l'intensité de cette catégorie de scénarios, il a été pris en compte comme voie de fuite un micro-annulaire d'épaisseur constante à une des interfaces de l'annulaire cimenté (arbitrairement à l'interface ciment-acier, ce choix n'a pas de conséquence importante en termes de quantification de débit de fuite), et continu sur toute la hauteur du puits reliant le réservoir et l'Albien-Néocomien.

La plage de variation de l'épaisseur de l'annulaire a été déterminée lors de l'atelier d'experts de la manière suivante : la valeur basse du micro-annulaire a été fixée à 50 μm , qui est d'après les dires d'experts, l'épaisseur maximale non-délectable par les diagraphies CBL ; c'est donc la valeur maximale à considérer en situation normale (sans défaut important) et minimale en situation dégradée (défaillance de la cimentation). Concernant la valeur haute de l'épaisseur de ce micro-annulaire, elle a été fixée à la valeur équivalente à une perméabilité de ciment de 100 D (10^{-10} m^2), représentative d'un ciment très dégradé d'après Lahaie et Thoraval (2013). L'épaisseur d'un micro-annulaire équivalente à cette perméabilité est de 300 μm pour la géométrie choisie pour les puits pétroliers et de 350 μm pour la géométrie choisie pour les puits de géothermie. Il est à noter que, sur un puits donné, plus le défaut est important, plus sa vraisemblance d'occurrence est faible.

Scénarios de type2

Pour évaluer l'intensité de cette catégorie de scénarios, la dimension des perforations potentielles d'un cuvelage a été choisie à partir des seuils actuels de détection des contrôles par calliper de l'état de surface des cuvelages : les méthodes actuelles permettent d'effectuer des mesures au niveau d'un point tous les 2.5 cm avec 40 à 60 bras. Etant donnée la géométrie fixe des puits de géométrie choisie pour cette étude, le seuil de détection actuel d'une perforation est alors de 4 cm^2 . Il a donc été décidé de considérer, pour ce scénario, deux situations différentes : l'existence d'1 perforation de 4 cm^2 , ainsi que l'existence de 10 perforations de 4 cm^2 . Ce chiffre (10 perforations) est arbitraire, l'objectif étant de faire une analyse de sensibilité sur ce paramètre, c'est-à-dire d'évaluer l'impact du nombre de perforations sur le débit de fuite. Il est à noter que, sur un puits donné, plus le nombre de perforations est important, plus leur vraisemblance d'occurrence est faible.

La situation où des perforations fuyardes se produiraient sur un puits bénéficiant d'un double cuvelage au niveau des nappes de l'Albien et du Néocomien n'est pas quantifiée, en termes de débit de fuite, de façon différente de la situation simple cuvelage. En effet, la différence entre ces deux situations de risque est principalement une question de vraisemblance de l'existence de perforation reliant le cuvelage de production et les aquifères. Elle est donc traitée et discutée dans la section dédiée à l'étude de la vraisemblance des scénarios.

Scénarios de type3

Pour l'étude de ce type de scénarios, le cas « fermeture provisoire » est analysé. En effet cette situation est jugée plus contraignante en termes de risques que le cas « fermeture définitive » où plusieurs bouchons de hauteurs plus importantes sont mis en place. Dans la mesure où les fermetures provisoires concernent principalement l'exploitation d'hydrocarbures, il a été décidé de l'analyse de ce scénario sur les puits d'hydrocarbures.

D'après Lahaie (2015), « la fermeture provisoire d'un puits a pour principe d'isoler, pendant une période provisoire, la couche réservoir de la surface du sol (ou du fond de la mer) par des moyens qui préservent la possibilité d'une utilisation ultérieure du puits ». Les modalités de la fermeture provisoire sont les mêmes que celles d'une fermeture définitive, à l'exception :

- du nombre de bouchons requis qui est de 2 pour une fermeture provisoire (un au niveau de la couche réservoir et l'autre en tête de puits) ;
- de la hauteur des bouchons pouvant être inférieure à la hauteur de 50 m requis pour la fermeture définitive.

Dans le cadre de notre étude, deux situations dégradées différentes ont été évaluées : 1) le cas où un bouchon de 50 m aurait été placé au niveau du réservoir mais comporterait un micro-annulaire au niveau de l'interface avec l'acier (épaisseur du micro-annulaire fixée à 50µm). 2) le cas extrême où la fermeture provisoire n'aurait pas été mise en place (pas de bouchon au niveau réservoir).

Cette catégorie de scénarios de risque nécessite également, pour se produire, des perforations dans le cuvelage de production (voire une double perforation dans le cas où les nappes de l'Albien et/ou du Néocomien bénéficieraient d'un double cuvelage à leurs niveaux). Par conséquent, la même démarche que celle menée pour les scénarios de type 2 a été suivie ici : étant donnée la géométrie choisie pour les puits d'hydrocarbures, le seuil de détection de perforation est de 3 cm². Comme pour le scénario 2, deux situations ont été évaluées, l'existence d'une perforation et l'existence de 10 perforations.

Les sections non cimentées des puits fermés provisoirement et définitivement sont remplies de fluide inhibé. Ce fluide inhibé est de l'eau douce avec un produit d'inhibition ajouté à hauteur d'un pour mille environ. Néanmoins, après discussions avec des experts du domaine, cet ajout ne change pas les propriétés du fluide (densité, viscosité) qui sont semblables à celle de l'eau.

7.4. RESULTATS DE L'ESTIMATION DES DEBITS DE FUITE

Les résultats sont donnés pour chacune des catégories de scénarios. Pour chacun des scénarios choisis (donnés dans le tableau 3), différents-sous scénarios ont été évalués, afin de prendre en compte les incertitudes liées à cette quantification (cf. Tableau 3). Les incertitudes spécifiquement liées à la variabilité des conditions géologiques et hydrogéologiques dans la zone d'étude (variabilité liée aux caractéristiques du bassin) sont retranscrites sous la forme de diagramme dits moustaches permettant de visualiser les valeurs minimales, au premier quartile, médianes,

au troisième quartile et maximales des débits de fuite obtenus lors de la quantification d'un scénario donné.

L'importance de chaque paramètre incertain dans la variabilité globale des débits de fuite obtenus est discutée au cas par cas.

7.4.1. Scénario de type 1: Quantification d'un débit de fuite de saumure / d'huile depuis le réservoir géothermal / pétrolier jusqu'aux nappes de l'Albien et du Néocomien par un micro-annulaire continu situé à l'extrados d'un puits géothermal / d'hydrocarbure générique.

a) Exploitation géothermale

Pour l'étude du scénario choisi, différents sous-scénarios (au total 12) ont été quantifiés afin de prendre en compte (cf. Tableau 6) :

- trois tailles différentes du défaut (du micro annulaire)
- une fuite dans la nappe de l'Albien ou dans la nappe du Néocomien
- des conditions de pression représentatives des conditions initiales ou représentatives de conditions d'exploitation (différentes selon les puits producteurs et injecteurs)

Tableau 6 – Sous-scénarios quantifiés pour le scénario de type 1

		Epaisseur Microannulaire		
		50µm	100µm	350µm
Conditions "initiales" des réservoirs	Fuite dans l'Albien	Sous-scénario n°1	Sous-scénario n°5	Sous-scénario n°9
	Fuite dans le Néocomien	Sous-scénario n°2	Sous-scénario n°6	Sous-scénario n°10
Conditions "en exploitation" des réservoirs	Fuite dans l'Albien	Sous-scénario n°3	Sous-scénario n°7	Sous-scénario n°11
	Fuite dans le Néocomien	Sous-scénario n°4	Sous-scénario n°8	Sous-scénario n°12

L'illustration 22 / partie gauche présente les résultats de cette quantification pour l'exploitation géothermale. On rappelle que les diagrammes moustaches présentés pour chacun des sous-scénarios représentent la variabilité des débits de fuite obtenus étant donnée la variabilité des paramètres du Dogger et des nappes de l'Albien et du Néocomien (profondeur, épaisseur, pression, température, salinité) au niveau des puits de géothermie considérés.

L'analyse suivante peut en être faite :

- En conditions initiales, tous les sous-scénarios indiquent des valeurs de débits positifs. Cela indique que les conditions initiales (en pression notamment) de la zone d'étude sont favorables à une migration depuis le réservoir du Dogger vers les nappes de l'Albien et du Néocomien.
- Néanmoins, les valeurs des débits calculés sont faibles pour les petits défauts (quelques m³/an), ce qui confirme qu'avec une bonne cimentation, la migration de fluides depuis le Dogger n'est pas possible.
- Les différences en termes d'intensité entre une fuite potentielle dans la nappe de l'Albien et une fuite potentielle dans la nappe du Néocomien sont faibles.

- Les différences sont plus importantes entre les débits calculés avec les conditions initiales et ceux calculés avec les conditions d'exploitation arbitraires choisies : pour les puits injecteurs, les débits calculés sont plus forts en exploitation (car localement la pression augmente dans le réservoir), mais c'est l'inverse pour les puits producteurs. On retrouve donc une plus grande variabilité des débits calculés en exploitation qu'en conditions initiales. De façon intéressante, pour certains puits producteurs, les débits sont nuls voire négatifs, ce qui signifie, pour ces configurations, qu'une fuite depuis le réservoir du Dogger jusqu'aux nappes l'Albien/Néocomien n'est pas possible quel que soit le défaut considéré.

b) Exploitation d'hydrocarbures

Comme pour le cas précédent, différents sous-scénarios (au total 12) ont été quantifiés afin de prendre en compte :

- trois différentes tailles du défaut (du micro annulaire)
- une fuite dans la nappe de l'Albien ou dans la nappe du Néocomien
- des conditions de pression représentatives des conditions initiales ou représentatives de conditions d'exploitation arbitraires.

L'illustration 22 / partie droite présente les résultats de cette quantification pour l'exploitation d'hydrocarbures. On rappelle que les diagrammes moustaches présentés pour chacun des sous-scénarios représentent la variabilité des débits de fuite obtenus étant donnée la variabilité des paramètres des réservoirs et des nappes de l'Albien et du Néocomien (profondeur, épaisseur, pression, température, salinité) au niveau des puits d'hydrocarbures considérés.

L'analyse suivante peut en être faite :

- En conditions initiales, les débits obtenus pour un sous-scénario donné varient significativement en fonction des puits considérés sur le bassin. Ainsi, pour certains puits, les conditions initiales (en pression notamment) de la zone d'étude sont favorables à une migration depuis le réservoir vers les nappes de l'Albien et du Néocomien, alors que pour d'autres, elles ne permettent pas de migration dans ce sens. Il est à noter que les débits négatifs (fuite impossible) sont obtenus exclusivement pour des champs du Trias.
- Néanmoins, même dans les cas où la piézométrie permet cette migration, les valeurs des débits calculés sont faibles pour les petits défauts (moins de 1 m³/an), ce qui confirme qu'avec une bonne cimentation, la migration de fluides depuis le réservoir n'est pas possible.
- Les différences en termes d'intensité entre une fuite potentielle dans la nappe de l'Albien et une fuite potentielle dans la nappe du Néocomien restent faibles pour ce scénario.
- Les différences sont plus importantes entre les débits calculés avec les conditions initiales et ceux calculés avec les conditions d'exploitation arbitraires choisies : ainsi, dans le cas arbitraire où la pression du réservoir en ou après exploitation atteindrait 75% de la pression initiale, aucune fuite ne serait possible. Cela prouve l'importance de la bonne compréhension de la remise ou non en pression d'un champ exploité à ses valeurs initiales.
- Concernant l'influence du type de fluide fuyard (eau ou huile) sur les valeurs de débits estimés, quelques différences existent mais restent très modérées : on peut observer des

valeurs extrêmes un peu plus fortes pour les débits d'eau que pour les débits d'huile, mais des débits médians d'huile plus forts. Ces observations sont les effets combinés d'une plus faible viscosité de l'eau en comparaison avec l'huile et d'une plus faible densité de l'huile qui, tous deux, favorisent un débit plus important entre le réservoir et les nappes de l'Albien/Néocomien.

Il est également possible de comparer les résultats de l'estimation de l'intensité des débits de fuite pour le scénario de type 1 analysé pour l'exploitation géothermale et celui analysé pour l'exploitation d'hydrocarbures (la comparaison est possible pour les eaux, en conditions initiales de pression). On observe des débits plus forts pour l'exploitation géothermale que pour l'exploitation d'hydrocarbures. Ceci est principalement dû à deux raisons :

- La géométrie des cimentations différentes prise en compte dans l'estimation des débits : la section de l'annulaire cimenté extérieur est considérée plus importante pour les puits de géothermie que pour les puits d'hydrocarbures. Cette différence de section se répercute sur les débits de fuite estimés.
- Les différences, en termes de pression des réservoirs et des nappes de l'Albien et du Néocomien, entre les zones où sont implantés les puits de géothermie et celles où sont implantés les puits d'hydrocarbures : les niveaux piézométriques des nappes de l'Albien et du Néocomien sont moins importants au centre du bassin au niveau des puits de géothermie ; de plus, si on considère le réservoir du Dogger, les pressions du réservoir sont en moyennes plus importantes au niveau de l'implantation des puits géothermiques qu'au niveau de l'implantation des puits pétroliers.

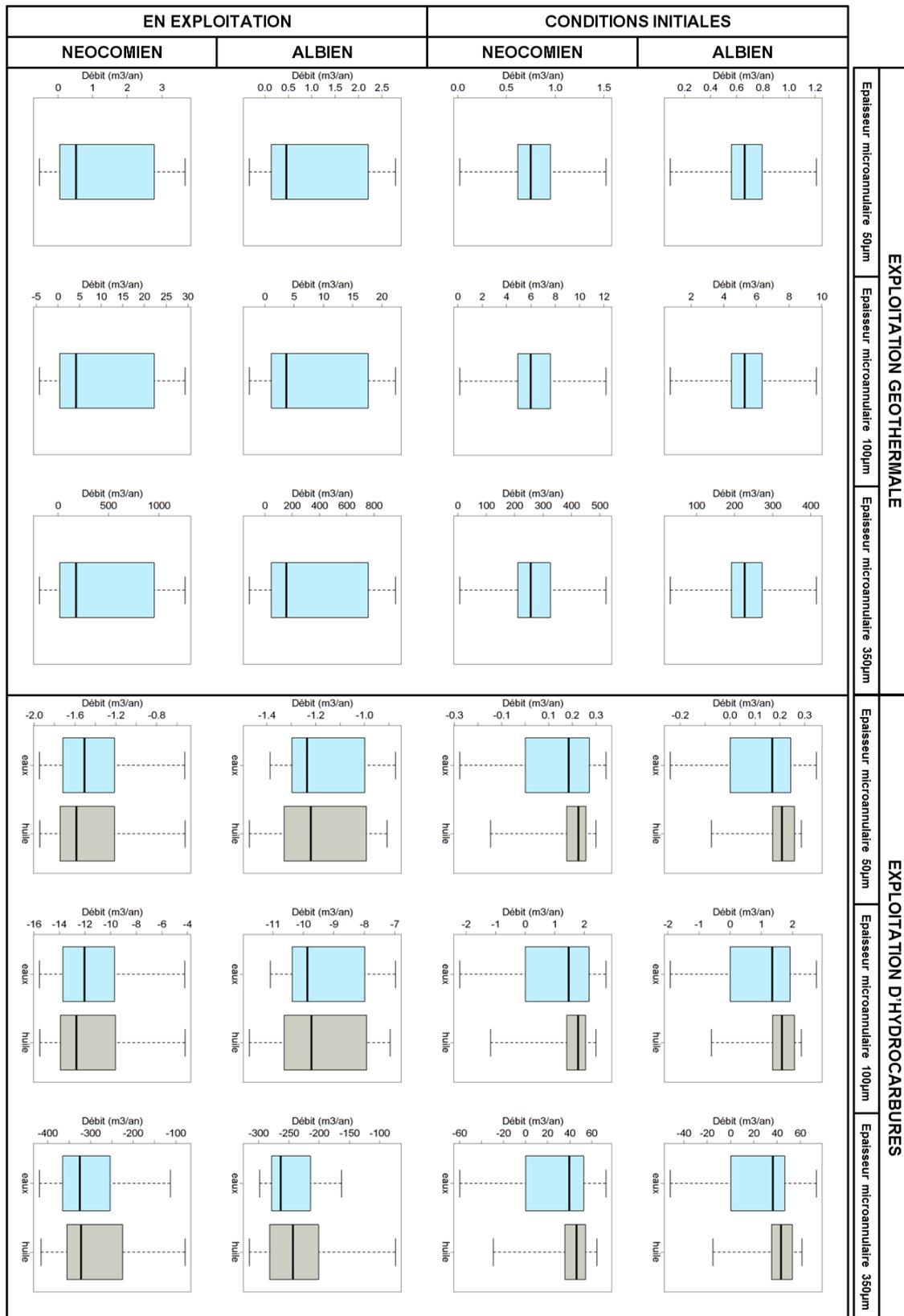


Illustration 22 – Résultats de l'estimation des débits de fuite pour un scénario de type 1 correspondant à une fuite de saumures ou d'hydrocarbures depuis le réservoir géothermal du Dogger jusqu'aux nappes de l'Albien et du Néocomien par un micro-annulaire continu situé à l'extrados d'un puits géothermal ou d'un puits d'hydrocarbure générique

7.4.2. Scénario de type 2 : Quantification d'un débit de fuite de saumure vers les nappes de l'Albien-Néocomien du fait de l'existence de perforations sur un puits en exploitation

Nous rappelons que ce type de scénario n'est envisagé que pour l'exploitation géothermique. Comme pour les scénarios précédents, différents sous-scénarios (au total 4) ont été quantifiés afin de prendre en compte (cf. Tableau 7) :

- deux différentes tailles de perforation
- une fuite dans la nappe de l'Albien ou dans la nappe du Néocomien

Tableau 7 – Sous-scénarios quantifiés pour le scénario de type 2

		Fuite dans l'Albien	Fuite dans le Néocomien
Taille des perforations	1 perforation de 4cm ²	Sous-scénario n°1	Sous-scénario n°3
	10 perforations de 4cm ²	Sous-scénario n°2	Sous-scénario n°4

L'illustration 23 présente les résultats de cette quantification. On rappelle que les diagrammes moustaches présentés pour chacun des sous-scénarios représentent la variabilité des débits de fuite obtenus étant donnée la variabilité des paramètres du Dogger et des nappes de l'Albien et du Néocomien (profondeur, épaisseur, pression, température, salinité) au niveau des puits de géothermie considérés ; pour chacun des sous-scénarios, trois diagrammes moustache sont présentés : le premier est le résultat de l'estimation des débits de fuite sur tous les puits de géothermie pris en compte, le deuxième en ne tenant compte que des puits injecteurs au sein de cette liste et le troisième en ne tenant compte que des puits producteurs.

L'analyse suivante peut en être faite :

- Il peut être tout d'abord noté que, pour un sous-scénario donné, la variabilité des débits estimés est importante avec des débits négatifs (c'est-à-dire migration des eaux géothermales vers les nappes de l'Albien et du Néocomien impossible) et des débits positifs (c'est-à-dire migration des eaux géothermales vers les nappes de l'Albien et du Néocomien possible en cas d'existence de perforations). Néanmoins, cette variabilité est principalement due aux types de puits. En effet, quand l'analyse est faite pour un type de puits donné (producteurs ou injecteurs), la variabilité est moindre. Les valeurs sont logiquement plus importantes pour les puits injecteurs (où les pressions dans le puits sont plus importantes) que pour les puits producteurs.
- On remarque également une importance non négligeable de la nappe dans laquelle se produit la fuite, du fait de la différence de perméabilité entre l'Albien et le Néocomien (nous rappelons que la perméabilité a été considéré constante dans les deux nappes mais quatre fois plus grande au niveau de la nappe de l'Albien que de celle du Néocomien). Cela montre l'importance des propriétés de l'aquifère récepteur de la fuite dans le cadre de ce type de scénarios (ce n'était pas le cas pour les scénarios de type 1).
- Enfin l'analyse de sensibilité montre également la relation directe entre les débits de fuite et la surface de perforation considérée, les deux étant quasi-proportionnels.

