

Antenne EST 1 Rue Claude Chappe

CS 25198 57075 METZ CEDEX 3 Tél : +33 (0)3 87 17 36 60 Fax : +33 (0)3 87 17 36 89

Cartographie des zones soumises au phénomène de remontée des nappes dans le bassin houiller lorrain (57)

RAPPORT E2018/034DE - 18LOR22060

Date : 27/04/2018

Siège - 1 Rue Claude Chappe – CS 25198 - 57075 METZ CEDEX 3 ■ +33 (0)3 87 17 36 60 - ■ +33 (0)3 87 17 36 89 – Internet www.geoderis.fr GROUPEMENT D'INTERET PUBLIC - SIRET : 185 722 949 00020 - APE : 7120B



Cartographie des zones soumises au phénomène de remontée des nappes dans le bassin houiller lorrain (57)

RAPPORT E2018/034DE - 18LOR22060

Diffusion :

DREAL Grand Est GEODERIS

HANOCQ Pascale HIRSCH Maxime BENNANI Mustapha KIMMEL Marion REICHART Guillaume

	Rédaction	Vérification	Approbation
NOM	G. REICHART	M. KIMMEL	M. BENNANI
Visa	G. feithar	Helle	A.

SOMMAIRE

1	Objet	. 3
2	Description des deux simulations réalisées	. 4
	2.1 Scénarios « durable » et « réaliste » d'évolution des prélèvements	. 4
	2.2 Scénarios climatiques et situations piézométriques de référence	. 4
3	Précision des prévisions réalisées	. 5
	3.1 Précision planimétrique des centres de mailles	. 5
	3.2 Précision altimétrique des résultats	. 5
	3.2.1 Nappe des GTI	. 6
	3.2.1.1 Piézométrie	. 6
	3.2.1.2 Profondeurs de nappe	. 6
	3.2.2 Nappes alluviales	. 7
	3.2.2.1 Piézométrie	. 7
	3.2.2.2 Profondeurs de nappe	. 7
	3.2.3 Incertitudes résiduelles	. 8
4	Notice des cartes présentées	10
	4.1 Classes de profondeur définies pour la cartographie	10
	4.2 Situation estimée de la nappe des GTI	11
	4.2.1 Situation de nappe libre	11
	4.2.2 Situation de nappe captive	11
	4.2.2.1 Captivité en domaine alluvial	11
	4.2.2.2 Captivité hors domaine alluvial	12
_	4.3 Situation estimée des nappes alluviales	13
5	Conclusions et préconisations	14
6	Bibliographie	16
7	Liste des annexes	17

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

Mots clés : bassin houiller lorrain, remontée des nappes, nappe des grès du Trias inférieur, nappes alluviales

1 OBJET

Avant son peuplement et son développement économique et industriel, le bassin houiller lorrain était largement recouvert de zones humides ou marécageuses [1].

Plus tard, les eaux souterraines du bassin ont été exhaurées lors de l'exploitation minière, ou prélevées par les industries et collectivités. Durant des décennies, et encore à l'heure actuelle, ceci a contribué à rabattre la nappe des grès du Trias inférieur (GTI).

Or, la baisse du niveau de la nappe permise par ces prélèvements d'eau a induit d'une part, un assèchement de certaines zones humides ou marécageuses et, d'autre part, un apport d'eau moindre au réseau hydrographique, partiellement compensé par le rejet d'une partie des prélèvements dans certains cours d'eau. Les zones urbaines ou périurbaines se sont développées sur ces secteurs, sans considération du caractère non durable de cette situation.

La fermeture progressive d'industries consommant d'importants volumes d'eau à partir des années 1980-1990, la fin de l'exploitation du charbon dans les années 2000 et la tendance aux économies d'eau constatée au cours des dernières années sont à l'origine d'une actuelle reconstitution de la nappe des GTI.

Les Charbonnages de France (CdF) ont étudié la mécanique de cette reconstitution après l'arrêt des travaux miniers dans le cadre de leur dossier d'arrêt, en considérant les données de prélèvements d'eau à disposition durant la période d'étude. Afin de limiter l'amplitude de la remontée de la nappe induite par la fin de son activité, CdF a prévu la mise en œuvre de mesures compensatoires, sous la forme d'importants moyens de rabattement de nappe.

Or, les évolutions techniques, socioéconomiques, ainsi que les politiques publiques mises en place au cours des dernières années, visant à une meilleure gestion des ressources naturelles, conduisent à accentuer la baisse de consommation initialement projetée. En conséquence, une remontée de nappe plus rapide et d'amplitude plus importante que dans les simulations antérieures a été conjecturée, et est déjà observée.

Un retour à un nouvel équilibre piézométrique de la nappe au niveau ou au-delà de la surface topographique est à considérer.

Compte tenu de ce qui précède, le GIP GEODERIS a été chargé, avec l'appui du BRGM, d'actualiser les prévisions de remontée de nappe en intégrant les zones du bassin houiller non concernées par l'exploitation minière.

Le phénomène a donc été reconsidéré dans sa globalité, en commençant par le secteur du bassin le plus sensible à court terme (secteur ouest) [2, 3, 4, 5] puis en étendant la démarche à tout le bassin [6, 7].

Dans ce cadre, différentes simulations ont été demandées à GEODERIS sur la base de scénarios définis en 2015 et récemment actualisés par les services de l'Etat.

Le présent rapport synthétise les résultats des études visant à l'identification des zones soumises au phénomène de remontée de nappe dans l'ensemble du bassin houiller lorrain.

Les résultats sont présentés en *Annexes 1 et 2* du rapport. Les études associées sont jointes en *Annexes 3 et 4*.

2 DESCRIPTION DES DEUX SIMULATIONS REALISEES

2.1 Scénarios « durable » et « réaliste » d'évolution des prélèvements

Deux scénarios prévisionnels relatifs aux prélèvements dans la nappe des GTI et dans le réservoir minier ont été définis par les services de l'Etat :

- un scénario « durable¹ » : il correspond à l'arrêt de tous les prélèvements effectués dans la nappe des GTI et dans le réservoir minier à compter de 2017, sur tout le domaine modélisé ;
- un scénario « réaliste » : il correspond à la prise en compte d'un certain nombre de dispositions et de simulations d'évolutions des prélèvements d'eau, qui sont détaillées en § 5.1.1 du rapport d'étude 2018 du BRGM.

2.2 Scénarios climatiques et situations piézométriques de référence

Le scénario climatique nécessaire aux simulations prévisionnelles (post 2016) d'impact de l'évolution des prélèvements dans la nappe des GTI et dans le réservoir minier intègre successivement deux périodes climatiques distinctes, aux chroniques d'infiltration spécifiques :

- la période de « moyennes eaux », dont l'objectif est de prévoir à long terme l'impact de la diminution évolutive des prélèvements, dans une situation d'infiltration moyenne fixée. Pour l'analyse des résultats des simulations, la situation où la nappe des GTI peut être considérée comme stable est retenue en tant que situation piézométrique de référence ;
- la période de « hautes eaux » (crue de nappe), dont l'objectif est de prévoir l'impact supplémentaire des chroniques de pluies exceptionnelles². Pour l'analyse des résultats des simulations, la situation la plus haute de la nappe des GTI est retenue en tant que situation piézométrique de référence.

¹ Appelé « sécuritaire » dans le rapport d'étude du BRGM puis renommé en concertation avec les services de l'Etat, étant donné que ce scénario est uniquement sécuritaire du point de vue des prélèvements anthropiques et qu'il exclut donc un certain nombre d'incertitudes susceptibles d'aggraver la cartographie des zones soumises à la remontée de nappe (changements climatiques, modifications anthropiques apportées au milieu, etc.). Plus anciennement appelé « pessimiste ».

² La période de « hautes eaux » inclut notamment des chroniques de pluies associées à une année proche d'une année cinquantennale et à une année proche d'une année centennale.

3 PRECISION DES PREVISIONS REALISEES

<u>N.B.</u> : pour les simulations comme pour la cartographie, des mailles carrées de 50 m de côté sont prises en compte dans le périmètre de l'étude. En dehors de ce périmètre, des mailles carrées de 500 m de côté sont utilisées.

À chaque maille de calcul est associée (i) une cote topographique (altitude de la surface du sol, des cours et étendues d'eau) qui correspond au minimum des valeurs du MNT LIDAR³ (à pas de 5 m) contenues à l'intérieur de chaque maille et (ii) une cote piézométrique calculée. Ces deux cotes sont prises pour référence dans la détermination de la classe de profondeur associée à la maille considérée.

3.1 Précision planimétrique des centres de mailles

La précision planimétrique sur les centres des mailles de calcul équivaut à la précision planimétrique des données LIDAR (nous retiendrons une valeur de 0,5 m) augmentée de la précision planimétrique du support cartographique sur lequel les résultats sont reportés.

Dans le cas du SCAN 25 de l'IGN utilisé dans les cartes que nous présentons, cette précision est de 2 à 3 m.

Nous retiendrons plus simplement que la précision planimétrique des résultats est de 3 m.

Pour des raisons de lisibilité des résultats, cette incertitude n'est pas prise en compte dans la cartographie des mailles soumises au phénomène de remontée.

3.2 Précision altimétrique des résultats

Le manque de précision des données topographiques affecte le comportement simulé de la nappe directement (puissance de l'aquifère, contraintes importantes sur le débordement, interactions avec le réseau hydrographique, etc.) et indirectement (fiabilité des données bancarisées, impact évolutif des affaissements miniers, etc.).

Ensuite, dans le calcul de la profondeur de nappe, obtenu par différence entre cote piézométrique et cote topographique, il est une nouvelle fois fait appel à cette dernière (et donc à son manque de précision), ce qui réduit d'autant la précision des résultats.

Pour ces raisons, le manque de précision des données topographiques avait été identifié comme étant le facteur ayant le plus d'impact sur les résultats de la précédente étude [2].

Dans la nouvelle version des prévisions de remontée de nappe, l'intégration des MNT LIDAR disponibles au sein des étapes les plus importantes du travail (hydrogéologie, hydrologie, topographie) a permis de réduire significativement les conséquences du manque de précision des données topographiques⁴ sur la piézométrie et la profondeur de nappe calculées.

³ Acronyme de « *light detection and ranging »* en anglais. En français, il s'agit de la télédétection par laser.

⁴ De l'ordre de \pm 2 m auparavant, pour \pm 0,5 m aujourd'hui.

3.2.1 Nappe des GTI

3.2.1.1 Piézométrie

L'analyse des travaux du BRGM nous conduit aujourd'hui à considérer que les cotes piézométriques de référence calculées en moyennes eaux et en hautes eaux pour les scénarios réaliste et durable sont précises à \pm 1,5 m NGF dans les secteurs de « La Houve Falck » et de « La Houve Traditionnel ».

Cette valeur est basée sur la qualité de la calibration dans ces secteurs, que le BRGM a estimée grâce à plusieurs critères statistiques. Nous considérons que, pour ces secteurs où nous bénéficions d'un retour d'expérience de plusieurs années sur une situation déjà haute de la nappe des GTI, l'erreur commise sur les prévisions ne devrait pas sensiblement différer de l'écart entre simulation et observation en période de calibration, cet écart étant de l'ordre de 1,5 m.

Dans la mesure où nous ne disposons pas de retour d'expérience sur le comportement de la nappe des GTI en situation haute dans les autres secteurs du bassin, il serait pour le moment beaucoup trop hasardeux d'établir un lien entre la période de calibration et le lointain futur, dans la mesure où les dynamiques associées à chaque période peuvent difficilement être comparées l'une avec l'autre. Ce constat est particulièrement clair dans les secteurs où la nappe a été fortement rabattue à une époque et où la nappe des GTI est toujours actuellement très profonde, comme « Vouters Reumaux » et « Forbach ». Dans ces secteurs, les écarts entre simulation et observation en période de calibration atteignent fréquemment une dizaine de mètres voire davantage. Ces écarts reflètent les difficultés à reproduire fidèlement l'extrême rabattement de la nappe des GTI, qui a pu localement être asséchée ou presque du fait de l'activité humaine. Pour ces secteurs, il est évident que cette dynamique profonde est totalement différente de la dynamique de proche surface sur laquelle les prévisions portent.

Ainsi, en raison du manque de retour d'expérience en situation de proche surface sur le reste du bassin, nos possibilités de quantifier la précision du calcul des cotes piézométriques de référence se limitent aux secteurs de « La Houve Falck » et « La Houve Traditionnel ».

Faute de pouvoir proposer une meilleure solution, nous suggérons donc de lire les cotes sur le reste du bassin en considérant également une précision de \pm 1,5 m NGF, mais en ayant bien à l'esprit qu'il s'agit d'une extrapolation.

<u>N.B.</u> : les annexes 1.1.2, 1.2.2, 2.1.2 et 2.2.2 accompagnant le présent rapport intègrent des isopièzes au pas de 1 m pour la nappe des GTI.

3.2.1.2 Profondeurs de nappe

L'analyse des travaux du BRGM nous conduit aujourd'hui à considérer que les cotes piézométriques de référence calculées en moyennes eaux et en hautes eaux pour les scénarios réaliste et durable sont précises à \pm 1,5 m NGF dans les secteurs de « La Houve Falck » et de « La Houve Traditionnel ».

La prise en compte des données LIDAR disponibles sur le bassin a permis d'améliorer sensiblement la précision des cotes topographiques des centres de mailles de 50 m utilisées dans le modèle hydrodynamique. Cette précision est aujourd'hui de \pm 0,5 m.

Compte tenu des remarques formulées sur la piézométrie :

- les profondeurs de nappe de référence calculées en moyennes eaux et en hautes eaux pour les scénarios réaliste et durable sont donc précises à ± 2 m pour les secteurs de « La Houve Falck » et « La Houve Traditionnel » ;
- ailleurs, nous suggérons de lire les profondeurs en considérant une précision similaire, mais en ayant bien à l'esprit qu'il s'agit d'une extrapolation.

3.2.2 Nappes alluviales

3.2.2.1 Piézométrie

Dans son rapport d'étude 2018, le BRGM précise que, pour l'essentiel des nappes alluviales, il n'existe pas (ou très peu) de chroniques piézométriques sur lesquelles se baser dans la modélisation. De plus, ces chroniques couvrent rarement plus que la dernière décennie. Enfin, les ouvrages existants sont très inégalement répartis sur l'ensemble du bassin. Sur la trentaine de piézomètres disponibles, plus de la moitié couvre ainsi la nappe de la Bisten, uniquement dans le secteur de Creutzwald. D'où un problème de représentativité – donc d'utilité dans l'interprétation – manifeste des critères statistiques calculés par le BRGM.

Il faut ajouter à cela l'extrême sensibilité du comportement simulé des nappes alluviales (surtout en phase de remontée) à la topographie, au maillage considéré (grossier par rapport à la faible largeur des nappes et des cours d'eau), à la qualité des échanges avec les cours d'eau (connue dans sa globalité, mal connue localement), à la faible épaisseur des nappes (considérer une incertitude revient rapidement à dire qu'une nappe alluviale est soit sèche soit affleurante), aux hétérogénéités locales (structurelles ou géologiques), à la connexion hydraulique entre les éventuelles terrasses, etc.

In fine, il n'est selon nous pas possible de quantifier la précision des cotes piézométriques de référence au sein des différentes nappes alluviales.

En l'état, nous suggérons donc de lire directement les cotes calculées sur l'ensemble du bassin, tout en gardant bien à l'esprit que ces cotes n'ont qu'une valeur indicative.

Cela étant, il nous semble important de retenir que, dès lors qu'une valeur de cote apparaît dans une maille donnée, la présence d'une nappe alluviale (avec ou sans lien avec la nappe des GTI) est à considérer.

<u>N.B.</u> : par souci de lisibilité et contrairement aux annexes concernant la nappe des GTI, les annexes 1.1.1, 1.2.1, 2.1.1 et 2.2.1 accompagnant le présent rapport n'intègrent pas d'isopièzes pour les nappes alluviales. Ces informations peuvent toutefois être retrouvées dans le rapport d'étude du BRGM.

3.2.2.2 Profondeurs de nappe

Dans la mesure où la piézométrie fournie est indicative, il en va de même pour la profondeur de nappe. La cartographie de la situation estimée pour les nappes alluviales intègre tout de même une incertitude altimétrique de \pm 0,5 m puisque le calcul des profondeurs fait appel aux données LIDAR.

Le lecteur sera de plus attentif au fait que les alluvions dessinées dans le modèle géologique ont été intégrées sous une forme discrétisée (modélisation monocouche selon des mailles carrées de 50 m de côté) dans le modèle hydrodynamique, ce qui se traduit par une perte

d'information. Autrement dit, par exemple, des zones contenant des alluvions ont pu être écartées du maillage du domaine alluvial maillé et d'autres zones ne contenant pas d'alluvions ont pu être intégrées dans le domaine alluvial maillé.

Pour que le lecteur ait bien à l'esprit les différences entre le modèle géologique et le modèle hydrodynamique, les contours d'alluvions considérés dans les deux modèles sont présentés dans les annexes 1.1.1, 1.2.1, 2.1.1 et 2.2.1 associées aux nappes alluviales.

3.2.3 Incertitudes résiduelles

La question des incertitudes résiduelles, c'est-à-dire de l'ensemble des éléments qui pourraient conduire à remettre en question les prévisions et qui doivent donc être gardés en mémoire dans le cadre de tout travail d'interprétation, a été abordée dans le rapport d'étude 2018 du BRGM (§ 4.3).

Dans le Tableau 1, nous nous proposons de récapituler ces incertitudes et d'apporter des précisions sur les moyens envisageables pour les réduire.

Par ailleurs, rappelons ici de manière générale que les cotes piézométriques et les profondeurs de nappe calculées n'ont de sens en phase de prévisions que si et seulement si (i) les hypothèses sous-tendant la construction du modèle s'avèrent correctes et (ii) les scénarios de simulation s'avèrent conformes à la réalité.

Objet	Incertitudes résiduelles associées	Impact estimé à ce jour sur les prévisions	Moyens envisageables pour réduire les incertitudes	Remarques sur les moyens
Failles géologiques	Localisation, géométrie, perméabilité	<u>Majeur</u>	Analyses de sensibilité numérique, pouvant guider le dimensionnement d'éventuelles investigations complémentaires (piézomètres, pompages d'essai, géophysique)	Réflexions sur la pertinence et la faisabilité des analyses de sensibilité pouvant être engagées dès à présent. Priorisation possible selon zones où la nappe des GTI est déjà haute (hétérogénéité du remplissage donc de la perméabilité). Pour les investigations éventuelles, <i>a priori</i> pas d'obstacles techniques à leur réalisation, exception faite de la sensibilité de la géophysique au contexte urbain.
Crevasses minières	Incertitude totale : pas de retour d'expérience sur le comportement	Potentiellement important	Piézomètres, pompages d'essai, traçages <u>/!\</u> Limites propres au modèle (implémentation)	Détection d'anomalies au fil de l'eau lors d'interprétations hydrogéologiques. Investigations ciblées suite à détection, ou en zones prédisposées à la présence de crevasses (après validation de l'étude associée). En attente de retour d'expérience sur Creutzwald pour en dire davantage.
Réservoirs miniers	Lois d'échange nappe- mine considérées	Modéré	Suivi pompages miniers + tests débit	Au fil de l'eau. Amélioration des lois sur le long terme
Alluvions	Localisation, géométrie, anisotropie de perméabilité (mises en charge possibles)	Modéré (échelle du bassin) <u>Majeure</u> (échelle inférieure au fond de vallée)	Doublets de piézomètres All. / GTI, pompages d'essai, sondages / <u>I\</u> Limites propres au modèle (maillage, modélisation monocouche)	 A priori, pas d'obstacles techniques à la réalisation d'investigations futures. Priorisation possible selon fonds de vallée identifiés dans l'étude géologique RP-67633-FR du BRGM ou selon enjeux présents / futurs. À une échelle inférieure aux fonds de vallée, des améliorations sensibles ne doivent pas être escomptées, du fait des limites de l'outil de modélisation.
Grès	Anisotropie de perméabilité (mises en charge possibles) selon variations sédimentologiques	Potentiellement important	Piézomètres profonds multi- tubés avec reconnaissance géologique sur carotte <u>/I\</u> Limites propres au modèle (GTI monocouche)	Détection d'anomalies au fil de l'eau lors d'interprétations hydrogéologiques, éventuellement suivie d'investigations ciblées
Cours d'eau	Echanges entre rivières et nappes. Compréhension de la dynamique considérée par le BRGM comme un élément-clef du modèle à améliorer	<u>Majeur</u>	Campagnes de jaugeage régulières <u>/!\</u> Limites liées à la forte anthropisation des cours d'eau	Mise en place d'un réseau de suivi du débit des cours d'eau.
Futurs exutoires actifs	Réalimentations (sources, débordements souterrains) non prises en compte	Potentiellement important	Inventaire et éventuelle modélisation au cas par cas, vérification des prévisions sur le terrain <u>/I\</u> Limites propres au modèle (maillage, écoulements latéraux)	Au fil de l'eau: inventaire, vérification des prévisions concernant les exutoires. Pertinence de la prise en compte des réalimentations à définir.
Modifications anthropiques	Remaniement (déconsolidation, imperméabilisation,) des terrains de surface / proche surface	<u>Majeur</u>	Inventaire et éventuelle modélisation au cas par cas. <u>/!\</u> Limites propres au modèle (maillage, couches, échanges nappe-rivière)	Inventaire au fil de l'eau. Pertinence de la prise en compte des modifications anthropiques à définir.
Prélèvements futurs	Evolution des prélèvements	<u>Majeur</u> (sc. réaliste)	Actualisation régulière du scénario de prélèvement réaliste	Actualisation systématique à chaque mise à jour du modèle
Recharge et ruissellement	Calcul de la recharge (conditionne débordement, comportement des	<u>Majeur</u>	Autres approches numériques à tester, accompagnées d'analyses de sensibilité. En lien très étroit avec la problématique	Améliorations pouvant être engagées dès à présent

Changements climatiques	Evolution de la recharge, intensité des événements exceptionnels	Potentiellement important	Actualisation des scénarios climatiques sur la base d'études scientifiques	Actualisation à l'occasion d'une future mise à jour du modèle, lorsque des données seront disponibles
Qualité de calibration	Difficultés ponctuelles ou dans certaines zones	<u>Majeur</u>	Re-calibrations régulières sur la base des nouvelles données disponibles	Mise à jour trisannuelle du modèle préconisée

Tableau 1 – Incertitudes résiduelles et moyens envisageables pour les réduire

4 NOTICE DES CARTES PRESENTEES

4.1 Classes de profondeur définies pour la cartographie

Par convention dans cette étude, la profondeur d'une nappe en un point de l'espace est définie et calculée comme étant la différence entre la cote topographique et la cote piézométrique de la nappe considérée.

Sur cette base et toujours par convention, la situation estimée d'une nappe donnée est cartographiée selon trois classes de profondeur :

- lorsque la profondeur de la nappe est inférieure ou égale à 0,5 m, la situation est cartographiée en orange et la nappe est dite « affleurante » ;
- lorsque la profondeur de la nappe est comprise entre 0,5 et 3 m, la situation est cartographiée en jaune et la nappe est dite « sub-affleurante » ;
- lorsque la profondeur de la nappe est comprise entre 3 et 5 m, la situation est cartographiée en vert et la nappe est dite « plus profonde ».

Par rapport aux précédents travaux, la définition de la nappe affleurante a été étendue jusqu'à une profondeur de 0,5 m⁵. Elle se limitait auparavant à une profondeur inférieure ou égale à 0 m.

Selon la configuration de la nappe, libre ou captive, la notion de profondeur de nappe ici définie peut prendre différentes significations. Ces dernières sont détaillées dans les paragraphes suivants.



Figure 1 – Situation estimée des nappes : classes de profondeur définies pour la cartographie

⁵ Notamment pour tenir compte des fluctuations saisonnières de la nappe des GTI à l'échelle d'un cycle hydrologique (soit approximativement sur une année) qui sont de l'ordre de ± 0,5 m autour de la situation piézométrique moyenne [9, 10].

4.2 Situation estimée de la nappe des GTI

Annexes concernées : 1.1.2, 1.2.2, 2.1.2 et 2.2.2

4.2.1 Situation de nappe libre

À l'extérieur des domaines de captivité suspectée de la nappe qui ont été cartographiés (voir § 4.2.2), la nappe des GTI est libre, c'est-à-dire que les profondeurs de nappe utilisées pour cartographier la situation estimée de la nappe correspondent à la profondeur physique de l'eau souterraine⁶ (Figure 2).

Pour les zones concernées, les trois classes de profondeur cartographiées (voir § 4.1) peuvent donc être lues directement.

Le tracé intègre une marge de 2 m de profondeur supplémentaire par rapport aux résultats bruts du BRGM (voir § 3.2.1.2a).



Figure 2 – Situation de nappe libre. La charge de pression est nulle dans le calcul des charges hydrauliques. Le niveau physique de l'eau correspond à la surface piézométrique des nappes

4.2.2 Situation de nappe captive

4.2.2.1 Captivité en domaine alluvial

À l'intérieur du domaine de captivité suspectée de la nappe des GTI en domaine alluvial, la nappe des GTI peut se mettre en charge sous les horizons imperméables présents dans les alluvions (Figure 3). Une drainance ascendante (autrement dit une alimentation des nappes alluviales) est toutefois possible vers les horizons alluvionnaires plus perméables, selon le

⁶ Le cas des dépressions topographiques du bassin directement connectées aux grès sous-jacents est à signaler. Du fait de la géométrie de ces structures et des critères de débordement retenus, la cote piézométrique de la nappe des GTI a la possibilité d'augmenter jusqu'à atteindre le seuil de débordement gravitaire de chaque dépression. Cela se traduit dans le calcul par une profondeur qui peut être négative bien que la nappe soit libre.

degré d'imperméabilité des horizons et selon leur répartition dans l'espace. Des fuites⁷ sont possibles à la faveur des faiblesses du terrain (type fracture naturelle ou crevasse d'origine minière par exemple) ou d'autres bouleversements pouvant occasionner un artésianisme avec jaillissement. Au contact entre grès et formations imperméables à l'affleurement, l'activation (ou réactivation) de sources « classiques », ponctuelles ou diffuses, est également possible. Enfin, des débordements latéraux souterrains⁸ de la nappe des GTI en bordure de zone imperméable sont également possibles.