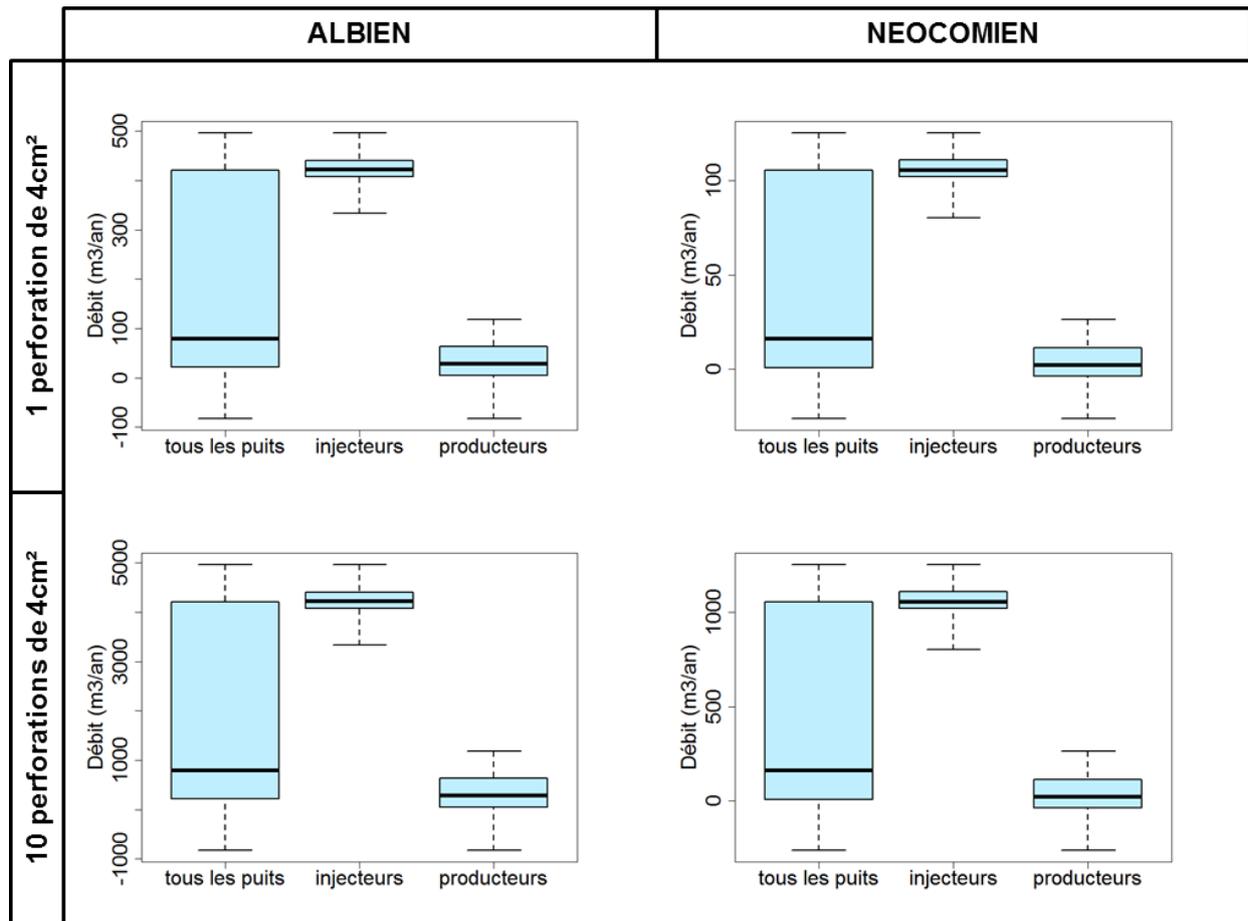


Illustration 23 – Résultats de l'estimation des débits de fuite pour un scénario de type 1 correspondant à une fuite de saumures vers les nappes de l'Albien-Néocomien du fait de l'existence de perforations sur un puits géothermique en exploitation

7.4.3. Scénario de type 3 : Migration de fluides vers les nappes de l'Albien-Néocomien du fait d'une migration verticale à l'intérieur d'un puits qui n'est plus exploité conjuguée à l'existence de perforations sur ce puits

Nous rappelons que ce type de scénarios n'est analysé que pour l'exploitation d'hydrocarbures et pour la situation où un puits serait fermé provisoirement (configuration jugée la plus contraignante d'un point de vue des risques).

Différents sous-scénarios (au total 16) ont été quantifiés afin de prendre en compte (cf. Tableau 8) :

- deux situations dégradées différentes 1) le cas où un bouchon de 50 m aurait été placé au niveau du réservoir mais comporterait un micro-annulaire continu au niveau de l'interface avec l'acier (épaisseur du micro-annulaire fixée à 50 µm). 2) le cas extrême où la fermeture provisoire n'aurait pas été mise en place (pas de bouchon au niveau réservoir)
- deux différentes tailles de perforation

- une fuite dans la nappe de l'Albien ou dans la nappe du Néocomien
- des conditions de pression représentatives des conditions initiales ou représentatives de conditions d'exploitation arbitraires.

Tableau 8 – Sous-scénarios quantifiés pour le scénario de type 3

				Conditions "initiales" des réservoirs		Conditions "en exploitation" des réservoirs	
				Fuite dans l'Albien	Fuite dans le Néocomien	Fuite dans l'Albien	Fuite dans le Néocomien
Taille des perforations	1 perforation de 3cm ²	Situation dégradée de la fermeture du puits	Bouchon avec micro-annulaire de 50µm	Sous-scénario n°1	Sous-scénario n°5	Sous-scénario n°9	Sous-scénario n°13
			Absence de bouchon	Sous-scénario n°2	Sous-scénario n°6	Sous-scénario n°10	Sous-scénario n°14
	10 perforations de 3cm ²		Bouchon avec micro-annulaire de 50µm	Sous-scénario n°3	Sous-scénario n°7	Sous-scénario n°11	Sous-scénario n°15
			Absence de bouchon	Sous-scénario n°4	Sous-scénario n°8	Sous-scénario n°12	Sous-scénario n°16

L'illustration 24 présente les résultats de cette quantification. On rappelle que les diagrammes moustaches présentés pour chacun des sous-scénarios représentent la variabilité des paramètres des réservoirs et des nappes de l'Albien et du Néocomien (profondeur, épaisseur, pression, température, salinité) au niveau des puits d'hydrocarbures considérés.

L'analyse suivante peut en être faite :

- Comme pour le scénario de type 1 (exploitation d'hydrocarbures), en conditions initiales, les débits obtenus pour un sous-scénario donné varient significativement en fonction des puits considérés sur le bassin. Ainsi, pour certains puits, les conditions initiales (en pression notamment) de la zone d'étude sont favorables à une migration depuis le réservoir vers les nappes de l'Albien et du Néocomien, alors que pour d'autres, elles ne permettent pas de migration dans ce sens. Il est à noter que les débits négatifs (fuite impossible) sont obtenus exclusivement pour des champs du Trias.
- Néanmoins, même dans les cas où cette migration est théoriquement possible, les valeurs des débits calculés sont faibles (quelques m³/an) lorsqu'un bouchon existe (même de hauteur limitée et comportant un micro annulaire continu). A l'inverse, dans le cas où aucun bouchon n'existerait, les débits estimés sont beaucoup plus importants (plusieurs dizaines, voire centaines de m³/an) (même pour une perforation de taille limitée). Ces chiffres confirment l'importance de l'existence d'un bouchon de ciment.
- D'autres différences entre les cas « existence d'un bouchon avec microannulaire » et « absence de bouchon » sont aussi visibles : dans le premier cas et pour une configuration donnée, l'intensité des débits de fuite estimés est relativement indépendante de l'aquifère dans laquelle se produit la fuite, alors que dans le second cas, les débits de fuite dans l'Albien et dans le Néocomien sont significativement différents. De même, dans le premier cas, la surface de perforation considérée n'impacte pas significativement les débits calculés alors que dans le second cas, elle joue un rôle important. Ces deux observations montrent que si un bouchon existe, assurer une bonne intégrité de celui-ci permet de se prémunir contre une fuite, même en cas d'existence de perforations et de propriétés hydrogéologiques favorables à une fuite ; l'absence de bouchon rend à l'inverse le puits vulnérable à l'existence d'une fuite par d'éventuelles perforations.
- Comme pour le scénario de type 1 (exploitation d'hydrocarbures), les différences sont importantes entre les débits calculés avec les conditions initiales et ceux calculés avec les conditions d'exploitation arbitraires choisies : ainsi, dans le cas arbitraire où la pression

du réservoir après exploitation n'excéderait pas 75% de la pression initiale, aucune fuite ne serait possible. Cela prouve l'importance de la bonne compréhension de la remise ou non en pression d'un champ exploité à ses valeurs initiales.

- Concernant l'influence du type de fluide fuyard (eaux ou huile) sur les valeurs de débits estimés, quelques différences existent mais, comme pour le scénario de type 1 (exploitation d'hydrocarbures), elles restent très modérées dans le cas où un bouchon de puits existe : on peut observer des valeurs extrêmes un peu plus fortes pour les débits d'eaux que pour les débits d'huile, mais des débits médians d'huile plus forts. Ces observations sont les effets combinés d'une plus faible viscosité de l'eau en comparaison avec l'huile et d'une plus faible densité de l'huile qui, tous deux, favorisent un débit plus important entre le réservoir et les nappes de l'Albien/Néocomien. Dans la situation d'une absence de bouchon (migration par un puits ouvert), ce sont les effets densitaires qui prédominent ce qui entraînent des valeurs plus significatives de débits de fuite d'huile que de débits de fuite de saumures.
- Contrairement au scénario de type 1 analysé (exploitation d'hydrocarbures), il est à noter que le temps d'arrivée du fluide initialement présent dans le réservoir (saumures ou huile) peut être long, du fait de la nécessaire migration au sein d'un puits principalement ouvert. En effet, le volume interne du puits considéré dans cette étude sur une hauteur de 1000 m est de 18 m³, et ce volume devra être rempli avant d'observer les premières migrations dans les nappes réceptrices. Par exemple, pour un débit de fuite de 5 m³/an sur 1000 m, le délai entre la mise en place de la voie de fuite et l'atteinte de la nappe serait de 3 années et demi environ.

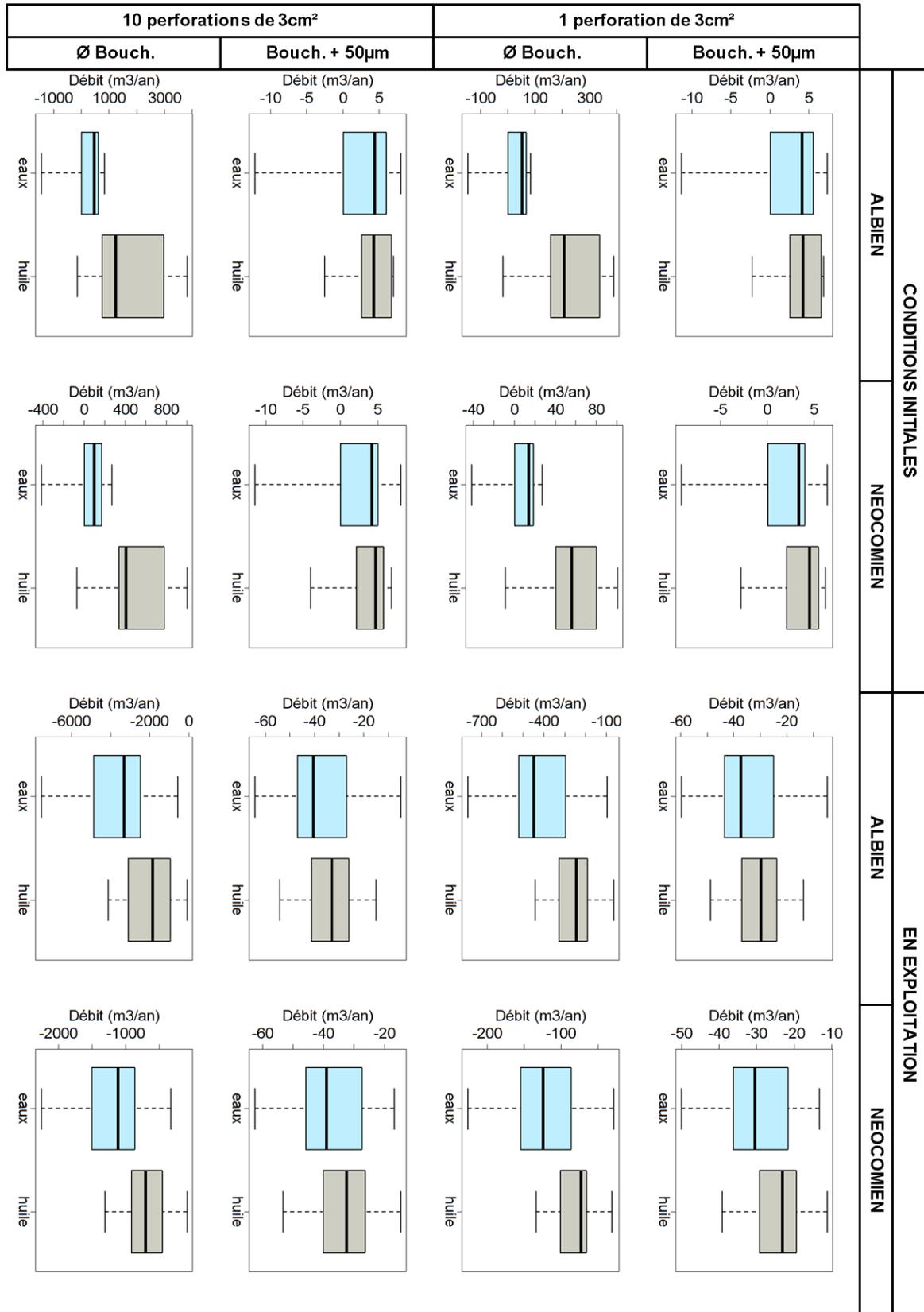


Illustration 24 – Résultats de l'estimation des débits de fuite pour un scénario de type 3 correspondant à une migration verticale à l'intérieur d'un puits d'hydrocarbure qui n'est plus exploité conjuguée à l'existence de perforations sur ce puits

Le Tableau 9 présente une synthèse des principaux résultats décrits en détails précédemment, avec comme objectif une discussion en matière de prévention des risques de fuite.

Tableau 9 – Synthèse de l'estimation de l'intensité des débits de fuite pour les différentes catégories de scénarios identifiées

Scénario de type 1 : Migration de fluides vers les nappes de l'Albien-Néocomien du fait de l'existence d'une voie de fuite à l'extrados d'un puits (annulaire, cimenté ou non)	Scénario de type 2 : Migration de fluides vers les nappes de l'Albien-Néocomien du fait de l'existence de perforations sur un puits en exploitation	Scénario de type 3 : Migration de fluides vers les nappes de l'Albien-Néocomien du fait d'une migration verticale à l'intérieur d'un puits qui n'est plus exploité conjuguée à l'existence de perforations sur ce puits
<p>Les conditions initiales de la zone d'étude sont plutôt favorables à une migration depuis les réservoirs exploités (géothermie ou hydrocarbures) vers les nappes de l'Albien et du Néocomien, mais les débits sont faibles (quelques m³/an) pour les petits défauts.</p> <p>⇒ Importance d'une bonne cimentation à l'extrados du puits qui empêche l'occurrence d'une fuite significative</p> <p>Concernant l'exploitation géothermale, pour les puits producteurs, l'intensité d'une fuite est plus importante en conditions initiales qu'en conditions d'exploitation, pour les puits injecteurs c'est l'inverse.</p> <p>⇒ Importance de surveiller l'état des cimentations à toutes les étapes de la vie du doublet</p> <p>Concernant l'exploitation d'hydrocarbures, dans le cas d'une baisse significative et pérenne des pressions des champs exploités, aucune fuite vers les nappes de l'Albien et du Néocomien n'est possible.</p> <p>⇒ Importance de la bonne compréhension de la remontée des pressions d'un champ exploité à ses valeurs initiales</p>	<p><i>(Scénario analysé uniquement pour la géothermie.)</i></p> <p>Même si une comparaison stricte n'est pas possible entre les 3 types de scénarios, c'est celui-ci qui semble provoquer les débits de fuite les plus importants (plusieurs centaines, voire milliers de m³/an, pour les puits injecteurs). De fortes incertitudes sur cette quantification existent avec une forte variabilité des débits calculés en fonction :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Du type de puits considéré (débits plus importants pour les puits injecteurs) - De l'ampleur des perforations - Des paramètres d'écoulement des nappes réceptrices <p>⇒ Importance des mesures prises pour éviter l'occurrence de perforations fuyardes (traitements inhibiteurs de corrosion, protection par double cuvelage des aquifères superficiels et de l'aquifère de l'Albien-Néocomien)</p>	<p><i>(Scénario analysé uniquement pour un puits d'hydrocarbure fermé provisoirement.)</i></p> <p>Les conditions initiales de la zone d'étude sont plutôt favorables à une migration depuis les champs exploités vers les nappes de l'Albien et du Néocomien, mais les débits sont très faibles si un bouchon existe (quelques m³/an), même dans le cas où d'importantes perforations existeraient. L'absence de bouchon rend à l'inverse le puits vulnérable à l'apparition d'une fuite de plus grande ampleur (plusieurs centaines, voire milliers de m³/an) par d'éventuelles perforations</p> <p>⇒ Importance des opérations de fermeture qui permettent de se prémunir contre une fuite importante, même en présence de perforations et de propriétés hydrogéologiques favorables à une fuite</p>

8. Etude des risques - Etape 2c : Estimation des conséquences d'une fuite potentielle sur les nappes de l'Albien/Néocomien

8.1. CHOIX DES TYPES D'IMPACTS A ESTIMER

L'objectif ici est de déterminer l'extension d'une zone impactée par la réinjection de fluides issus du Dogger, ou du Trias via des puits géothermiques ou d'hydrocarbures, à partir des estimations faites en matière de débit de fuite.

Afin d'estimer l'étendue de la zone impactée par une fuite, les impacts suivant ont été quantifiés :

- **Impacts chimiques de l'ion chlorure dans le cas d'une fuite d'eau salée issue du Dogger ou du Trias (Conséquences des scénarios de type 1, 2 et 3).** Le critère choisi pour cet impact est la norme de potabilité fixée à une concentration de 250 mg/L soit environ 7.10^{-3} mol/L. Même si les chlorures sont présents en grande quantité dans l'eau géothermale du Dogger, il existe d'autres éléments beaucoup plus toxiques (cf. Annexe 2). Le critère choisi correspond à une contamination de l'Albien par 2.5% d'eau du Dogger. Ce chiffre est cohérent avec ceux issus de l'évaluation de la nocivité des eaux du Dogger (Abou Akar, 1994) qui conclut que les eaux de l'Albien se révèlent non potables à partir d'un taux approximatif d'infiltration d'eau du Dogger de l'ordre de 1,5 %.
- **Impacts thermiques dans le cas d'une fuite d'eau géothermale issue du Dogger au droit d'un puits d'injection ou de production en exploitation (Conséquences des scénarios de type 2).** Le critère choisi pour cet impact est la baisse ou hausse d'un degré de la température initiale du réservoir.
- **Impacts chimiques dans le cas d'une fuite d'hydrocarbures (Conséquences des scénarios de type 1 et 3).** Le critère choisi pour cet impact est une fraction de la phase huile par rapport à la phase eau de 1%. Ce critère a été choisi de façon arbitraire.

8.2. MODELE UTILISE POUR L'ESTIMATION DES IMPACTS D'UNE FUITE

La modélisation numérique des réservoirs de l'Albien et du Néocomien ciblés par ce projet a été effectuée avec le logiciel COMSOL Multiphysics et le module Subsurface Flow développés par la société COMSOL.

Le code de calcul résout par la méthode des éléments finis, en géométrie bi- ou tridimensionnelle, les équations décrivant l'écoulement et le transport de masse ou d'énergie en aquifère (COMSOL, version 5.2, 2016).