Pour les zones concernées, les trois classes de profondeur cartographiées (voir § 4.1) ne rendent donc pas nécessairement compte de la profondeur à laquelle l'eau sera réellement rencontrée (au sens d'un terrain saturé en eau). Elles renseignent avant tout sur l'état de charge de la nappe en profondeur et sur la nature des désordres qui peut résulter de cet état de charge.

Le tracé intègre une marge de 2 m de profondeur supplémentaire par rapport aux résultats bruts du BRGM (voir § 3.2.1.2a).



Figure 3 – Situation de nappe captive. La charge de pression n'est pas nulle dans le calcul des charges hydrauliques. Le niveau physique de l'eau ne correspond pas à la surface piézométrique de la nappe. De manière générale, des situations d'artésianisme sont possibles (jaillissements). En bordure de domaine alluvial imperméable, des sources peuvent s'activer ou se réactiver et des débordements souterrains sont également possibles. Suivant les caractéristiques des horizons peu perméables, une drainance ascendante (ici non représentée) plus ou moins importante peut se mettre en place

4.2.2.2 Captivité hors domaine alluvial

À l'intérieur du domaine de captivité suspectée de la nappe hors domaine alluvial, la nappe des GTI peut se mettre en charge au sein des grès, sous des strates localement moins perméables du milieu poreux. La profondeur de ces niveaux de possible mise en charge demeurant inconnue, la profondeur physique de l'eau dans le futur ne peut donc être

⁷ Non modélisées.

⁸ Non modélisés.

estimée en l'état actuel de nos connaissances. De ce fait, il nous paraît actuellement difficile d'exclure que l'eau puisse un jour être rencontrée à faible profondeur dans les secteurs cartographiés comme étant soumis au phénomène de remontée de nappe et situés au sein de ces zones de possible captivité. Il est par ailleurs à noter que des fuites⁹ sont possibles à la faveur des faiblesses du terrain (type fracture naturelle ou crevasse d'origine minière par exemple) ou d'autres bouleversements pouvant occasionner un artésianisme avec jaillissement.

Pour les zones concernées¹⁰, les trois classes de profondeur cartographiées (voir § 4.1) ne rendent donc pas nécessairement compte de la profondeur à laquelle l'eau sera réellement rencontrée (au sens d'un terrain saturé en eau). Elles renseignent avant tout sur l'état de charge de la nappe en profondeur et sur la nature des désordres qui peut résulter de cet état de charge.

Le tracé intègre une marge de 2 m de profondeur supplémentaire par rapport aux résultats bruts du BRGM (voir § 3.2.1.2a).

4.3 Situation estimée des nappes alluviales

Annexes concernées : 1.1.1, 1.2.1, 2.1.1 et 2.2.1

Cette situation est similaire à la situation de nappe libre pour la nappe des GTI.

Les nappes alluviales sont toujours libres, c'est-à-dire que les profondeurs de nappe utilisées pour cartographier la situation estimée de la nappe correspondent toujours à la profondeur physique de l'eau souterraine¹¹ (Figure 2).

Pour les zones concernées, les trois classes de profondeur cartographiées (voir § 4.1) peuvent donc être lues directement.

Le tracé intègre une marge de 0,5 m de profondeur supplémentaire par rapport aux résultats bruts du BRGM (voir § 3.2.2.2). On rappelle ici le caractère indicatif du tracé.

Parmi les éléments cartographiés dans les annexes associées aux nappes alluviales, nous pensons que c'est la zone de contact estimée entre la nappe des GTI et la base des alluvions modélisées qui présente le plus d'intérêt dans l'interprétation des prévisions.

⁹ Non modélisées.

¹⁰ Une seule zone, centrée sur la commune de Ham-sous-Varsberg, est concernée dans cette version du modèle. Dans cette zone, la question du comportement de la nappe des GTI sous le domaine alluvial se pose également. Un « double » phénomène de captivité ne peut être exclu en l'état actuel de nos connaissances, dans la mesure où, de part et d'autre du domaine alluvial, nous ne voyons pas d'arguments géologiques permettant d'écarter la continuité du caractère faiblement perméable des strates de grès qui occasionne la mise en charge de la nappe des GTI.

¹¹ Le cas de la dépression transfrontalière du Weihergraben est à signaler. Du fait de la nature affaissée des alluvions en place (considérées comme déconnectées du système actif de la Rosselle) et des critères de débordement retenus, la cote piézométrique de la nappe alluviale a la possibilité d'augmenter jusqu'à atteindre le sommet de la digue de Rosbruck avant que la nappe du Weihergraben ne déborde. Cela se traduit dans le calcul par une profondeur qui peut être négative bien que la nappe soit libre.

5 CONCLUSIONS ET PRECONISATIONS

GEODERIS a établi, avec l'appui du BRGM, un modèle de la nappe des GTI à l'échelle du bassin houiller lorrain. La situation future des nappes rencontrées a été estimée selon deux scénarios, réaliste et durable, définis par les services de l'Etat. Les résultats ont été cartographiés sur l'ensemble du bassin. Les cartes proposées renseignent, (i) au moyen d'isopièzes, sur les cotes piézométriques calculées par le modèle et, (ii) au moyen de classes de profondeur, sur le croisement des situations piézométriques calculées avec la topographie. Ces deux grandeurs sont corrigées de leur précision altimétrique, lorsque cette dernière a pu être évaluée.

Un tableau récapitulatif des incertitudes pesant sur les prévisions et sur les moyens envisageables pour réduire ces incertitudes (Tableau 1) a été proposé en § 3.2.3.

Par ailleurs, les résultats présentés dans notre rapport ne sont pas figés dans le temps ; ils devraient selon nous faire l'objet d'actualisations fréquentes pour tenir compte des nouvelles données disponibles (données piézométriques, géologiques, hydrogéologiques, hydrologiques, etc., en France comme en Allemagne) au fil du temps. Par ailleurs, le calcul spatialisé de la recharge pourrait être consolidé à l'aide d'un schéma plus intégrant (§ 3.2.2c du rapport d'étude 2018 du BRGM). Compte tenu de la cinétique du phénomène de remontée des nappes et de la situation déjà sensible de certains secteurs, nous proposons que les modèles géologique et hydrodynamique, ainsi que les cartes ici présentées, soient mis à jour tous les trois ans, ceci sous réserve d'avoir collecté suffisamment de données utiles pour justifier une telle opération.

Concernant le modèle en tant que tel, pour s'assurer de la traçabilité et de l'intégrité des résultats ultérieurs, nous suggérons qu'une seule et unique version de l'outil soit mise à jour dans le futur et que toute modification du modèle envisagée dans le périmètre d'étude ne puisse se faire, *a minima* sans nous avoir consulté, idéalement sans notre intermédiaire. À défaut, nous ne pourrons nous engager sur la qualité des résultats produits dans le futur et sur la continuité de l'approche retenue depuis le début des travaux relatifs à la problématique de remontée de nappe.

Dans le cadre de l'amélioration des prévisions, le suivi piézométrique de la nappe des GTI et des nappes alluviales devrait être renforcé dans tout le bassin. Une réflexion ciblée sur l'évolution temporelle du phénomène va être engagée par GEODERIS dès 2018. Ce travail devrait notamment permettre de préciser, par ordre de priorité, les zones sensibles à venir, dans lesquelles un suivi de l'évolution de la situation nécessiterait d'être assuré ou amélioré.

En complément des mises à jour du modèle et pour autant qu'elles soient jugées pertinentes, des simulations-tests (*i.e.* analyse de sensibilité) pourraient être réalisées sur certains tronçons de faille afin de préciser les conséquences possibles, sur les résultats, des incertitudes afférentes à ces structures géologiques.

Dans les secteurs où l'amplitude prévue de la remontée de la nappe des GTI apparaît significative, dès lors que la situation observée de ladite nappe aura suffisamment évolué, nous préconisons de réaliser une étude d'hydrosystème, telle que celle actuellement conduite sur la commune de Creutzwald. Dans ce cadre, une densification du réseau de suivi piézométrique, des essais de pompage, des jaugeages des cours d'eau, des analyses chimiques, des diagraphies de forages, des investigations géologiques / géophysiques pourraient être réalisés, autant que de besoin, dans le but de mieux appréhender les spécificités hydrauliques du secteur en question (failles géologiques, plans d'eau, crevasses, etc.) et donc de permettre une gestion optimisée des actions visant à limiter les conséquences de la remontée des nappes.

Le plus tôt possible, nous préconisons de mettre en place un réseau (dense) de suivi du débit des cours d'eau du bassin, afin de mieux caractériser les échanges entre rivières et nappes. Cela présentera d'autant plus d'intérêt que le modèle actuel n'a pas pour vocation à rendre compte du comportement des exutoires (sources, points de réalimentation des nappes alluviales) de la nappe des GTI qui pourraient s'activer dans le futur.

Il est à noter qu'une analyse bibliographique et comparative des actions envisageables pour limiter les conséquences de la remontée des nappes a été engagée en 2017 et se poursuit en 2018. Les conclusions produites seront d'ordre général. Par la suite, et sur la base de ces premières conclusions, des études spécifiques pourraient être engagées en fonction des besoins et à l'initiative des instances décisionnelles.

6 BIBLIOGRAPHIE

- [1] Syndicat Mixte de Cohérence du Val de Rosselle. Etude pour l'élaboration de l'inventaire des zones humides sur le périmètre du SCoT du Val de Rosselle et du SAGE du Bassin Houiller. 117 p., ASCONIT Consultants (auteurs inconnus), 2012.
- [2] GEODERIS. Zones soumises à la remontée de nappe dans le bassin houiller lorrain (57), secteur ouest. Note d'accompagnement. Rapport GEODERIS E2015/075DE, 2015.
- [3] GEODERIS. Actualisation de la cartographie des zones soumises à la remontée de la nappe dans le bassin houiller lorrain (57), secteur ouest. Note de synthèse destinée aux services de l'Etat et aux communes. Rapport GEODERIS E2015/097DE, 2015.
- [4] GEODERIS. Actualisation de la cartographie des zones soumises à la remontée de la nappe dans le bassin houiller lorrain (57), secteur ouest. Note de synthèse destinée aux services de l'Etat. Rapport GEODERIS E2015/098DE, 2015.
- [5] BRGM. Evaluation des zones à risque lié à la remontée de nappe consécutive à la baisse des prélèvements d'eau dans le bassin houiller lorrain, secteur de La Houve. Rapport BRGM/RP-64573-FR, 2015.
- [6] BRGM. Evaluation des zones soumises au phénomène de remontée des nappes du grès du Trias inférieur et des alluvions sus-jacentes dans le bassin houiller lorrain. Rapport BRGM/RP-67630-FR, 2018.
- [7] BRGM. Modélisation géologique des alluvions du bassin houiller lorrain sur la partie affleurante des grès du Trias inférieur. Rapport BRGM/RP-67633-FR, 2018.
- [8] Charbonnages de France. Mémoire d'arrêt des travaux miniers de Dalem, Berviller, La Houve [...]. Annexe 3.2.a, rapport ANTEA A31516/A, 2005.
- [9] Charbonnages de France. Mémoire d'arrêt des travaux miniers de la concession de Dalem, Berviller, La Houve [...]. Annexe 3.2.b, rapport ANTEA A33301/A, 2005.

7 LISTE DES ANNEXES

Annexe 1 : Situation estimée des nappes selon le scénario réaliste			
Annexe 1.1 (Moyennes Eaux)	Annexe 1.1.1 (a, b et c)	Nappes alluviales dans les secteurs a, b et c du bassin	
	Annexe 1.1.2 (a, b et c)	Nappe des GTI dans les secteurs a, b et c du bassin	
Annexe 1.2 (Hautes Eaux)	Annexe 1.2.1 (a, b et c)	Nappes alluviales dans les secteurs a, b et c du bassin	
	Annexe 1.2.2 (a, b et c)	Nappe des GTI dans les secteurs a, b et c du bassin	

Annexe 2 : Situation estimée des nappes selon le scénario durable

Annexe 2.1 (Moyennes Eaux)	Annexe 2.1.1 (a, b et c)	Nappes alluviales dans les secteurs a, b et c du bassin
	Annexe 2.1.2 (a, b et c)	Nappe des GTI dans les secteurs a, b et c du bassin
Annexe 2.2	Annexe 2.2.1 (a, b et c)	Nappes alluviales dans les secteurs a, b et c du bassin
(Hautes Eaux)	Annexe 2.2.2 (a, b et c)	Nappe des GTI dans les secteurs a, b et c du bassin

Annexe 3

Rapport BRGM/RP-67630-FR

<u>N.B. 1</u> : les résultats présentés dans ce rapport du BRGM sont associés à l'avantdernière version des simulations existantes. Dans cette version, la piézométrie (donc probablement le dénombrement présenté dans les illustrations 23 et 24 du rapport) est légèrement surestimée dans le secteur du centre-ville de Merten, en raison d'une interdiction, à présent non justifiée, du débordement de la nappe des GTI en bordure de nappe alluviale. Les corrections nécessaires ont été introduites dans le modèle et la dernière version des simulations qui en découle a été prise en compte dans la présente synthèse.

<u>N.B. 2</u> : le tableau concernant le « Choix des caractéristiques hydrogéologiques des failles » de l'annexe 4 de ce rapport du BRGM a été modifié par GEODERIS (déplacement d'astérisque entre les deux failles du Grand dérangement).

Annexe 4

Rapport BRGM/RP-67633-FR

<u>N.B.</u> : la figure 21 de ce rapport du BRGM a été modifiée par GEODERIS (modification de la zone libre de la nappe des GTI).

<u>Annexe 1</u>

Situation estimée des nappes selon le scénario réaliste

Hors texte























- A	
Think the second second	
nte ontaine	
	Carrière et a 13 14 14 14 14 14 14 14 14 14 14 14 14 14
KSZ	
For e	
desteanne	
210	
	Tongelberg
	Kalschir 285
	207 Coste corra 205 Ferme de 1207
	218 ^t Leinmue III. Binc Binc
	Chapelle St ombert 230 Heckelsberg
Nellering	Wolfesburnert 333
	Witz 235 277 5 + Chen out
	Wirmerswitz Simsesmertel
hlag	are destellering 328.3 Billion and a second a second and a second
324 Steilberg	Ruchemodd
307 +	272 Die srech
287	Breitlang 200 Broitlang 200 Broitlang 200 Broitlang 200 Broitlang 200 Broitlang 200 Broitlang 200 Broitlang
	278 2.8 Macheren 307 311 311 292
ALAN STREET	Zones soumises à la remontée des nappes dans le bassin houiller lorrain (57) - ANNEXE 1.2.2.b
	Situation estimée de la nappe des grès du Trias inférieur
Maison Forestière de Macheren	selon un scénario réaliste (en hautes eaux)
	SECTEUR DE SAINT-AVOLD
	Nappe affleurante (jusqu'à 0,5 m de profondeur)
- H	Nappe sub-affleurante (de 0,5 à 3 m de profondeur)
270	 Cote piézométrique calculée (m NGF)
FOR	<u>Géologie - Hydrogéologie</u>
202	 Halles suspectees de jouer un röle hydrogéologique Alluvions retenues dans le modèle hydrodynamique
	Limite d'affleurement des GTI (modèle)
63 Erch	 Domaine de captivité suspectée de la nappe (en domaine alluvial) Domaine de captivité suspectée de la nappe (hors domaine alluvial)
	Travaux miniers (charbon)
ey weller word	Enveloppe des travaux souterrains
Leywei	Limites administratives Limites communales
5	Fond cartographique : Scan 25 (© IGN)



<u>Annexe 2</u>

Situation estimée des nappes selon le scénario durable

Hors texte










Λ		216
\square	208 Cite Restand	
125	Carrière 13 4.5 CT 213	
K		
2.0		
T		
K - A		
238		
Jeanne w	Becret 15	
AUA S		
A-1- 21	218	
5 7		
Coll.		sos de
223	V 2 Bren Congenberg	Pomp.
**************************************		210 Helmes
		211
N.	Kalschir 285	
A		
	287 Hon pour S 259 295 295 295 295 295 295	
A STREET		246
	Breing-Tes-5	
	Chorelle Baso Gross ewanter He	Heckelsberg
	St-Lamber Will Hochibern Sielberg	
III CENTE 230		Wolksburnert
W W	Witz Buterheck	305
I	235 277 Eben 348 345	A total
TE		Simisesmerter 215
Ferme	ne de lellering	
	Côte de Hellennig	
4 Steilberg		Griesta
307	Ruchemiald	N SX
1 D	272 Diessrech	
Homburg	rgerweg Breitlang 29	berg pato
287	Poste at 1	308 Bec
100	Macheren 307	292
	Zones soumises à la remontée des napp	es
	dans le bassin houiller lorrain (57) - ANNEXE	2.1.2.b
-		
	Situation estimee de la nappe des gres du Trias selon un scénario durable (en movennes é	s inferieur eaux)
Forestière	Scion an Scenario darable (en moyennes e	Juury
	SECTEUR DE SAINT-AVOLD	
	Situation estimée	
学大学	Nappe affleurante (jusqu'à 0,5 m de profondeur)	
290 9	Nappe sub-affleurante (de 0,5 à 3 m de profondeur)	
K-A	Nappe plus profonde (de 3 à 5 m de profondeur)	
20	Cote piezometrique calculee (m NGF)	
F.O.Y	<u>Géologie - Hydrogéologie</u>	
282	——— Failles suspectées de jouer un rôle hydrogéologique	
215	Alluvions retenues dans le modèle hydrodynamique	
(pe)	Limite d'affleurement des GTI (modèle)	
A	Domaine de captivité suspectée de la nappe (en dom	naine alluvial)
Ster	Domaine de captivité suspectée de la nanne (hors de	omaine alluvial)
	Travaux miniers (charbon)	
rwald		
	Enveloppe des travaux souterrains	
A	Limites administratives	
Leywei	Limites communales	
He	Fond cartographique : Scan 25 (© IGN)	
Junea		





Fond cartographique : Scan 25 (© IGN)











	226	
5		
	\mathcal{H}	
cantiere Barrois		
e A a a a a a a a a a a a a a a a a a a		250 231
		Ha III
		201111111111111111111111111111111111111
	215	
For		202
de Jammerd Ras Cité Berenbe		
219		
205 223		
		20 BB2 216 2255
224 1 - 224 TEAMER	Bistein	and a second
	304	Fondelberg
	220 Kalxchir 285	
	Hi215 (1997) 282 259	erborn 295 L
		Perme de Betting 0.9 E Betting-les-St-wold
	Grossewann	Bine i 355 A Herel 3 Heckelsberg
Hellong	Hochborn Siel	berg 361
THE AND A		Butterbreck 22
235	277. + 275. Eben 348	Simsesmertel
renne de tellering		switz
lag	Côte de Nellering	A PART AND
324 Steilberg	wend b	310 0.6 C
* 307 +	Diensrech	Guenviller
Homburgerweg	Breitlang 296	Galgenberg 0 910 Bed
278 Ma	2.8 cheren 307	Poste gaz 3N Lango

Zones soumises à la remontée des nappes dans le bassin houiller lorrain (57) - ANNEXE 2.2.2.b

Situation estimée de la nappe des grès du Trias inférieur selon un scénario durable (en hautes eaux)

SECTEUR DE SAINT-AVOLD

Situation estimée			
	Nappe affleurante (jusqu'à 0,5 m de profondeur)		
	Nappe sub-affleurante (de 0,5 à 3 m de profondeur)		
	Nappe plus profonde (de 3 à 5 m de profondeur)		
	Cote piézométrique calculée (m NGF)		
<u>Géolo</u>	gie - Hydrogéologie		
	Failles suspectées de jouer un rôle hydrogéologique		
	Alluvions retenues dans le modèle hydrodynamique		
	Limite d'affleurement des GTI (modèle)		
$\times\!\!\times\!\!\times$	Domaine de captivité suspectée de la nappe (en domaine alluvial)		
$\times\!\!\times\!\!\times$	Domaine de captivité suspectée de la nappe (hors domaine alluvial)		
Travau	Travaux miniers (charbon)		
\square	Enveloppe des travaux souterrains		
Limite	Limites administratives		
	Limites communales		

Fond cartographique : Scan 25 (© IGN)





<u>Annexe 3</u>

Rapport BRGM/RP-67630-FR

Hors texte

Accès réservé





Accès réservé

Evaluation des zones soumises au phénomène de remontée des nappes du grès du Trias inférieur et des alluvions sus-jacentes dans le bassin houiller lorrain

Rapport final

BRGM/RP-67630-FR Mars 2018

Quentin Guillemoto, Géraldine Picot-Colbeaux, Laurent Vaute

Vérificateur :	
Nom : Dominique Thiéry	
Date : 15 mars 2018	
Signature :	
T	

Approbateur : Nom : Gaël Bellenfant Date : 30 mars 2018 11/2 le

Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2000.



Avertissement

Ce rapport est adressé en communication exclusive à GEODERIS, en 3 exemplaires (dont 1 non relié).

Le demandeur assure lui-même la diffusion des exemplaires de ce tirage initial.

Le BRGM ne saurait être tenu comme responsable de la divulgation du contenu de ce rapport à un tiers qui ne soit pas de son fait, et, des éventuelles conséquences pouvant en résulter.

Mots clés : modèle hydrodynamique, modèle MARTHE, mine abandonnée, mine souterraine, réservoir minier, bassin houiller lorrain, nappe des grès du Trias inférieur, alluvions, remontée de nappe, Moselle, Lorraine, Grand Est.

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

Guillemoto Q., Picot-Colbeaux G., Vaute L., (2018) – Evaluation des zones soumises au phénomène de remontée des nappes du grès du Trias inférieur et des alluvions sus-jacentes dans le bassin houiller lorrain. Rapport BRGM/RP-67630-FR, 71p., 24 ill., 5 ann.

© BRGM, 2018, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

La nappe d'eau souterraine des grès du Trias inférieur (GTI) est en grande partie libre dans le bassin houiller lorrain (Moselle Est). Avant son peuplement et son développement économique et industriel, ce secteur de nappe libre était largement recouvert de zones humides ou marécageuses.

Au cours des 19^{ème} et 20^{ème} siècles, les eaux souterraines y ont été prélevées par l'activité minière, les industries et les collectivités, contribuant ainsi pendant des décennies à fortement rabattre l'aquifère sur une grande partie du bassin houiller lorrain et plus largement sur l'ensemble du département de la Moselle.

Sur les secteurs du bassin houiller lorrain dénommés Ouest, Centre et Est concernés par l'exploitation minière, le Permien, constituant le soubassement de l'aquifère des GTI et pouvant être considéré comme écran imperméable lorsqu'il est intègre, a subi une fracturation consécutive à l'exploitation, ce qui a induit des écoulements vers les anciens travaux souterrains.

La fin de l'activité minière (2004) a conduit à l'arrêt des pompages d'exhaure (juin 2006 pour les secteurs Centre et Est, décembre 2006 pour le secteur Ouest) et à l'ennoyage des vides miniers résiduels (fin 2008 pour le secteur Ouest et fin 2012 pour l'essentiel des travaux souterrains des secteurs Centre et Est). Le phénomène de reconstitution de la nappe qui en a résulté a été annoncé et étudié depuis les années 2000. D'après ces études, il devait durer plusieurs décennies, amenant la nappe des GTI à un nouvel état d'équilibre proche de la surface dans les principaux fonds de vallée (Bisten et Rosselle moyenne et aval).

Notamment, entre 2003 et 2005, Charbonnages de France (CdF), dans le cadre de la réalisation de ses Dossiers d'Arrêt Définitif de Travaux miniers (DADT), a fait réaliser au bureau d'études ANTEA des prévisions de remontée de la nappe, et a identifié les zones où celle-ci se situerait à moins de 3 m du sol. Néanmoins, ANTEA avait précisé dans plusieurs de ses études que ses prévisions étaient à considérer avec précaution car elles pouvaient varier de manière significative, notamment selon les caractéristiques réelles de l'aquifère (porosité surtout), mais également selon l'évolution réelle des prélèvements dans la nappe des GTI lors des prochaines décennies, en particulier si les pompages de tiers (AEP, AEI, *etc.*) venaient à diminuer.

Il s'avère aujourd'hui que la désindustrialisation du bassin houiller lorrain à partir des années 1980-1990 et la transition vers des activités plus économes en eau constatée depuis plusieurs années jouent un rôle important dans la reconstitution de la nappe des GTI.

Ainsi, (i) consécutivement à la baisse des prélèvements d'eau à destination des collectivités et des industriels constatée notamment dans la zone des GTI affleurants sur la période 2008-2011, (ii) compte tenu de l'état d'avancement de la reconstitution dans le secteur Ouest et (iii) considérant les infiltrations d'eau signalées dans certains sous-sols d'immeubles de ce secteur en 2011-2012, le groupement d'intérêt public GEODERIS a été saisi par la Division Risques Miniers et Sous-Sol (DRMSS) de la Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement (DREAL) Grand Est afin d'actualiser les prévisions faites à l'époque de CdF.

Priorité a été donnée au secteur Ouest du bassin houiller lorrain pour les raisons précédemment évoquées. GEODERIS a demandé au Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) de réaliser ce travail, qui a fait l'objet du rapport BRGM RP-64573-FR (Vaute et *al.,* 2015) puis des rapports GEODERIS E2015-075DE (Reichart, 2015a), E2015-097DE (Reichart, 2015b) et E2015-098DE (Reichart, 2015c). Les prévisions ont été réalisées selon différents scénarios et les résultats des simulations ont été croisés avec la cartographie des zones bâties selon la BD-TOPO de l'Institut Géographique National (IGN).

A la suite de ce premier travail, GEODERIS a demandé au BRGM de réaliser des prévisions de remontée de la nappe des GTI sur l'ensemble du bassin houiller lorrain, en considérant des scénarios analogues à ceux définis pour le secteur Ouest en 2015 : un scénario dit « réaliste » mis à jour des données et prévisions de prélèvement réalisés dans la nappe des GTI et un scénario dit « sécuritaire¹ ». Le présent rapport présente le travail entrepris et les résultats obtenus.

Dans la première partie du rapport, le réservoir aquifère des grès du Trias inférieur en Lorraine et le modèle régional développé par le BRGM, qui en est la représentation numérique, sont présentés. Le modèle hydrogéologique régional de la nappe des GTI concerne la nappe sur toute sa partie captive et sur sa partie libre dans le bassin houiller, ainsi que quelques petits secteurs de nappe libre indispensables à la modélisation.

Dans la deuxième partie du rapport, on détaille la méthodologie de révision du modèle régional, réalisée dans le but d'affiner les prévisions de remontée de la nappe dans l'ensemble du bassin houiller lorrain, suite à l'ennoyage des mines et à la baisse des prélèvements d'eau constatés dans le bassin. Le travail réalisé précédemment sur le secteur Ouest du bassin houiller a été totalement repris et mis en cohérence avec la méthodologie de révision mise au point pour les secteurs Centre et Est dans le cadre de la présente étude.

Pour pouvoir répondre aux enjeux de la remontée de la nappe dans le bassin houiller, le modèle régional a dû être modifié sur une superficie qui déborde largement de la superficie des travaux miniers, pour des raisons de cohérence géologique et hydrogéologique : le sous-maillage gigogne du modèle version 2018 englobe le territoire du Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SAGE) du bassin houiller, ainsi qu'en Allemagne les affleurements des GTI au sud de la rivière Sarre.

¹ Anciennement appelé « pessimiste » dans les rapports de 2015

La structure géologique du modèle numérique élaboré à l'aide du logiciel MARTHE² du BRGM dans le bassin houiller a été totalement revue dans l'emprise de ce sous-maillage gigogne, en débordant suffisamment du sous-maillage pour assurer une bonne transition avec le modèle régional. Dans le but d'améliorer fortement la fiabilité et la précision des prévisions de remontée de nappe, des améliorations très importantes ont été apportées :

- Modélisation beaucoup plus précise des surfaces géologiques du toit des GTI sous couverture, du toit du Permien et du toit du Houiller.
- Modélisation très précise de la surface du sol des GTI à l'affleurement par des modèles numériques de terrain (MNT) LIDAR³ au pas de 5 m en France et en Allemagne.
- Prise en compte des affaissements miniers et correction du MNT LIDAR français au pas de 5 m, chaque année entre 1977 et 2005.
- Correction des niveaux piézométriques observés à l'aide des MNT corrigés des affaissements, chaque année entre 1977 et 2005.
- Correction de l'altitude et du tracé des cours d'eau, chaque année entre 1977 et 2005, de manière à mettre en cohérence les cours d'eau et la topographie issue des MNT LIDAR.
- Modélisation de la couche alluvionnaire sus-jacente à l'aquifère des GTI.
- Modélisation des dépressions topographiques telles que carrières et gravières.
- Nouveau calcul spatialisé de l'infiltration, dans le but de ne plus faire de cette grandeur un paramètre de calibration du modèle.
- Modélisation globale du débit de drainage de la nappe des GTI par les cours d'eau du bassin houiller, à l'aide d'un modèle hydrologique à réservoirs (GARDÉNIA⁴). Ce modèle global est réalisé en parallèle du modèle hydrogéologique MARTHE est n'y est actuellement pas inclus. Il est cependant intéressant de comparer les débits des cours d'eau calculés par ce modèle global GARDÉNIA à ceux déduits des débordements de fond de vallées calculés par MARTHE, le débit calculé par le modèle global GARDENIA servant alors de référence.

Dans le cadre de la présente l'étude, le fichier de données et le modèle MARTHE ont été mis à jour avec les nouvelles données acquises jusqu'en 2016. Dans le bassin houiller, cette mise à jour a concerné 594 points en France et 97 points en Allemagne.

² « Modélisation d'Aquifères avec un maillage Rectangulaire, Transport et HydrodynamiquE », <u>http://marthe.brgm.fr»</u> (Thiéry 2015).

³ En anglais : « *Light Detection and ranging* » *ou « Laser detection and ranging* ». En français : « télédétection par laser », « levé laser » ou « lasergrammétrie ».

⁴ « Modèle Global à Réservoirs pour la simulation de Débits et de Niveaux Aquifères », <u>http://gardenia.brgm.fr</u> (Thiéry, 2014)

Les résultats de calibration du modèle sont ensuite présentés dans la troisième partie du rapport. En raison de la complexité du système hydrogéologique du bassin houiller, la calibration des paramètres hydrodynamiques classiques (notamment conductivité hydraulique⁵, coefficients d'emmagasinement libre et captif) n'a pas suffi à atteindre un ajustement suffisant des très nombreuses observations disponibles. Il est nécessaire de prendre en compte d'autres paramètres qui s'avèrent extrêmement importants pour les secteurs Centre et Est du bassin houiller et qui allongent considérablement la durée nécessaire à la calibration, car de très nombreux tests supplémentaires sont nécessaires :

- Situation initiale de la nappe lors du démarrage de la simulation.
- Rôle hydrogéologique de chacune des failles majeures, très nombreuses dans le bassin houiller.
- Position et débit des points d'échange nappe-mine dans les secteurs Centre et Est.
- Localisation, débit et sens des échanges nappe-rivière.
- Surplus d'infiltration en pied de côte de la nappe du Muschelkalk (drainance, infiltration du ruissellement).
- Infiltration des bassins d'infiltration industriels dans le secteur de L'Hôpital pour certaines périodes.
- Représentativité de chaque mesure piézométrique.

Les tendances d'évolution sont bien reproduites sur la plupart des points de mesure, la moyenne des erreurs moyennes quadratiques (RMSE) et la moyenne des erreurs moyennes quadratiques normalisées (RMSEN) sur les mesures piézométriques observées et calculées sont respectivement de 3,7 m et de 56 % pour le bassin houiller, sur toute la période de calibration et pour toutes les mesures piézométriques disponibles.

De plus, les tests de calibration réalisés ont montré que contrairement à ce qui était supposé, et malgré le fait que le secteur Ouest est isolé des secteurs Centre et Est par la faille imperméable de Hombourg-Longeville, les modifications très importantes du maillage et la prise en compte des nouvelles données plus précises (MNT LIDAR, affaissements, cours d'eau, géologie, recharge, failles, etc.) imposaient une calibration simultanée de l'ensemble des secteurs du bassin houiller.

Dans la dernière partie du rapport, sont présentés les résultats de deux simulations prévisionnelles d'évolution des prélèvements (dits « sécuritaire » et « réaliste ») intégrant un scénario climatique avec deux périodes successives de recharge (dites « hautes eaux » et « moyennes eaux »). Des cartes précisent les zones où la première nappe rencontrée sera à moins de 3 m du sol (d'après la piézométrie brute) et permettent d'identifier les mailles soumises à la remontée de la première nappe rencontrée dans lesquelles se trouvent des bâtiments.

⁵ Par convention pour cette étude hydrogéologique, la « conductivité hydraulique » (perméabilité d'un milieu poreux à l'eau) sera appelée « perméabilité » dans la suite du présent rapport.

Sommaire

1.	Introduction	10
2.	Le modèle régional de la nappe des GTI en Lorraine (Annexe 1)	13
	2.1. LE RESERVOIR AQUIFERE DES GTI	13
	2.2. REGIME DE LA NAPPE DES GTI	14
	2.3. LE BASSIN HOUILLER LORRAIN	15
	2.4. CONSEQUENCES DE L'EXPLOITATION DE LA NAPPE DES GTI	16
3.	Méthodologie de révision du modèle régional de la nappe des GTI dans le bassin houiller	19
	 3.1. DESCRIPTION DES ELEMENTS CONSTITUTIFS DU MODELE REGIONAL (ANNEXE 2)	19 3 19 23 224 30 JR 31 31 31
A	 3.3. MODELE CONCEPTUEL D'ECOULEMENT DANS LE SECTEUR DU BASSIN HOUILLER	35 35 39
4.		43
	4.1. METHODOLOGIE DE CALIBRATION	43
	4.2. PARAMETRES DE CALIBRATION	44
	4.3. DIFFICULTES PERSISTANTES ET INCERTITUDES	46
	4.4. RESULTATS DE CALIBRATION (ANNEXE 4)	50
5.	Simulations prévisionnelles	55

	5.1. DEFINITIONS DES SCENARIOS DE SIMULATION	55
	5.1.1.Scénarios « sécuritaire » et « réaliste » d'évolution des prélèvements dans la nappe des GTI et dans le réservoir minier	55
	5.1.2. Scénarios climatiques	57
	5.2. RESULTATS DES SIMULATIONS PREVISIONNELLES (ANNEXE 5)	58
6.	Conclusion	65
7.	Bibliographie	69

Liste des illustrations

Illustration 1 : Cadre géographique de l'étude (Vaute et al., 2015)	10
Illustration 2 : Réseau hydrographique du bassin houiller	12
Illustration 3 : Répartition des prélèvements effectués dans l'intégralité de la partie captive de la nappe des GTI et dans sa partie libre au droit du bassin houiller lorrain en 2010	a 17
Illustration 4 : Evolution de 1968 à 2010 du total des prélèvements effectués dans l'intégralité de la partie captive de la nappe des GTI, et dans sa partie libre au droit du bassin houiller lorrain	ı 17
Illustration 5 : Evolution de 1990 à 2012 du total des prélèvements effectués dans le bassin houiller sous forme de pompages dans la nappe des GTI pour l'alimentation en eau potable (AEP) ou industrielle (AEI), le soutien d'étiage (SE) et les pompages de dépollution (DEP) ; ainsi que sous forme d'exhaures non valorisées ou valorisées pour l'AEP ou l'AEI	18
Illustration 6 : Tableau de synthèse des conditions aux limites du modèle régional de la nappe des GTI version 2005	, 21
Illustration 7 : Carte hydrogéologique de la nappe des GTI en Lorraine dans le bassin houiller et conditions aux limites du modèle régional avant sa révision dans le cadre de la présente étude (Vaute et al., 2007)	22
Illustration 8 : Carte des épaisseurs des alluvions (GEODERIS d'après Cartannaz, 2018)	27
Illustration 9 : Carte du caractère imperméables des alluvions (GEODERIS d'après Cartannaz, 2018)	, 27
Illustration 10 : Dépressions topographiques telles que carrières et gravières prises en compte dans le modèle et altitudes de débordement associées	29
Illustration 11 : Débits des cours d'eau observés et simulés à la station A9612010 de la Bisten Creutzwald.	à 34
Illustration 12 : Secteur de mise en charge de la nappe des GTI sous horizons gréseux moins perméables au sein des GTI, considéré dans le modèle hydrogéologique (débordement non autorisé)	36
Illustration 13 : Synthèse des paramètres hydrodynamiques retenus à l'issue de la calibration du modèle hydrodynamique	44
Illustration 14 : Qualité de calibration (médiane des valeurs absolues des écarts entre piézométrie mesurée et simulée, en mètres) entre 1976 et 2016 sur l'ensemble du modèle régional (544 points de mesures piézométriques de la nappe des GTI-Alluvions-Mines)	u 51
Illustration 15 : Qualité de calibration (médiane des valeurs absolues des écarts entre piézométrie mesurée et simulée, en mètres) entre 1976 et 2016 sur le maillage	

gigogne du bassin houiller (424 points de mesures piézométriques de la nappe des GTI) 51 Illustration 16 : Qualité de calibration entre 1976 et 2016 sur le maillage gigogne du bassin houiller, (424 points de mesures piézométriques de la nappe des GTI) ; RMSE : la racine carrée de l'écart quadratique moyen (Root Mean Square Error) ; RMSEN : la racine carrée de l'écart quadratique moyen Normalisé 53 Illustration 17 : Bilans hydrodynamiques annuels calculés sur la période de calibration 1976-2016 pour l'ensemble du domaine (alluvions, GTI et mines) 54 Illustration 18 : Cotes retenues pour la mise en activité des pompages miniers et de rabattement de la nappe des GTI dans le modèle pour le scénario « réaliste » (équivalent à des cotes de débordement). 56 Illustration 19 : variation de recharge annuelle du scénario climatique défini pour le calcul des simulations prévisionnelles sur le Bassin Houiller (période de calibration 1976-2016 avec les données de recharge annuelle connues jusqu'à fin 2013 ; période de « moyennes eaux » 2017-2199 ; période de « hautes eaux » 2200-2237) 58 Illustration 20 : Exemple de courbes piézométriques simulées par les deux scénarios d'évolution des prélèvements (« réaliste » et « sécuritaire ») avec le scénario climatique intégrant successivement trois parties : recharge annuelle de la période de calibration (période de 1976-2016 avec les données de recharge annuelle connues jusqu'en 2013), recharge de« moyennes eaux » (recharge annuelle moyenne de 2017 à l'année fictive 2199) et recharge « hautes eaux » (recharge annuelle de 1976-2013 de l'année fictive 2200 à l'année fictive 2237) 59 Illustration 21 : Bilans hydrodynamiques annuels pour le scénario « sécuritaire » et pour les 3 périodes climatiques simulées successivement 60 Illustration 22 : Bilans hydrodynamiques annuels pour le scénario « réaliste » et pour les 3 périodes climatiques simulées successivement 61 Illustration 23 : Nombre de bâtiments présents dans les mailles soumises à une remontée de nappe à moins de 3 m de profondeur, par commune, pour le scénario « réaliste » et pour les 3 périodes climatiques simulées successivement (avant impact de l'ennoyage : situation 2008, situation de « moyennes eaux » et situation de « hautes eaux ») 62 Illustration 24 : Nombre de bâtiments présents dans les mailles soumises à une remontée de nappe à moins de 3 m de profondeur, par commune, pour le scénario « sécuritaire » et pour les 3 périodes climatiques simulées successivement (avant impact de l'ennoyage : situation 2008, situation de « moyennes eaux » et situation de « hautes eaux ») 63

Liste des annexes

- Annexe 1 : Cartes et coupes hydrogéologiques d'information générale
- Annexe 2 : Données géologiques du modèle MARTHE du bassin houiller
- Annexe 3 : Données hydrogéologiques et hydrologiques du modèle MARTHE du bassin houiller
- Annexe 4 : Résultats de la calibration du modèle MARTHE du bassin houiller et de sa périphérie
- Annexe 5 : Résultats des simulations prévisionnelles

1. Introduction

La nappe d'eau souterraine des grès du Trias inférieur (GTI) est en grande partie libre dans le bassin houiller lorrain (Moselle Est). L'Illustration 1 situe le cadre de l'étude.

Avant son peuplement et son développement économique et industriel, ce secteur de nappe libre était largement recouvert de zones humides ou marécageuses.

Au cours des 19^{ème} et 20^{ème} siècles, les eaux souterraines y ont été prélevées par l'activité minière, les industries et les collectivités, contribuant ainsi pendant des décennies à fortement rabattre l'aquifère sur une grande partie du bassin houiller lorrain et plus largement sur l'ensemble du département de la Moselle.



Illustration 1 : Cadre géographique de l'étude (Vaute et al., 2015)

Sur les secteurs du bassin houiller lorrain dénommés Ouest, Centre et Est concernés par l'exploitation minière, le Permien, constituant le soubassement de l'aquifère des GTI et pouvant être considéré comme écran imperméable lorsqu'il est intègre, a subi une fracturation consécutive à l'exploitation, ce qui a induit des écoulements vers les anciens travaux souterrains.

La fin de l'activité minière (2004) a conduit à l'arrêt des exhaures (juin 2006 pour les secteurs Centre et Est, décembre 2006 pour le secteur Ouest) et à l'ennoyage des vides miniers résiduels (fin 2008 pour le secteur Ouest et fin 2012 pour l'essentiel des travaux souterrains des secteurs Centre et Est). Le phénomène de reconstitution de la nappe qui en a résulté a été annoncé et étudié depuis les années 2000. D'après ces études, il devait durer plusieurs décennies, amenant la nappe des GTI à un nouvel état d'équilibre proche de la surface dans les principaux fonds de vallée (Bisten et Rosselle moyenne et aval comme le montre l'Illustration 2).

Notamment, entre 2003 et 2005, Charbonnages de France (CdF), dans le cadre de la réalisation de ses Dossiers d'Arrêt Définitif de Travaux miniers (DADT), a fait réaliser au bureau d'études ANTEA des prévisions de remontée de la nappe, et a identifié les zones où celle-ci se situerait à moins de 3 m du sol. Néanmoins, ANTEA avait précisé dans plusieurs de ses études que ses prévisions étaient à considérer avec précaution car elles pouvaient varier de manière significative, notamment selon les caractéristiques réelles de l'aquifère (porosité surtout), mais également selon l'évolution réelle des prélèvements dans la nappe des GTI lors des prochaines décennies, en particulier si les pompages de tiers (AEP, AEI, *etc.*) venaient à diminuer.

Il s'avère aujourd'hui que la désindustrialisation du bassin houiller lorrain à partir des années 1980-1990 et la transition vers des activités plus économes en eau constatée depuis plusieurs années jouent un rôle important dans la reconstitution de la nappe des GTI.

Ainsi, (i) consécutivement à la baisse des prélèvements d'eau à destination des collectivités et des industriels constatée notamment dans la zone des GTI affleurants sur la période 2008-2011, (ii) compte tenu de l'état d'avancement de la reconstitution dans le secteur Ouest et (iii) considérant les infiltrations d'eau signalées dans certains sous-sols d'immeubles en 2011-2012 de ce secteur, le groupement d'intérêt public GEODERIS a été saisi par la Division Risques Miniers et Sous-Sol (DRMSS) de la Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement (DREAL) Grand Est afin d'actualiser les prévisions faites à l'époque de CdF.

Priorité a été donnée au secteur Ouest du bassin houiller lorrain pour les raisons précédemment évoquées. GEODERIS a demandé au Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) de réaliser ce travail, qui a fait l'objet du rapport BRGM RP-64573-FR (Vaute et *al.*, 2015) puis des rapports GEODERIS E2015-075DE (Reichart, 2015a), E2015-097DE (Reichart, 2015b) et E2015-098DE (Reichart, 2015c). Les prévisions ont été réalisées selon différents scénarios et les résultats des simulations ont été croisés avec la cartographie des zones bâties selon la BD-TOPO de l'Institut Géographique National (IGN).

A la suite de ce premier travail, GEODERIS a demandé au BRGM de réaliser des prévisions de remontée de la nappe des GTI sur l'ensemble du bassin houiller lorrain, en considérant des scénarios analogues à ceux définis pour le secteur Ouest en 2015 : un scénario dit « réaliste » mis à jour des données et prévisions de prélèvement réalisés dans la nappe des GTI et un scénario dit « sécuritaire⁶ ». Le présent rapport présente le travail entrepris et les résultats obtenus.

⁶ Anciennement appelé « pessimiste » dans les rapports de 2015



Illustration 2 : Réseau hydrographique du bassin houiller

2. Le modèle régional de la nappe des GTI en Lorraine (Annexe 1)

En 1995, confrontées au problème de baisse continue des niveaux piézométriques de certains secteurs de la nappe des GTI, la région Lorraine (actuelle région Grand Est), la DIREN Lorraine (actuelle DREAL Grand Est) et l'Agence de l'eau Rhin-Meuse (AERM) ont confié au BRGM la réalisation d'un modèle hydrogéologique de la nappe des GTI. Après plusieurs phases successives de développement et d'amélioration, un modèle opérationnel a vu le jour en 2005 (Vaute *et al.*, 2007). Les données de ce modèle régional ont par la suite été mises à jour en 2010 (Vaute *et al.*, 2013).

Ce modèle hydrogéologique de la nappe des GTI a été développé par le BRGM avec le logiciel MARTHE (Thiéry, 2015). Il couvre la nappe sur toute sa partie captive et sur sa partie libre dans le bassin houiller. Avant sa modification dans le cadre de la présente étude, ce modèle était constitué d'une seule couche représentant toute la formation des GTI et était calibré en régime transitoire sur la période 1976-2010 au pas de temps annuel. Le fonctionnement en régime transitoire est un avantage décisif par rapport à un modèle fonctionnant en régime permanent : la prise en compte du temps dans la modélisation permet en effet de modéliser les variations du volume d'eau stocké dans le milieu souterrain, ce qui contraint beaucoup plus fortement le modèle et améliore donc sa robustesse.

Le texte de ce chapitre présente de manière succincte le réservoir aquifère des GTI et le modèle régional qui le représente numériquement. Les cartes et coupes de l'annexe 1 complètent l'information présentée. Pour plus de détails, le lecteur est renvoyé à la bibliographie.

2.1. LE RESERVOIR AQUIFERE DES GTI

Le réservoir des GTI recouvre une large partie de la région Grand Est. Il est constitué de grès plus ou moins fins, avec quelques passées argileuses dans sa partie supérieure, des passées conglomératiques en son centre et à sa base, et des lentilles d'argile dans sa partie inférieure. Au droit d'un même point géographique, cette hétérogénéité des facies géologiques peut induire l'existence de niveaux piézométriques différents au sein des grès, voire permettre la présence de véritables nappes perchées au sein des grès.

Le substratum imperméable du réservoir est constitué, suivant les secteurs, par les grès argileux permiens ou directement par le socle.

Sur la majeure partie du territoire lorrain, le réservoir est sous recouvrement de terrains imperméables et il est majoritairement captif (Illustration 1). Le toit du réservoir est constitué par les marnes du Muschelkalk moyen et inférieur qui sont situées au-dessus du Grès coquillier.

Au contraire, le long du massif des Vosges et dans le bassin houiller, la nappe est essentiellement libre, c'est-à-dire qu'elle reçoit directement les infiltrations d'eau de pluie, car les grès affleurent.

Notons que le réservoir s'étend aussi largement en Allemagne (*Länder* de Sarre et de Rhénanie-Palatinat), essentiellement en affleurements drainés par les cours d'eau, et sous le Luxembourg, essentiellement en nappe captive drainée par la Moselle vers Trèves. Enfin, les GTI s'étendent sous tout le fossé rhénan, en Forêt Noire, et au-delà en Allemagne, mais ces réservoirs sont indépendants de celui de la Lorraine.

L'épaisseur du réservoir aquifère décroît régulièrement de l'Est vers l'Ouest et le Sud. De plus de 500 m dans le massif des Vosges du Nord, elle est de 200 m vers Toul et Epinal et de 100 m vers Bar-le-Duc et Vittel (*cf.* la coupe du bassin Rhin-Meuse en annexe 1). Son extension occidentale sous le Bassin parisien a été limitée pour les besoins de la modélisation lorsque l'épaisseur des GTI est réduite à quelques mètres.

En Lorraine, le réservoir des GTI est constitué de deux compartiments distincts : une partie sous couverture essentiellement captive, et une partie essentiellement libre. Le modèle régional prend en compte la partie sous couverture du réservoir, ainsi que trois secteurs en partie libre ne pouvant pas être considérés séparément de la partie sous couverture du réservoir : les affleurements dans le bassin houiller (région de Saint-Avold – Forbach), les affleurements de la région de Phalsbourg – Saverne, et une petite partie des affleurements situés au sud de la région de Vittel – Contrexéville (*cf.* la carte hydrogéologique de la nappe des GTI et les conditions aux limites du modèle régional en annexe 1).

2.2. REGIME DE LA NAPPE DES GTI

Les informations données ci-après sont tirées de Vaute *et al.*, 2007. La carte hydrogéologique de la nappe des GTI et des conditions aux limites du modèle régional se trouve en annexe 1 comme précisé précédemment.

Les zones d'alimentation de la nappe des GTI en Lorraine sont constituées par les affleurements des grès dans le massif des Vosges, de Wissembourg à Monthureux-sur-Saône, et dans la région du bassin houiller entre Saint-Avold et Forbach (Babot *et al.*, 1972).

L'alimentation de la nappe captive par les affleurements des grès situés dans le massif des Vosges au sud de Vittel – Contrexéville est un cas particulier : le débit d'alimentation de la nappe captive est limité dans ce secteur en raison de la faible surface d'affleurements disponibles à l'infiltration (85 km²), et surtout en raison de la prépondérance des écoulements souterrains et de surface à contre-pendage du mur de l'aquifère.

La nappe captive des GTI est drainée naturellement par les cours d'eau sur ses limites nord et nord-est, dont la Moselle à Sierck-les-Bains ainsi que la Sarre et ses affluents.

L'état initial non perturbé de la surface piézométrique n'est pas connu, car l'exploitation de la nappe existe depuis le 19^{ème} siècle dans le bassin houiller. D'autre part, la plupart des points d'accès sont des forages d'exploitation, et les mesures sont souvent asynchrones. Enfin, peu de mesures sont rattachées au nivellement général de la France. Il résulte de tout ceci que la surface piézométrique de la nappe ne peut pas être connue très précisément, et parfois seulement à quelques mètres près.

L'écoulement général de la nappe s'effectue du Sud vers le Nord (soit du massif des Vosges vers la Sarre) et du Sud-Ouest vers le Nord-Est (soit de la Meuse vers le nord de la Moselle). À l'échelle de la nappe, le gradient de charge hydraulique varie fortement : il est de l'ordre de 5.10^{-3} à 2.10^{-2} dans la partie libre, suivant le drainage des rivières ou en fonction de l'exhaure, et de l'ordre de 3.10^{-4} à 1.10^{-3} en partie captive.

Dans les secteurs faillés, certains auteurs (Babot *et al.*, 1972) ont fait l'hypothèse que la communication entre les GTI et les calcaires du Muschelkalk sus-jacents était possible. Dans ce cas, il pourrait se développer, selon les secteurs, des échanges d'eau limités d'orientation descendante ou ascendante entre la nappe des GTI et la nappe des calcaires.

En l'absence de données, le phénomène hypothétique d'écoulement ascendant (donc de perte d'eau des GTI vers le Muschelkalk sus-jacent) n'est pas pris en compte dans la modélisation. Dans d'autres secteurs, les écoulements pourraient théoriquement être descendants, avec la possibilité de permettre dans certains secteurs faillés la contamination des eaux peu minéralisées des grès par les eaux parfois fortement minéralisées du Muschelkalk sus-jacent.

Dans le cadre de l'étude d'actualisation du modèle de la nappe des GTI en Lorraine (Vaute *et al.*, 2013), l'hypothèse de drainance descendante a été étudiée pour la partie de la nappe captive située au sud de la faille de Vittel.