Les principales caractéristiques du modèle sont détaillées ci-dessous :

- Le domaine modélisé en 2 Dimensions est représenté par un rectangle de 10 km sur 3 km de côtés. Il comprend un seul puits isolé, correspondant à un puits géothermique ou pétrolier fuyard ; dans les situations où cela s'est avéré nécessaire, le domaine modélisé a été agrandi à 15 km afin de ne pas subir l'influence des conditions aux limites imposées.
- Le maillage du modèle est composé de triangles évoluant d'une taille de 10 cm de côté, au contour du puits, à 100 mètres de côté aux frontières extérieures : il comporte plus de

120 000 éléments (Cf. Illustration 25). La taille extensible des mailles s'adapte à la progression des perturbations thermiques et géochimiques du milieu.

- Le réservoir est assimilé à un aquifère monocouche horizontal, homogène, isotrope, d'épaisseur constante et d'extension infinie. L'ensemble des caractéristiques hydrogéologiques sont constants sur l'ensemble du domaine modélisé.
- Les équations mathématiques utilisées dans le modèle numérique prennent en compte les écoulements dans un milieu poreux. L'hydrodynamisme est résolu par les équations de Darcy. Le transport de chaleur intègre le mécanisme de convection et le phénomène de dispersion thermique cinématique résultant de l'hétérogénéité locale du champ de vitesse. Les dispersivités longitudinale (α_L) et transversale (α_T) ont été fixées respectivement à 10 m et 1 m.
- Les différences de viscosité et de densité entre l'eau injectée et l'eau en place sont prises en compte par des lois physiques dépendantes de la température, de la pression de gisement et de la salinité du fluide via les abaques de Chesnut.
- Un comportement conservatif est affecté à l'élément chimique considéré ; sans interaction avec le milieu encaissant (absence de réaction, d'adsorption, complexification...).
- La diffusion moléculaire en milieu poreux est considérée comme isotrope : la valeur de 10^{-9} m²/s est retenue (de Marsily, 1981). Pour la dispersion, on prend en compte, comme pour la thermique, une dispersivité longitudinale $\alpha_L = 10$ m et une dispersivité transversale $\alpha_T = 1$ m.
- La modélisation de l'impact chimique de la fuite d'hydrocarbure est simulée par le transport de deux phases non miscibles intégrant la loi de Darcy et les lois de perméabilité relative et de pression capillaire de Van Genuchten.
- Les écoulements gravitaires sont négligés.
- Les vitesses d'écoulement du fluide sont utilisées pour coupler les transferts hydrauliques avec les transferts thermiques et chimiques.
- La distance entre le puits et les limites du domaine ont été prises suffisamment grandes pour ne pas avoir d'impact sur l'hydrodynamisme.
- Du point de vue hydraulique, la condition initiale et les conditions aux limites extérieures du domaine sont en charge imposée et permettent de tenir compte de l'écoulement naturel de la nappe de l'Albien et du Néocomien, selon un gradient moyen respectif de 3/1000 et 0,4/1000 (Seguin et al, 2015).
- Au puits, la condition limite correspond à un flux massique imposé (kg/m.s) dépendant du débit de fuite, de sa densité volumique et de la hauteur totale utile du réservoir cible.
- Du point de vue thermique, la condition initiale du modèle correspond à une température imposée et uniforme intégrant la valeur des températures moyennes relevées au droit de l'Albien et du Néocomien. Au niveau des limites extérieures du modèle, la température est imposée constante et égale à la température du réservoir définie précédemment.

- La salinité des eaux de l'Albien et du Néocomien est généralement inférieure à 1,5 g/L sur l'ensemble du bassin et inférieure à 0,5 g/L en région parisienne (Hervé et al, 2007). L'hypothèse d'une salinité moyenne de 1 g/L et une concentration de 10 mg/L en ions chlorures ont été retenues (Vernoux et al, 1997).

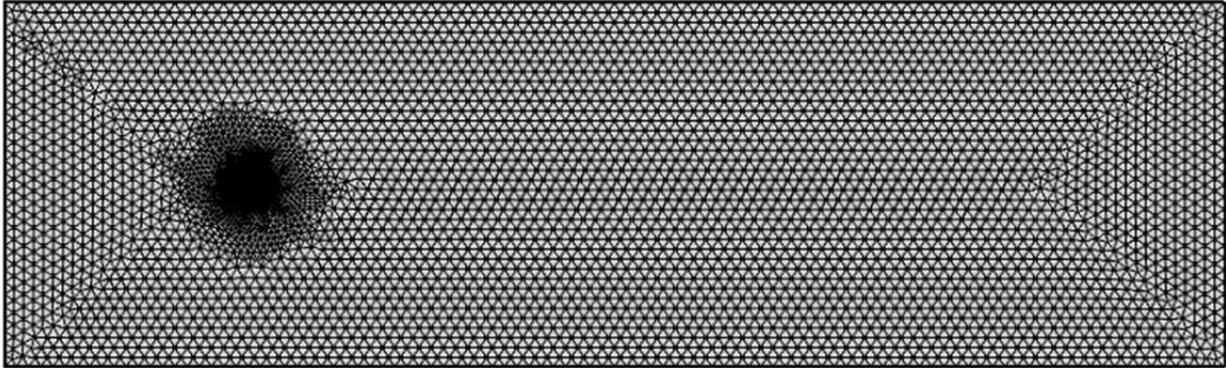


Illustration 25 – Discrétisation ou maillage horizontal du domaine 2D modélisé

8.3. PARAMETRES INITIAUX POUR L'ESTIMATION DES IMPACTS D'UNE FUITE

8.3.1. Paramètres hydrodynamiques et thermiques du modèle numérique

Le modèle hydrogéologique utilisé est basé sur les valeurs moyennes des données relatives aux nappes de l'Albien et du Néocomien disponibles au niveau des doublets géothermiques et des puits pétroliers du bassin Parisien (voir les précisions données dans la section 7.3). Le modèle numérique intègre les paramètres donnés dans le Tableau 10.

Tableau 10 – Paramètres hydrodynamiques retenus pour les modélisations

Aquifère cible	Albien		Néocomien	
	Géothermie	Hydrocarbure	Géothermie	Hydrocarbure
Température moyenne	32,6°C	31,1°C	37,8°C	36,5°C
Porosité moyenne	30%		28%	
Perméabilité intrinsèque	8.10 ⁻¹² m ²		2.10 ⁻¹² m ²	
Coefficient d'emmagasinement spécifique.	2.10 ⁻¹⁰ Pa ⁻¹			
Gradient d'écoulement naturel moyen	3 ‰		0,4 ‰	
Epaisseur productrice moyenne	74 m	76 m	64 m	67 m
Densité des sables	2 650 kg/m ³			
Salinité totale	1 g/L			
Concentration moyenne en chlorures	10 mg/L ou 0,28 mol/m ³			
Pression de gisement moyenne	77,6 kg/cm ²	71,5 kg/cm ²	94,5 kg/cm ²	91,3 kg/cm ²

Les impacts thermiques étant également étudiés, les paramètres thermiques intégrés dans le modèle numérique sont les suivants :

Tableau 11 – Paramètres thermiques retenus pour le scénario de type 2

Aquifère cible	Albien	Néocomien
Capacité calorifique du fluide	4,18 MJ/kg/°C	
Conductivité thermique du fluide	0,6 W/m/°C	
Capacité calorifique du réservoir	2 MJ/m ³ /°C	
Conductivité thermique du réservoir	3 W/m/°C	

8.3.2. Caractéristiques de la fuite

Débits de fuite considérés

Comme expliqué dans la section 8.1, il a été décidé d'estimer trois types d'impacts sur les nappes de l'Albien Néocomien.

Pour chacun de ces types d'impacts, les débits de fuite maximaux estimés à la section 7 ont été considérés afin d'obtenir une estimation conservatrice des risques, c'est-à-dire :

- Pour les impacts chimiques de l'ion chlorure : ont été considérés les débits maximaux de fuite, scénarios de type 1, 2 et 3 confondus, à la fois pour les exploitations d'hydrocarbures et pour les exploitations géothermales.
- Pour les impacts thermiques : ont été considérés les débits maximaux de fuite pour les scénarios de type 2 (exploitations géothermales seulement).
- Pour les impacts chimiques d'une fuite d'hydrocarbures : ont été considérés les débits maximaux, scénarios de type 1 et 3 confondus (exploitations d'hydrocarbures seulement).

Durée de fuite considérée

Dans le cadre des scénarios de type 1 et 3, les durées de migration d'une fuite via un micro-annulaire, un bouchon poreux ou via le volume interne du puits peuvent être potentiellement longues. En effet, compte tenu du caractère fermé/bouché des puits, la détection d'une fuite et l'intervention sur cette fuite ne sont pas évidentes. Nous avons donc considéré une durée de fuite maximale de 50 ans dans ces situations.

A l'inverse, compte tenu du suivi journalier des installations géothermiques au Dogger et des contraintes règlementaires d'auscultation-diagnostic de l'état des ouvrages, une durée de fuite maximale de 2 ans par perforation du/des cuvelage(s) a été prise en compte pour les scénarios de type 2.

Propriétés des fluides fuyards

Pour les exploitations géothermales, la salinité moyenne considérée est celle des eaux du Dogger ; elle a été choisie à environ 22 g/L, avec une teneur moyenne en chlorures de 10 g/L ou environ 280 mol/m³. Pour les exploitations pétrolières, la salinité moyenne considérée pour rester conservatifs en terme de risques est celle des eaux du Trias (même si certains champs sont dans le Dogger) ; elle a été choisie à environ 130 g/L avec une teneur moyenne en chlorures de 60 g/L ou 1 690 mol/m³ (Lopez et al, 2008).

Les huiles du Dogger sont retenues en raison de leur caractère moins visqueux par rapport à celles issues du Trias : soit une viscosité de 2,5 cp et une densité de 750 kg/m³. Cette hypothèse rendra plus conservatrice l'estimation de l'étendue du panache d'huile. Les propriétés des phases eau/huile non miscibles sont définies par les lois de perméabilités relatives et de pression capillaire dites de Van Genuchten, intégrant l'abondance relative d'une phase par rapport à l'autre (saturation) et la pression entre les deux phases résultant des forces d'interactions entre les fluides et le milieu poreux. Aucune donnée sur ces paramètres dits diphasiques n'a pu être trouvée pour les phases huile/eau au niveau des nappes de l'Albien et du Néocomien. Les travaux de Humez et al (2011) donnent néanmoins des valeurs pour les phases CO₂/eau au niveau de la nappe de l'Albien (pression capillaire de référence P₀ de 1 400 Pa, saturation en eau résiduelle de 0,05 et un coefficient constitutif λ de 0,63). Devant l'absence de donnée supplémentaire disponible et constatant que les valeurs de tensions interfaciales pour les phases CO₂/eau et pour les phases huile/eau sont du même ordre de grandeur, les valeurs de Humez et al. (2011) ont été prises en compte.

Dans le cadre du scénario de type 2, le type de puits géothermique (injecteur ou producteur) conditionne les débits de fuite calculés mais également la température de la fuite considérée. La température de la fuite est fixée à 71°C pour un puits producteur et à 25°C pour un puits injecteur. En revanche, pour les scénarios de type 1 et 3, compte tenu des plus faibles débits estimés, l'hypothèse d'une fuite qui suit le gradient géothermique a été faite.

8.4. RESULTATS DE L'ESTIMATION DES IMPACTS

8.4.1. Impacts chimiques de l'ion chlorure dans le cas d'une fuite d'eau salée issue du Dogger ou du Trias

Comme indiqué précédemment, les modélisations des impacts ont été faites à partir des débits de fuite maximaux obtenus pour les scénarios de type 1 et 3 pour une durée de fuite de 50 ans, et à partir des débits maximaux obtenus pour les scénarios de type 2 pour une durée de fuite de 2 ans.

Ainsi, le Tableau 12 fournit les distances maximales entre la localisation de la fuite et le panache de concentration en ion chlorure supérieure à 250 mg/L, après 10, 25 et 50 ans de fuite ; ces résultats correspondent aux débits de fuite maximaux obtenus pour les scénarios de type 1 et 3, à la fois pour les exploitations géothermales (fuite d'eau du Dogger) et pour les exploitations d'hydrocarbures (fuite d'eau du Trias considérée). Le même travail a été fait sur une durée de deux ans pour les scénarios de type 2, dédiés aux puits géothermaux en exploitation ; les résultats sont récapitulés au Tableau 13.

Tableau 12 – Résultats de l'estimation de l'extension des impacts chimiques de l'ion chlorure dans le cas d'une fuite d'eau salée issue du Dogger ou du Trias. Ces résultats correspondent à des modélisations de fuite utilisant les débits maximum de fuites de saumure obtenus pour les scénarios de type 1 et 3.

Type d'exploitation	Aquifère cible	Débit de fuite considéré (m ³ /an)	Panache d'eau salée		
			Distance 10 ans en m	Distance 25 ans en m	Distance 50 ans en m
Exploitation géothermale <i>Eau du Dogger</i>	Albien	1000	415	875	1570
	Neocomien	1260	65	110	160
Exploitation hydrocarbures <i>Eau du Trias</i>	Albien	820	685	1340	2255
	Neocomien	270	60	105	160

Tableau 13 – Résultats de l'estimation de l'extension des impacts chimiques de l'ion chlorure dans le cas d'une fuite d'eau salée issue du Dogger. Ces résultats correspondent à des modélisations de fuite utilisant les débits maximum de fuites de saumure obtenus pour les scénarios de type 2.

Type d'exploitation	Aquifère cible	Type de puits	Débit de fuite considéré (m ³ /an)	Panache d'eau salée	
				Distance 1 ans en m	Distance 2 ans en m
Exploitation géothermale <i>Eau du Dogger</i>	Albien	Injecteur	4965	83	131
		Producteur	1184	72	113
	Neocomien	Injecteur	1252	18	24
		Producteur	264	13	18

L'analyse suivante peut en être faite :

- La distance maximale atteinte par la fuite d'eau géothermale issue du Dogger est inférieure à 1600 m pour l'aquifère de l'Albien et 160 m pour l'aquifère du Néocomien. Ces différences d'extension au droit de l'Albien et du Néocomien sont expliquées par leurs propriétés hydrogéologiques intrinsèques et principalement par leur gradient d'écoulement naturel respectif (3 ‰ pour l'Albien contre 0,4 ‰ pour le Néocomien). Ceci est mis en évidence avec l'illustration 26, où on voit que le panache d'eau salée dans l'Albien s'étire sous l'effet du gradient hydrogéologique, alors que dans le Néocomien, soumis à un gradient moins important, l'extension du panache est beaucoup moins importante. L'illustration 26 montre également l'atténuation progressive des concentrations une fois la fuite de 50 ans terminée, après 25, 50 et 100 ans. On voit que, dans le cas de l'Albien, le gradient hydrogéologique plus fort a permis de diluer le panache de sorte que la limite de potabilité n'est plus dépassée.
- La même observation peut être faite pour la distance maximale atteinte par la fuite d'eau salée du Trias (exploitations d'hydrocarbures), qui est de 2255 m pour l'aquifère de l'Albien et de 160 m pour l'aquifère du Néocomien. Les valeurs, un peu plus importantes pour la fuite d'eau salée du Trias, sont expliquées par une concentration en chlorures plus importante dans les eaux du Trias. L'illustration 27 montre l'évolution du panache d'eau salée, dans ce cas d'une fuite d'eau du Trias, ainsi que l'atténuation progressive des concentrations une fois la fuite de 50 ans terminée, après 25, 50 et 100 ans. On peut voir que, dans ce cas-là, même si les concentrations sont réduites au cours du temps une fois la fuite terminée, la zone au-delà de la limite de potabilité a tendance à augmenter.
- Les valeurs obtenues à partir des débits maximum de fuites de saumure obtenus pour les scénarios de type 2 sont plus faibles (113 à 131 m sur 2 ans dans l'Albien et 18 à 14 m sur 2 ans dans le Néocomien), du fait de la faible durée de la fuite.
- De façon intéressante, la progression du panache en termes de distance au point d'injection est principalement imputable au gradient naturel plutôt qu'à la différence de valeurs des débits de fuite. En effet, dans les gammes de débits explorées, les débits de fuite ne jouent que très peu sur les distances. Un exemple est donné au Tableau 14, où d'autres débits plus faibles de fuite d'eau du Dogger ont été modélisés, et dont les résultats ont été comparés aux résultats des débits maximaux. Cette faible importance des débits de fuite est expliquée par les faibles volumes fuyards, même sur 50 ans, au regard des volumes des nappes. Néanmoins, le débit joue un rôle sur le temps de retour à des valeurs en deçà des valeurs de potabilité pour toute la nappe, en particulier lorsque le gradient hydrogéologique est faible.

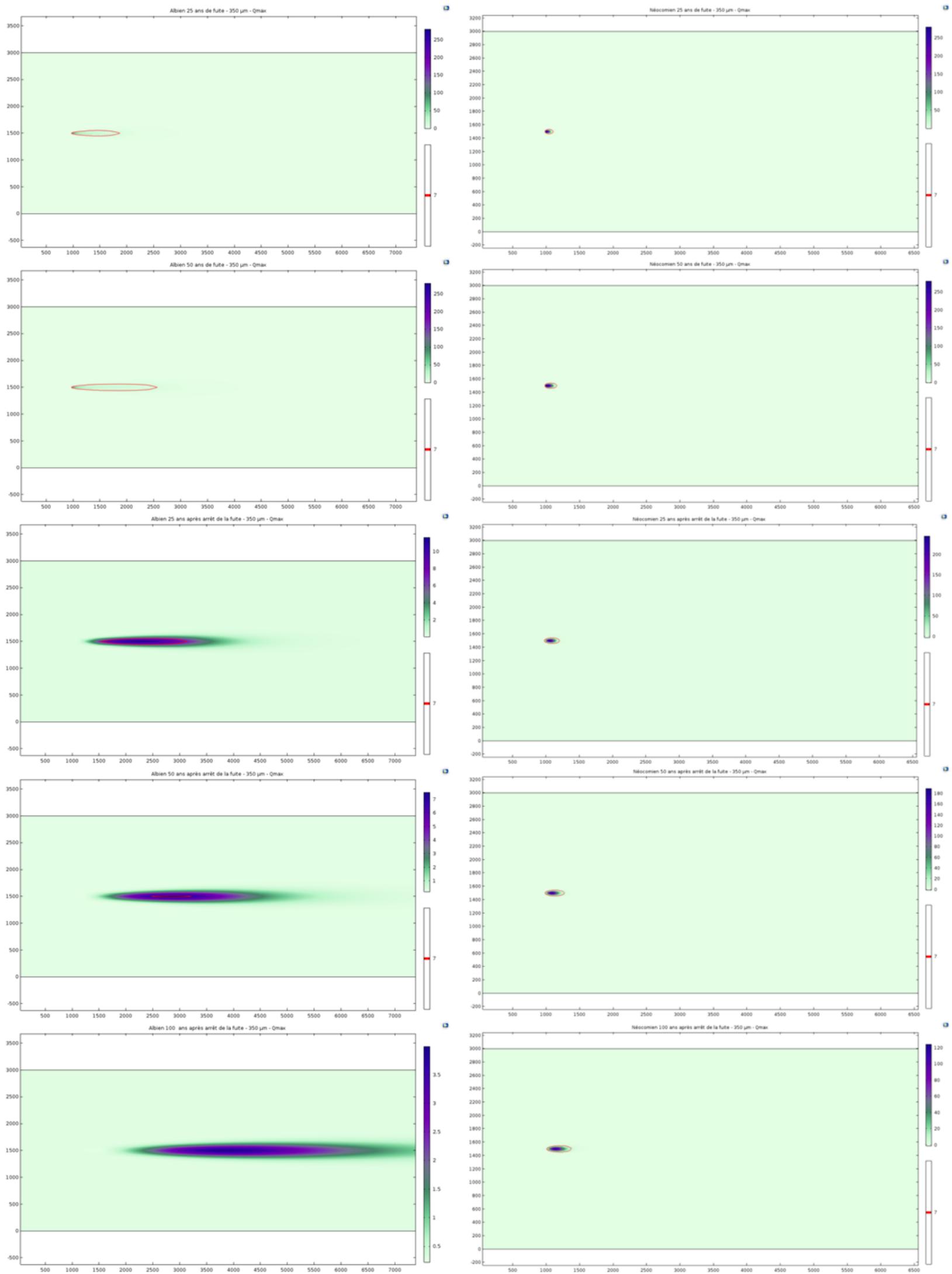


Illustration 26 - Estimation de l'extension des impacts chimiques au droit de l'Albien (à gauche) et du Néocomien (à droite) après 25 et 50 ans d'une fuite d'eau du Dogger, puis 25 ans, 50 ans et 100 ans après l'arrêt de la fuite. La limite de potabilité est indiquée par une ligne rouge. [attention les échelles de couleur varient]