Au niveau régional, plusieurs failles importantes avaient un rôle hydrogéologique déjà identifié au commencement de la présente étude (cf. cartes en fin d'annexe 4) : les failles de Longeville-Hombourg (dite aussi faille de Faulquemont), du Grand Dérangement du Siège 2 et de Saint-Nicolas dans le bassin houiller, et la faille de Vittel au nord de Vittel – Contrexéville. Ces failles sont étanches ou peu perméables sur une partie de leur tracé, ce qui est démontré par l'existence d'importantes différences de niveaux piézométriques et l'évolution différente des niveaux piézométriques dans chaque compartiment de part et d'autre des failles.

La minéralisation de l'eau augmente à mesure que l'on s'éloigne des affleurements et que l'on s'enfonce en profondeur. À l'affleurement l'eau est très peu minéralisée et agressive : son résidu sec est de 10 à 100 mg/L dans les Vosges gréseuses et de 200 à 400 mg/L en Sarre. Sous couverture, on observe des concentrations de 10 g/L à Toul, 200 g/L vers Bar-le-Duc et 300 g/L vers Saint-Dizier. La ligne d'iso-concentration à 1 g/L est orientée sensiblement nord-sud selon un axe « ouest du bassin houiller – Metz – Nancy – Vittel ». Une large « bulle » salée est aussi connue en Moselle, sous le bassin de la Sarre en aval de Sarrebourg et à l'interfluve Sarre-Sânon.

2.3. LE BASSIN HOUILLER LORRAIN

Les informations données ci-après concernant le bassin houiller lorrain sont extraites de la thèse de G. Reichart (2015d) et d'une synthèse récemment établie par GEODERIS (Reichart, 2016a). La carte hydrogéologique de la nappe des GTI et des conditions aux limites du modèle régional dans le bassin houiller se trouve en annexe 1. On trouvera aussi dans cette annexe 1 la carte des exploitations du bassin houiller, et une coupe hydrogéologique à travers le secteur Ouest (La Houve).

Le périmètre de la concession des Houillères du Bassin de Lorraine (HBL) constitue la partie exploitée du bassin houiller lorrain.

Cette zone, localisée dans l'est du département de la Moselle, s'étend sur 49 000 ha, depuis la frontière allemande jusqu'à environ 30 km de Metz. Elle est approximativement délimitée par un triangle formé par les villes de Faulquemont, Creutzwald et Stiring-Wendel (*cf.* la carte des exploitations minières de l'annexe 1).

Un total de 58 puits a été foncé au sein des HBL, dont 56 en territoire français. Ces ouvrages sont répartis sur une quinzaine de communes, avec une concentration maximale sur les communes de Freyming-Merlebach, Petite-Rosselle, Forbach et Stiring-Wendel. Comme le montre la carte de l'annexe 1, la zone minière se partage essentiellement en trois grands secteurs avec :

- Au nord-ouest : la concession de la Houve (secteur Ouest).
- Au centre : la concession de Sarre-et-Moselle (secteur Centre).

- Au nord-est : la concession de De Wendel (secteur Est).

Plus bas, au sud-ouest de Saint-Avold, le secteur de Faulquemont et de Folschviller (secteur Sud, non représenté sur la carte de l'annexe 1) a également été exploité. La zone minière des HBL déborde par ailleurs en Allemagne avec la présence de deux puits sur le territoire de la Sarre⁷. Il est également à noter que les travaux miniers souterrains des secteurs Centre et Est sont reliés à ceux du secteur allemand du Warndt, non représenté sur la carte de l'annexe 1.

Alors qu'en Sarre le gisement houiller se trouve à faible profondeur, côté français celui-ci s'enfonce progressivement sous les morts-terrains, constitués essentiellement, dans le bassin houiller exploité, par les conglomérats du Permien supérieur, les GTI, et enfin les marnes et les calcaires du Trias. L'épaisseur de ces terrains de recouvrement au droit des exploitations du secteur Ouest (La Houve) varie de 97 m au nord-est du secteur (en fond de vallée sur les affleurements des GTI) à 375 m au sud-ouest du secteur (sous la cuesta du Muschelkalk), pour une épaisseur moyenne de recouvrement de 194 m. La stratification de ces formations est subhorizontale et n'est pas affectée par des plis.

Sous-jacent à ces formations de recouvrement qui reposent en discordance sur les terrains du houiller, le gisement houiller lorrain est affecté par une tectonique intense et est disloqué par un réseau de failles (*cf.* la carte de l'annexe 1). L'étendue géographique des champs d'exploitation et les méthodes d'exploitation ont été directement conditionnées par les grandes discontinuités structurales du gisement. On distingue d'une part les exploitations en « plateures » des veines les plus planes, retrouvées pour l'essentiel dans les secteurs Ouest et Sud et d'autre part les exploitations en « semi-dressants » (pente moyenne des couches comprise entre 25° et 45°) et « dressants » (pente moyenne des couches supérieure à 45°) des couches les plus redressées, spécifiques aux secteurs Centre et Est.

Dans le bassin houiller, trois failles au rôle hydrogéologique important, se traduisant par des discontinuités piézométriques au sein de la nappe des GTI, étaient déjà identifiées au commencement de l'étude : les failles de Hombourg-Longeville (ou Faulquemont), de Saint-Nicolas ainsi que du Grand Dérangement du Siège 2 (*cf.* en annexe 1 la carte des exploitations minières et la coupe hydrogéologique de la nappe des GTI à travers le secteur Ouest).

2.4. CONSEQUENCES DE L'EXPLOITATION DE LA NAPPE DES GTI

La répartition des prélèvements par département dans l'intégralité de la partie captive de la nappe des GTI et dans sa partie libre au droit du bassin houiller lorrain pour l'année 2010 est résumée dans le tableau de l'Illustration 3, l'évolution des volumes prélevés sur la période 1968-2010 est présentée sur l'Illustration 4, et l'évolution de 1990 à 2012 du total des prélèvements effectués dans le bassin houiller est présentée sur l'Illustration 5.

⁷ Les puits Merlebach Nord et Saint-Charles 4 sont associés à une amodiation en territoire allemand.

Nature des prélèvements	Département	Millions de m³/an	% du total
	Sarre (Allemagne)	12,97	18,2
	Moselle (57)	48,38	68,0
ACF-ACI	Meurthe-et-Moselle (54)	4,15	5,8
	Vosges (88)	5,70	8,0
	Total	71.2	100

Illustration 3 : Répartition des prélèvements effectués dans l'intégralité de la partie captive de la nappe des GTI et dans sa partie libre au droit du bassin houiller lorrain en 2010

Le volume total des prélèvements destinés à l'alimentation en eau potable (AEP) ou industrielle (AEI), et des prélèvements nécessités par l'activité extractive des bassins miniers, a atteint en 1977 un maximum de près de 160 millions de m³ (Mm³) dont 86 Mm³ correspondaient à l'exhaure minière, c'est-à-dire l'eau de la nappe des GTI qui s'infiltrait dans les mines (les terrains du Houiller dans lesquels les mines ont été créées étaient réputés contenir très peu d'eau). Une partie de cette exhaure minière était valorisée pour l'AEP ou l'AEI. À partir de cette date, tandis que les prélèvements destinés à l'AEP et l'AEI restaient stables en moyenne, la part des exhaures minières a diminué régulièrement, jusqu'à s'annuler presque totalement après l'arrêt des exhaures en 2006. Le volume total prélevé dans la nappe des GTI était de 71,2 Mm³ en 2010.



Illustration 4 : Evolution de 1968 à 2010 du total des prélèvements effectués dans l'intégralité de la partie captive de la nappe des GTI, et dans sa partie libre au droit du bassin houiller lorrain



Illustration 5 : Evolution de 1990 à 2012 du total des prélèvements effectués dans le bassin houiller sous forme de pompages dans la nappe des GTI pour l'alimentation en eau potable (AEP) ou industrielle (AEI), le soutien d'étiage (SE) et les pompages de dépollution (DEP) ; ainsi que sous forme d'exhaures non valorisées ou valorisées pour l'AEP ou l'AEI

Entre 1968 et 2000, les niveaux piézométriques mesurés étaient en forte baisse presque partout dans la nappe captive : d'environ 30 cm/an au sud de la faille de Vittel ; de 90 cm/an à Mirecourt ; de 1,5 m/an en bordure du bassin houiller ; et même de plus de 2 m/an au droit de certaines exploitations minières du bassin houiller. On pouvait en conclure que durant cette période, le volume total des prélèvements était bien supérieur aux capacités naturelles de renouvellement de la nappe captive des GTI, ce qui avait pour conséquence un bilan hydrodynamique déséquilibré pour la nappe.

3. Méthodologie de révision du modèle régional de la nappe des GTI dans le bassin houiller

Pour répondre à la demande de GEODERIS, et améliorer la précision des prévisions dans le secteur Ouest du bassin houiller, une modification préalable du modèle régional avait été entreprise lors de l'étude de modélisation dédiée à ce secteur (Vaute *et al.*, 2015). En effet, le maillage du modèle régional est constitué de mailles de 500 x 500 m, trop grandes pour simuler la remontée de la nappe dans les fonds de vallées avec la précision souhaitée. Un sous-maillage gigogne aux mailles de 50 x 50 m avait donc été introduit dans le modèle régional de la nappe des GTI. Ce maillage gigogne englobait la presque totalité des travaux miniers du secteur Ouest du bassin houiller lorrain, et correspondait à l'emprise du « zoom » défini dans les modélisations précédentes réalisées par ANTEA pour le compte de CdF.

De plus, dans le sous-maillage, le nombre de couches avait été augmenté de 1 à 4 couches, de manière à représenter du haut vers le bas : la nappe alluviale de la Bisten à sa traversée de l'agglomération de Creutzwald, la nappe des GTI, la formation imperméable du Permien localement fracturée suite à l'exploitation minière, et les travaux miniers souterrains. Le travail réalisé sur le secteur Ouest du bassin houiller a été totalement repris et mis en cohérence avec la méthodologie de révision mise au point pour les secteurs Centre et Est. Les cartes des annexes 2 (données géologiques) et 3 (données hydrogéologiques et hydrologiques) illustrent le contenu de ce chapitre.

Par ailleurs, dans le cadre de la présente étude, une attention particulière a été apportée à la couche alluvionnaire et à ses propriétés hydrodynamiques, impliquant alors une modification locale des écoulements et donc une phase de redéfinition des paramètres hydrodynamiques du modèle.

3.1. DESCRIPTION DES ELEMENTS CONSTITUTIFS DU MODELE REGIONAL (ANNEXE 2)

3.1.1. Conditions aux limites du modèle régional avant sa révision dans le cadre de la présente étude

La définition des conditions aux limites du modèle (annexe 1) s'est appuyée sur les nombreuses études hydrogéologiques générales et locales concernant la nappe des GTI en Lorraine, ainsi que sur les hypothèses prises en compte et sur les résultats obtenus lors de tentatives de modélisation de la nappe ou de certains secteurs de la nappe réalisées dans le passé. Le document de référence utilisé est l'étude de synthèse et la carte hydrogéologique réalisée par Babot *et al.* en 1972 (*cf.* la carte hydrogéologique en annexe 1). Les conditions aux limites retenues pour le modèle régional avant sa révision dans le cadre de la présente étude sont détaillées ci-dessous, et résumées dans le tableau de l'Illustration 6 et la carte de l'Illustration 7.

a) Délimitation extérieure du domaine modélisé

La limite extérieure du modèle a été définie :

 Au nord et à l'est : par comparaison au contour de la limite nappe libre / nappe captive issue de la numérisation de la carte géologique au 1/50 000 du BRGM. Le Muschelkalk
inférieur gréseux a été inclus à la définition de la nappe captive, c'est donc le contact géologique Muschelkalk inférieur – Muschelkalk moyen qui a servi à définir la limite nappe captive – nappe libre, lorsque ce contact était représenté sur les cartes géologiques. À défaut, c'est le contact Grès – Muschelkalk qui a été pris en compte, lorsque le Muschelkalk inférieur n'était pas différencié sur les cartes géologiques. Le secteur situé au nord de la faille traversant Schoeneck, et perturbé par l'affleurement du Permien, est supprimé du modèle ;

 Au sud et à l'ouest : la limite a été définie lors de la modélisation de la géométrie du réservoir (limitation pour les besoins de la modélisation lorsque l'épaisseur du réservoir est réduite à quelques mètres).

b) Charges imposées sur la majorité des affleurements en limites est et nord du modèle

Une charge imposée est une maille du modèle dont le niveau piézométrique est imposé constant sur la durée de simulation. Pour fixer la charge à une valeur donnée, le modèle introduit dans la maille un débit, positif ou négatif. Cette condition permet de modéliser correctement les mailles situées sur la limite du domaine modélisé.

Le niveau des charges imposées sur les limites du modèle a été défini grâce à une méthode utilisant un modèle numérique de terrain (MNT). Pour chaque maille à charge imposée, on a extrait du MNT la cote la plus basse de la maille. On obtient de cette manière une cote approximativement représentative du niveau de base de la nappe dans la maille (niveau de drainage de la nappe par un cours d'eau).

Nota bene : aucune maille située sur les affleurements des grès au sud de la faille de Vittel ou dans le bassin houiller ne peut être considérée comme une charge imposée, en raison de la surexploitation de la nappe dans ces secteurs. En effet, la baisse importante des niveaux piézométriques a supprimé le drainage naturel de la nappe par la partie amont des cours d'eau.

c) Infiltration et débordement

Tous les affleurements sont considérés à la fois comme zones d'infiltration d'eau de pluie et zones à débordement potentiel (lorsque le niveau piézométrique calculé tenterait à être supérieur à la cote du sol, un débit de débordement vers l'extérieur du modèle est calculé de manière à ramener le niveau piézométrique au niveau du sol).

Cette condition de zone de débordement potentiel permet de simuler aussi bien l'assèchement d'un cours d'eau par la surexploitation de la nappe que sa réalimentation en calculant la contribution de la nappe au débit du cours d'eau.

Le modèle est construit pour évaluer l'impact de la remontée de nappe en proche surface. Les conditions de débordement de la nappe des GTI en surface jouent un rôle majeur, notamment dans les fonds de vallées. Des mailles-rivières sont introduites dans le modèle en considérant une perméabilité de colmatage de fond de rivière afin de représenter les cours d'eau majeurs pérennes du bassin houiller. Les débits d'échange entre nappes et cours d'eau sont alors contrôlés par la valeur de perméabilité de colmatage du fond de rivière.

d) Prise en compte de failles

Quelques failles, dont le rôle de barrière hydraulique est connu ou vraisemblable compte tenu des différences de niveau piézométrique que l'on peut observer de part et d'autre de ces accidents géologiques, ont été prises en compte en tant que limites à flux nul à l'intérieur de la zone modélisée (*cf.* les planches en annexe 1). Ces failles sont situées :

- Dans la région du bassin houiller : la faille de Longeville Hombourg (dite aussi faille de Faulquemont) et une partie de la faille de Saint-Nicolas qui la recoupe orthogonalement. L'identification et la prise en compte du rôle hydrogéologique de la faille du Grand Dérangement du Siège 2 sont des avancées plus récentes réalisées dans le cadre des travaux sur le secteur Ouest (Vaute et *al.*, 2015).
- Dans la région de Vittel Contrexéville : la faille de Vittel.

Secteur géographique	Conditions aux limites	
La majorité des affleurements en limites nord et est de la nappe captive :	Charges imposées : → permet de simuler l'alimentation de la nappe captive par la nappe libre, ainsi que le drainage de la nappe captive par les cours d'eau (exutoires naturels de la nappe).	
 massif des Vosges cours d'eau drainants (Moselle, Sarre, Blies, Horn, Zorn et Zinsel) 		
Certains affleurements en limite nord, est et sud, dans les régions suivantes : - Bassin houiller - Phalsbourg – Saverne - Vittel – Contrexéville	Zones de recharge (infiltration d'eau de pluie) : → hauteurs de pluie annuelle ajustées lors de la calibration du modèle et mises au regard des données fournies par Météo- France.	
Tous les affleurements qui ne sont pas des charges imposées, en limite nord et est de la nappe captive.	Zones à « débordement » potentiel sur tous les affleurements qui ne sont pas des charges imposées : → surtout utile pour le bassin houiller, cette condition permet de simuler l'assèchement des tronçons aval des cours d'eau du secteur (Rosselle et Merle, Lauterbach, Bisten) en raison de l'abaissement généralisé du niveau de la nappe, mais aussi la remise en eau de ces cours d'eau lors d'une future remontée généralisée du niveau de la nappe (diminution importante des prélèvements).	
Limites sud et ouest de la nappe captive principalement	Limites à flux nul (limite étanche)	

Illustration 6 : Tableau de synthèse des conditions aux limites du modèle régional de la nappe des GTI version 2005



Illustration 7 : Carte hydrogéologique de la nappe des GTI en Lorraine dans le bassin houiller et conditions aux limites du modèle régional avant sa révision dans le cadre de la présente étude (Vaute et al., 2007)

3.1.2. Définition du maillage et de l'emprise du sous-maillage gigogne

Pour pouvoir répondre aux enjeux de la remontée de la nappe dans le bassin houiller, le modèle régional avait été modifié sur une emprise beaucoup plus intégrante que celle des travaux miniers pour des raisons de cohérence géologique et hydrogéologique (cf. aussi les deux premières cartes de l'annexe 3). Le sous-maillage gigogne a été défini selon les critères suivants :

- Le sous-maillage gigogne inclut tous les travaux miniers en zone d'affleurement des GTI et en zone sous-couverture, ainsi que leur zone de plus grand impact piézométrique : la délimitation de cette zone de plus grand impact est arbitraire car la remontée de la nappe des GTI se fera sentir dans tout le département de la Moselle ; toutefois, les conséquences de la remontée en surface et proche surface seront limitées aux communes les plus proches des affleurements des GTI, c'est pourquoi la limite administrative fixe du SAGE du bassin houiller est intéressante à considérer pour la définition du sous-maillage gigogne.
- Le sous-maillage gigogne englobe une partie du territoire Sarrois allemand compris entre la frontière franco-allemande et la limite des affleurements des GTI située au sud de la rivière Sarre. Ce territoire se situant en aval hydraulique direct du territoire français, la prise en compte du territoire allemand dans la modélisation s'avère nécessaire pour garantir la robustesse du modèle en territoire français.

La taille de maille du sous-maillage a été divisée par 10, en passant d'une taille initiale de 500 m de côté à une nouvelle taille de 50 m de côté. Cette augmentation de la précision du maillage entraîne une multiplication du nombre de mailles par 100 dans le sous-maillage du bassin houiller, par couche modélisée. Ceci pénalise le temps de calcul des simulations et complexifie fortement la gestion et la saisie des données dans le modèle MARTHE. Cette augmentation de la précision du maillage du maillage a néanmoins été choisie car c'est le meilleur compromis entre :

- La demande de la part de l'Administration d'une précision maximale pour la cartographie des secteurs urbanisés soumis à la remontée de nappe.
- La grande précision des nouveaux MNT LIDAR français et allemands au pas de 5 m, qui ont été rendus disponibles pour la modélisation en 2015 (France) et 2016 (Saarland).
- La répartition spatiale et la précision relativement faible des données géologiques et hydrogéologiques disponibles.
- L'augmentation du temps de calcul et la complexification de la gestion des données du modèle.

Nota bene : à l'occasion de la reconstruction complète du modèle du bassin houiller, le modèle régional a été converti en Lambert 93 (les précédentes versions du modèle étaient en Lambert 2 étendu), de manière à le mettre en conformité avec l'usage actuel.

3.1.3. Construction d'un modèle géologique dans l'emprise du sous-maillage gigogne

a) Modélisation des surfaces géologiques du toit des GTI sous couverture, du toit du Permien et du toit du Houiller

La structure géologique du modèle MARTHE dans le bassin houiller a été totalement revue dans l'emprise du sous-maillage gigogne, en débordant du sous-maillage suffisamment pour assurer une bonne transition avec le modèle régional (cf. cartes de l'annexe 2).

A l'aide des très nombreuses données issues de CdF et fournies par le Département Prévention et Sécurité Minière (DPSM) du BRGM sous une forme numérique (logs de sondages miniers, failles, couches cartographiques des isohypses du toit et du mur des GTI et du Permien), et grâce au maillage beaucoup plus fin du sous-maillage gigogne, il a été possible de calculer beaucoup plus précisément la position du toit de l'aquifère des GTI sous couverture, du Permien et du Houiller. Les méthodes d'interpolation disponibles sous ArcGIS (le logiciel de cartographie utilisé) ont permis de calculer ces surfaces en tenant compte des plus petites failles connues. Dans le cas particulier du toit du Permien (c'est-à-dire du substratum des GTI), et compte tenu du nombre insuffisant de données, ce dernier a été calculé à partir des interpolations de la surface du toit du Houiller et de l'épaisseur du Permien.

b) Modélisation de la surface du sol des GTI à l'affleurement

Dans les zones où le grès affleure, la surface du toit des GTI a été érodée, et cette surface ne correspond plus à une surface géologique, elle est représentée par l'altitude du sol, elle-même décrite par un MNT. Lors de la précédente modélisation du secteur Ouest, il avait été choisi de ne pas utiliser un MNT LIDAR du département de la Moselle au pas de 5 m qui était disponible en raison du travail très important de mise en cohérence des couches du modèle MARTHE que cela aurait demandé à l'époque (notamment l'altitude et le tracé du réseau hydrographique pris en compte dans le modèle) et de la faible plus-value que ce travail conséquent aurait apportée comparativement à l'intégration de nouvelles connaissances sur les horizons peu perméables du bassin, par exemple (Reichart, 2015e). Cela étant, il a été montré dans le cas du secteur Ouest que le MNT 25 m initialement utilisé peut induire des erreurs sur l'altitude des cours d'eau dépassant la dizaine de mètres, rendant alors le modèle inopérant localement. Le problème a été partiellement résolu lors de la modélisation du secteur Ouest par l'utilisation de données de nivellement du fil de l'eau des rivières disponibles dans les DADT.

Or, cette information n'est pas disponible pour les autres secteurs du bassin houiller. Par ailleurs, une étude de modélisation géologique des alluvions du bassin houiller a été réalisée en parallèle de l'étude de la remontée de nappe (Cartannaz, 2018) et a permis de réduire les incertitudes portant sur le comportement de la nappe des GTI dans les vallées. C'est pourquoi, à l'occasion de la refonte de la structure géologique du modèle du bassin houiller, il a été décidé d'utiliser les MNT 5 m LIDAR français et allemand. Le MNT français déborde largement en Allemagne et a été utilisé en priorité en raison de sa disponibilité plus précoce au cours de l'étude, le MNT allemand est devenu disponible fin 2016 et a servi à compléter les zones non couvertes par le MNT français. Ces MNT apportent désormais une très grande valeur ajoutée aux résultats des simulations puisque les drainages de nappe par les cours d'eau sont à présent mieux caractérisés, calculés à la bonne altitude et au bon emplacement géographique.

c) Modélisation de la couche superficielle alluvionnaire

Dans les zones de vallées sur le secteur de la plaine du Warndt, les alluvions reposant sur l'aquifère des GTI peuvent influencer localement la nappe des GTI selon leur épaisseur (jusqu'à 14 m d'épaisseur) et leur caractère perméable ou non : mise en captivité, limitation de la recharge atmosphérique (infiltration d'eau de pluie), limitation des échanges nappe-rivière (Cartannaz, 2018). Les alluvions concernent les vallées suivantes, affluents de la Sarre :

- La Bisten et ses affluents : Weissbach, Halsbach, Raubach, Schlosserbach, Banngraben, Bitzelbach, Grossbach, Weiesgraben, Leibsbach, ruisseau de Guerting, Bruchbach, Fröschenpfuhl, Ohlighbach ;
- La Lauterbach.
- La Rosselle et ses affluents : Muehlegraben, Maimahdbach, Katharinenbach, Dotelbach, Merle, Kochernbach, Morsbach, Grohbruchbach (Weihergraben), Schafbach.
- La Lixingerbach.
- Le Simbach.
- Le Pulverbach.

Par ailleurs, au sein de ces alluvions se distinguent des terrasses alluviales secondaires, zones planes situées sur les versants des vallées, qui peuvent être considérées déconnectées du système alluvial actif. Celles dont le substratum est estimé imperméable sont :

- La terrasse alluviale secondaire de la Rosselle, qui se trouve dans le périmètre du carreau de mine Vuillemin-Wendel. Dans le modèle hydrodynamique, aucune liaison n'a été modélisée entre la terrasse alluviale primaire du cours d'eau et ce système secondaire perché. Le critère de débordement imposé à ce dernier (via la carrière présente sur le site) permet de conserver la recharge atmosphérique.
- La terrasse alluviale secondaire du Leibsbach, environnant la carrière du Siège 2 de La Houve. Cette terrasse est déconnectée de la carrière et de la terrasse alluviale primaire du cours d'eau (liaisons étanches entre ces trois entités). Le fond de cette terrasse secondaire est considéré imperméable et la recharge atmosphérique est supprimée sur la superficie de de cette zone.
- La terrasse alluviale secondaire du Fröschenpfuhl au niveau des anciens bassins de décantation de la commune de Diesen. Cette terrasse, située environ 20 m plus haut que la terrasse primaire du cours d'eau, est considérée déconnectée de cette dernière. La recharge atmosphérique est maintenue sur la superficie de ce secteur, dans la mesure où les eaux peuvent s'évacuer par les bassins n°1 et n°3, considérés comme infiltrants.

Les terrasses alluviales secondaires déconnectées du système alluvial actif, et dont le fond est perméable, n'ont pas été prises en compte dans le modèle hydrogéologique. Celles-ci concernent :

- La terrasse alluviale secondaire de la Merle (plateforme pétrochimique de Carling) : les alluvions de cette vaste zone sont constituées de placages pluri-centimétriques et ne contiennent pas d'horizons imperméables (sauf très localement, sur quelques dizaines de centimètres). De plus, cette zone industrielle a été extrêmement remaniée au cours du siècle dernier. Seule la terrasse primaire du Merle a donc été prise en compte ;
- La terrasse alluviale secondaire du Bitzelbach au sud de Merten : il s'agit d'une vaste plaine alluviale dont la partie sud-est est très peu épaisse et ne présente pas d'horizons imperméables. Cette portion spécifique de la terrasse secondaire n'est pas considérée dans le modèle hydrogéologique.
- Les deux terrasses alluviales secondaires du Leibsbach situées de part et d'autre de ce dernier, entre les deux sièges de La Houve. Leur fond étant perméable, il a été décidé de ne pas les prendre en compte dans le modèle hydrogéologique.
- Les deux niveaux de terrasses alluviales secondaires du Morsbach (secteur de la Cité Huebel dans la commune de Morsbach) : les deux niveaux sont déconnectés de la terrasse primaire du cours d'eau. Leur fond étant perméable, il a été décidé de ne pas les prendre en compte dans le modèle hydrogéologique.
- La terrasse alluviale secondaire de la Lauterbach à l'est des bassins de décantation de Diesen. Son fond étant perméable, il a été décidé de ne pas la prendre en compte dans le modèle hydrogéologique.

Sur la base des travaux de modélisation géologique des alluvions (Cartannaz, 2018) et du caractère imperméable probable défini spatialement (Illustration 8 et Illustration 9), la couche superficielle alluvionnaire créée pour la Bisten en 2015 (couche n°1) a été étendue au périmètre du gigogne « bassin houiller » du modèle hydrogéologique.



Illustration 8 : Carte des épaisseurs des alluvions (GEODERIS d'après Cartannaz, 2018)



Illustration 9 : Carte du caractère imperméables des alluvions (GEODERIS d'après Cartannaz, 2018)

d) Modélisation des dépressions topographiques du bassin

Les principales dépressions topographiques présentes dans le périmètre d'étude ont été prises en compte dans le modèle, sous forme de seuils de débordement imposés par la topographie (sur la base des données LIDAR).

Parmi ces dépressions topographiques, certaines ont nécessité une prise en compte particulière car elles se trouvent au sein de terrasses alluviales : il s'agit du Weihergraben (terrasse primaire affaissée de la Rosselle), de la carrière du Siège 2 de La Houve (terrasse secondaire du Leibsbach) et la carrière présente sur le carreau Vuillemin-Wendel (terrasse secondaire de la Rosselle).

Le contexte particulier des carrières de La Houve et de Vuillemin-Wendel a déjà été évoqué dans le paragraphe précédent. Pour ce qui concerne le Weihergraben (dépressions transfrontalière liées à des affaissements miniers sur les communes de Nassweiler et de Rosbruck), aucun débordement des eaux souterraines n'a été constaté dans la dépression, ce qui indique une déconnexion entre les alluvions en place dans le Graben et la nappe alluviale « active » de la Rosselle. Une liaison étanche entre ces deux entités est donc considérée. Pour éviter un débordement des alluvions du Graben qui sont considérées imperméables (c'est également l'effet de l'actuelle station de relevage), la recharge atmosphérique est supprimée sur la superficie de cette dépression. Les ouvrages 01405X0215/ROSAL1 et 01405X0216/ROSAL2 situés dans la zone sont de ce fait asséchés et ne peuvent pas être utilisés pour la calibration du modèle.

Les autres carrières se trouvent au sein de la formation des GTI et possèdent donc un fond perméable, à l'exception du plan d'eau existant dans le périmètre du bassin Saint-Charles (Petite-Rosselle). Ce plan d'eau déborde actuellement par une cheminée et ses eaux sont canalisées vers la Rosselle.

		Seuil de	
Dépression	Commune	débordement	Remarques
		(m NGF)	
Carrière Est	Schœneck	245	/
Carrière Centrale	Forbach	232	/
Carrière Simon	Forbach / Schœneck	245	/
Bassin Saint-Charles	Petite-Rosselle	230	Fond en partie imperméable (plan d'eau actuel)
Carrière La Houve Siège 2	Creutzwald	232	Prise en compte particulière (terrasse secondaire du Leibsbach)
Carrière Vuillemin-Wendel	Petite-Rosselle	231	Prise en compte particulière (terrasse secondaire de la Rosselle)
Sablière de Longeville	Longeville-lès-Saint-Avold	254	1
Carrière Ancienne	Forbach	218	/
Carrière Klarenthal	Sarrebruck	216	En territoire allemand
Carrière Wadgassen	Wadgassen	244	En territoire allemand
Usine Ludweiler	Völklingen	205	En territoire allemand
Weihergraben	Nassweiler / Rosbruck	200	Dépression transfrontalière. Prise en compte particulière (terrasse primaire affaissée de la Rosselle)
Carrière Gargan	Petite-Rosselle	258	/
Carrière 2 Wadgassen	Wadgassen	215	En territoire allemand
Carrière Merlebach 1	Saint-Avold	223	/
Carrière Merlebach 2	Freyming-Merlebach	221	Morcelée (3 cuvettes successives)

Le tableau suivant (Illustration 10) récapitule les seuils de débordement définis dans le modèle et les cas particuliers rencontrés :

Illustration 10 : Dépressions topographiques telles que carrières et gravières prises en compte dans le modèle et altitudes de débordement associées

e) Prise en compte des affaissements miniers et correction du MNT LIDAR français au pas de 5 m, chaque année entre 1977 et 2005

Le travail précédemment décrit n'était pas suffisant pour garantir une précision optimale des prévisions dans le périmètre d'étude. En effet, les travaux miniers ont induit des affaissements de la surface du sol qui ont atteint localement plus de 15 m au niveau de l'affaissement transfrontalier du Weihergraben à Rosbruck et Nassweiler (cf. carte en annexe 2). Sur la base du MNT LIDAR français au pas de 5 m de 2012 et des données chronologiques d'affaissement miniers fournies par GEODERIS (données ponctuelles), il a donc été nécessaire de recalculer, pour chaque année entre 1977 et 2005, un MNT intégrant l'information sur les affaissements observés par CdF, y compris les affaissements en Allemagne dus aux travaux miniers français. Cette correction du MNT LIDAR français côté allemand a été possible car le MNT français déborde largement en Allemagne et englobe l'intégralité du périmètre des affaissements dus aux travaux miniers français⁸.

⁸ Amodiations incluses

Par contre, les affaissements liés aux travaux allemands n'ont pas été pris en compte, les données n'étant pas disponibles. Après 2005, les phénomènes d'affaissement supplémentaires ainsi que les phénomènes de surrection⁹ ultérieurs sont considérés comme négligeables pour l'objectif de modélisation hydrogéologique poursuivi dans la présente étude. Le MNT est donc supposé invariant à partir de 2006.

Les données chronologiques d'affaissement (différence d'altitude entre les points de nivellements mesurés annuellement) sont interpolées afin de créer des grilles d'affaissement au pas de 5 m, et sont soustraites au MNT 2005 au pas de 5 m (identique au MNT 2012). Chaque carte annuelle de MNT corrigé (29 grilles de 1977 à 2005) est utilisée dans le modèle hydrogéologique. Ces calculs ont été réalisés à l'aide du logiciel ArcGIS.

Ces données ont ensuite été intégrées au modèle hydrogéologique MARTHE, qui a été lui aussi modifié pour prendre en compte dans le calcul l'évolution de la topographie, année par année.

Nota bene : les données topographiques issues d'une acquisition LIDAR sont habituellement considérées comme très précises (précision altimétrique de quelques dizaines de centimètres). Cela étant, au cours de nos travaux nous avons constaté des écarts d'altitude de plus d'un mètre (jusqu'à 1,5 m observé) entre les données françaises et allemandes dans les secteurs où les deux jeux de données coexistent. Ces écarts importants semblent correspondre aux zones où la topographie varie rapidement. A contrario, les écarts semblent généralement très faibles dans les zones où la topographie est relativement plane (fonds de carrière, bassins, lits de cours d'eau, digues, routes, etc.). Sur la frange de coexistence des données franco-allemandes, nous avons fait le choix de retenir les données françaises, considérées comme plus fiables sur la base de nos observations.

3.1.4. Spécificités de modélisation hydrodynamique induites par les affaissements miniers dans l'emprise du sous-maillage gigogne

a) Correction des niveaux piézométriques observés

Le calcul de la série de MNT corrigés des affaissements entre 1977 et 2005 a permis de corriger les niveaux piézométriques historiques. Les corrections sur les niveaux piézométriques peuvent atteindre plusieurs mètres. Il est ainsi possible d'assurer une cohérence entre les niveaux piézométriques mesurés et calculés, y compris dans les périodes où les affaissements ont pu être localement conséquents. Ces niveaux piézométriques corrigés ont été intégrés à la base de données du modèle MARTHE.

b) Correction de l'altitude et du tracé des cours d'eau

L'utilisation pour la modélisation des nouveaux MNT LIDAR au pas de 5 m en France et en Allemagne nécessite de recalculer l'altitude des cours d'eau qui sont pris en compte dans le modèle. En effet, l'utilisation du MNT LIDAR permet d'obtenir une très bonne précision sur l'altitude, mais la position géographique du tracé des cours d'eau de la base BD-CARTHAGE, initialement utilisée, est très peu précise. La précision du tracé des cours d'eau de la BD-TOPO (5 à 10 m), utilisée pour la présente étude en remplacement de la BD-CARTHAGE, n'était pas non plus suffisante pour répondre aux contraintes d'utilisation d'un MNT LIDAR maillé à 5 m.

⁹ Voir Reichart, 2015f.

En conséquence, pour modéliser un réseau hydrographique précis et cohérent avec la nouvelle topographie LIDAR, il s'est avéré nécessaire de recalculer en chaque maille du modèle l'altitude minimum du cours d'eau le plus proche. Par ailleurs, l'existence dans le bassin houiller de nombreux tronçons de cours d'eau couverts ou busés a nécessité de recalculer l'altitude théorique de ces tronçons par interpolation linéaire entre les altitudes calculées précédemment aux extrémités des passages couverts ou busés.

Chaque carte annuelle de MNT corrigé (29 grilles de 1977 à 2005) produite précédemment est utilisée pour corriger la cote du fil d'eau dans le réseau hydrographique en fonction des affaissements. Ces évolutions annuelles d'altitude ont ensuite été intégrées au modèle hydrogéologique MARTHE en chaque maille-rivière. Les altitudes du fond de chaque maille rivière sont également corrigées en fonction des affaissements (artificiellement définies à 1 m en dessous de la côte d'eau de la rivière). Ces calculs ont été réalisés à l'aide du logiciel ArcGIS.

3.2. MISE A JOUR DES DONNEES HYDROGEOLOGIQUES ET HYDROLOGIQUES SUR LA PERIODE 1968-2015 (ANNEXE 3)

3.2.1. Constitution d'une base de données du modèle hydrogéologique MARTHE sous Excel

L'ensemble des données compilées lors de la présente étude et lors des précédentes études régionales (niveaux piézométriques, débits annuels prélevés y compris les exhaures, paramètres hydrodynamiques) ont été intégrées dans un unique fichier de données Excel qui a vocation à servir de base de données d'échange entre les producteurs de données.

Tous les points de mesure de ce fichier sont identifiés par leur numéro national (code BSS¹⁰), ce qui évitera à l'avenir les erreurs d'attribution de données liées à l'identification d'un point par son nom d'usage, qui varie selon les producteurs de données. Le code BSS unique permet aussi d'accéder immédiatement aux données bancarisées notamment dans la BSS et dans ADES¹¹.

3.2.2. Introduction des nouvelles données acquises concernant la nappe des GTI

a) Niveaux piézométriques et débits de prélèvements annuels

Le modèle hydrogéologique de la nappe des GTI concerne la nappe sur toute sa partie captive et sur sa partie libre dans le bassin houiller, ainsi que quelques très petits secteurs de nappe libre indispensables à la modélisation. Dans le cadre de l'étude présente, le fichier de données et le modèle ont été mis à jour avec les nouvelles données acquises jusqu'en 2015 voire 2016 pour certaines données. Dans le bassin houiller exclusivement, cette mise à jour a concerné 594 points en France et 97 points en Allemagne (cf. tableaux de l'annexe 3).

Les données mise à jour sont les suivantes :

• Niveaux piézométriques mesurés jusqu'en 2016 sur les points de la nappe des GTI appartenant au réseau piézométrique suivi par le BRGM Grand Est.

¹⁰ Banque du Sous-Sol (BRGM)

¹¹ Banque nationale d'Accès aux Données sur les Eaux Souterraines

- Volumes annuels prélevés jusqu'en 2016, compilés par l'AERM à partir des données de sa base « redevances ».
- Volumes annuels prélevés pour le soutien d'étiage des cours d'eau et le rabattement du niveau des réservoirs miniers ennoyés jusqu'en 2016, fournies par le BRGM-DPSM.
- Pour la partie sarroise du bassin houiller, volumes annuels prélevés et niveaux piézométriques mesurés jusqu'en 2016, transmis par l'Administration sarroise à la DREAL Grand Est.
- Niveaux piézométriques du réseau de surveillance de CdF (archives numériques du BRGM-DPSM), dont une partie seulement des données avait été récupérée lors de la construction du modèle régional en 2001 ; chaque nouveau point a été vérifié et a été mis en correspondance avec son code national BSS.
- Niveaux piézométriques de la nappe des GTI mesurés par CdF à travers le cuvelage des puits du bassin houiller (archives numériques du BRGM-DPSM) pour les secteurs Centre et Est.

b) Définition des points d'échange nappe-mine et calcul de l'évolution du débit des venues d'eau en mine

Le modèle régional de la nappe des GTI incluait les points d'échange nappe-mine définis dans les modèles successifs réalisés par ANTEA, et figurant dans les DADT.

Lors de la modélisation du secteur Ouest du bassin houiller, la localisation des points d'échange a été redéfinie pour ce secteur en exploitant les données numériques disponibles au BRGM-DPSM concernant la mine de la Houve : plans des travaux et des galeries, données d'exhaure et d'ennoyage, schémas de fonctionnement, cartes de localisation des venues d'eau. La localisation des venues d'eau, la date de leur apparition, et le débit initial observé (rarement disponible pour les venues d'eau datant d'avant 1960) ont été recherchés sur les plans miniers. La diminution ultérieure du débit des venues d'eau a pu être calculée en appliquant un prorata au débit initial, suivant la loi de décroissance observée pour le total des débits (diminution de 1,3 % à 7 % par an, selon une loi de type exponentiel) et en tenant compte de la date d'apparition de la venue d'eau, de sorte que :

 $Q_T = Q_0 x ((100 - \%réduction) / 100) (T-T_0)$

Avec :

 T_0 = année de création de la venue d'eau

T = année T

T - T_0 = nombre d'années depuis la création de la venue d'eau

Q_T = débit de la venue d'eau estimé pour l'année T

Q₀ = débit initial de la venue d'eau mesuré lors de l'année T₀

% réduction = % annuel de réduction du débit de la venue d'eau

Faute de données similaires, le même travail n'a pu être effectué pour les secteurs Centre et Est. La principale information utilisée pour déterminer l'emplacement de points d'échange nappe-mine potentiels de ces deux secteurs est la surface piézométrique au droit et à proximité des travaux miniers. De manière générale, en l'absence d'autres pompages, les cônes de rabattement au droit des mines constituent logiquement les points d'échange potentiels les plus importants. Ici, ce raisonnement est acceptable en raison de l'absence de pompages AEP ou AEI importants dans ce secteur de la nappe des GTI et parce que la surface piézométrique y est relativement bien connue, notamment dans ses points bas.

Ainsi, pour chaque champ d'exploitation des secteurs Centre et Est, le débit total d'exhaure mesuré est réparti sur les points d'échange nappe-mine correspondants dont la localisation est définie par calibration.

Il est à noter que les interactions nappe-mine du secteur Sud du bassin houiller n'ont pas été intégrées dans les réflexions. D'une part, ce secteur où la nappe des GTI est sous couverture sort du périmètre d'étude et d'autre part les travaux miniers souterrains du secteur Sud sont ennoyés depuis une trentaine d'années (Reichart, 2016). Les points d'échange définis par ANTEA dans le DADT de ce secteur ont été conservés sans changement.

c) Calcul de la recharge de la nappe spatialisée sur les affleurements du bassin houiller

Pour cette version actualisée du modèle du bassin houiller, une amélioration très significative a été apportée : la recharge où la nappe est libre a été calculée de façon spatialisée à la maille carrée de 8 km x 8 km et au pas de temps journalier à partir des données de pluie et d'ETP¹² fournies par MétéoFrance. La recharge appliquée au modèle hydrogéologique est calculée en utilisant la méthode de Thornthwaite pondérée d'un coefficient calibré (de l'ordre de 0,5 sur le bassin houiller). Celle-ci est ensuite moyennée pour chaque bassin versant, la moyenne étant pondérée par la proportion de surface de chaque maille carrée se trouvant dans le bassin versant. La recharge s'applique uniquement aux affleurements des niveaux géologiques gréseux compris entre le Muschelkalk inférieur (grès Coquiller) et le grès Vosgien inclus.

Cette approche reste cependant définie par le schéma le plus simple et pourrait être consolidée en utilisant le schéma du réservoir sol à capacité progressive du modèle GARDÉNIA inclus dans MARTHE. Cette évolution serait d'autant plus robuste en considérant le module de calcul des débits des cours d'eau, conférant au modèle hydrogéologique l'entièreté de l'hydrosystème : conditions atmosphériques (Pluies, ETP), hydrologiques (rivières, ruissellement, recharge) et hydrogéologiques (nappe, mine, débordement/suintement).

d) Modélisation des débits de drainage de la nappe des GTI à l'aide du logiciel GARDÉNIA

Les données de quatre stations hydrométriques présentes dans les bassins versants de la Bisten et de la Rosselle en France et en Allemagne (une station par bassin versant et par pays) ont été utilisées pour modéliser le débit de drainage de la nappe des GTI par les cours d'eau, à l'aide du modèle hydrologique à réservoirs GARDÉNIA (cf. dernière page de l'annexe 3). L'Illustration 11 présente les évolutions comparées des débits observés et simulés de la Bisten à la station A9612010 de Creutzwald. Les débits calculés à l'exutoire du bassin versant rassemblent les composantes de ruissellement (écoulement rapide) et de nappe (écoulement lent).

¹² Evapotranspiration potentielle

Les débits observés sont très anthropisés notamment par les rejets d'exhaure (jusqu'en 2008 pour la partie ouest et 2012 pour la partie est du bassin houiller). Les débits simulés ne peuvent reproduire ces évènements puisqu'ils ne sont pas considérés dans les calculs, mais ils permettent d'estimer la composante d'écoulement de la nappe qui est ensuite comparée aux débits de « rivière » (débordements et échanges nappe-rivière) calculés par le modèle hydrogéologique MARTHE.

La difficulté rencontrée provient du caractère très anthropisé du débit des cours d'eau dans le bassin houiller. Les débits de la composante nappe simulés sont donc à considérer avec précaution et fournissent *in fine* un ordre de grandeur du débit de drainage de référence.



Illustration 11 : Débits des cours d'eau observés et simulés à la station A9612010 de la Bisten à Creutzwald.

e) Prise en compte d'une nouvelle délimitation des alluvions et de leurs caractéristiques

Une nouvelle délimitation des alluvions et des éléments d'interprétation portant sur leur perméabilité ont été intégrés au modèle hydrodynamique à partir d'une modélisation géologique permettant de déterminer un nouveau contour des alluvions et de préciser leurs caractéristiques (puissance, perméabilité). Ce travail est notamment basé sur l'analyse de 872 sondages géologiques (Cartannaz, 2018).

3.3. MODELE CONCEPTUEL D'ECOULEMENT DANS LE SECTEUR DU BASSIN HOUILLER

Un modèle conceptuel constitue une schématisation de la réalité à partir de laquelle le modèle numérique est construit. La robustesse du modèle numérique dépend fortement de l'adéquation entre cette schématisation de la réalité et les objectifs de la simulation. Au fur et à mesure de l'avancée d'un travail de modélisation, les incohérences s'estompent entre les données observées et celles calculées directement liées au modèle conceptuel d'écoulement. En effet, le modèle conceptuel est, de manière itérative, toujours revu à la lumière de l'interprétation de données nouvelles ou à rechercher. Les éléments importants du modèle conceptuel retenu pour le modèle du bassin houiller version 2018 sont présentés ci-dessous.

3.3.1. Echanges nappe-rivières

La comparaison entre les débits d'étiage moyens de certains tronçons de cours d'eau du bassin houiller (Bisten et Rosselle notamment) et les débits de débordement de la nappe calculés, ainsi qu'entre les évolutions piézométriques observées et celles calculées pour les points se situant à proximité des cours d'eau, ont amené à la conclusion que des relations nappes rivières sont à considérer. Ces échanges d'eau peuvent se faire entre une rivière et la nappe des GTI lorsque l'aquifère des grès affleure (c'est-à-dire lorsqu'il n'est pas captif sous une autre formation géologique), ou bien entre une rivière et sa nappe alluviale dans le cas où cette dernière est suffisamment significative pour devoir être prise en compte. Dans ce cas, la rivière échange de l'eau avec sa nappe alluviale, qui peut elle-même échanger de l'eau avec la nappe des GTI sousjacente. La nappe alluviale constitue ainsi un réservoir « tampon » entre le cours d'eau et la nappe des GTI.

a) Captivité à artésianisme de la nappe des GTI « libre »

Lors de la modélisation du secteur Ouest du bassin houiller (Vaute et *al.*, 2015), l'analyse de certaines données hydrogéologiques disponibles dans la BSS et les tests de calibration ont montré que la partie profonde de la nappe libre des GTI peut être localement en charge (et même artésienne) dans les points bas des vallées alluviales ou bien se remettre en charge lors de sa remontée sous les horizons peu perméables (argileux ou tourbeux) des fonds de vallée, et/ou sous un ou plusieurs niveaux de grès argileux moins perméables.

Par ailleurs, il existe au moins 4 cas de forages documentés en BSS qui étaient artésiens au moment de leur création. Ces forages sont situés en fond de vallée près de Falck (01392X0032¹³) et de Creutzwald (01397X0027, 01397X0028 et 01397X0029), au milieu des affleurements du Grès vosgien.

De plus, les investigations menées en 2017 par la DREAL Grand Est ont montré que 3 sondages (deux sondages dans la vallée du Grossbach à Dalem et Merten et un sondage dans le vallon du Bitzelbach à Creutzwald) étaient artésiens au moment de leur foration (Reichart, 2017b).

On peut déduire de ces observations que la partie profonde de la nappe libre est effectivement en charge, au moins localement, sous un ou plusieurs niveaux de grès argileux moins perméables, et/ou sous les horizons peu perméables des fonds de vallée.

¹³ Voir aussi Reichart, 2017a.

La possibilité de mise en charge sous les alluvions est confirmée par les résultats de l'étude géologique des alluvions du bassin houiller (Cartannaz, 2018). Cette étude a permis de tracer un contour cartographique qui représente la présence d'un horizon imperméable au sein des alluvions. Ce contour a été pris en compte dans le modèle MARTHE sous la forme d'une interdiction du débordement de la nappe des GTI dans les zones alluviales, afin de représenter de manière simple la possibilité de mise en charge de la nappe des GTI sous les alluvions.

Pour ce qui concerne les grès moins perméables, nous avons détecté plusieurs points de piézométrie anormalement hautes à l'échelle du bassin, qu'il est possible d'imputer à une mise en charge locale de la nappe des GTI. A l'exception d'un unique secteur (Ham-sous-Varsberg – Diesen) où la reproduction de la mise en charge est apparue comme une nécessité de calibration sur une large zone (cf. Illustration 12 localisant la zone et les ouvrages concernés : 01397X0093/F2, 01397X0084/S, TMP_ST_HAM, 01397X0104/246, 01396X0350/HAMGTI), ces piézométries n'ont pas été considérées comme représentatives d'une zone suffisamment grande de la nappe des GTI (anomalie « ponctuelle ») pour que nous cherchions à les reproduire (01396X0036, 01405X0036, 01405X0097, 01405X0100, 01405X0115, 01405X0118, 01405X0142, 01653X0045, SAR_1419, SAR_T_GTI1, TMP_T_GTI2).

Il est également à noter que l'exploitation des données de la BSS réalisée dans le cadre de la modélisation géologique des alluvions a permis de détecter un certain nombre de niveaux de faible perméabilité dans le *bedrock*. Cela étant, ces données sont largement insuffisantes pour modéliser de manière satisfaisante la possible hétérogénéité des grès dans l'espace ; cette modélisation complexe démultiplierait de manière inacceptable les incertitudes associées aux résultats.



Illustration 12 : Secteur de mise en charge de la nappe des GTI sous horizons gréseux moins perméables au sein des GTI, considéré dans le modèle hydrogéologique (débordement non autorisé)

b) Existence de nappes alluviales perchées le long des cours d'eau

L'existence de nappes alluviales est connue dans certains secteurs du bassin houiller, pour la plupart peu épaisses et contenant potentiellement un horizon imperméable. Plus d'une trentaine de piézomètres permettent de suivre certains tronçons de nappes alluviales. Toutefois, la plupart des nappes alluviales n'avaient pas été modélisées car les informations géologiques disponibles rendaient trop incertaine leur modélisation, à l'exception du tronçon de nappe alluviale de la Bisten qui traverse l'agglomération de Creutzwald.

Les nappes alluviales sont désormais intégrées dans la nouvelle version du modèle, sur la base des informations fournies par un modèle géologique des alluvions du bassin houiller (Cartannaz, 2018). Ce travail tient compte des données piézométriques disponibles sur les piézomètres bancarisés, dont les ouvrages réalisés jusqu'à 2016 dans la nappe alluviale de la Bisten au niveau de l'agglomération de Creutzwald.

Concernant ce secteur, il est indiqué dans le dossier BSS du point 01397X0071/S5 que lors de l'étude géotechnique préalable à la création de la retenue de Creutzwald, deux niveaux piézométriques ont été observés en 1965-1966 : le niveau le plus profond était situé à la cote 196 m environ (mesures dans 5 piézomètres de 20 m de profondeur), et le niveau le plus élevé était situé à des cotes variant entre 200 et 209 m (mesures dans 4 piézomètres de 5 à 10 m de profondeur). L'altitude de la nappe la plus profonde est du même ordre de grandeur que celle observée dès cette époque au niveau du cône de rabattement du secteur Barrois (ce dernier n'a plus évolué jusqu'en 2009).