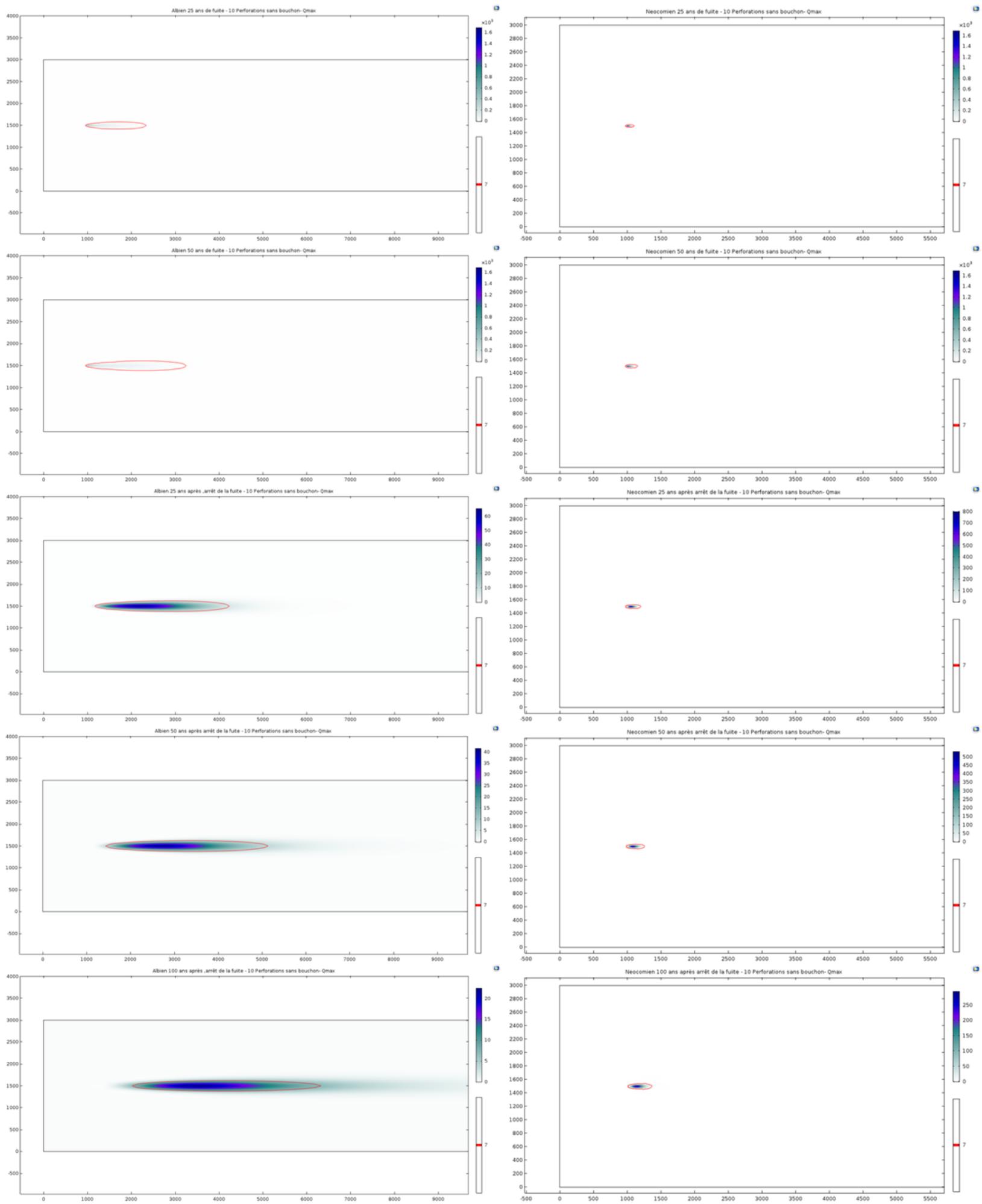


Illustration 27 – Estimation de l’extension des impacts chimiques au droit de l’Albien (à gauche) et du Néocomien (à droite) après 25 et 50 ans d’une fuite d’eau du Trias, puis 25 ans, 50 ans et 100 ans après l’arrêt de la fuite. La limite de potabilité est indiquée par une ligne rouge. [attention les échelles de couleur varient]

Tableau 14 – Résultats de l'estimation de l'extension des impacts chimiques de l'ion chlorure dans le cas d'une fuite d'eau salée issue du Dogger : comparaison entre les résultats obtenus pour les débits maximaux et ceux obtenus pour des débits plus faibles.

Type d'exploitation	Aquifère cible	Débit de fuite considéré (m ³ /an)	Panache d'eau salée		
			Distance 10 ans en m	Distance 25 ans en m	Distance 50 ans en m
Exploitation géothermale <i>Eau du Dogger</i>	Albien	160	370	800	1445
		1000	415	875	1570
	Neocomien	180	45	80	120
		1260	65	110	160

8.4.2. Impacts thermiques dans le cas d'une fuite d'eau géothermale issue du Dogger au droit d'un puits d'injection ou de production en exploitation

Des conséquences thermiques ne pouvant se produire que pour les scénarios de type 2, les modélisations de ces impacts ont été faites à partir des débits de fuite maximaux obtenus pour les scénarios de type 2 sur une durée de 2 ans. Les résultats sont fournis dans le Tableau 15. On rappelle que sont calculées les distances entre le point de fuite et un panache ayant pour limite une baisse ou une hausse d'un degré de la température naturelle du réservoir cible.

Tableau 15 – Résultats de l'estimation de l'extension des impacts thermiques dans le cas d'une fuite d'eau géothermale issue du Dogger au droit d'un puits d'injection ou de production en exploitation

Type d'exploitation	Aquifère cible	Type de puits	Débit de fuite considéré (m ³ /an)	Perturbation thermique	
				Distance 1 an m	Distance 2 ans m
Exploitation géothermale <i>Eau du Dogger</i>	Albien	Injecteur	4965	31	48
		Producteur	1184	43	66
	Neocomien	Injecteur	1252	13	17
		Producteur	264	15	20

Après 2 ans de fuite, la distance maximale atteinte par la bulle chaude ou froide n'excède pas 70 m pour l'aquifère de l'Albien et est inférieure à 20 mètres pour l'aquifère du Néocomien. Ces distances sont faibles, et même plus faibles que l'extension des impacts chimiques estimés pour des fuites du même type (voir Tableau 14). Une comparaison entre les impacts thermiques et chimiques dans le cas d'une fuite d'eau géothermale issue du Dogger au droit d'un puits d'injection et de production est fournie respectivement à l'illustration 28 et à l'illustration 29. Y est également montrée l'atténuation progressive des impacts une fois la fuite de deux ans terminée, après 5, 10 et 15 ans.

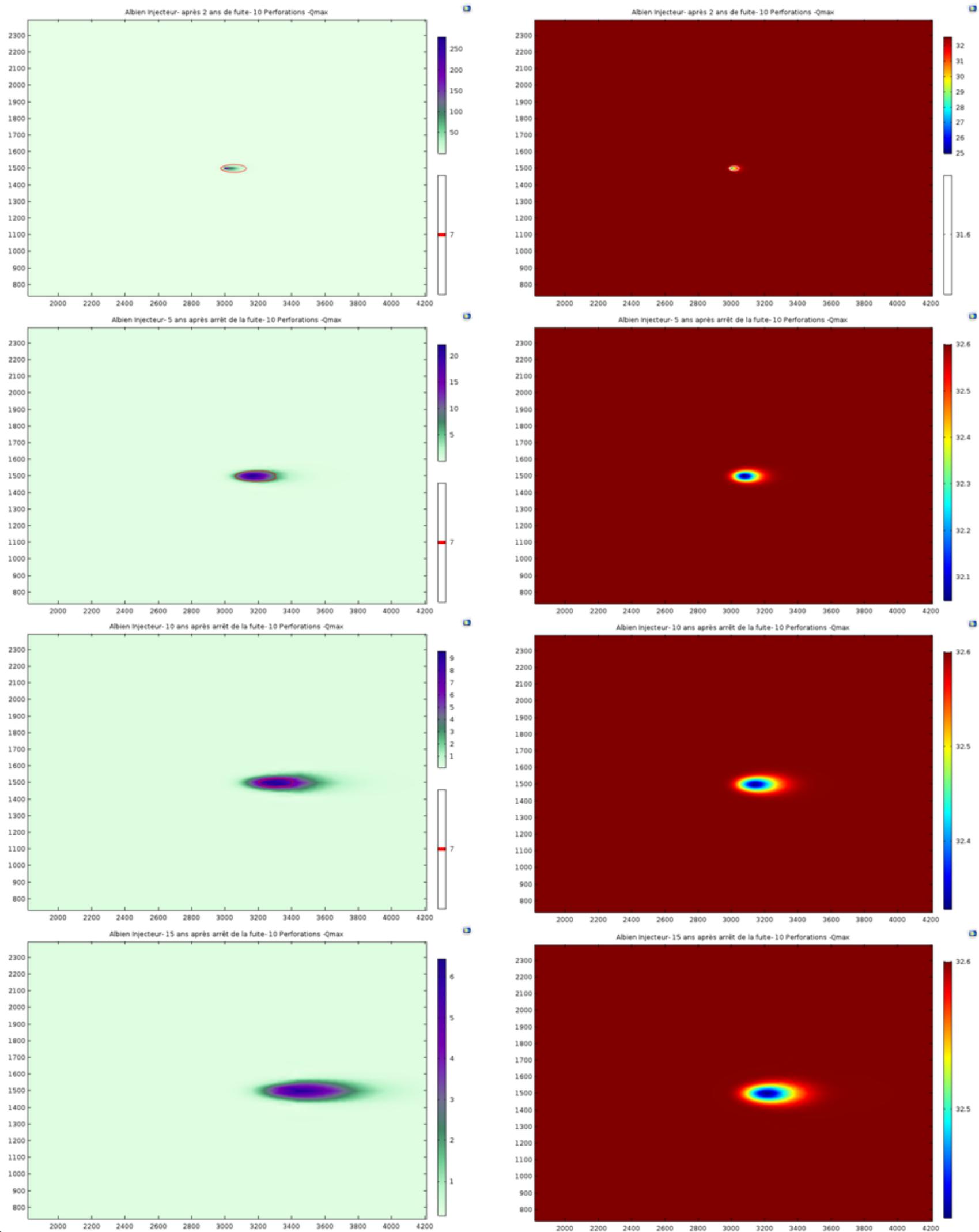


Illustration 28 – Estimation de l'extension des impacts chimiques (à gauche) et thermique (à droite) au droit de l'Albien pour un puits injecteur au Dogger après 2 ans de fuite et 5, 10 et 15 ans après l'arrêt de la fuite - [attention les échelles de couleur varient]

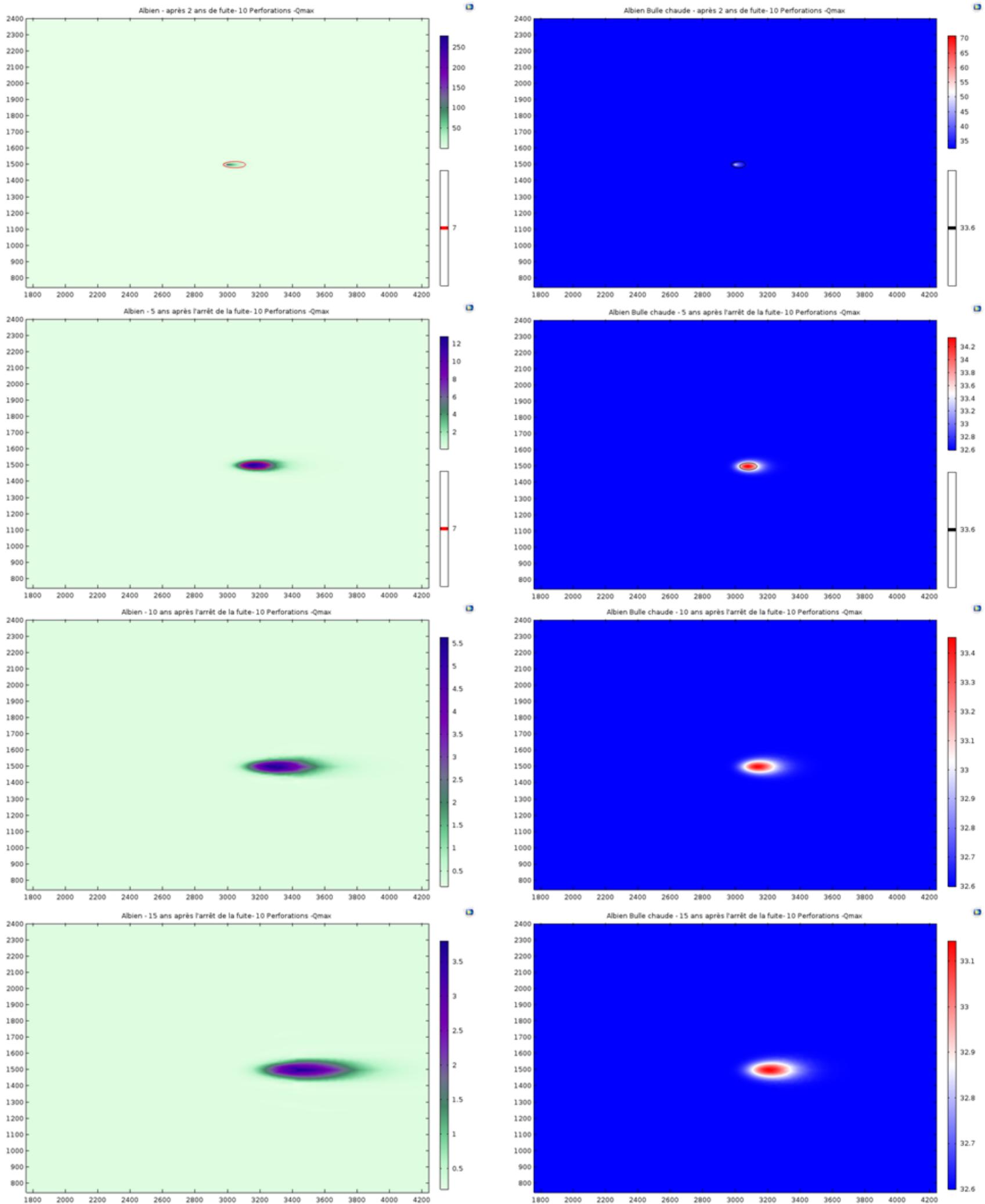


Illustration 29 – Estimation de l'extension des impacts chimiques (à gauche) et thermique (à droite) au droit de l'Albien pour un puits producteur au Dogger après 2 ans de fuite et 5, 10 et 15 ans après l'arrêt de la fuite [attention les échelles de couleur varient]

8.4.3. Impacts chimiques dans le cas d'une fuite d'hydrocarbures

On rappelle que pour estimer l'extension de ce type d'impacts, un critère correspondant à une fraction de la phase huile par rapport à la phase eau de 1% a été choisi. Le débit de fuite d'hydrocarbure choisi pour effectuer les modélisations correspond au débit maximal obtenu pour les fuites d'huile, scénarios 1 et 3 confondu. Les résultats sont fournis dans le Tableau 16. En plus de la distance entre le point de fuite et la limite à 1% en fraction d'huile, les distances pour des fractions de 25% et 50% sont également fournies.

Il est à noter que les simulations ont été faites pour l'Albien seulement ; néanmoins, un cas sans gradient hydrogéologique a été simulé en complément afin de mieux comprendre l'influence de ce gradient.

Tableau 16 – Résultats de l'estimation des impacts chimiques dans le cas d'une fuite d'hydrocarbures

Type d'exploitation	Aquifère cible	Gradient hydrogéologique	Débit de fuite considéré (m ³ /an)	Panache huile		
				Distance m après 50 ans de fuite		
				Fraction 1%	Fraction 25%	Sat huile 50%
Exploitation hydrocarbures <i>Huile</i>	Albien	Oui	4000	1660	22	2.5
		Non	4000	315	42	5

L'analyse suivant peut en être faite :

- Les distances d'impacts chimiques dus à une fuite d'hydrocarbures restent dans les mêmes ordres de grandeur que les distances d'impacts chimiques liées aux fuites d'eau salée. En termes d'extension de migration, les différences sont donc plutôt faibles entre les deux scénarios. Cela semble provenir du fait, qu'ici encore, les paramètres hydrogéologiques de la nappe et en particulier le gradient d'écoulement régissent la migration. Il faut néanmoins noter que la saturation limite de 1% a été fixée arbitrairement. Une plus petite saturation limite entraîne logiquement une zone impactée plus étendue.
- L'évolution de la saturation en huile au sein du panache de pollution n'est pas régulière ; en effet, les fortes saturations en huile restent confinées à proximité immédiate de la zone de fuite, comme le montre le Tableau 16. Cela est encore plus visible sur Illustration 30.

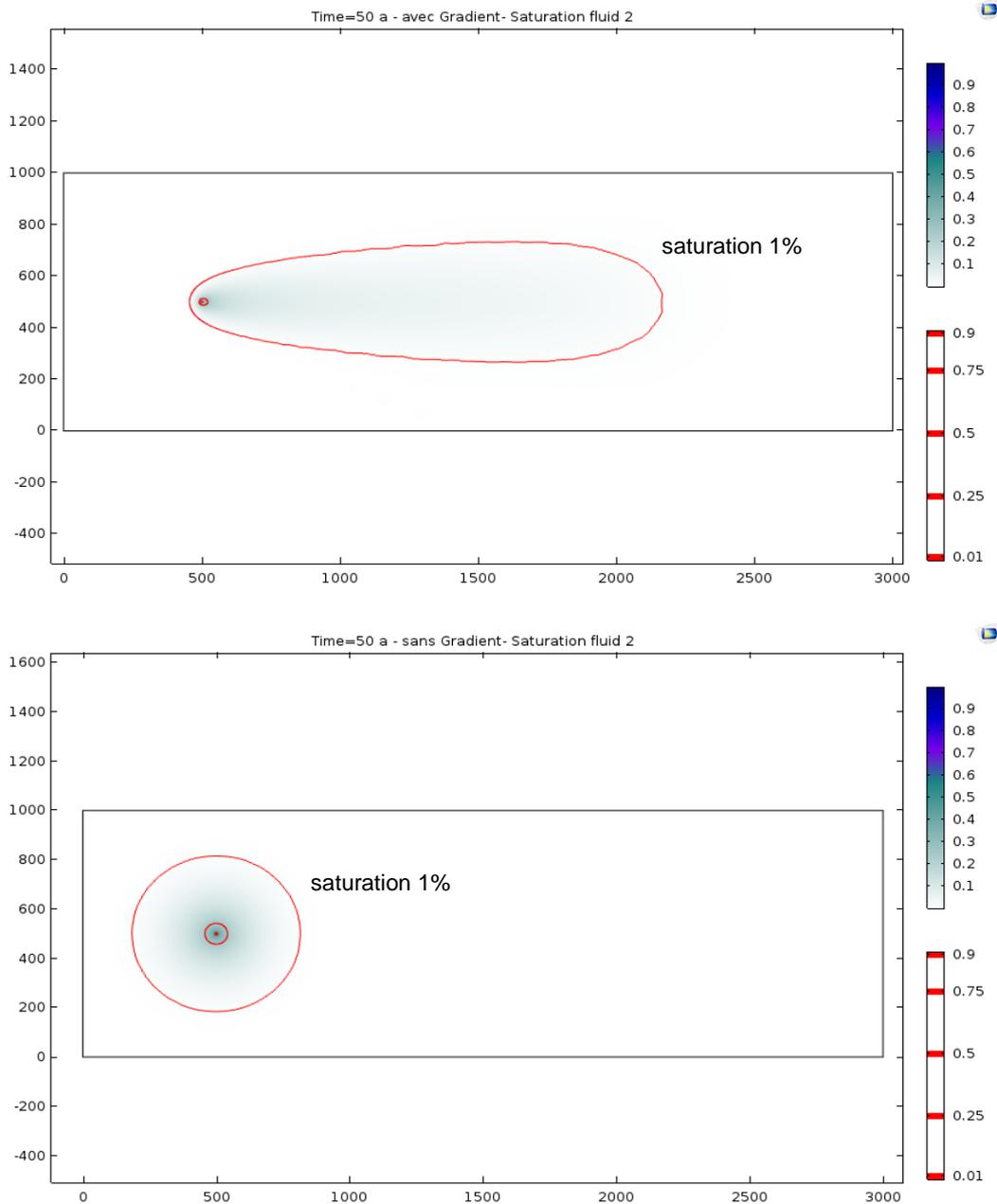


Illustration 30 – Estimation de l’extension des impacts chimiques d’une fuite d’hydrocarbure dans l’Albien, considérant le gradient hydrogéologique moyen (illustration du haut) et ne considérant aucun gradient (illustration du bas). Les limites en rouge sont données pour des saturation de 1% (limite la plus large), 25%, 50%, 75% et 90%.

8.5. SYNTHÈSE

Cette dernière étape de l’étude des risques a permis de donner des ordres de grandeur en matière d’impacts pouvant être attendus en cas de fuite de saumure ou d’huile par un forage profonds dans les nappes de l’Albien et du Néocomien. La stratégie mise en place afin de traduire les estimations de débits de fuite (chapitre 7) en estimation d’impacts sur ces nappes est conservatrice. En effet, les débits maximaux des différents scénarios de fuite identifiés ont été considérés dans les simulations numériques d’évaluation des impacts et de longues périodes de fuite ont été simulées. Il est difficile, dans le cadre de cette étude générique, de juger de la

significativité des extensions des panaches obtenus, qui dépendra, dans une situation concrète de pollution, des caractéristiques du site, comme par exemple la proximité d'un captage dans la nappe de l'Albien. L'estimation du risque de pollution d'un tel captage par rapport au critère de distance du panache doit prendre en compte la zone d'appel du captage qui va elle-même dépendre des caractéristiques hydrodynamiques de la nappe au point de captage (transmissivité, coefficient d'emmagasinement) et du débit de pompage. L'illustration 31 montre un exemple théorique de captage situé en dehors du panache de pollution mais dont la zone d'appel intercepte le panache, ce qui entrainera une contamination du captage.

Les zones impactées semblent être de l'ordre de grandeur du kilomètre au maximum (2 km après 50 ans de fuite pour le pire des cas simulés) et ce, quels que soient les types d'impacts étudiés (impacts chimiques liés à la migration d'eau salée dans l'Albien/Néocomien, impacts chimiques liés à la migration d'hydrocarbures, impacts thermiques liés à la migration d'eau plus froide ou plus chaude que celle des nappes).

Il est également intéressant de signaler qu'au regard des volumes fuyards estimés, l'extension des zones impactées dépend clairement des paramètres hydrodynamiques choisis, mais semble, dans la gamme des fuites qui ont été simulées, être moins influencée par les caractéristiques de la fuite, en particulier par le débit de fuite.

D'une manière générale, l'évaluation des risques de pollution a été limitée par le manque d'informations et de retours d'expérience publiés sur l'étanchéité des puits profonds et sur les migrations potentielles associées. Les plages d'incertitudes considérées sont donc importantes étant donnée l'impossibilité de les contraindre. Cela se traduit par des plages d'incertitudes également importantes sur les débits de fuite possibles et, dans une moindre mesure, sur les impacts qu'ils engendreraient sur les nappes de l'Albien et du Néocomien. Même si ce manque d'informations limite la portée des résultats, cette étude a permis de développer une approche robuste qui semble pouvoir être utilisée soit pour une étude statistique sur le risque de pollution à l'échelle du bassin, comme cela a été le cas ici, soit pour une étude locale sur un puits précis pour évaluer les conséquences d'une défaillance qui aurait été observée.

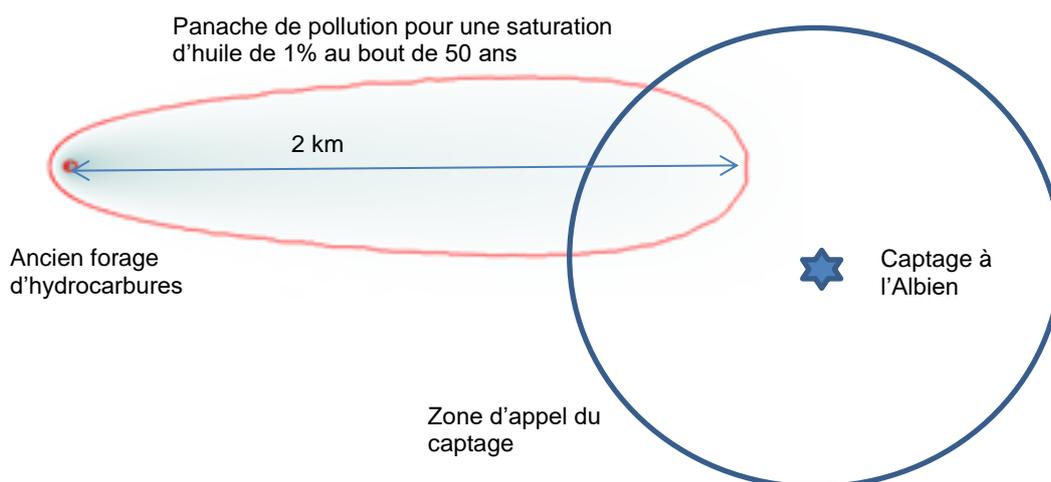


Illustration 31 – Risque de contamination d'un captage à l'Albien par rapport à l'extension de sa zone d'appel

9. Conclusion

Les objectifs de cette étude sur les risques de pollution des nappes de l'Albien et du Néocomien par les forages profonds du bassin parisien étaient les suivants :

- 1- Evaluer l'état des cimentations des tubages des forages profonds et leur évolution au cours du temps, ainsi que l'état des bouchons de ciments mis en place lors de la fermeture des ouvrages ;
- 2- Les risques de contamination dépendant de l'état des ouvrages mais aussi des pressions des réservoirs au regard des pressions des nappes de l'Albien et du Néocomien, connaître les caractéristiques des nappes de l'Albien-Néocomien et des réservoirs profonds, et, en particulier, les niveaux piézométriques et les pressions de gisement.
- 3- A partir de ces éléments, mener une étude de risques, permettant de donner des ordres de grandeur concernant les impacts potentiels des fuites dans l'Albien et dans le Néocomien.

Les conclusions principales des différentes étapes de l'étude sont rappelées ici.

Analyse de la qualité des cimentations des tubages

La première étape de l'étude a consisté à rechercher des ouvrages bénéficiant de diagraphies de contrôle de cimentation à plusieurs années d'intervalle, afin de les comparer et d'en tirer des leçons en matière d'évolution des cimentations au cours du temps.

Sur 5 puits analysés, une amélioration de la cimentation est visible sur certains niveaux au moins, mais on peut aussi observer une détérioration. Cette amélioration semble dans certains cas être liée à la nature des formations géologiques à l'extrados du tubage (formations argileuses ou marneuses) qui pourraient avoir fluées. On peut également observer une amélioration de la cimentation au droit de formations non argileuses sans éléments pour l'expliquer. On a enfin le cas où on observe une amélioration générale de la cimentation, mais qui peut être considérée comme un artefact dans le cas où la première diagraphie est réalisée avant la consolidation finale du ciment. Enfin deux puits présentent une détérioration partielle de la cimentation.

Au-delà de ces résultats ponctuels qui pourraient ne pas être transposables à tous les puits du bassin, des enseignements plus généraux peuvent être tirés quant à l'applicabilité et l'intérêt de cette approche de comparaison des CBL dans le temps. En effet, le suivi régulier des puits, associé à la faisabilité technique de la comparaison quantitative de deux CBL différés dans le temps rendrait possible l'analyse systématique de l'évolution de la cimentation des tubages pour tous les puits en exploitation. Cette analyse systématique permettrait d'identifier les puits posant potentiellement problème et d'intervenir au besoin au cours de l'exploitation, voire avant la fermeture afin de pallier à une dégradation future dont les prémices seraient visibles. Néanmoins, il faut souligner les difficultés potentielles de mise en œuvre de l'approche sur un puits particulier, qui expliquent, en partie, que l'analyse ait été faite, dans la présente étude, sur seulement 5 puits du bassin. Ces difficultés concernent principalement les diagraphies initiales et plus particulièrement leur disponibilité, leur qualité (les diagraphies ont parfois été faites avant la prise complète des cimentations), ainsi que leur emprise (les diagraphies sont parfois limitées à des horizons bien précis, empêchant la comparaison sur toute la hauteur de la cimentation).

Analyse de la qualité des bouchons de ciment

Afin de mener une analyse de la tenue dans le temps des bouchons de ciment, la démarche suivie a consisté à tirer avantage des opérations récentes de réouverture de certains puits pétroliers. 5 puits pétroliers sur une dizaine d'opérations de réouverture récentes et pour lesquels nous avons pu disposer d'informations ont été identifiés. Mais seul un ouvrage, pour lequel des informations suffisamment détaillées ont été trouvées sur les opérations de fermeture et de réouverture, a pu être analysé. Il est donc difficile de tirer des conclusions générales en matière de qualité des bouchons de ciment sur les puits fermés du bassin.

Néanmoins, l'opportunité d'utiliser les opérations de réouverture de puits comme test ponctuel de l'intégrité des bouchons de ciment semble réelle. En effet, dans l'optique d'une compréhension accrue du vieillissement des bouchons et de l'évolution de leur intégrité au cours du temps, le forage des bouchons nécessaire dans le cadre de ces opérations de réouverture donne des informations impossibles à obtenir par d'autres moyens. Certes les opérations d'ouvertures sont et seront limitées en nombre dans le bassin, mais les enseignements fournis, même sur un faible échantillon, semblent précieux pour comprendre les conditions d'une intégrité pérenne sur les autres puits. En revanche, les travaux menés lors de cette étude montrent qu'il ne semble pas possible, dans la plupart des cas, d'évaluer l'intégrité des bouchons faute de données suffisantes, soit sur les conditions de fermeture, soit sur les conditions de réouverture. Dans l'optique d'une telle analyse dans le futur, une liste des informations à fournir est indiquée.

Etude des risques de pollution des nappes de l'Albien et du Néocomien par les forages profonds

Cette étude des risques s'est déroulée, conformément aux bonnes pratiques en la matière, en différentes étapes, avec le recensement des scénarios redoutés, puis l'estimation de la vraisemblance de ces scénarios ainsi que de leurs conséquences.

Les scénarios de risque de fuite ont été identifiés à partir du retour d'expérience d'incidents observés dans le bassin de Paris, puis validés lors d'un atelier d'expert pluridisciplinaire. Au final, 3 types de scénarios susceptibles de conduire à une pollution de ces nappes.

- Scénarios de type 1 : ils s'appliquent aux puits de géothermie, d'hydrocarbures et de stockage de gaz. Ils consistent en une migration de fluides vers les nappes de l'Albien-Néocomien du fait de l'existence d'une voie de fuite à l'extrados d'un puits (annulaire, cimenté ou non).
- Scénarios de type 2 : ils s'appliquent uniquement aux puits de géothermie. Ils consistent en une migration de fluides vers les nappes de l'Albien-Néocomien du fait de l'existence de perforations sur un puits en exploitation.
- Scénarios de type 3 : ils concernent les puits de géothermie, d'hydrocarbures et de stockage de gaz. Ils consistent en une migration de fluides vers les nappes de l'Albien-Néocomien du fait d'une migration verticale à l'intérieur d'un puits qui n'est plus exploité conjuguée à l'existence de perforations sur ce puits

Etant donné le peu d'évènements de fuites recensés dans le retour d'expérience sur les risques liés aux forages profonds dans la zone d'étude, le calcul de probabilités de défaillance n'était pas réalisable. Ainsi, nous avons proposé une estimation qualitative de la vraisemblance des scénarios, basée sur une classification normalisée, avec 5 classes d'évènements, depuis A) l'évènement courant jusqu'à E) l'évènement possible mais extrêmement peu probable. Cette vraisemblance a également été discutée lors de l'atelier d'expert. Les scénarios de type 1 s'avèrent possibles mais extrêmement peu probables (E) pour la géothermie, très improbables (D) pour les hydrocarbures et le stockage de gaz. Les scénarios de type 2 s'avèrent extrêmement peu probables (E) ou très improbables (D). Enfin les scénarios de type 3 s'avèrent extrêmement

peu probables (E) pour la géothermie, très improbables (D) à extrêmement peu probables (E) pour les hydrocarbures et extrêmement peu probables (E) pour le stockage de gaz.

En revanche, au vu de la relative bonne connaissance des caractéristiques des aquifères profonds, une estimation quantitative des conséquences de fuites sur des puits aux caractéristiques génériques a pu être faite, afin de permettre une comparaison entre les différents scénarios sur ce point. Cette analyse quantitative a été réalisée en combinant avis d'experts, données bibliographiques et modélisation. Elle a été menée en deux temps.

Dans un premier temps, nous avons déterminé des ordres de grandeurs de débits de fuite potentiels d'eau ou d'hydrocarbures dans les nappes de l'Albien/Néocomien au niveau d'un puits défaillant. Pour les scénarios de type 1, les fuites d'eau géothermale varient de quelques m^3/an à quelques centaines de m^3/an en fonction de l'épaisseur du défaut permettant la fuite (micro-annulaire de 50, 100 ou 350 μm) et du fait que le puits soit en exploitation ou non. Les fuites d'hydrocarbures sont plus faibles, de quelques dixièmes à quelques dizaines de m^3/an et uniquement dans les conditions initiales. En phase d'exploitation, dans le cas d'une baisse significative et pérenne des pressions des champs exploités, aucune fuite vers les nappes de l'Albien et du Néocomien n'est possible. Pour les scénarios de type 2, qui ne concernent que l'exploitation géothermique, les fuites d'eau géothermale sont plus importantes, plusieurs centaines, voire milliers de m^3/an , pour les puits injecteurs qui entraînent les plus forts débits. Enfin pour les scénarios 3, une fuite d'hydrocarbures sera très faible si un bouchon existe (quelques m^3/an), même dans le cas où d'importantes perforations existeraient. L'absence de bouchon rend à l'inverse le puits vulnérable à l'apparition d'une fuite de plus grande ampleur (plusieurs centaines, voire milliers de m^3/an) par d'éventuelles perforations. Ces résultats génériques ont été discutés sous l'angle des mesures de prévention des risques (bonnes pratiques en termes de conception, construction, opération, surveillance et fermeture des ouvrages) et de leur intérêt.

Dans un second temps, les conséquences de ces débits de fuite sur la qualité des eaux de ces nappes ont été estimées avec un modèle COMSOL. L'objectif était de déterminer des ordres de grandeur concernant l'extension de la zone impactée par la réinjection de fluides fuyards issus du Dogger, ou du Trias via des puits géothermiques ou d'hydrocarbures, à partir des estimations faites des débits de fuite. 3 types d'impacts ont été quantifiés : les impacts chimiques de l'ion chlorure dans le cas d'une fuite d'eau salée issue du Dogger ou du Trias, les impacts thermiques dans le cas d'une fuite d'eau géothermale issue du Dogger au droit d'un puits d'injection ou de production en exploitation, les impacts chimiques dans le cas d'une fuite d'hydrocarbures. Les débits maximaux des différents scénarios de fuite identifiés ont été considérés dans les simulations numériques et de longues périodes de fuite ont été simulées. Il est difficile, dans le cadre de cette étude générique, de juger de la significativité des extensions des panaches obtenus, qui dépendra, dans une situation concrète de pollution, des caractéristiques du site (proximité d'un captage par exemple, en prenant en compte la zone d'appel du captage). Néanmoins, les zones impactées semblent être de l'ordre de grandeur du kilomètre au maximum (2 km après 50 ans de fuite pour le pire des cas simulés) et ce, quels que soient les types d'impacts étudiés. Il est également intéressant de signaler qu'au regard des volumes fuyards estimés, l'extension des zones impactées dépend clairement des paramètres hydrodynamiques choisis, mais semble, dans la gamme des fuites qui ont été simulées, être moins influencée par les caractéristiques de la fuite, en particulier par le débit de fuite.

D'une manière générale, et comme pour les deux premiers points de cette étude (qualité des cimentations des tubages, qualité des bouchons de ciment), l'évaluation des risques de pollution a été limitée par le manque d'informations et de retours d'expérience publiés sur l'étanchéité des puits profonds et sur les migrations potentielles associées. Les plages d'incertitudes considérées sont donc importantes étant donnée l'impossibilité de les contraindre. Cela se traduit par des

plages d'incertitudes également importantes sur les débits de fuite possibles et, dans une moindre mesure, sur les impacts qu'ils engendreraient sur les nappes de l'Albien et du Néocomien. Même si ce manque d'informations limite la portée des résultats, cette étude a permis de développer une approche robuste qui semble pouvoir être utilisée soit pour une étude statistique sur le risque de pollution à l'échelle du bassin, comme cela a été le cas ici, soit pour une étude locale sur un puits précis pour évaluer les conséquences d'une défaillance qui aurait été observée.

10. Bibliographie

- Abou Akar A. (1994) - Risque de pollution des nappes d'eau douce du fait des exploitations géothermales de l'aquifère du Dogger du Bassin parisien. 1. Evaluation de la nocivité des eaux du Dogger. Rap. BRGM R 38032 GGP DR 94, 87 p., 1 fig., 5 tabl., 3 ann.
- Bouchot V., Bialkowski A., Lopez S., Ossi A. (2008) – Evaluation du potentiel géothermique des réservoirs clastiques du Trias du Bassin de Paris. Rapport final BRGM RP-56463-FR, 92p., 40 fig., 3 tab, 1 ann.
- Caritg S., Bourguine B., Foissard D., Lopez S. (2014) – Projet LUSITANIEN – Evaluation du potentiel géothermique du Lusitanien du bassin de Paris pour la production de chaleur : mise en adéquation entre ressources et besoins. Rapport final. BRGM/RP-63244-FR, 147 p., 43 fig., 13 tabl., 8 ann.
- Chambre syndicale de la recherche et de la production du pétrole et du gaz naturel – Comité des techniciens (1991, MAJ en 1993). Monographies des principaux champs pétroliers de France. Bulletin des centres de recherches exploration-production Elf Aquitaine. Mémoires ; 14.
- Comsol Multiphysics, Subsurface Flow Module, version 5.2 2016. <http://www.comsol.fr/>
- Hervé J.Y. (2009) – Etat de l'art relatif à la conception et à la mise en œuvre des forages géothermiques exploitant le Dogger. Rapport d'avancement. BRGM/RP-57245-FR, 99p., 7 fig.
- Hervé J.Y., Ignatiadis I. (2007) – Nappes de l'Albien et du Néocomien. Définition des conditions d'accès à la ressource géothermique en Ile de France. Rapport final. BRGM/RP-55990-FR, 55 p.
- Humez P., Audigane P., Julie Lions J., Chiaberge C., Bellenfant G (2011) - Modeling of CO2 Leakage up Through an Abandoned Well from Deep Saline Aquifer to Shallow Fresh Groundwaters. Transport in Porous Media, Springer Verlag, 2011, 90 (1), pp.153-181.
- Lahaie (2015) - Contexte et aspects fondamentaux du forage et de l'exploitation des puits d'hydrocarbures, rapport INERIS DRS-15-149641-01420A, 121 p.
- Lahaie et Thoraval (2013). L'abandon des cavités de stockage lessivées dans le sel : stratégies envisagées pour la fermeture des cavités et la maîtrise des aléas à long terme. DRS-11-118134-02433B
- Lary de L., Le Guenan T., Manceau J-C. (2015) – Projet MARSE : Approche de gestion des risques pour les exploitations du sous-sol. Rapport final. BRGM/RP-65676-FR, 50p., 11 fig.
- Laurent H. (1974) – Etude des possibilités d'exploitation de l'eau chaude du Dogger dans la région de Creil (60) - 74 SGN 339 GTH
- Lopez S., Millot R., et collaborateurs. (2008) – Problématique de réinjection des fluides géothermiques dans un réservoir argilo-gréseux : retour d'expériences et apport de l'étude des fluides du Trias du Bassin de Paris. Rapport BRGM/RP-56630-FR, 197 p., 65 ill.
- Mainguy M., Longuemare P., Audibert A. and Lécolier E. (2007) - Analyzing the Risk of Well Plug Failure after Abandonment, Oil & Gas Science and Technology – Rev. IFP, Vol. 62 (2007), No. 3

Marsily, de G. (1981) – Hydrogéologie quantitative. Collection sciences de la terre, Masson Paris, 215 p.