Dans les piézomètres créés par GEODERIS en 2012 et 2013 pour étudier la nappe alluviale de la Bisten au droit de l'agglomération de Creutzwald, on observe en septembre 2013 des niveaux piézométriques variant entre 203,98 m et 206,42 m dans 12 piézomètres profonds de 4,6 à 6,8 m. Les coupes géologiques de ces piézomètres montrent que les alluvions, constituées sur plusieurs mètres de sables fins, de graviers et contenant localement des débris végétaux, présentent généralement des niveaux tourbeux ou argileux dont l'épaisseur varie de quelques centimètres à quelques mètres (Reichart, 2015g). Des pompages d'essai (de très courte durée) permettent de calculer une perméabilité médiane de 4,10⁻⁶ m/s, sachant que 6 tests sur 8 donnent une valeur de K variant entre 2,9.10⁻⁶ m/s et 7,8.10⁻⁶ m/s (Kimmel, 2014). L'ordre de grandeur de la perméabilité des alluvions serait donc d'un facteur 10 inférieur à celle du grès qui est d'environ 3 à 6.10⁻⁵ m/s. La valeur retenue pour la version actuelle du modèle est de 0,4.10⁻⁵ m/s pour la couche des alluvions de la Bisten.

Ainsi, on peut identifier à Creutzwald un aquifère alluvial, dont le substratum est situé à une profondeur inférieure à 10 m selon les mesures disponibles, de perméabilité d'un ordre de grandeur inférieur à celui de la nappe des GTI. Cet aquifère superficiel a présenté (jusqu'à récemment) un niveau piézométrique stable plus élevé que celui de la nappe des GTI depuis que l'exploitation minière a rabattu cette dernière. Avant cette période, la nappe des GTI pouvait se mettre en charge suffisamment sous la nappe alluviale pour que certains forages situés dans les points bas soient artésiens (forage d'eau 01397X0027 créé en 1932 en bordure de la Bisten à Creutzwald).

On peut déduire de l'ensemble des observations piézométriques synthétisées ci-dessus qu'en 1965, le cône de rabattement de la nappe des GTI au droit du secteur Barrois s'étalait sous la Bisten et rejoignait le cône de rabattement qui s'était créé en rive gauche de la Bisten au droit du secteur Traditionnel ancien (1910-1930). La nappe alluviale était perchée au-dessus de la nappe des GTI.

D'après des données transmises par GEODERIS, à la fin 2012, la nappe alluviale était alimentée par la Bisten en amont du canal ; elle était située 1.3 m sous le fond du canal, et au même niveau que la Bisten en aval du canal (échange faible).

Depuis 2015 voire plus tôt (Reichart, 2015g), la piézométrie de la nappe des GTI a rejoint celle de la nappe alluviale et a fini par la dépasser. Une mise en charge de plusieurs dizaines de centimètres a ainsi été observée sur plusieurs piézomètres fonctionnant en doublets « nappe alluviale – nappe des GTI » implantés en 2016. Ces données démontrent le caractère redevenu captif de la nappe des GTI dans ce secteur sous couverture alluvionnaire (Reichart, 2017a). Ainsi, la nappe alluviale est alimentée aujourd'hui par drainance ascendante probablement accompagnée localement par un drainage latéral de la nappe des GTI par les sables alluvionnaires perméables, dans les zones de transition en bordure de nappe alluviale où les niveaux tourbeux disparaissent (Reichart, 2016b, 2016c, 2017a).

c) Perte des cours d'eau au droit des affaissements miniers

Dans les secteurs situés au droit des travaux d'exploitation souterrains, donc dans des secteurs où les terrains sont plus ou moins affaissés, il est connu que les cours d'eau sont généralement perchés au-dessus de la nappe des GTI (CdF, 2005a), et que certains tronçons de cours d'eau présentent des pertes au droit des secteurs fracturés par les affaissements miniers.

Ainsi, les débits d'infiltration du Diesenbach et du lac de Creutzwald vers la nappe des GTI ont été évalués en 2003 à respectivement 23 L/s et 50 L/s (CdF, 2005a, figure 4 p. 20).

À l'aval du lac de Creutzwald, 3 forages en rive gauche de la Bisten ont vu leur niveau piézométrique remonter entre 1976 et 1985 : 01397X0096 (+10 m), 01397X0068 (+ 4 m), 01397X0016 (+4 m), alors que la somme des débits pompés sur les forages exploités du secteur (01397X0096; 01397X0067; 01397X0061) a augmenté fortement sur la même période (252 000 m³/an en 1976, 631 000 m³/an en 1981, 371 000 m³/an en moyenne entre 1982 et 1987). La remontée dans les forages a été d'autant plus faible qu'ils sont éloignés de la Bisten. L'hypothèse suivante peut être formulée pour expliquer ce phénomène : la mise en eau du lac de Creutzwald en mai 1967 aurait provoqué ou augmenté les pertes de la Bisten vers la nappe des GTI via la nappe alluviale, et aurait provoqué la remontée de la nappe profonde en rive gauche de la Bisten.

La fiche des débits caractéristiques de la Bisten à Creutzwald du catalogue des débits d'étiage du bassin Rhin-Meuse (AERM et DIREN de bassin Rhin-Meuse, 2000) fait apparaître une perte moyenne de 145 L/s entre l'amont du lac de Creutzwald et la station hydrométrique de la Bisten à Creutzwald (A9612010) 3 km en aval, ce qui correspondrait à une perte supplémentaire moyenne de 95 L/s pour la Bisten en aval du lac de Creutzwald (CdF, 2005c, p. 46).

Dans le secteur Centre-Est, un modèle hydrologique mis en place par ANTEA (CdF, 2005b) a permis d'estimer les pertes des cours d'eau vers les GTI notamment au niveau du Merlebach et de la Rosselle (cf. carte en annexe 3).

Beaucoup d'autres tronçons amont des cours d'eau du secteur sont certainement infiltrant, sans que l'on puisse quantifier ces pertes.

d) Modélisation des échanges nappe-rivière

Cette complexité des échanges nappe-rivières impose une modélisation plus élaborée qu'une simple représentation du drainage par « mailles à débordement ». Nous avons choisi d'utiliser de la fonctionnalité « réseau hydrographique » de MARTHE, qui permet de calculer le sens et la valeur des débits échangés entre la nappe (nappe des GTI ou nappe alluviale selon leur répartition géographique dans le modèle) et la rivière proportionnellement à la perméabilité du lit de la rivière et à la différence de charge hydraulique entre le niveau de la nappe et la cote de la ligne d'eau dans la rivière. Cette fonctionnalité est utilisée de façon simplifiée car le calcul du débit qui s'écoule dans les rivières n'a pas été considéré à ce jour dans le modèle (ces débits n'étant pas connus ou trop influencés par les exhaures et les rejets industriels).

Cette façon de modéliser les échanges nappe-rivière permet notamment de:

- Simuler la mise en charge de la nappe même dans la maille du modèle contenant la rivière (il suffit d'interdire le débordement classique et d'affecter une perméabilité d'échange faible au lit du cours d'eau).
- Contrôler le débit d'échange depuis un cours d'eau vers la nappe sous-jacente, lorsqu'on le connaît ou lorsque que cet échange est cohérent avec les chroniques piézométriques observées.
- Simuler correctement la réduction du débit d'échange en provenance d'un cours d'eau au fur et à mesure de la remontée de la nappe (le débit d'échange calculé étant proportionnel à la différence d'altitude entre le niveau du cours d'eau et le niveau de la nappe, il diminue lorsque la nappe remonte à condition que la charge de la nappe soit au-dessus de l'altitude correspondant au fond de la rivière.).

3.3.2. Echanges nappe-mine

Considérant la quasi-absence de données sur les échanges, il n'était pas pertinent de modéliser la mine en détail, même si les informations sur la géométrie des mines disponibles sous une forme numérique sont très riches et détaillées. Les principales caractéristiques du modèle conceptuel d'échange nappe-mine retenu sont décrites ci-après (cf. annexe 3, coupes verticales issues du modèle MARTHE).

• Une couche « mine » de mailles à perméabilité élevée représente tous les travaux miniers connus (6.10⁻⁴ à 5.10⁻³ m/s). Les connexions entre les champs sont figurées par quelques lignes de mailles représentant les galeries principales de liaison. La mine est considérée comme un milieu poreux équivalent (ne sachant pas en détail ses propriétés : géométrie, comblement/effondrement, ...) et seul le transfert de pression est modélisé de manière simplifiée à l'aide d'une perméabilité élevée (cette perméabilité peut toutefois être modulée de manière à reproduire d'éventuelles différences de charge entre secteurs de la mine). Le modèle conceptuel ainsi défini contient les éléments suffisants à des calculs hydrodynamiques faisant intervenir la relation entre la nappe des GTI et les réservoirs miniers.

- Une couche « Permien » représente le substratum qui est peu perméable lorsqu'il n'est pas impacté par les travaux miniers, sauf au droit des venues d'eau observées en mine où il est au contraire fracturé et perméable. Cette couche « Permien » du modèle règle ainsi les échanges entre la couche « nappe des GTI » et la couche « mine ». Il faut considérer deux périodes pour la modélisation des échanges nappe-mine via le Permien :
 - La période d'exploitation et de remplissage de la mine.
 - La période suivant la fin de l'ennoyage de la mine.

a) Période d'exploitation et de remplissage de la mine

Tant que la mine est dénoyée, même partiellement, on peut considérer que les mailles situées au droit des venues d'eau en mine ont un débit de venue d'eau mesuré ou évalué en mine proportionnel à la perméabilité verticale K_v: c'est notamment le cas dans l'hypothèse d'un gradient de charge unitaire. Cette hypothèse revient à constater que lorsqu'un milieu poreux idéal s'égoutte verticalement dans un vide sous-jacent, l'épaisseur de terrain poreux traversée est égale à la différence entre le niveau piézométrique et l'altitude de la venue d'eau : le gradient vertical de charge qui intervient dans la loi de description des écoulements dans un milieu poreux (loi de Darcy) est alors égal à 1, et la loi se simplifie pour devenir :

Débit venue d'eau = Kv x Surface d'échange

d'où l'on peut déduire directement K_v , la surface d'échange étant fixée à la taille d'une maille (50 x 50 m).

Cette hypothèse de gradient unitaire a aussi été utilisée dans les modélisations ANTEA pour calculer les transmissivités verticales $T_v = K_v x$ Epaisseur _{Permien}. Ces transmissivités verticales ainsi calculées ont été utilisées dans le modèle construit pour CdF ayant servi aux simulations présentées dans les DADT des mines du bassin houiller.

Toutefois, l'hypothèse de gradient unitaire n'est valable que dans le cas où le Permien et les GTI ont la même perméabilité verticale. C'est pourquoi, dans le code MARTHE, afin que le calcul du débit qui transite par les points d'échange nappe-mine après l'ennoyage soit cohérent avec le débit calculé par la méthode du gradient unitaire avant l'ennoyage, les dispositions suivantes sont prises pour les mailles des couches « GTI », « Permien » et « mine » situées au droit des points d'échange nappe-mine :

- Suppression de toute anisotropie verticale de perméabilité le cas échéant.
- Affectation de la même perméabilité verticale calculée par la méthode du gradient de charge unitaire pour les mailles des 3 couches, GTI, Permien, mine, au droit des points d'échange nappe-mine. Un facteur d'anisotropie pour ces mailles a été parfois appliqué pour respecter l'uniformité des perméabilités verticales entre ces trois couches.

Ces modifications permettent de respecter les conditions d'application de l'hypothèse du gradient unitaire tout en impactant très peu la modélisation des écoulements horizontaux. En effet, les modifications ne concernent que des mailles isolées représentant le fonctionnement des points d'échange nappe-mine, objets pour lesquels la description des écoulements verticaux et la vraisemblance du débit échangé entre couches différentes est le phénomène fondamental à étudier. Enfin, ces modifications apportées au modèle MARTHE ne concernent que la période après ennoyage des mines (cf. alinéa ci-dessous). Pour la période précédant l'ennoyage des mines, le fonctionnement de l'échange nappe-mine selon l'hypothèse du gradient unitaire n'est pas modélisé explicitement. Pour simplifier le calcul, pour les périodes 1976-2008 (secteur Ouest) et 1976-2012 (secteur Centre-Est), les couches « mine » et « Permien » sont simplement désactivées, et les venues d'eau en mine sont représentées par des pompages dans la nappe des GTI au droit des points d'échange nappe-mine. Les couches « désactivées » ne font alors pas partie du domaine de calcul.

La réduction observée des débits d'exhaure au cours des années, dans les secteurs exploités anciens, pouvait être due à la fermeture ou au colmatage des fractures créées par l'exploitation minière dans la nappe des GTI et/ou le Permien. Elle pouvait aussi provenir d'une extension du cône de rabattement dans la nappe des GTI provoqué par les infiltrations vers la mine, et donc d'une diminution du gradient de charge. Cependant, étant donné que le niveau piézométrique observé était constant dans certains piézomètres situés au droit de ces secteurs anciens affectés de venues d'eau, alors que le débit des venues d'eau y a diminué d'année en année, c'est plutôt la fermeture ou le colmatage des fractures qui semble à l'origine de la diminution du débit. Cela serait cohérent avec la nature argileuse des grès du Permien. Enfin la baisse du débit pourrait aussi provenir d'une inflexion importante du gradient hydraulique dans les derniers mètres de grès sus-jacents au Permien, qui auraient joué le rôle d'une zone de dépression. L'évolution future éventuelle des perméabilités des points d'échange nappe-mine n'est pas prise en compte dans le modèle actuel, par manque complet d'information sur les mécanismes qui sont éventuellement à l'œuvre au cours de la reconstitution de la nappe des GTI.

b) Période suivant la fin de l'ennoyage de la mine

A partir de début 2009 pour le secteur Ouest et 2013 pour le secteur Centre-Est (dates auxquelles les derniers vides miniers sont ennoyés), les deux couches « mine » et « Permien » sont rendues actives dans le modèle et peuvent échanger de l'eau avec la couche « nappe GTI » selon le schéma classique de calcul multicouche. En chaque point d'échange nappe-mine, le débit échangé entre les deux couches « nappe GTI » et « mine » via les points d'échange de la couche « Permien » dépend alors des différences de charge existant entre ces couches ainsi que de la perméabilité verticale unique affectée au triplet de mailles superposées du point d'échange (« GTI », « Permien », « mine », comme discuté à l'alinéa précédent). La perméabilité de chaque point d'échange est calculée à l'aide des débits des venues d'eau en mine mesurés ou estimés (cf. § 3.2.2.b) juste avant la fin de l'ennoyage, soit en 2008 pour le secteur Ouest et en 2012 pour le secteur Centre-Est.

4. Calibration du modèle MARTHE dans le bassin houiller et sa périphérie

4.1. METHODOLOGIE DE CALIBRATION

La modification de la structure d'un modèle numérique et/ou l'introduction de nouvelles données impose toujours la calibration du modèle de manière à ajuster au mieux les évolutions des paramètres observés et calculés (niveaux piézométriques, débits drainés par le réseau hydrographique).

L'ensemble des points disposant d'au moins une mesure de niveau piézométrique sur la période 1976-2016 (cf. le décompte des piézomètres dans les 2 tableaux des points de donnée en annexe 3) a été recensé pour la calibration, soit 594 points se trouvant en France et 97 points en Allemagne. Tous les points de calibration ne sont pas nécessairement affichés. Le choix a été fait d'afficher ceux ayant le plus de données sources où étant situés dans des secteurs jugés sensibles comme l'agglomération de Creutzwald. Par ailleurs, pour diverses raisons, des points affichés dans les cartes de calibration sont affichés en grisé (la liste suivante n'étant pas exhaustive) car ceux-ci :

- Ne sont pas fiables, tels que, le puits de mine 01405X0027/PIV (mesures intracuvelage peu fiables : problème de représentativité de la donnée), l'ouvrage 01656X0014/F1 au comportement anormal par rapport aux ouvrages environnants dans le secteur de Faulquemont, l'ouvrage 01397X0071/S5 (implanté avant la mise en eau du plan d'eau de Creutzwald), les ouvrages aux données difficiles à vérifier comme SAR_L3, SAR_NB5, SAR_Sf448 et SAR_4114.
- N'ont pas pu être reproduits malgré les efforts fournis, tels que, l'ouvrage 01406X0024/410 (zone très faillée : influence probable sur la donnée) et l'ouvrage 01397X0061/P5 (point « sacrifié » car incompatible avec les ouvrages environnants, par ailleurs bien calés. Il y a 10 m de charge en trop et cela n'a pu être expliqué.
- Ont été manuellement modifiés, tels que, les ouvrages 01405X208/SP036 et 01405X0086/PUITS1, où la piézométrie mesurée est inférieure au substratum des grès (la donnée a été manuellement ramenée à la cote du substratum, ouvrages secs).

Enfin, de manière générale (ce point restant toutefois à l'appréciation de l'expert), lorsqu'un ouvrage présente une chronique contenant manifestement des anomalies, la calibration des paramètres du modèle s'est basée sur les valeurs hautes de la chronique plutôt que sur les valeurs faibles, du fait des prélèvements perturbateurs ayant pu être réalisés dans l'ouvrage (exemple du 01653X0121/F).

La très grande quantité de données à examiner à chaque calibration a nécessité le développement d'un outil spécifique d'interfaçage entre un SIG et les résultats fournis par le code MARTHE. L'outil permet actuellement de générer automatiquement les graphiques associés aux cartes présentées en annexe 4, et de calculer des statistiques permettant de juger rapidement à chaque test de la qualité de la calibration, point par point.

La calibration du modèle régional dans le bassin houiller a nécessité de très nombreux essais (près de 300), compte tenu de la complexité du système à modéliser. En effet, dans ce secteur très anthropisé, la surface de la nappe des GTI a évolué sans cesse depuis le début de l'exploitation des mines. Les paramètres hydrodynamiques (perméabilités, coefficients d'emmagasinement, colmatages, état initial, etc.) du modèle MARTHE doivent être ajustés en restant dans des gammes réalistes pour restituer aux mieux les chroniques des niveaux observés sur les points de suivi piézométrique. Tous les points disposant d'au moins une mesure de niveau piézométrique sur la période 1976-2016 et se situant dans le sous-maillage gigogne du bassin houiller ont été utilisés pour la calibration.

Nota bene : il est à noter que les points de mesure se situant en périphérie du bassin houiller, dans les secteurs de Bitche, de Sarrebourg et plus largement dans le département de la Moselle, ont été intégrés à la procédure de calibration car ces secteurs se situent à l'amont ou à l'aval hydraulique du bassin houiller, et constituent ainsi des zones d'alimentation ou des exutoires qui doivent être recalées en même temps que les secteurs du bassin houiller.

Afin d'assurer une meilleure robustesse au modèle calé, la procédure de calibration a respecté le principe de parcimonie : parmi toutes les configurations équivalentes possibles pour obtenir un résultat équivalent, la calibration à retenir est celle qui nécessite le moins de paramètres, chaque paramètre prenant le moins de valeurs spatialement différentes possible.

4.2. PARAMETRES DE CALIBRATION

Les paramètres hydrodynamiques retenus dans le modèle pour les couches aquifères des GTI et des alluvions sont synthétisés dans l'Illustration 13 et concernent : les perméabilités, les coefficients d'emmagasinements et les facteurs d'anisotropie verticale. Les paramètres de la couche mines sont également indiqués même s'ils ne correspondent pas à de réelles caractéristiques hydrogéologiques.

Nappes	Gamme de perméabilité (m/s)	Gamme de coefficients d'emmagasinement libre (%)	Gamme de coefficients d'emmagasinement captif (-)	Anisotropie verticale K _v /K _h
Alluvions	0,4.10-5	10	10 ^{e-4}	1 (base perméable) à 1 ^{e-7} (base imperméable)
GTI	0,2 à 12.10 ⁻⁵	10	1 à 5.10 ⁻⁴	3.10 ⁻⁴ à 2,31
Mines	62,5 à 500.10 ⁻⁵	Non concerné	0,8 à 8,0.10 ⁻⁴	4,8.10 ⁻⁶ à 6,2.10 ⁻²

Illustration 13 : Synthèse des paramètres hydrodynamiques retenus à l'issue de la calibration du modèle hydrodynamique

En raison de la complexité du système hydrogéologique du bassin houiller, la calibration des paramètres hydrodynamiques classiques (notamment perméabilité, coefficients d'emmagasinement libre et captif) n'a pas suffi à lui seul à atteindre un ajustement suffisant des très nombreuses observations disponibles. Les autres paramètres qui s'avèrent extrêmement importants pour l'ensemble du bassin houiller sont :

 La situation initiale de la nappe lors du démarrage de la simulation : en raison du très fort déséquilibre de la nappe au démarrage des simulations (1977), ce paramètre est essentiel à estimer faute de quoi la tendance d'évolution n'est jamais correcte. Cela étant, une méthode d'interpolation automatique ne convient pas, car la nappe à cette date était rabattue fortement dans son ensemble mais de manière très différente selon les secteurs. La méthode la plus intégrante pour résoudre ce problème aurait consisté à établir une nouvelle carte piézométrique initiale à chaque test de calibration, en testant différentes situations de rabattement là où l'on ne dispose pas de mesures piézométriques. Cette solution aurait impliqué de travailler manuellement ou presque et n'était pas donc raisonnable compte tenu des centaines de tests nécessaires à la calibration. Une méthodologie offrant un compromis acceptable entre les deux solutions évoquées précédemment a donc été mise au point. Elle consiste à calculer un régime permanent initial en considérant les mesures piézométriques connues comme des charges imposées.

- Le rôle hydrogéologique de chacune des failles majeures, très nombreuses dans le bassin houiller : sont-elles imperméables, peu perméables, sur quel linéaire ? Ce paramètre joue un rôle majeur et explique la difficulté à reproduire les tendances d'évolution de certains niveaux piézométriques en faisant varier uniquement les paramètres hydrodynamiques classiques (cf. annexe 4, les cartes et graphiques démontrant l'existence de failles imperméables). De nouvelles failles au rôle hydrogéologique non connu jusqu'ici semblent jouer un rôle important : faille du Grand Dérangement du Siège 1, faille de Varsberg, faille de la Chapelle. (Cf. en annexe 4, les niveaux piézométriques calculés par le modèle MARTHE pour l'année 1976, figurés en rouge pour les failles peu perméables et lignes grises les failles totalement imperméables, une carte des failles imperméables sur le secteur Ouest ainsi qu'un tableau récapitulatif des failles à rôle hydrogéologique).
- La position et le débit des points d'échange nappe-mine dans les secteurs Centre et Est : ces positions et les débits d'échange nappe-mine sont inconnus. Contrairement au cas du secteur Ouest, on ne peut les estimer qu'en se basant sur la piézométrie connue. Or, l'échange nappe-mine détermine la surface piézométrique de la nappe profonde au droit des mines, qui est extrêmement perturbée (les différences entre les points hauts et bas de la surface piézométrique sont de plus de 100 m localement). La bonne reproduction de cette surface piézométrique et de son évolution conditionne la qualité des simulations de remontée de nappe.
- Les échanges nappe-rivière : ce paramètre influe fortement sur les résultats des simulations, il faut estimer la position des tronçons de cours d'eau drainants ou perdants, ainsi que les paramètres d'échange avec la nappe. La calibration respecte autant que possible les mesures d'infiltration des cours d'eau de certains tronçons de rivière figurant dans les DADT, notamment la Bisten sur le secteur Ouest et la Rosselle sur le secteur Est (cf. la carte des pertes de rivières du secteur Centre-Est estimées en annexe 3).
- Le surplus d'infiltration en pied de côte de la nappe du Muschelkalk (drainance, infiltration du ruissellement) : ce paramètre permet de maintenir les niveaux piézométriques à l'aval des points hauts de la piézométrie, et doit être évalué. Cette infiltration est localisée sur les grès coquillers affleurant sur la bordure ouest du bassin houiller, au Nord de la faille de Longeville.
- L'infiltration potentielle des bassins d'infiltrations industriels à certaines périodes (notamment entre 1980 et 1990), dans les secteurs de L'Hôpital et Vernejoul. Notamment, le bassin de Diesen Est a joué un rôle important. Ce bassin a été subdivisé en 3 bassins exploités par relation suivant un cycle exploitation – consolidation – curage (Bonvallet, 1981).

La digue séparant les bassins 1 et 2 a fait l'objet d'un suivi des niveaux piézométriques. Les bassins n°2 et le n°3 ont été curés en 1980 et 1981, à la suite de quoi les piézomètres de surveillance de la digue ont montré une baisse « inexpliquée » (Delaunay, 1982).

 La représentativité de chaque mesure piézométrique comme discuté précédemment : la calibration des paramètres précédents n'est possible qu'en utilisant le maximum de données (même lorsqu'une seule mesure piézométrique est disponible sur la période de calibration la mesure peut être retenue pour fournir un point d'information), cependant la nature multicouches du grès nécessite d'évaluer à chaque test la pertinence de conserver ou non le point dans le processus de calibration, car un point peut être représentatif d'un niveau perché du grès (on ne le sait en général que par une impossibilité de calibration de ce point).

4.3. DIFFICULTES PERSISTANTES ET INCERTITUDES

Au-delà des difficultés ponctuelles évoquées au paragraphe 4.1, dans certains secteurs le travail de calibration n'a pas permis d'aboutir à une reproduction des observations pleinement satisfaisante, en raison généralement d'un manque de connaissances associé à certaines particularités hydrogéologiques :

- Nord de la commune de Schœneck, en bordure Nord-Est du bassin houiller (secteur Forbach) : cette zone est séparée hydrologiquement du reste du modèle par une limite considérée comme imperméable (pour les besoins de calibration) le long de la faille de Longeville. Cette zone n'est plus considérée dans le modèle hydrogéologique car elle est totalement indépendante du reste de la nappe des GTI. Par souci de cohérence et parce que les quelques mailles d'alluvions imperméables présentes au sud de la faille sont largement perchées par rapport à la piézométrie attendue pour la nappe des GTI, les mailles en question n'ont pas non plus été considérées dans le modèle.
- Zone de la cité Wendel Nord, en bordure Nord-Est du bassin houiller (secteur Forbach) où la piézométrie calculée reste encore trop haute sur le piézomètre 01405X0207.
- Environs de Varsberg (secteur La Houve Vernejoul) où certaines chroniques piézométriques mesurées n'apparaissant pas en annexe (par exemple les piézomètres 01396X0170 et 01396X0223) n'ont aucun lien avec les variations piézométriques générales de la nappe des GTI.
- Zone compris entre le Bitzelbach et le Leibsbach (secteur La Houve Falck) où la piézométrie calculée d'une douzaine d'ouvrages est plus basse que la piézométrie observée, soit par un manque de recharge atmosphérique et/ou par une perméabilité trop faible de la couche alluvionnaire et/ou d'échanges nappe vers rivière trop importants (effet de vidange).
- Secteur La Houve Ouest où la calibration se limite à un point unique, l'ouvrage 01396X0039/F2, limitant la représentativité du comportement de la nappe des GTI. Les efforts de calibration ont donc été reportés sur le secteur de Varsberg.
- Allemagne (secteurs Saarland Bisten et Saarland Lauterbach), où les données considérées dans le modèle sont difficiles à vérifier et où les éventuelles données complémentaires sont plus complexes à obtenir (exemples des ouvrages SAR_L3, SAR_NB5, SAR_Sf448, SAR_4114 déjà évoqués en §4.1).