Réveillère A. (2013b) - Semi-analytical solution for brine leakage through passive abandoned wells taking account of brine density differences. Trans Porous Med 100:337–361

Réveillère, A. (2013a) SAMBA v1.0 – User Guide. BRGM Report RP-61680-FR, 64p., 14 fig.

Seguin J.J., Castillo C., Arnaud, L. (2015) – Modélisation des nappes de l'Albien et du Néocomien. Rapport Final. BRGM/RP-64873-FR, 274 p., 152 fig., 21 tabl., 8 ann.

Theis, C.V.: The relationship between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using ground water storage. Trans. Am. Geophys. Union 16, 519–524 (1935)

Vernoux J.F., M. Degouy, H. Machard de Gramont, R. Galin (2002) – Etude bibliographique sur le suivi des risques engendrés par les forages profonds sur les nappes d'eau souterraine du bassin Seine-Normandie, rapport BRGM/RP-51312-FR, 70 pages, 14 figures, 1 tableau, 2 annexes

Vernoux J.F., Bretteville V., Denis L., Fabris H., Pointet T., Souadi T., Vigouroux P. (2003) – Inventaire et évaluation des risques engendrés par les forages profonds sur les nappes d'eau souterraine du bassin Seine-Normandie. Rapport final BRGM/RP-52102-FR, 71 pages, 20 figures, 21 tableaux, 12 planches, 7 annexes

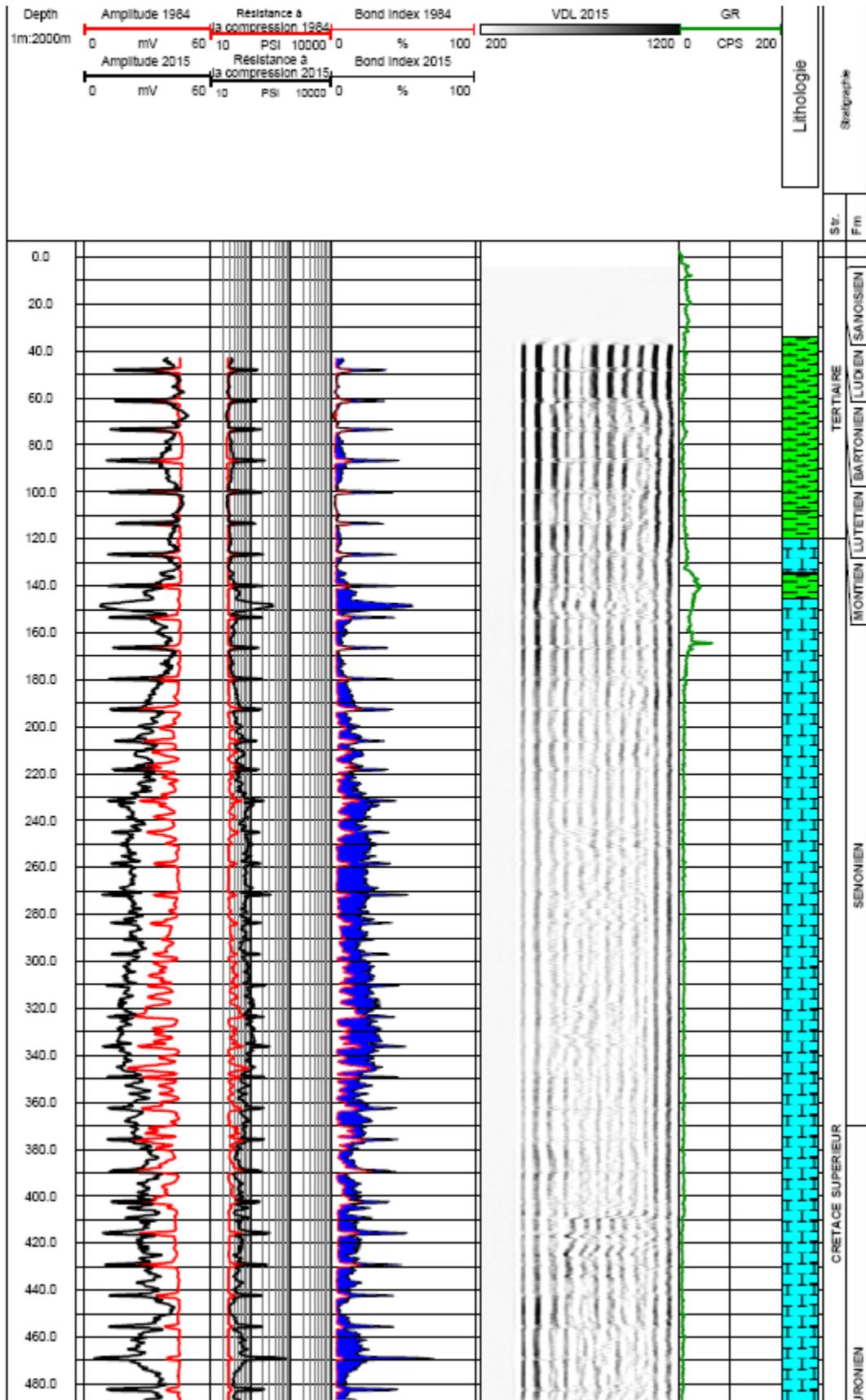
Vernoux.J.F., Maget P., Donsimoni M., Blanchin R., Afzali.H., Vairon.J. (1997) - Synthèse hydrogéologique du Crétacé inférieur du bassin de Paris - BRGM/RR-39702-FR, 93 pages, 2 tableaux, 37 figures, 23 planches, 12 annexes

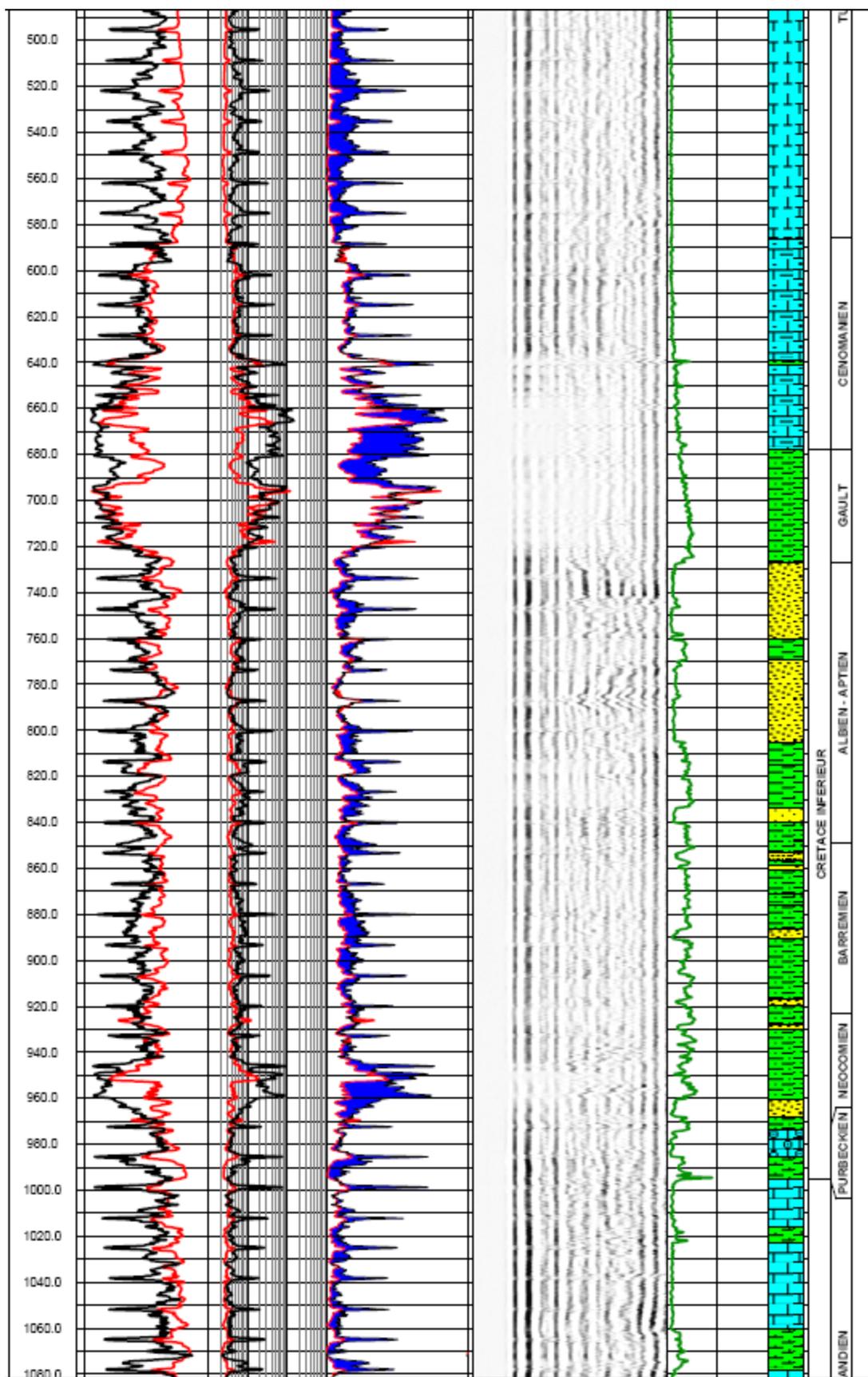
Vignerou G., Deroualle M. (2014) – Permis de RIOM – Mise en sécurité du forage pétrolier de Cébazat 1 (CBT), commune de Cébazat (63118). Mémoire de fin de travaux. Rapport BRGM/RP-63618-FR. 110p., 23 fig., 21 ann., 1 CD.

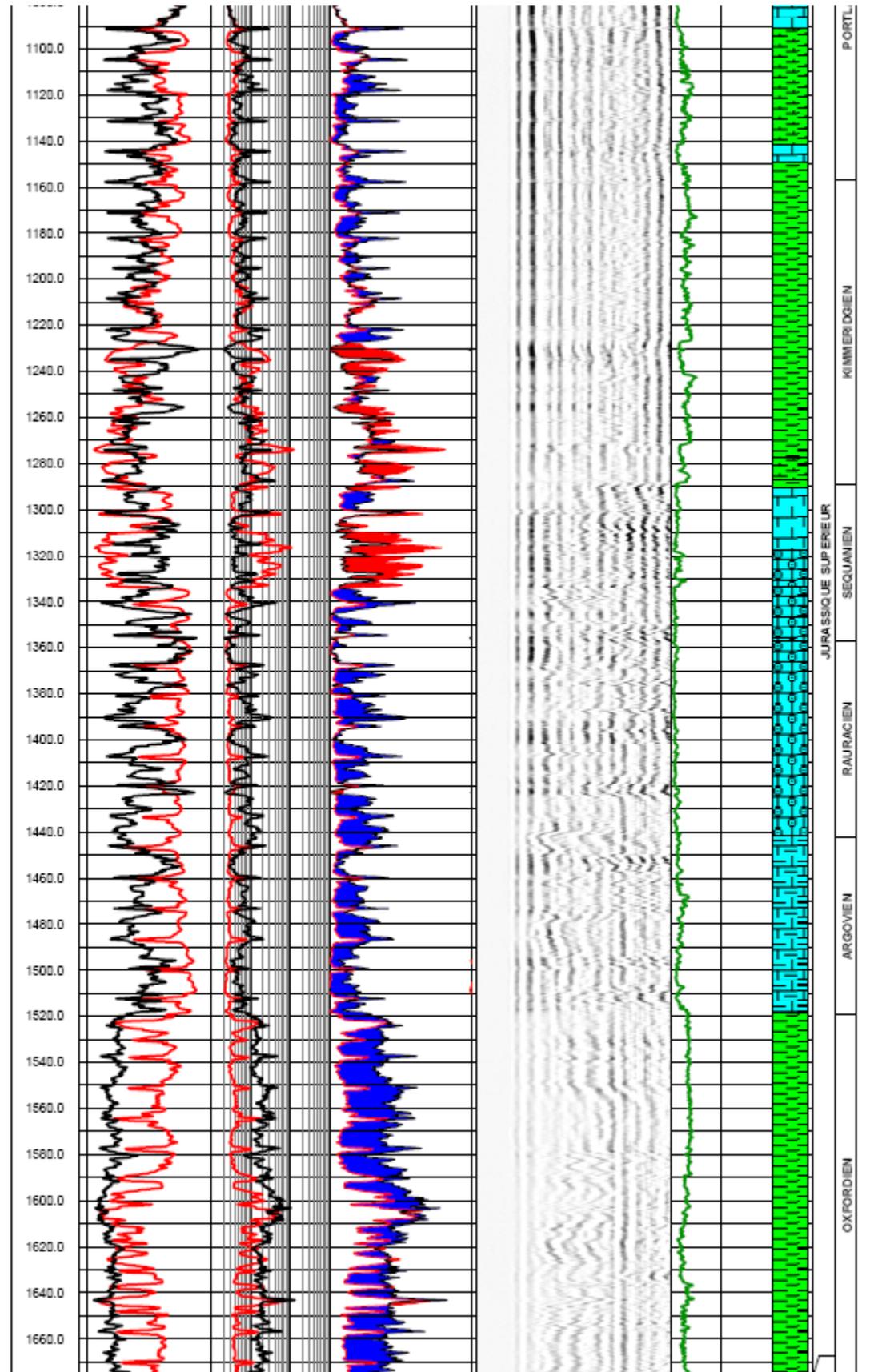
Annexe 1

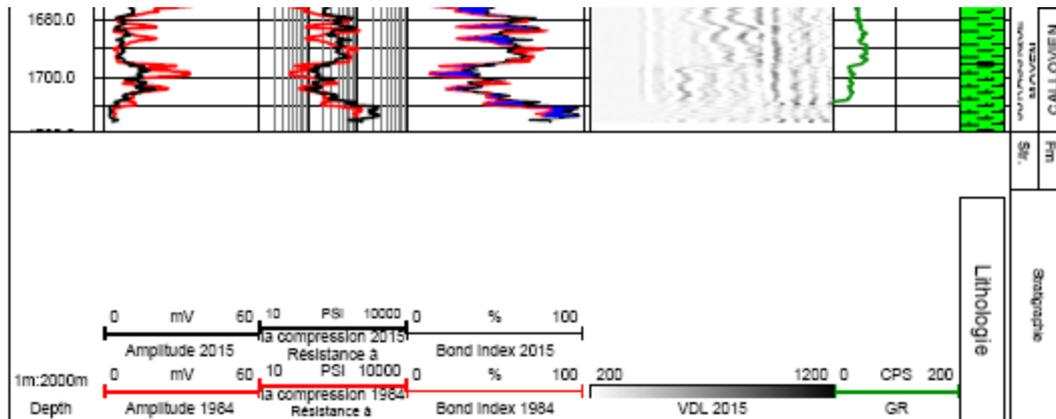
Résultats des comparaisons des diagraphies CBL