 La grande majorité des nappes alluviales en l'absence de chroniques piézométriques fiables voire existantes. Les isopièzes simulées sont alors dépendantes de la valeur de perméabilité verticale (ou facteur d'anisotropie) considérée dans le modèle hydrogéologique et la phase de calibration a consisté à favoriser localement l'écoulement vertical tout en respectant le caractère imperméable de la couche défini par le modèle géologique des alluvions (Cartannaz, 2018).

Malgré tout le soin porté aux travaux de modélisation et aux investigations complémentaires menées dans le cadre des études, des incertitudes de diverses natures demeurent et doivent être gardées en mémoire dans le cadre de tout travail d'interprétation ultérieur :

- La calibration des paramètres du modèle ne permet pas d'assurer une reproduction pleinement satisfaisante des historiques piézométriques dans les secteurs précisés précédemment. Du fait des difficultés de calibration impliquant un décalage entre les chroniques simulées et les chroniques observées avant même d'entrer en phase de prévisions (qui témoignent le plus souvent de la contribution d'un paramètre physique qu'il ne nous a pas été possible d'identifier), une sous-estimation ou surestimation localement plurimétrique de la cote réelle de stabilisation de la nappe en phase prévisionnelle ne peut donc être exclue sur les zones concernées.
- La localisation des failles n'est pas connue avec précision. D'une part, une faille ne se résume pas à un simple trait dans l'espace, d'autre part leur rôle évolue probablement avec la profondeur du fait de leur pendage. Une telle incertitude peut avoir pour conséquence un décalage dans le plan des écoulements observés par rapport aux écoulements simulés. Nous conjecturons que ce point pourrait avoir des conséquences sur plusieurs dizaines de mètres de part et d'autre du tracé des failles actuellement considéré dans le modèle. Le décalage piézométrique associé pourrait localement atteindre d'amplitude plusieurs mètres voire davantage, dans la mesure où le décalage pourrait concerner des failles pour lesquelles des décrochages piézométriques de plusieurs dizaines de mètres d'amplitude sont attendus.
- Le rôle hydrogéologique de nombreux tronçons de failles considérés dans l'étude reste à démontrer (cf. tableau et carte en Annexe 4 du rapport d'étude du BRGM), dans la mesure où les données piézométriques – ou plus souvent l'absence de données – ont pu être insuffisantes pour se prononcer sur le sujet. L'action d'un tronçon de faille de perméabilité réduite se traduit par un décrochage piézométrique et par une perturbation des lignes d'écoulement. Nous conjecturons que ce point pourrait avoir des conséquences sur plusieurs dizaines à centaines de mètres de part et d'autre du tracé actuellement considéré pour les failles. Le décrochage piézométrique associé pourrait localement atteindre plusieurs mètres d'amplitude voire davantage, sur la base des décrochages connus dans le bassin.
- Le rôle des crevasses minières est à ce jour inconnu dans le système. Une fois alimentées en eau, on ne peut exclure que certaines de ces structures – qui couvrent une partie non négligeable du bassin – puissent jouer le rôle de drain préférentiel et ainsi entraîner des perturbations locales des écoulements. Ces dernières seraient conditionnées par l'ouverture des crevasses concernées, ainsi que la connectivité et la densité surfacique du réseau qui leur est associé. Nous conjecturons que ce point pourrait avoir des conséquences sur plusieurs dizaines à centaines de dizaines de mètres autour des zones prédisposées à la présence de crevasses minières. La perturbation piézométrique associée pourrait localement atteindre plusieurs mètres d'amplitude.

- Les volumes d'eau concernés par la mine et les échanges nappe-mines ainsi que leur localisation restent très mal connus même si les compléments d'information sur la mine ont grandement amélioré cette nouvelle version du modèle hydrogéologique (cf.3.2.2.b) et 3.3.2). Leur conceptualisation dans le modèle fait intervenir des valeurs de perméabilités pour la couche mine et la couche permien mais aussi des valeurs de coefficients d'emmagasinement de la couche mine dont les valeurs ne permettent que de représenter le transfert de pression pour reproduire les variations de charge. Par ailleurs les choix conceptuels de représentation de la mine peuvent également influencer localement la piézométrie calculée dans la nappe des GTI (les venues d'eau en mine sont représentées par des pompages dans la nappe des GTI). Enfin, l'évolution future éventuelle des perméabilités des points d'échange nappe-mine n'est pas prise en compte dans le modèle actuel, par manque complet d'information sur les mécanismes qui sont éventuellement à l'œuvre au cours de la reconstitution de la nappe des GTI. Nous conjecturons que ces différents éléments pourraient avoir des conséquences au long terme sur la vitesse des phénomènes de remontée mais également sur les calculs de charge, sans qu'il nous soit possible d'être plus précis quant à ces possibles conséquences en l'état actuel de nos connaissances.
- La géométrie des alluvions ne peut naturellement être modélisée de manière exacte, pas plus qu'elle ne peut être connue avec une précision absolue. D'une part, la limite des alluvions ne se résume pas à un simple trait dans l'espace, il s'agit davantage d'une zone de transition progressive entre sables et grès. D'autre part, les alluvions ne sont pas d'épaisseur constante sur toute leur largeur : les dépôts sont en réalité plus ou moins biseautés en fonction des conditions de sédimentation. Ce type d'incertitude peut avoir pour conséquence une surestimation ou sous-estimation de la future cote d'équilibre de la nappe des GTI et des nappes alluviales sus-jacentes. Nous conjecturons que ce point pourrait avoir des conséquences sur plusieurs mètres (zones de fortes pentes) à dizaines de mètres (zones de faibles pentes) de part et d'autre de la limite actuelle des alluvions. L'écart piézométrique associé pourrait localement atteindre quelques dizaines de centimètres (zones de faible pentes) voire davantage (zones de forte pentes).
- Le rôle hydrogéologique des alluvions du bassin houiller lorrain défini dans le modèle hydrogéologique influence les échanges entre la nappe des GTI et les rivières lorsque les alluvions sont suffisamment significatives pour être prises en compte dans le modèle hydrogéologique. Pour autant, il est impossible de connaître exactement la répartition et les paramètres hydrodynamiques des horizons peu perméables, qui sont le plus souvent hétérogènes dans les trois directions de l'espace. Tout au plus peut-on qualifier ces hétérogénéités. On ne peut non plus exclure que la remontée de la nappe des GTI puisse avoir des conséquences structurelles sur les horizons superficiels. Une telle incertitude impacte le caractère libre ou captif de la nappe des GTI et peut donc avoir pour conséquence une surestimation (substratum de nappe alluviale moins perméable que supposé) ou sous-estimation (substratum de nappe alluviale plus perméable que supposé) de la future cote d'équilibre de la nappe des GTI et des nappes alluviales sus-jacentes. Nous conjecturons que ce point pourrait avoir des conséquences sur toutes les zones associées à une nappe alluviale et sur quelques mètres à dizaines de mètres de part et d'autre de ces zones. L'écart piézométrique associé pourrait localement atteindre quelques dizaines de centimètres voire un à plusieurs mètres.

- Pour ce qui concerne les grès moins perméables, les données disponibles concernant la structure des GTI ne permettent pas d'écarter la possibilité de mises en charge localisées de la nappe associée. A l'exception d'un unique secteur (voir §3.3.1.b), les éléments à notre connaissance étaient insuffisants pour espérer modéliser de tels comportements de manière pertinente. Ces comportements sont localement susceptibles d'entraîner la réactivation d'anciens exutoires ou de l'activation de nouveaux exutoires pour la nappe des GTI, à la faveur des faiblesses du terrain.
- Les conséquences de la réactivation d'anciens exutoires ou de l'activation de nouveaux exutoires pour la nappe des GTI, tels que des sources ou des dépressions topographiques, ne sont pas évaluées dans le cadre de cette étude. Ces phénomènes sont notamment susceptibles de générer des alimentations complémentaires des nappes alluviales par effet de débordement. Il n'est donc pas exclu que les prévisions tendent à sous-estimer la future cote d'équilibre des nappes alluviales présentes dans les secteurs concernés par ces phénomènes.
- Tous les travaux de terrassement, creusement, imperméabilisation des terrains, étanchéification ou renaturation des cours d'eau etc. sont susceptibles d'impacter localement le comportement des eaux souterraines. De même que pour les alluvions, la parfaite connaissance des modifications anthropiques des terrains de surface et de proche surface ne peut naturellement pas être exhaustive, pas plus que ne peut raisonnablement l'être son évolution dans le futur. Estimer l'influence spatiale de ces modifications anthropiques aléatoires et se prononcer sur les perturbations piézométriques associées est selon nous inenvisageable.
- Les travaux présentés font appel à des simulations prévisionnelles d'évolution des prélèvements. Plus ces simulations prévisionnelles s'avéreront éloignées de la réalité (localement ou globalement), plus les prévisions produites s'en éloigneront également (localement ou globalement).
- Les travaux présentés font appel à un scénario climatique avec deux périodes de recharge juxtaposées temporellement (équivalentes à une infiltration moyenne puis à une infiltration réellement observée par le passé). Ce scénario ne tient pas compte des changements climatiques qui pourraient survenir et viendraient alors remettre en question les résultats de l'étude dans leur ensemble.
- Qualitativement, précisons par ailleurs que, pour une zone donnée, la conjonction de plusieurs sources d'incertitudes (par exemple la présence de crevasses dans une zone de nappe alluviale, ou encore la reconfiguration d'un champ captant situé à proximité d'une faille) tend à dégrader davantage la fiabilité des prévisions.
- De manière générale, à l'image de la précédente étude, il convient de rappeler que les cotes piézométriques et les profondeurs de nappe calculées n'ont de sens en phase de prévisions que si et seulement si les hypothèses sous-tendant la construction du modèle et les simulations prévisionnelles d'évolution des prélèvements s'avèrent correctes.

4.4. RESULTATS DE CALIBRATION (ANNEXE 4)

Les résultats de calibration du modèle MARTHE dans le bassin houiller et sa périphérie sont présentés en annexe 4, pour chacun des 11 secteurs du sous-maillage gigogne disposant de points de mesures piézométriques de la nappe des GTI profonde, pour celle de la nappe alluviale, et pour les 3 secteurs situés en périphérie du bassin houiller. Les 4 dernières pages de l'annexe 4 présentent aussi des cartes de la surface piézométrique et de la profondeur de la nappe calculées par le modèle MARTHE pour les années 1976 et 2008.

La qualité de la calibration peut s'apprécier secteur par secteur par comparaison des chroniques piézométriques calculées sur la période 1976-2016 avec les chroniques mesurées sur la même période.

Sur la période de calibration et pour le secteur du bassin houiller de la nappe des GTI, la moyenne arithmétique en valeur absolue des écarts de charge entre les résultats observés et simulés est comprise entre 10 m et 0,85 m dans les différents secteurs du gigogne (Illustration 16) et, elle est de 3,08 m pour l'ensemble du gigogne (*Illustration 15*). Ces moyennes d'écart de calibration sont calculées comme suit :

- Pour chaque ouvrage piézométrique, on calcule une valeur absolue d'« écart de simulation » entre toutes les valeurs observées disponibles et les valeurs simulées correspondantes.
- La médiane des valeurs absolues des écarts est ensuite calculée pour chaque ouvrage piézométrique, afin d'obtenir un écart médian sur toute la chronique de calibration (on choisit la médiane car elle est peu sensible aux écarts extrêmes qui sont souvent dus, sur une même chronique piézométrique, à des problèmes de représentativité des mesures piézométriques) : les Illustration 14 et Illustration 15 représentent la distribution des médianes des valeurs absolues des écarts mesurés/simulés pour l'ensemble des points de calibration.
- Enfin, la moyenne des écarts médians en valeur absolue permet de juger de la calibration sur l'ensemble des chroniques piézométriques disponibles (on choisit la moyenne car elle est sensible aux extrêmes et permet de mieux juger de la qualité de la calibration dans son ensemble).

Il est à signaler que les points jugés *a priori* peu ou pas représentatifs du système modélisé n'ont pas été écartés du calcul de l'indicateur de qualité de la calibration, pour éviter de biaiser l'indicateur de qualité de la calibration et pour rendre possible d'éventuelles mises à jour du modèle, soit en supprimant définitivement un point de calibration s'il est démontré qu'il n'est pas représentatif, soit en modifiant les paramètres hydrodynamiques pour améliorer la calibration sur le point considéré.



Illustration 14 : Qualité de calibration (médiane des valeurs absolues des écarts entre piézométrie mesurée et simulée, en mètres) entre 1976 et 2016 sur l'ensemble du modèle régional (544 points de mesures piézométriques de la nappe des GTI-Alluvions-Mines)



Illustration 15 : Qualité de calibration (médiane des valeurs absolues des écarts entre piézométrie mesurée et simulée, en mètres) entre 1976 et 2016 sur le maillage gigogne du bassin houiller (424 points de mesures piézométriques de la nappe des GTI)

Pour quantifier plus efficacement l'erreur entre l'entrée et la sortie du modèle en période de calibration, nous avons utilisé la racine carrée de l'écart quadratique moyen (RMSE : *Root Mean Square Error*), RMSE et RMSE normalisée, qui sont des critères utilisables en modélisation hydrogéologique (Anderson, 1992).

La RMSE (en m) associée à un ouvrage se calcule comme suit, avec X_{obs} les niveaux piézométriques observés, X_{simu} les niveaux piézométriques simulés, et *n* le nombre de couples « observé/simulé » disponibles pour l'ouvrage :

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^{n} (X_{obs,t} - X_{simu,t})^2}{n}}$$

Pour les 394 points considérés dans le calcul (nombre de mesures supérieures à 1), la RMSE moyenne calculée entre 1976 et 2016 (donc pour chaque couple « observé/simulé ») est de 3,7 m. Autrement dit, par ouvrage, la déviation moyenne des niveaux simulés dans le secteur est de près de 3,7 m par rapport aux niveaux observés.

Dans les différents secteurs du gigogne, cette valeur évolue entre 0,9 et 12 m (Illustration 16).

La RMSE normalisée, ou RMSEN, tient compte des différentes gammes de valeurs associées aux niveaux piézométriques observés, c'est-à-dire que selon la variation plus ou moins importante du niveau au cours de la période d'observation, la façon de calculer l'erreur est différente. Elle permet donc un calcul plus représentatif de l'erreur que la RMSE, selon l'expression suivante :

$$RMSEN = \frac{RMSE}{\max(X_{obs}) - \min(X_{obs})}$$

Pour les 207 points considérés dans le calcul (nombre mesures supérieur à 5), la RMSEN moyenne est de 56%, ce qui revient à dire que, par ouvrage, l'amplitude moyenne de la déviation des niveaux simulés est inférieure à l'amplitude de la gamme de valeurs dans laquelle les niveaux piézométriques observés évoluent. Ce résultat atteste de la fiabilité globale des résultats du modèle en période de calibration.

Dans les différents secteurs du gigogne, cette valeur évolue entre 20% et 120% (Illustration 16).

Secteur du gigogne du bassin houiller	Moyenne arithmétique des écarts médians « Observation – Simulation » en valeur absolue (m)	RMSE (m)	RMSEN (%)
GTI La Houve Falck	1.5	2.2	63
GTI La Houve Traditionnel	1.4	1.7	53
GTI La Houve Vernejoul	3.7	4.2	65
GTI La Houve Ouest	1.5	1.7	22
GTI L'Hôpital	2.2	2.8	65
GTI Rosselle amont	3.4	4.2	50
GTI Faulquemont	3.5	4.0	25
GTI Vouters Reumaux	10	12	63
GTI Forbach	6.5	7.8	61
GTI Saarland Lauterbach	3.4	4	60
GTI Saarland Bisten	1.6	2	56
Alluvions Ouest	0.85	0.9	63
Alluvions Ouest	1.5	1.7	120
Mines	2.0	2.3	20
min	3.08	3.70	56
max	10.00	12.00	120
тоу	0.85	0.90	20

Illustration 16 : Qualité de calibration entre 1976 et 2016 sur le maillage gigogne du bassin houiller, (424 points de mesures piézométriques de la nappe des GTI) ; RMSE : la racine carrée de l'écart quadratique moyen (Root Mean Square Error) ; RMSEN : la racine carrée de l'écart quadratique moyen Normalisé

Les paramètres de calibration définis pour la période 1976-2016 permettent de calculer les bilans hydrodynamiques annuels sur l'ensemble du domaine, c'est-à-dire alluvions, GTI et Mines (Illustration 17). Ces volumes entrant et sortant du domaine modélisé concernent :

- Les entrées d'eau, en moyenne de 318 Mm³/an (valeurs indiquées positivement sur l'illustration), qui se décomposent en :
 - Recharge atmosphérique, en moyenne de 285 Mm³/an (Recharge_Maill).
 - Echanges nappe-rivière qui incluent l'infiltration des eaux de ruissellement du Muschelkalk, en moyenne de 24 Mm³/an (Glob_Riv_Nappe).
 - Stockage, en moyenne de 9 Mm³/an (Glob_Stock).
- Les sorties d'eau, en moyenne de 316 Mm³/an (valeurs indiquées négativement sur l'illustration), qui se décomposent en :
 - Prélèvements par pompage, en moyenne de 113 Mm³/an (Glob_Intern_fix), dont 8 Mm³/an en moyenne ne peuvent être prélevés à cause du dénoyage de certaines mailles pompées (erreur moyenne de 6 % sur les prélèvements).
 - Débordements, en moyenne de 161 Mm³/an (Débordement).
 - Limites du domaine aux charges hydrauliques imposées, en moyenne de 34 Mm³/an (Glob_Limites).



Illustration 17 : Bilans hydrodynamiques annuels calculés sur la période de calibration 1976-2016 pour l'ensemble du domaine (alluvions, GTI et mines)

5. Simulations prévisionnelles

5.1. DEFINITIONS DES SCENARIOS DE SIMULATION

Deux simulations prévisionnelles relatives aux prélèvements dans la nappe des GTI et le réservoir minier ainsi qu'à l'infiltration des eaux atmosphériques ont été réalisées. Ces deux simulations considèrent deux scénarios de prélèvements différents dits « sécuritaire » et « réaliste ». Les deux simulations intègrent la période de calibration de 1976 à 2016 et se poursuivent sur deux siècles pour la phase prédictive. Chaque simulation est calculée en utilisant un scénario climatique construit de telle sorte à intégrer successivement trois parties : la variation de recharge annuelle (1976-2013) de la période de calibration¹⁴, une recharge annuelle moyenne (établie sur les dix années de 2004 à 2013) et de nouveau la variation de recharge annuelle de la période de calibration (1976-2013).

5.1.1. Scénarios « sécuritaire » et « réaliste » d'évolution des prélèvements dans la nappe des GTI et dans le réservoir minier

Deux scénarios prévisionnels relatifs aux prélèvements dans la nappe des GTI et dans le réservoir minier ont été définis :

- Un scénario « sécuritaire » (pessimiste) : il correspond à l'arrêt de tous les prélèvements effectués dans la nappe des GTI et dans le réservoir minier à compter de 2017, sur tout le domaine modélisé.
- Un scénario « réaliste » : il correspond à la prise en compte d'un certain nombre de dispositions et de simulations d'évolutions des prélèvements d'eau :
 - Dans le bassin houiller côté français, l'ajustement annuel des volumes prélevés dans les puits La Houve 1 (secteur Ouest), Simon 5 et Vouters 2 (secteurs Centre et Est) à partir de 2017 de façon à ce que les cotes des réservoirs miniers ne puissent jamais dépasser la cote 205 m NGF (Ouest) et 193 m NGF (Centre et Est) pour éviter la remontée d'eau de mine dans les GTI : cet ajustement se fait en implantant des cotes de débordement au niveau de la couche mine, les débits d'ajustement nécessaires sont ainsi directement estimés par le code MARTHE.
 - Dans les secteurs Centre et Est, à Forbach, Freyming-Merlebach, Betting, Hombourg-Haut et Rosbruck, la prise en compte dans le futur des 15 forages de rabattement de la nappe des GTI prévus par CdF (CdF, 2005d) : ces forages de rabattements sont pris en compte en affectant une cote de débordement de manière à ce que le modèle déborde lorsque la charge hydraulique calculée dépasse cette cote, on a ainsi un débit de rabattement nécessaire correspondant au maintien de cette cote.
 - Dans le secteur Ouest, à Creutzwald, la prise en compte de l'arrêt du forage F28 destinée au soutien d'étiage du Leibsbach le 01/01/2017.

¹⁴ La période de calibration est réalisée sur la période de 1976 à 2016 en tenant compte d'une recharge annuelle variant de 1976 à 2013 suivie, pour la période de 2014 à 2016, d'une moyenne établie sur les dix années de 2004 à 2013 en l'absence de données climatiques sur cette période.
- Dans le secteur Ouest, à Creutzwald, la prise en compte des forages de rabattement « Poste » et « Croix » dont les essais ont commencé mi-2016.
- Dans le secteur Ouest, à Diesen, le maintien jusqu'en 2023 des volumes prélevés pour le soutien du lac de Creutzwald.
- Dans le bassin houiller côté français, la prise en compte d'une diminution future des prélèvements destinés à l'AEI suivant les prévisions de la Société des Eaux de l'Est disponible jusqu'à 2045.
- Dans le bassin houiller côté français, la prise en compte d'une diminution future des prélèvements destinés à l'AEP, à hauteur de 1,3% par an de 2014 à 2030, de telle sorte que les volumes prélevés en 2030 soient diminués de 20,7% par rapport aux volumes prélevés en 2014. Cette diminution a été évaluée par différents services de l'Etat, notamment sur la base d'études du SAGE du bassin houiller et de statistiques INSEE.
- Dans le bassin houiller côté allemand, la prise en compte d'une diminution des prélèvements destinés à l'AEP et l'AEI de 3% par an jusqu'à 2020 à compter des dernières données de prélèvements disponibles puis d'une stagnation au-delà de cette échéance.

La synthèse des cotes retenues pour la mise en activité des pompages miniers et de rabattement de la nappe des GTI dans le modèle (équivalent à des cotes de débordement) est reprise dans l'*Illustration 18* :

Nom	Nappe captée	Seuil d'activation (m NGF)
Forbach 1	GTI	194
Forbach 2	GTI	194
F10	GTI	186
F11	GTI	186
F12	GTI	186
F13	GTI	186
F1	GTI	204
F2	GTI	204
F3	GTI	204
F4	GTI	201
F5	GTI	201
F6	GTI	201
F7	GTI	207
F8	GTI	207
F9	GTI	207
Simon 5	Mines	193
Vouters 2	Mines	193
La Houve 1	Mines	205
Varsberg	GTI	230,5

Illustration 18 : Cotes retenues pour la mise en activité des pompages miniers et de rabattement de la nappe des GTI dans le modèle pour le scénario « réaliste » (équivalent à des cotes de débordement).

5.1.2. Scénarios climatiques

Le scénario climatique nécessaire aux simulations prévisionnelles (post 2016) d'impact de l'évolution des prélèvements dans la nappe des GTI et dans le réservoir minier intègre successivement deux périodes climatiques distinctes. Ces périodes simulent deux périodes de recharge de la nappe successives de 2017 à l'année fictive 2199 (pluies/infiltrations moyennes : « moyennes eaux ») et de l'année fictive 2200 à l'année fictive 2225 (pluies/infiltrations exceptionnelles : « hautes eaux »). La chronique d'infiltration retenue est construite selon :

- Le scénario « moyennes eaux », dont l'objectif est de prévoir à long terme l'impact de la diminution évolutive des prélèvements, dans une situation d'infiltration moyenne fixée. L'infiltration constante moyenne est calculée pour chaque zone d'infiltration du modèle à partir des valeurs de hauteur de pluie observées sur la période 2004-2013. Pour le scénario « réaliste », la nappe des GTI peut être considérée comme quasi-stabilisée en l'année fictive 2199 : elle remonte à cette date en moyenne de 6 mm par an avec un maximum de 3 cm aux points les plus éloignés du cône de rabattement du secteur Est. Pour l'analyse des résultats de la simulation « moyennes eaux », l'année fictive 2199 est retenue comme année de référence.
- Le scénario « hautes eaux » (crue de nappe), dont l'objectif est de prévoir l'impact supplémentaire des chroniques de pluies exceptionnelles. Pour l'affectation d'une infiltration exceptionnelle, il n'est pas réaliste de considérer une infiltration constante égale à une recharge décennale ou centennale, par exemple¹⁵. Le choix a donc été fait de simuler le scénario « hautes eaux » à partir de la situation prévue à la fin du scénario « moyennes eaux ». Pour cela, on affecte l'infiltration de la période 1976-2013¹⁶ à la période fictive 2200-2237, c'est-à-dire après quasi-stabilisation de la nappe simulée à l'aide du scénario « moyennes eaux ». Pour cette période « hautes eaux », les calculs montrent que l'année de plus haute piézométrie de la nappe est l'année fictive 2225, qui est donc l'année de référence retenue pour l'analyse des résultats. L'année fictive 2225 est cohérente avec les données de pluies introduites dans le modèle où l'infiltration annuelle est forte pour les années 2000 et 2001, correspondant aux années fictives 2224 et 2225 (Illustration 19).