GCHL 1

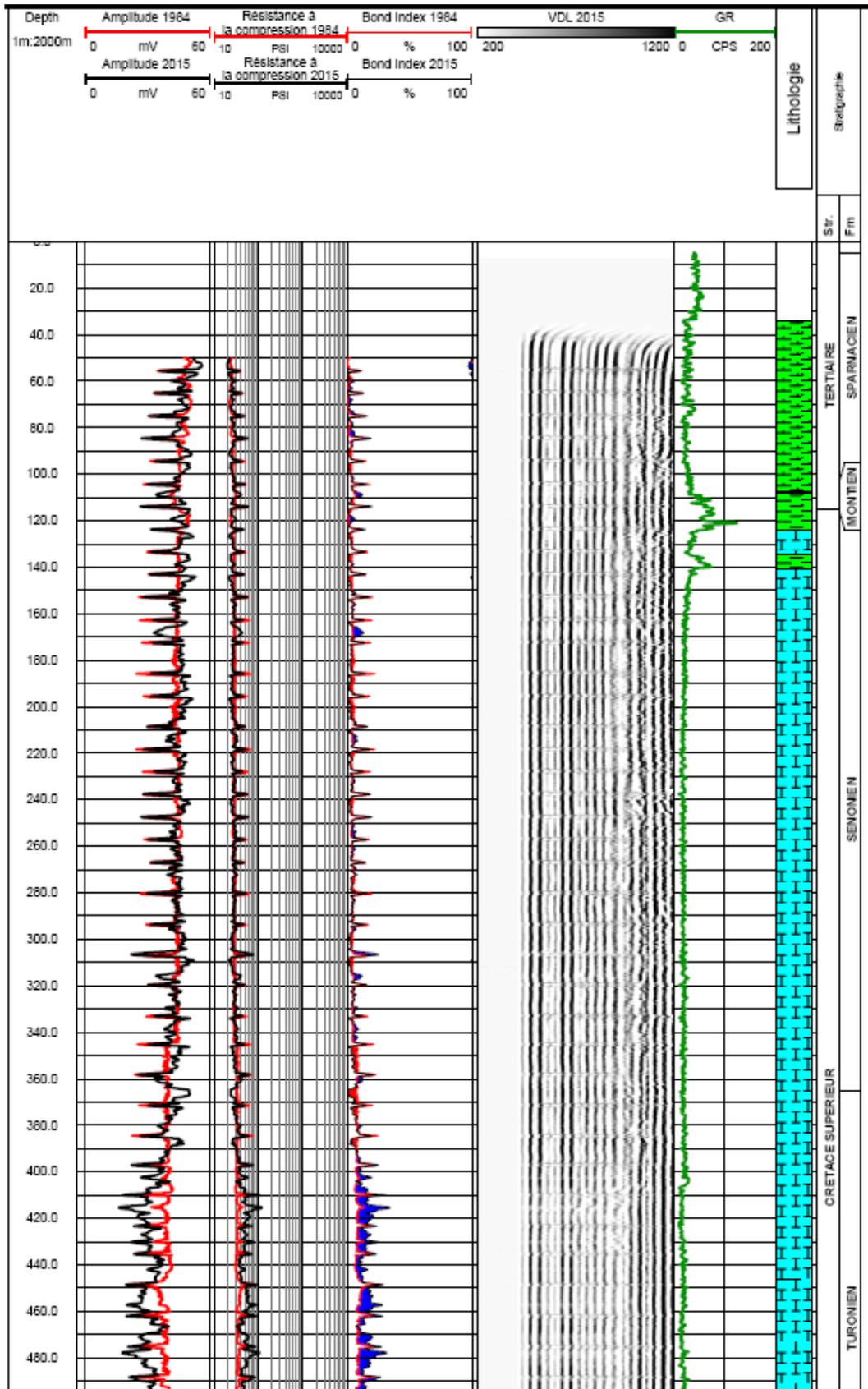


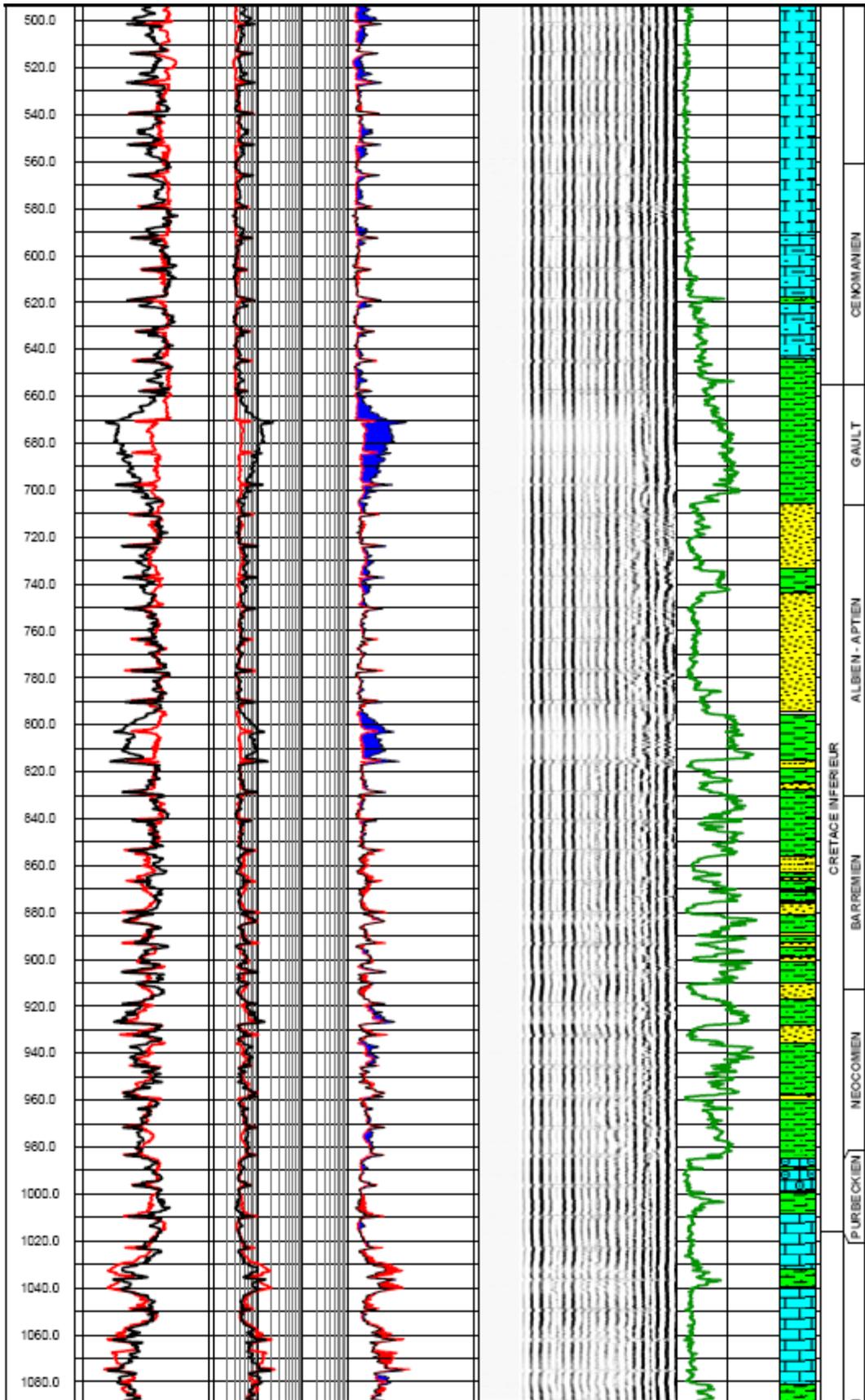


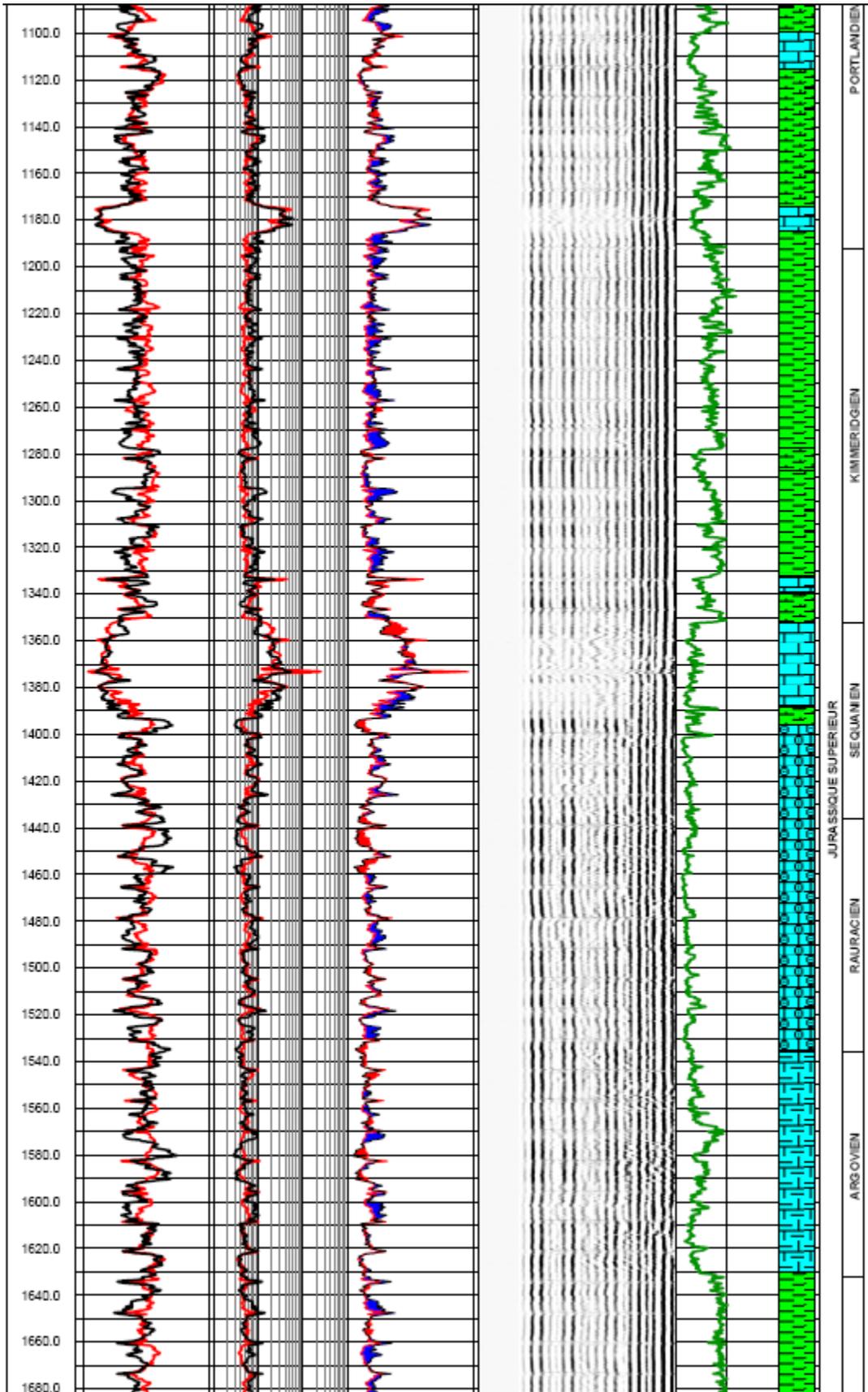


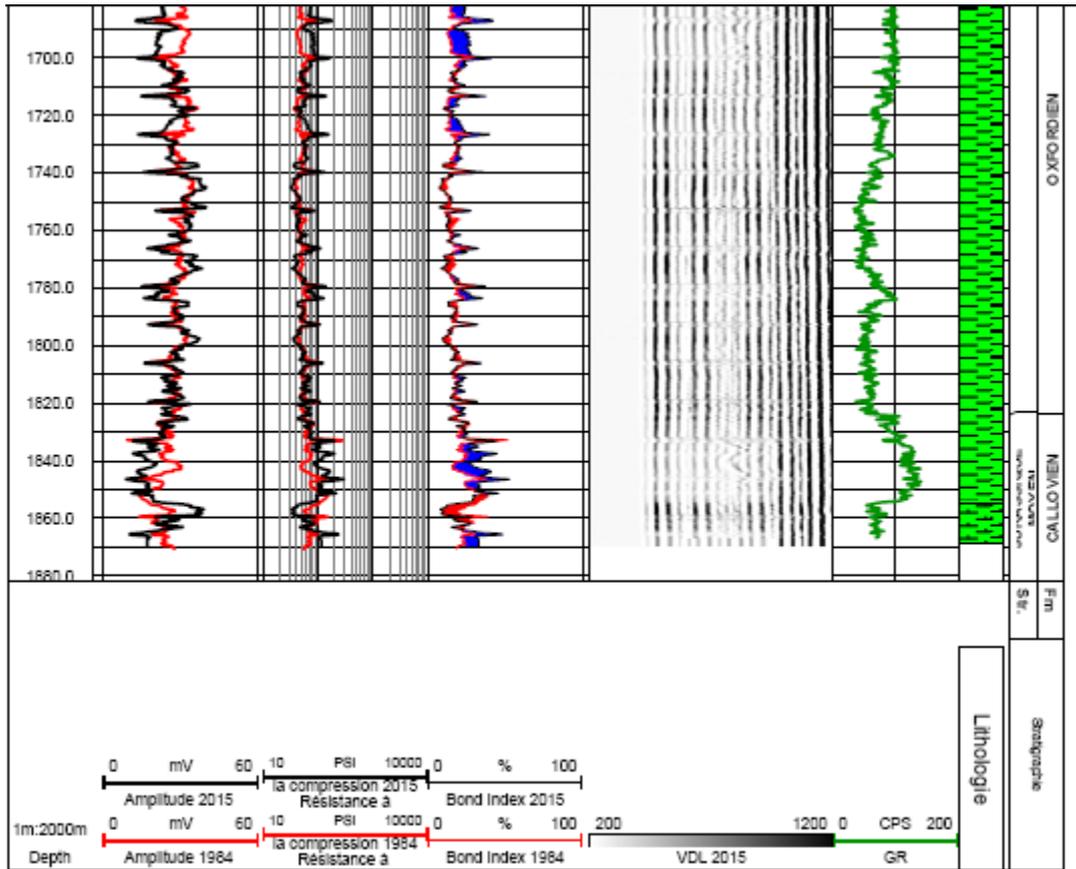


GHLR 1

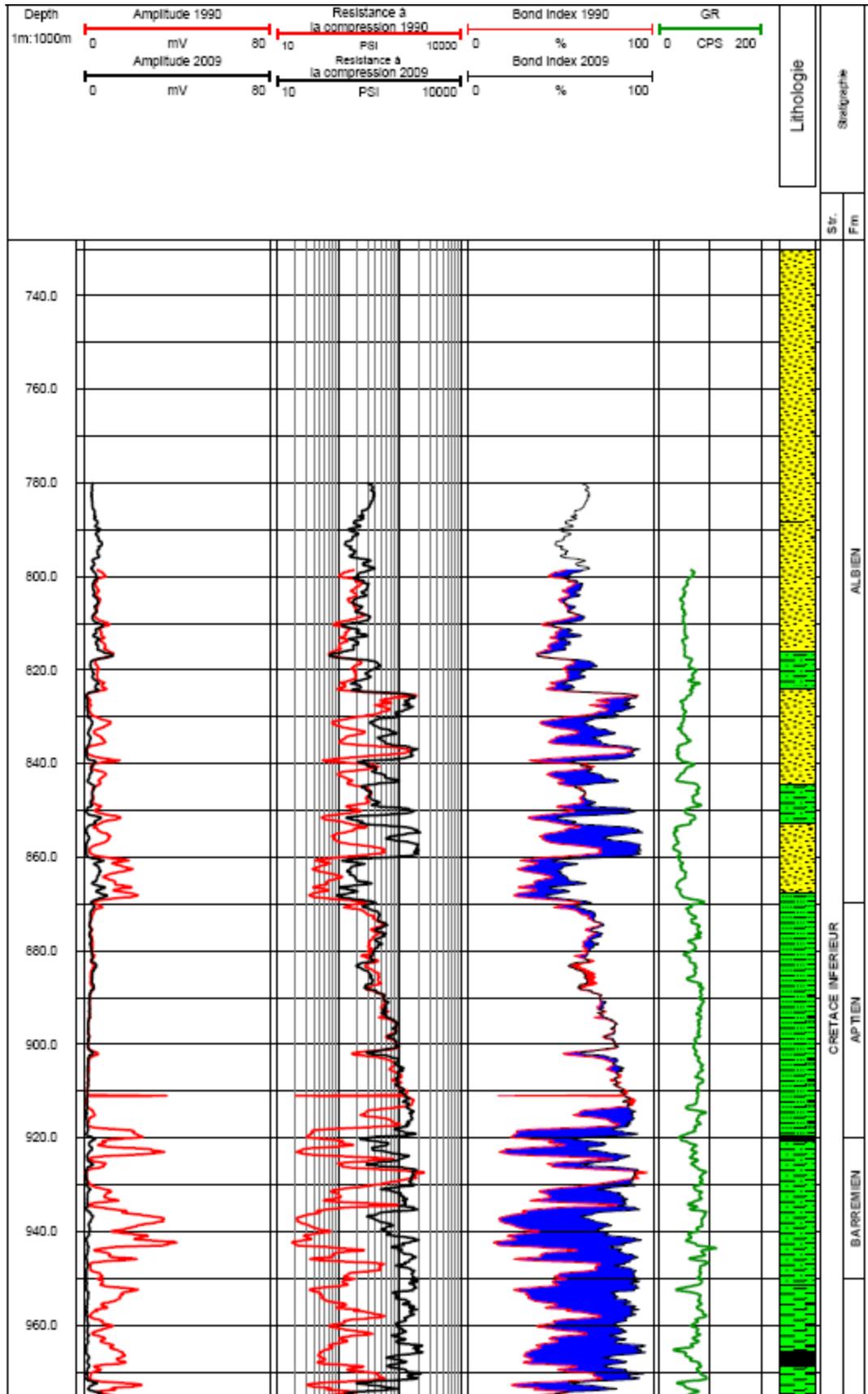


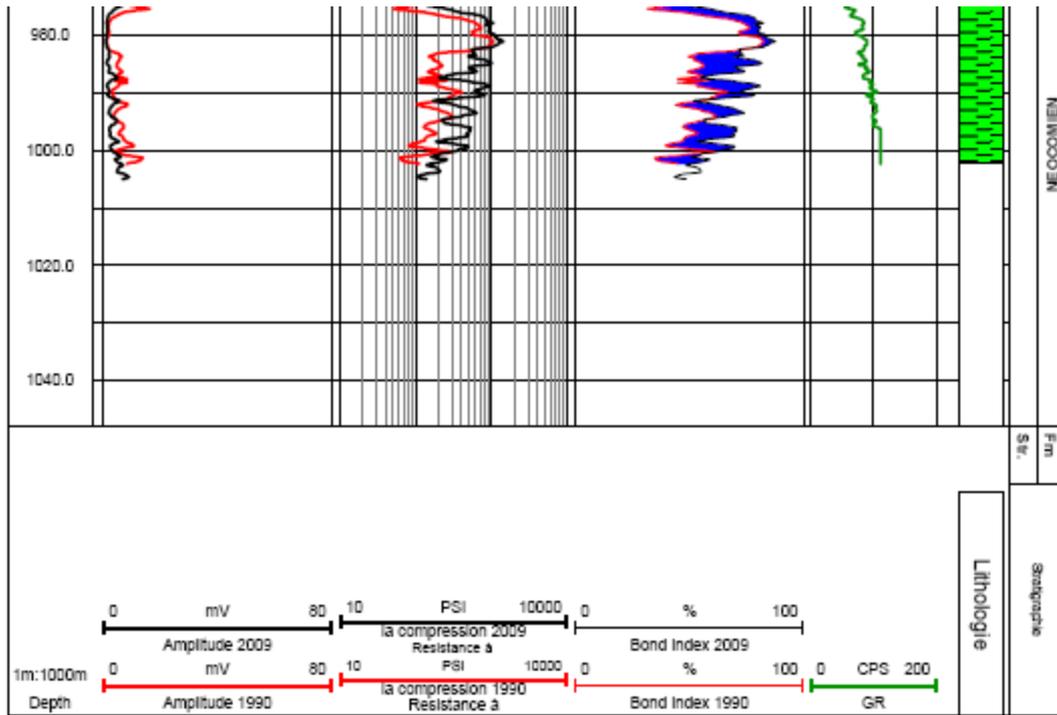




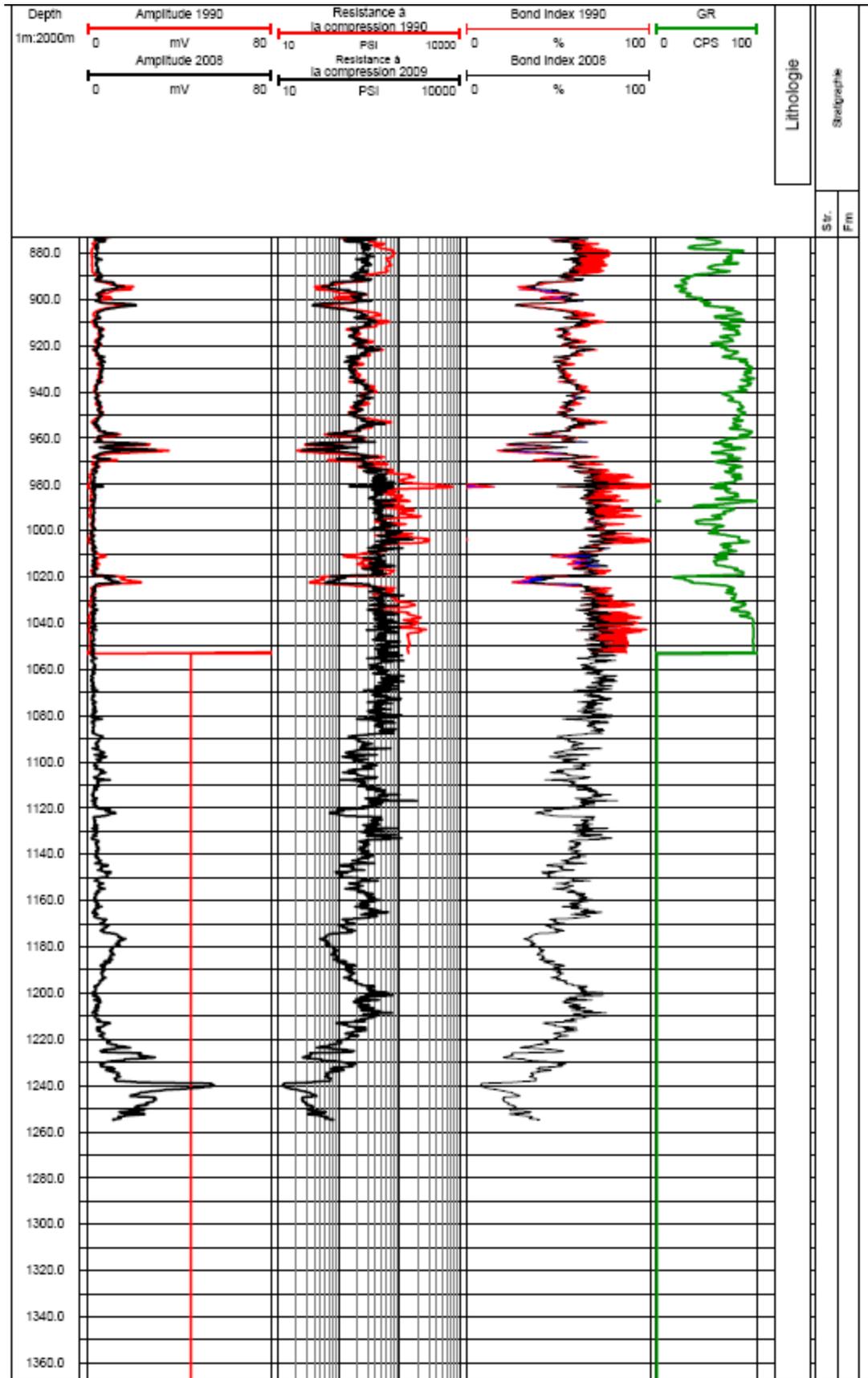


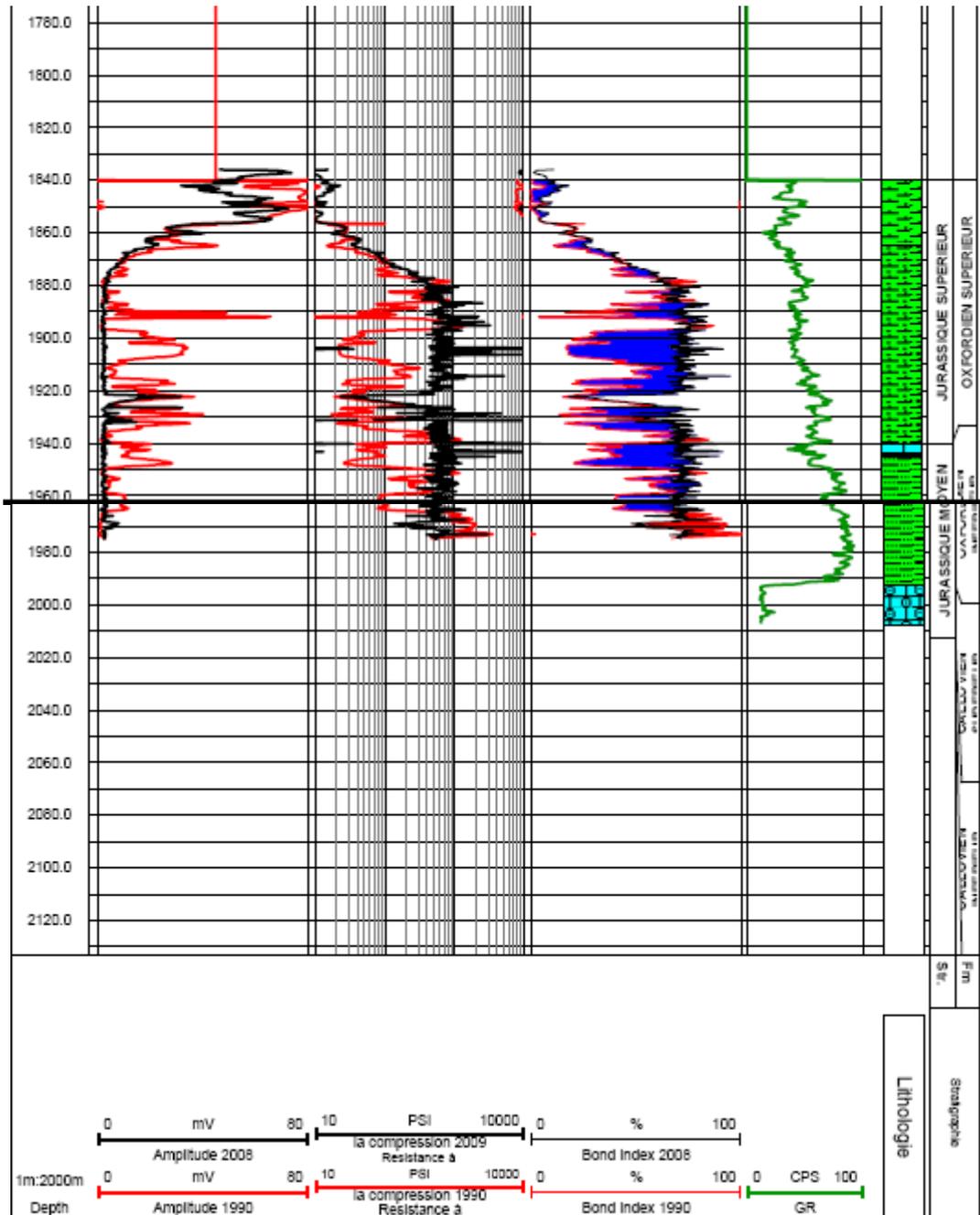
VPU O 11



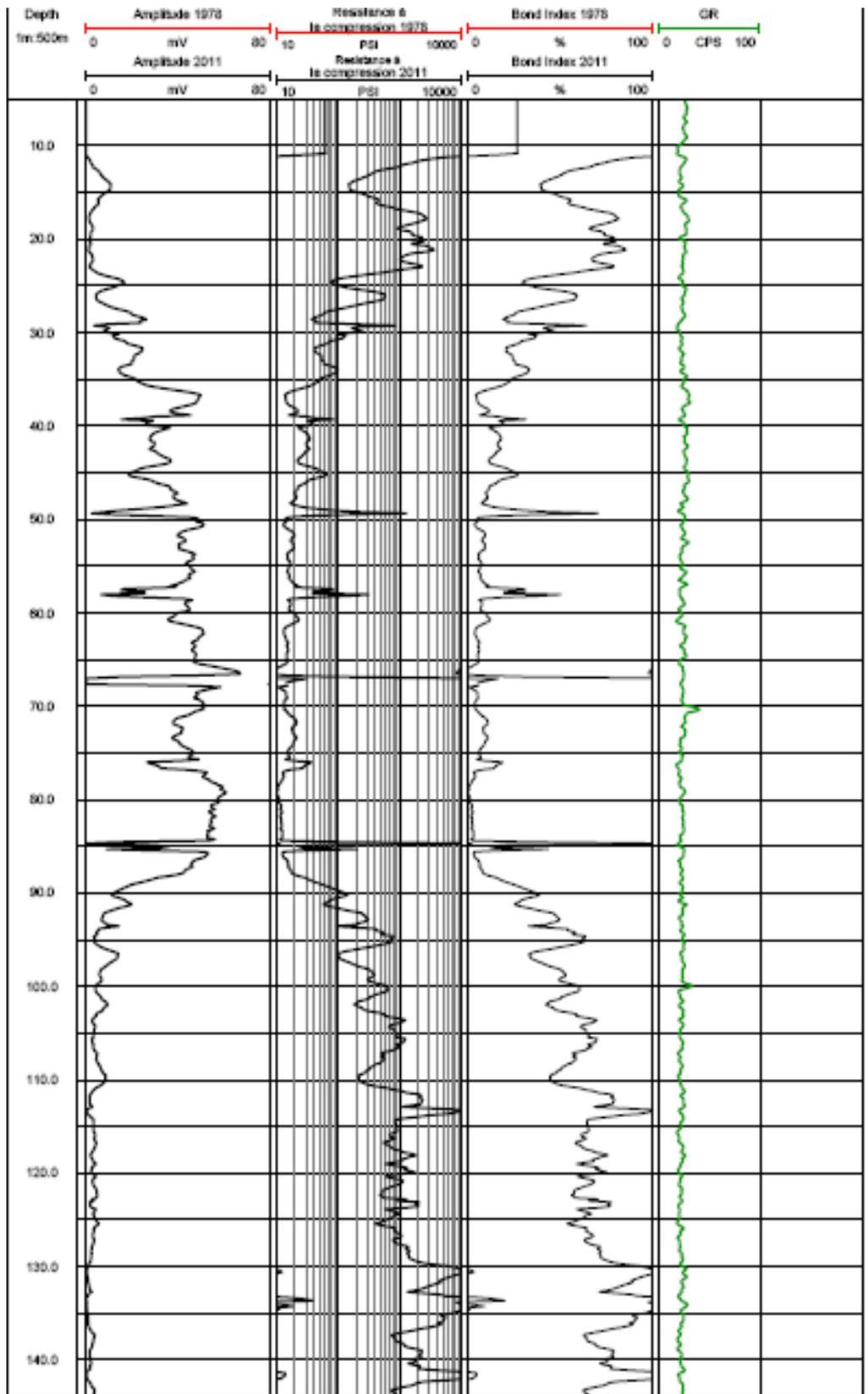


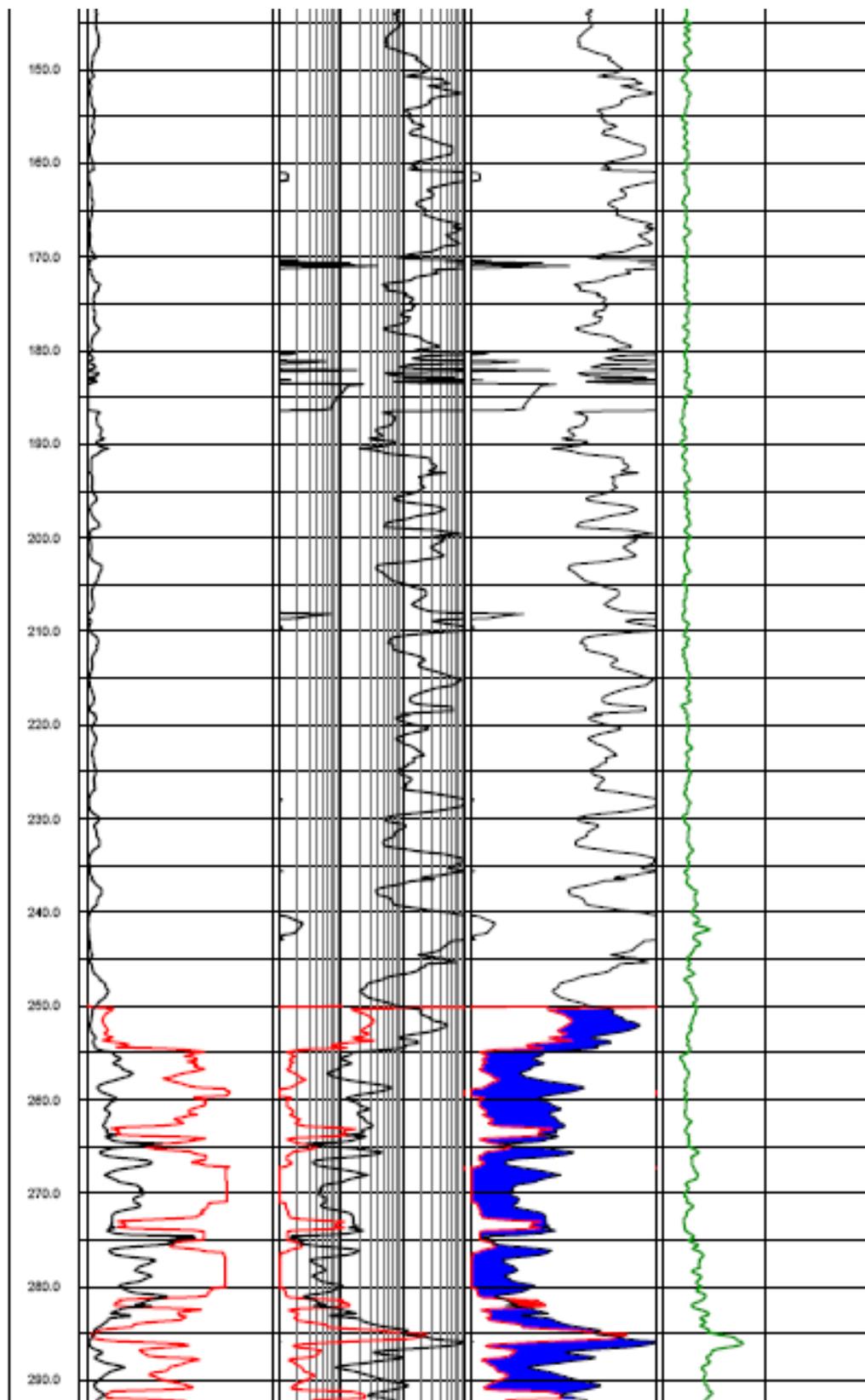
VPU M 31

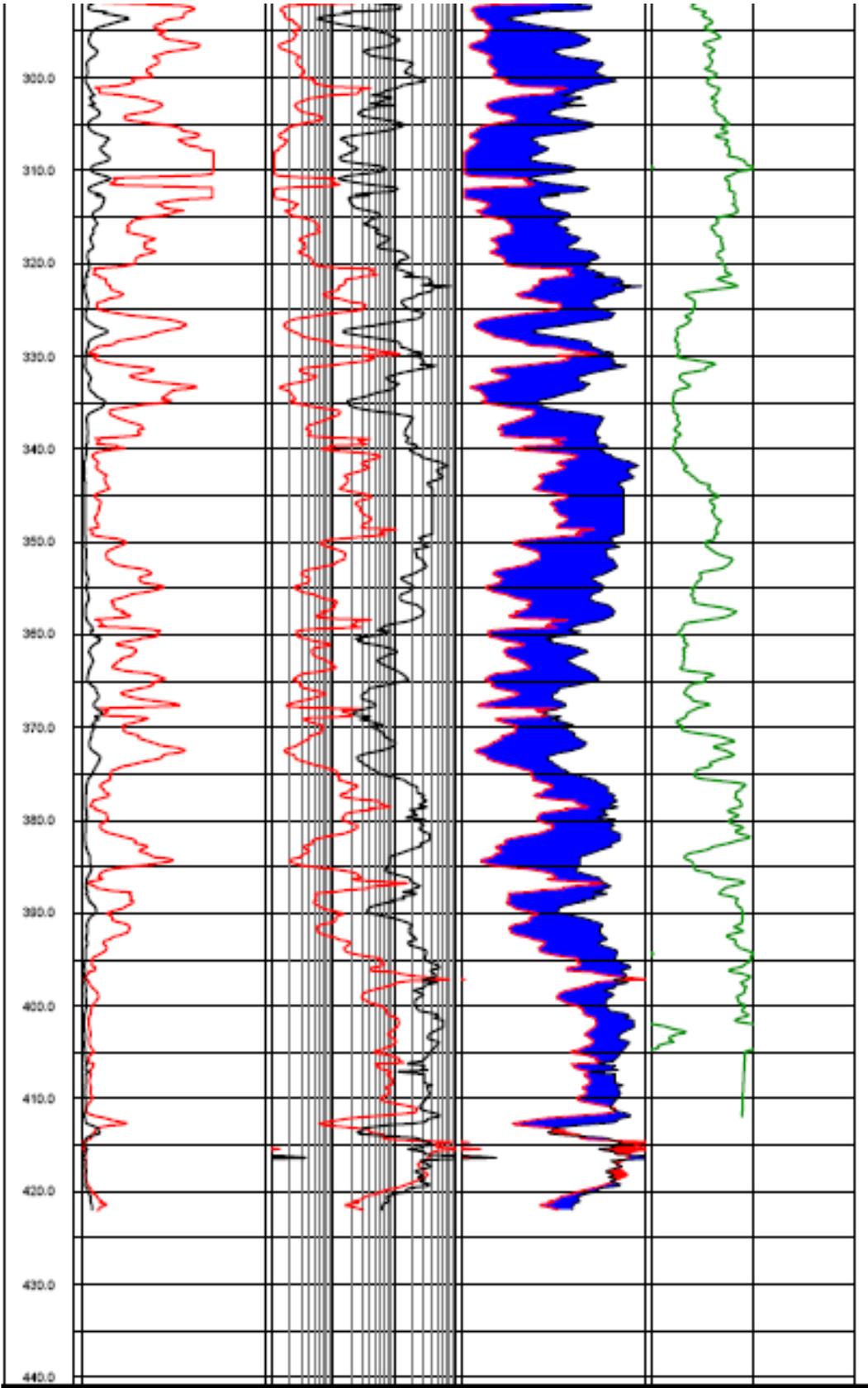


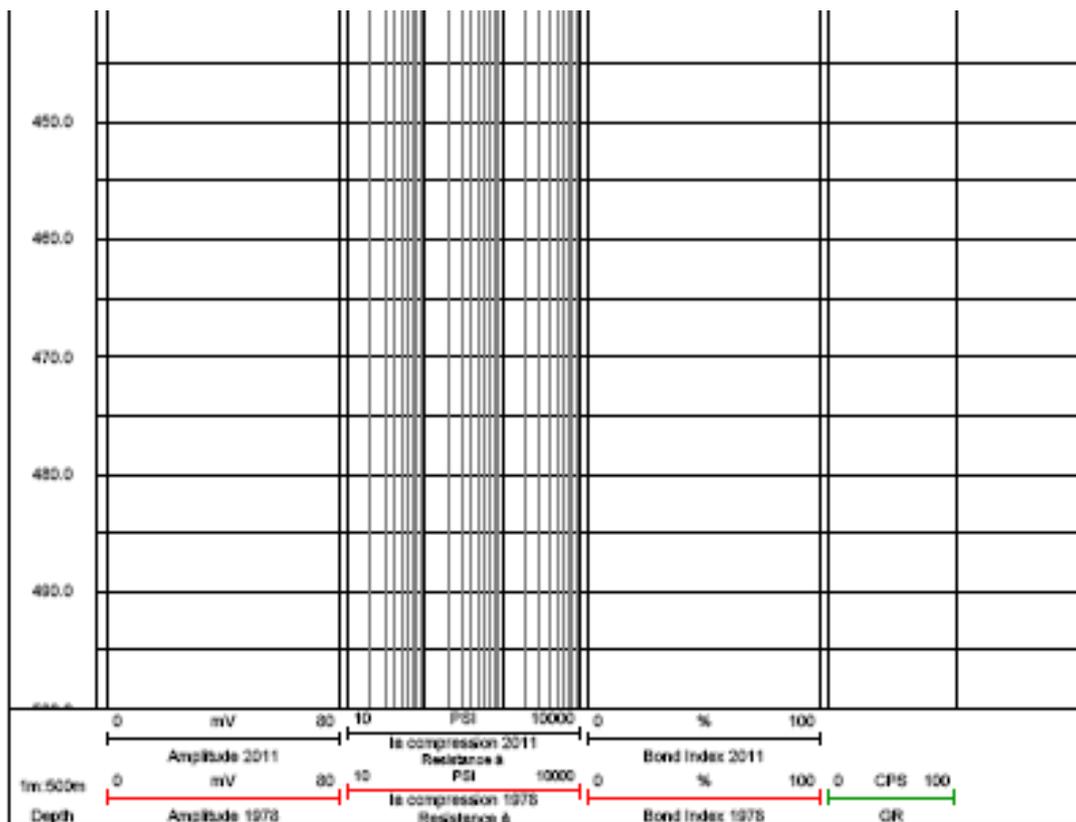


B 27









Annexe 2

Comparaison entre les teneurs en espèces toxiques et indésirables de l'eau potable et de l'eau géothermale

(Abou Akar, 1994)

	Eau potable JOCE jul.80		Dogger teneurs moyennes	teneurs moyennes dans 100 ml d'eau du Dogger	DL 50 (rat)	Quantité nécessaire pour provoquer une fois sur deux le décès d'un être de 70 kg
	niveau guide	maximum admis				
espèces indésirables	mg/l	mg/l	mg/l	mg	mg/kg	mg
Nitrates	25	50	0,5	0,05	2360	165200
Nitrites		0,1			57	3990
Ammonium	0,05	0,5	20,55	2,055	556	38920
H ₂ S	0	0,5	39,32	3,932		
H.C. dissous totaux → C6		10	34,3	3,43	28710	2009700
H.C. dissous surface → C6		10	4,4	0,44		
Phénols		0,0005	0,03	0,003	317	22190
Bore	1		7	0,7	650	45500
Agents de surface autres R-Cl		0,2	10	1	2000	140000
Fer	0,05	0,2	1,1	0,11	276	19320
Manganèse	0,02	0,05	0,025	0,0025	749	52430
Cuivre	0,1		0,05	0,005	119	8330
Zinc	0,1		0,025	0,0025	168	11760
Phosphore (PO ₄)	0,535	6,69	0,325	0,0325		
Fluor		0,7	4,84	0,484	24	1680
Cobalt			0,05	0,005	36	2520
Cl résiduel						
Baryum	0,1		0,225	0,0225	78	5460
Argent		0,01	0,025	0,0025	32	2240
espèces toxiques		µg/l	µg/l	µg	µg/kg	µg
Arsenic		50	50	5	5500	385000
Béryllium			25	2,5		
Cadmium		5	25	2,5	202000	14140000
Cyanures		50	40	4	68000	4760000
Chrome		50	50	5	791000	55370000
Mercur		1	3	0,3	740	51800
Nickel		50	50	5	43000	3010000
Plomb		50	25	2,5	1,1E+06	78190000
Antimoine		10	50	5	280000	19600000
Sélénium		10	25	2,5		
Vanadium		~ 10	50	5	113000	7910000
Pesticides						
par substance		0,1				
au total		0,5				
H.C. polycycliques aromatiques		0,2	0,09	0,009		



Centre scientifique et technique
Direction Eau Environnement et Ecotechnologies
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34
www.brgm.fr