Nota bene : les années de simulation indiquées dans la suite du présent document <u>ne</u> <u>correspondent pas à des années réelles</u>. Elles sont le résultat des choix retenus pour la construction des différents scénarios. On comprend bien, par exemple, qu'une situation de recharge constante sur des décennies ne sera jamais retrouvée dans la réalité. Notamment, l'occurrence d'une crue de nappe n'est évidemment pas limitée à la période post-2199. Un tel événement pourrait très bien se produire dans les prochaines années et ainsi accélérer sensiblement le phénomène de remontée. Dans la même logique, nous ne pouvons préjuger des périodes de sécheresse intense qui pourraient survenir au cours des prochaines décennies. Pour ces raisons, la stabilisation de la nappe pourrait être atteinte bien avant ou bien après 2199. Pour ces mêmes raisons, la configuration piézométrique la plus haute pourrait être atteinte bien avant ou bien après 2225.

¹⁵ En d'autres termes, il n'est pas possible d'établir d'une analogie avec la crue d'un cours d'eau en modélisation hydrologique.

¹⁶ Une analyse statistique réalisée sur la chronique de hauteur de pluie annuelle de la station de Porcelette a montré que sur la période disponible, 1981 est une année proche d'une année centennale, tandis que l'année 2001 est une année proche d'une année cinquantennale (Vaute, 2015).



Illustration 19 : variation de recharge annuelle du scénario climatique défini pour le calcul des simulations prévisionnelles sur le Bassin Houiller

(période de calibration 1976-2016 avec les données de recharge annuelle connues jusqu'à fin 2013 ; période de « moyennes eaux » 2017-2199 ; période de « hautes eaux » 2200-2237)

5.2. RESULTATS DES SIMULATIONS PREVISIONNELLES (ANNEXE 5)

Les résultats des deux simulations prédictives selon les scénarios « sécuritaire » et « réaliste » sont présentés sous forme de :

- Cartes piézométriques (selon piézométrie brute) pour chaque secteur du bassin houiller concernant la nappe des GTI mais aussi les nappes alluviales lorsqu'elles sont considérées.
- Cartes des zones soumises à la remontée de la première nappe rencontrée à moins de 3 m de profondeur (selon piézométrie brute).
- Chroniques piézométriques (selon piézométrie brute) par ouvrage d'intérêt mettant en parallèle les données observées et calculées selon les deux scénarios.
- Chroniques piézométriques (selon piézométrie brute) par ouvrage d'intérêt pour GEODERIS.
- Bilans hydrodynamiques de chaque scénario.
- Tableau des impacts potentiels de remontée de nappe en surface déduits du calcul piézométrique (selon piézométrie brute) de chaque scénario.

Le graphique ci-après (Illustration 20) aide la lecture des résultats de ces simulations en présentant un exemple de calcul d'une courbe prévisionnelle d'évolution du niveau piézométrique pour les deux simulations définies précédemment en fonction du scénario climatique. La situation représentative de la situation « moyennes eaux » est à lire à la date 2199 et celle de la situation « hautes eaux » est à lire à la date 2225 (correspondant à la situation de recharge exceptionnelle connue en 2001).



Illustration 20 : Exemple de courbes piézométriques simulées par les deux scénarios d'évolution des prélèvements (« réaliste » et « sécuritaire ») avec le scénario climatique intégrant successivement trois parties : recharge annuelle de la période de calibration (période de 1976-2016 avec les données de recharge annuelle connues jusqu'en 2013), recharge de« moyennes eaux » (recharge annuelle moyenne de 2017 à l'année fictive 2199) et recharge « hautes eaux » (recharge annuelle de 1976-2013 de l'année fictive 2200 à l'année fictive 2237)

Les bilans hydrodynamiques calculés pour les scénarios « sécuritaire » et « réalistes » sont présentés respectivement sur les Illustration 21 et Illustration 22. Comme pour les chroniques piézométriques calculées, les trois périodes du scénario climatique sont reproduites, et aux années de références « moyennes eaux » (2199) et « hautes eaux » (2225), une différence nette des volumes entrant et sortant est visible, au sein du même scénario de prélèvement mais également entre les deux scénarios de prélèvement.

Les débordements calculés s'équilibrent dès que l'aquifère des GTI a atteint ses capacités de stockage. De plus, ils sont directement liés à la recharge et tamponnés par les prélèvements. Il n'est pas à omettre que les débordements inclus les volumes de rabattement qui se déclencherait si la côte de débordement était atteinte.



Illustration 21 : Bilans hydrodynamiques annuels pour le scénario « sécuritaire » et pour les 3 périodes climatiques simulées successivement



Illustration 22 : Bilans hydrodynamiques annuels pour le scénario « réaliste » et pour les 3 périodes climatiques simulées successivement

Les tableaux ci-après (Illustration 23 et Illustration 24) dénombrent par commune le nombre de bâtiments présents dans les mailles soumises à une remontée de nappe à moins de 3 m de profondeur pour chacune des deux simulations (« réaliste » et « sécuritaire ») pour les 3 périodes climatiques simulées successivement (avant impact de l'ennoyage, situation de « moyennes eaux » et situation de « hautes eaux »). Ces chiffres sont donnés à titre indicatif. Ce dénombrement ne peut se substituer à une évaluation du ou des risques potentiels (sur tous types d'enjeux) résultant de la remontée de nappe.

Commune	Situation 2008	Situation moyennes e	Situations hautes eaux
Alsting	11	28	32
Berviller-en-Moselle	1	1	2
Betting	274	307	311
Bisten-en-Lorraine	43	43	43
Boucheporn	0	1	1
Béning-lès-Saint-Avold	120	121	123
Carling	0	0	9
Cocheren	510	775	812
Creutzwald	264	1587	1667
Dalem	160	192	231
Diesen	41	383	383
Falck	164	186	211
Forbach	1062	2605	2949
Freyming-Merlebach	558	1098	1122
Guerting	325	326	326
Ham-sous-Varsberg	177	1387	1420
Hargarten-aux-Mines	140	147	165
Hombourg-Haut	299	451	469
L'Hôpital	29	33	45
Longeville-lès-Saint-Avold	11	1024	1167
Macheren	0	90	90
Merten	682	694	755
Morsbach	24	414	642
Petite-Rosselle	761	798	831
Porcelette	79	94	96
Rosbruck	38	314	325
Rémering	0	0	3
Spicheren	0	0	25
Saint-Avold	36	2026	2080
Œting	0	3	3
Stiring-Wendel	0	216	366
Varsberg	272	573	573
Somme	6081	15917	17277

Illustration 23 : Nombre de bâtiments présents dans les mailles soumises à une remontée de nappe à moins de 3 m de profondeur, par commune, pour le scénario « réaliste » et pour les 3 périodes climatiques simulées successivement

(avant impact de l'ennoyage : situation 2008, situation de « moyennes eaux » et situation de « hautes eaux »)

Commune	Situation 2008	Situation moyennes e	Situations hautes eaux
Alsting	11	28	32
Berviller-en-Moselle	1	1	2
Betting	274	307	311
Bisten-en-Lorraine	43	43	43
Boucheporn	0	1	1
Béning-lès-Saint-Avold	120	121	123
Carling	0	0	9
Cocheren	510	775	812
Creutzwald	264	1587	1667
Dalem	160	192	231
Diesen	41	383	383
Falck	164	186	211
Forbach	1062	2605	2949
Freyming-Merlebach	558	1098	1122
Guerting	325	326	326
Ham-sous-Varsberg	177	1387	1420
Hargarten-aux-Mines	140	147	165
Hombourg-Haut	299	451	469
L'Hôpital	29	33	45
Longeville-lès-Saint-Avold	11	1024	1167
Macheren	0	90	90
Merten	682	694	755
Morsbach	24	414	642
Petite-Rosselle	761	798	831
Porcelette	79	94	96
Rosbruck	38	314	325
Rémering	0	0	3
Spicheren	0	0	25
Saint-Avold	36	2026	2080
Œting	0	3	3
Stiring-Wendel	0	216	366
Varsberg	272	573	573
Somme	6085	15921	17281

Illustration 24 : Nombre de bâtiments présents dans les mailles soumises à une remontée de nappe à moins de 3 m de profondeur, par commune, pour le scénario « sécuritaire » et pour les 3 périodes climatiques simulées successivement

(avant impact de l'ennoyage : situation 2008, situation de « moyennes eaux » et situation de « hautes eaux »)

En annexe 5, on trouvera notamment :

 11 cartes de présentation des résultats de simulation dans les 11 secteurs du bassin houiller disposant de mesures du niveau de la nappe des GTI (France et Allemagne) : chaque graphique de ces cartes permet de comparer en un point la chronique piézométrique observée sur la période 1976-2016 (courbe bleue, niveau piézométrique en mètres NGF) et la chronique calculée par le modèle (courbe rouge scénario « sécuritaire » et courbe verte scénario « réaliste », niveaux piézométrique en mètres NGF).

- 2 cartes de présentation des résultats de simulation dans les secteurs du bassin houiller disposant de mesures du niveau des nappes des alluvions : même représentation graphique que pour la nappe des GTI.
- 1 carte de présentation des résultats de simulation dans les secteurs du bassin houiller disposant de mesures du niveau du réservoir minier : même représentation graphique que pour la nappe des GTI.
- 8 cartes de présentation des résultats de simulations sur les points de contrôles fixés par GEODERIS pour la nappe des GTI et les nappes alluviales : les courbes vertes représentent les résultats de la simulation « réaliste » et les courbes rouges représentent les résultats de la simulation « sécuritaire ».
- 7 cartes des zones soumises à la remontée de la première nappe rencontrée pour le scénario « réaliste ».
- 7 cartes piézométriques de la nappe des GTI et des nappes alluviales pour le scénario « réaliste ».
- 7 cartes des zones soumises à la remontée de la première nappe rencontrée pour le scénario « sécuritaire ».
- 7 cartes piézométriques de la nappe des GTI et des nappes alluviales pour le scénario « sécuritaire ».

6. Conclusion

GEODERIS a demandé au BRGM de réaliser des prévisions de remontée de la nappe des GTI dans le bassin houiller lorrain, en considérant des scénarios analogues à ceux définis pour le secteur Ouest en 2015 : un scénario dit « réaliste » mis à jour des données et prévisions de prélèvement réalisés dans la nappe des GTI et un scénario dit « sécuritaire ». Le présent rapport présente le travail entrepris et les résultats obtenus.

Dans la première partie du rapport, le réservoir aquifère des grès du Trias inférieur en Lorraine et le modèle régional développé par le BRGM, qui en est la représentation numérique, sont présentés. Le modèle hydrogéologique régional de la nappe des GTI concerne la nappe sur toute sa partie captive et sur sa partie libre dans le bassin houiller, ainsi que quelques petits secteurs de nappe libre indispensables à la modélisation.

Dans la deuxième partie du rapport, on détaille la méthodologie de révision du modèle régional, réalisée dans le but d'affiner les prévisions de remontée de la nappe dans l'ensemble du bassin houiller lorrain, suite à l'ennoyage des mines et à la baisse des prélèvements d'eau constatés dans le bassin. Le travail réalisé précédemment sur le secteur Ouest du bassin houiller a été totalement repris et mis en cohérence avec la méthodologie de révision mise au point pour les secteurs Centre et Est dans le cadre de la présente étude.

Pour pouvoir répondre aux enjeux de la remontée de la nappe dans le bassin houiller, le modèle régional a dû être modifié sur une superficie qui déborde largement de la superficie des travaux miniers, pour des raisons de cohérence géologique et hydrogéologique : le sous-maillage gigogne du modèle version 2017 englobe le territoire du Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SAGE) du bassin houiller, ainsi qu'en Allemagne les affleurements des GTI au sud de la rivière Sarre.

La structure géologique du modèle numérique élaboré à l'aide du logiciel MARTHE¹⁷ (BRGM, http://marthe.brgm.fr) dans le bassin houiller a été totalement revue dans l'emprise de ce sousmaillage gigogne, en débordant suffisamment du sous-maillage pour assurer une bonne transition avec le modèle régional. Dans le but d'améliorer fortement la fiabilité et la précision des prévisions de remontée de nappe, des améliorations très importantes ont été apportées :

- Modélisation beaucoup plus précise des surfaces géologiques du toit des GTI sous couverture, du toit du Permien et du toit du Houiller.
- Modélisation très précise de la surface du sol des GTI à l'affleurement par des modèles numériques de terrain (MNT) LIDAR¹⁸ au pas de 5 m en France et en Allemagne.
- Prise en compte des affaissements miniers et correction du MNT LIDAR français au pas de 5 m, chaque année entre 1977 et 2005.

¹⁷ « Modélisation d'Aquifères avec un maillage Rectangulaire, Transport et HydrodynamiquE », http://marthe.brgm.fr

¹⁸ En anglais : « *Light Detection and ranging » ou « Laser detection and ranging »*. En français : « télédétection par laser », « levé laser » ou « lasergrammétrie ».

- Prise en compte des alluvions dans le bassin houiller, de leur emprise géographique, leur épaisseur et leur caractère imperméable.
- Correction des niveaux piézométriques observés à l'aide des MNT corrigés des affaissements, chaque année entre 1977 et 2005.
- Correction de l'altitude et du tracé des cours d'eau, chaque année entre 1977 et 2005, de manière à mettre en cohérence les cours d'eau et la topographie issue des MNT LIDAR.
- Modélisation de la couche alluvionnaire sus-jacente à l'aquifère des GTI.
- Modélisation des dépressions topographiques telles que carrières et gravières.
- Nouveau calcul spatialisé de l'infiltration, dans le but de ne plus faire de cette grandeur un paramètre de calibration du modèle.
- Modélisation globale du débit de drainage de la nappe des GTI par les cours d'eau du bassin houiller, à l'aide d'un modèle hydrologique à réservoirs (GARDÉNIA¹⁹), ce qui permet d'ajuster le débit de drainage calculé par le modèle MARTHE sur un débit de référence.

Dans le cadre de la présente l'étude, le fichier de données et le modèle MARTHE ont été mis à jour avec les nouvelles données acquises jusqu'en 2016. Dans le bassin houiller, cette mise à jour a concerné 594 points en France et 97 points en Allemagne.

Les résultats de calibration du modèle sont ensuite présentés dans la troisième partie du rapport. En raison de la complexité du système hydrogéologique du bassin houiller, la calibration des paramètres hydrodynamiques classiques (notamment conductivité hydraulique²⁰, coefficients d'emmagasinement libre et captif) n'a pas suffi à atteindre un ajustement suffisant des très nombreuses observations disponibles. Il est nécessaire de prendre en compte d'autres paramètres qui s'avèrent extrêmement importants pour les secteurs Centre et Est du bassin houiller et qui allongent considérablement la durée nécessaire à la calibration, car de très nombreux tests supplémentaires sont nécessaires :

- Situation initiale de la nappe lors du démarrage de la simulation.
- Rôle hydrogéologique de chacune des failles majeures, très nombreuses dans le bassin houiller.
- Position et débit des points d'échange nappe-mine dans les secteurs Centre et Est.
- Localisation, débit et sens des échanges nappe-rivière.
- Surplus d'infiltration en pied de côte de la nappe du Muschelkalk (drainance, infiltration du ruissellement).

¹⁹ « Modèle Global à Réservoirs pour la simulation de Débits et de Niveaux Aquifères »

²⁰ Par convention pour cette étude hydrogéologique, la « conductivité hydraulique » (perméabilité d'un milieu poreux à l'eau) sera appelée « perméabilité » dans la suite du présent rapport.

- Infiltration des bassins d'infiltration industriels dans le secteur de L'Hôpital pour certaines périodes.
- Représentativité de chaque mesure piézométrique.

Les tendances d'évolution sont bien reproduites sur la plupart des points de mesure, la moyenne des erreurs moyennes quadratiques (RMSE) et la moyenne des erreurs moyennes quadratiques normalisées (RMSEN) sur les mesures piézométriques observées et calculées sont respectivement de 3,7 m et de 56 % pour le bassin houiller, sur toute la période de calibration et pour toutes les mesures piézométriques disponibles.

De plus, les tests de calibration réalisés ont montré que contrairement à ce qui était supposé, et malgré le fait que le secteur Ouest est isolé des secteurs Centre et Est par la faille imperméable de Hombourg-Longeville, les modifications très importantes du maillage et la prise en compte des nouvelles données plus précises (MNT LIDAR, affaissements, cours d'eau, géologie, recharge, failles, etc.) imposaient une calibration simultanée de l'ensemble des secteurs du bassin houiller.

Dans la dernière partie du rapport, on présente les résultats de deux simulations prévisionnelles d'évolution des prélèvements (dits « sécuritaire » et « réaliste ») intégrant un scénario climatique avec deux périodes de recharge successives (dites « hautes eaux » et « moyennes eaux »). Des cartes précisent les zones où la première nappe rencontrée sera à moins de 3 m du sol (d'après la piézométrie brute) et permettent d'identifier les mailles soumises à la remontée de la première nappe rencontrée dans lesquelles se trouvent des bâtiments.

7. Bibliographie

Agence de l'eau Rhin-Meuse (2004) – Carte hydrogéologique du bassin Rhin-Meuse.

Agence de l'eau Rhin-Meuse et DIREN de bassin Rhin-Meuse (1997-2000) – Catalogue des débits des cours d'eau du bassin Rhin-Meuse. Site Internet de la DREAL Grand Est, <u>http://www.lorraine.developpement-durable.gouv.fr/debits-mensuels-d-etiage-et-modules-bassin-rhin-r1484.html</u>.

Anderson, M.P., Woessner, W.W. (1992) – Applied Groundwater Modeling: Simulation of Flow and Advective Transport (2nd Edition ed.). Academic Press.

Bonvallet J. (1981) – Houillères du bassin de Lorraine, Surveillance des digues et des bassins, 1980. Rapport BRGM 81 SGN 110 LOR, 36 p., 5 fig., 6 ann.

Delaunay J. (1982) – Houillères du bassin de Lorraine, Surveillance des digues et des bassins, 1981. Rapport BRGM 82 SGN 253 LOR, 15 p., 6 ann.

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

Cartannaz C. (2018) – Modélisation géologique des alluvions du bassin houiller lorrain sur la partie affleurante des grès du Trias inférieur. Rapport BRGM/RP-67633-FR.

Charbonnages de France (2005a) – Mémoire d'arrêt des travaux miniers de Dalem, Berviller, La Houve [...]. Annexe 3.2.a, rapport ANTEA A31516/A, février 2004.

Charbonnages de France (2005b) – Mémoires d'arrêt des travaux miniers de la concession de De Wendel [...]. Annexe 4, rapport ANTEA A36496/A, décembre 2004.

Charbonnages de France (2005c) – Mémoire d'arrêt des travaux miniers de Dalem, Berviller, La Houve [...]. Annexe 3.2.j. Rapport ANTEA A30703/C, 2003.

Charbonnages de France (2005d) – Mémoires d'arrêt des travaux miniers de la concession de De Wendel [...]. Annexe 17, rapport ANTEA A35769/B, octobre 2004.

Kimmel M. (2014) – Note d'accompagnement de l'étude hydrogéotechnique sur les conséquences de la remontée de nappe dans la commune de Creutzwald (57). Rapport GEODERIS E2014/113DE.

Reichart G. (2015a) – Zones soumises à la remontée de nappe dans le bassin houiller lorrain (57) – secteur ouest. Note d'accompagnement. Rapport GEODERIS E2015/075DE.

Reichart G. (2015b) – Actualisation de la cartographie des zones soumises à la remontée de la nappe dans le bassin houiller lorrain (57) – secteur ouest. Note de synthèse destinée aux services de l'Etat et aux communes. Rapport GEODERIS E2015/097DE.

Reichart G. (2015c) – Actualisation de la cartographie des zones soumises à la remontée de la nappe dans le bassin houiller lorrain (57) – secteur ouest. Note de synthèse destinée aux services de l'Etat. Rapport GEODERIS E2015/098DE.

Reichart G. (2015d) – Modélisation thermo-hydrodynamique d'un réservoir minier profond ennoyé. Le cas du Bassin Houiller Lorrain. Thèse de Doctorat, Université de Lorraine. Numéro national de thèse : 2015LORR0051.

Reichart G. (2015e) – Remontée de nappe dans le bassin houiller lorrain. Retours d'expérience sur l'intégration des données lasergrammétriques dans les études de modélisation. Rapport GEODERIS E2015/117DE.

Reichart G. (2015f) – Bassin houiller lorrain. Impact de l'ennoyage des vides miniers sur les mouvements de surface. Rapport GEODERIS E2015/063DE.

Reichart G. (2015g) – Avis sur les mesures compensatoires à mettre en œuvre à Creutzwald vis-à-vis du « risque remontée de nappe ». Réponse à la demande de la DREAL Lorraine n°2014-1208-1/Q-393 du 09/12/2014. GEODERIS E2015/043DE.

Reichart G. (2016a) – Bassin houiller lorrain – Présentation générale et synthèse des problématiques minières. Rapport GEODERIS E2016/035DE.

Reichart G. (2016b) – Avis sur les inondations constatées chez trois particuliers à Creutzwald, rue de la Croix (57). Réponse à la demande de la DREAL n°2016-0301-1/Q-490 du 01/03/2016. Rapport GEODERIS E2016/071DE.

Reichart G. (2016c) – Avis sur l'existence d'un lien entre la remontée des eaux souterraines et la présence de fissures sur une habitation située rue de la Croix à Creutzwald (57). Rapport GEODERIS E2016/135DE.

Reichart G. (2017a) – Réponse à la demande de la DREAL n°2017-0106-1/Q-550 du 09/01/2017 concernant le comportement prévisionnel de la nappe des grès du Trias inférieur dans le secteur de Falck (57). Rapport GEODERIS E2017/001DE.

Reichart G. (2017b) – Bassin houiller lorrain. Compte-rendu de la campagne de sondages réalisée par la DREAL Grand Est avec l'appui technique de GEODERIS. Rapport GEODERIS E2017/094DE.

Thiéry D. (2014) - Logiciel GARDÉNIA, version 8.2. Guide d'utilisation. BRGM/RP-62797-FR, 126 p., 65 fig., 2 ann.

Thiéry D. (2015) - Code de calcul MARTHE - Modélisation 3D des écoulements dans les hydrosystèmes - Notice d'utilisation de la version 7.5. BRGM/RP-64554-FR, 306 p., 150 fig.

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

Vaute L., Innocent C., Fourniguet G. (2013) – Actualisation du modèle hydrogéologique de la nappe des grès du Trias inférieur en Lorraine. Rapport BRGM/RP-62405-FR.

Vaute L., Fourniguet G. (2015) – Evaluation des zones à risque lié à la remontée de nappe consécutive à la diminution des prélèvements d'eau dans le bassin houiller lorrain, secteur Ouest (La Houve), révision du rapport RP-63542-FR. Rapport BRGM/RP-64573-FR, 110 p., 18 ill., 4 ann.

Documents consultés non cités dans le texte

Charbonnages de France (2005e) – Mémoire d'arrêt des travaux miniers de Dalem, Berviller, La Houve [...]. Rapport ANTEA A11649, septembre 1998.

Charbonnages de France (2005f) – Mémoire d'arrêt des travaux miniers de Dalem, Berviller, La Houve [...]. Rapport ANTEA A11650, septembre 1998.

Charbonnages de France (2005g) – Mémoire d'arrêt des travaux miniers de Dalem, Berviller, La Houve [...]. Annexe 3.2.k, rapport ANTEA A32023/A, octobre 2003.

Charbonnages de France (2005h) – Mémoire d'arrêt des travaux miniers de Dalem, Berviller, La Houve [...]. Annexe 3.2.b, rapport ANTEA A33301/A, février 2004.

Charbonnages de France (2005i) – Mémoires d'arrêt des travaux miniers de la concession de De Wendel [...]. Annexe 18, rapport ANTEA A36323/A, décembre 2004.

Service Géologique d'Alsace et de Lorraine (1967) – Etude hydrogéologique du bassin houiller Lorrain.



Centre scientifique et technique 3, avenue Claude-Guillemin – BP 6009 45060 – Orléans Cedex 2 – France Tél. : 02 38 64 34 34 Direction régionale Grand Est 1, avenue du parc de Brabois 54500 – Vandoeuvre-lès-Nancy – France Tél. : 03.83.44.81.49



Rapport final - Annexes

BRGM/RP-67630-FR Mars 2018



Annexe 1 : Cartes et coupes hydrogéologiques d'information générale

L'annexe 1 présente sur 5 pages A3 les cartes et coupes hydrogéologiques suivantes :

- **Coupe hydrogéologique ouest-est du bassin Rhin-Meuse** (extrait de la Carte hydrogéologique du bassin Rhin-Meuse, Agence de l'eau Rhin-Meuse, 2004).
- Carte hydrogéologique de la nappe des GTI et conditions aux limites du modèle régional version 2005 (Vaute *et al.*, 2007).
- Carte hydrogéologique de la nappe des GTI et conditions aux limites du modèle régional version 2005 – Zooms (Vaute *et al.*, 2007).
- Carte des trois principaux secteurs exploités dans le bassin houiller lorrain (Reichart, 2015d, d'après des données fournies par le BRGM-DPSM).
- Coupe hydrogéologique à travers le secteur Ouest du bassin houiller lorrain (Babot *et al.*, 1972).



Coupe hydrogéologique ouest-est du bassin Rhin-Meuse (extrait de la Carte hydrogéologique du bassin Rhin-Meuse, Agence de l'eau Rhin-Meuse, 2004).









Carte hydrogéologique de la nappe des GTI et conditions aux limites du modèle régional – Zooms (Vaute et al., 2007).



Carte des trois principaux secteurs exploités dans le bassin houiller lorrain (Reichart, 2015d, d'après des données fournies par le BRGM-DPSM).



Coupe hydrogéologique à travers le secteur Ouest du bassin houiller lorrain (Babot *et al.*, 1972).

BRGM/RP-67630-FR – Rapport final

Annexe 2 : Données géologiques du modèle MARTHE du bassin houiller (version 2017)

L'annexe 2 présente sur 7 pages A3 les cartes suivantes :

- 2 cartes des données utilisées pour la modélisation géologique du toit des grès du Trias inférieur : pour la partie sous-couverture il s'agit de données provenant de logs géologiques et des failles connues (carte de gauche), et pour la partie affleurante il s'agit des MNT LIDAR au pas de 5 m français et allemands recalculés pour prendre en compte les affaissements du sol mesurés entre 1976 et 2005 (carte de droite);
- 1 Résultat de l'intégration dans le modèle MARTHE du modèle géologique des alluvions (épaisseur) ;
- 1 carte du résultat de l'intégration dans le modèle MARTHE du modèle géologique du toit des GTI ;
- 2 cartes des données utilisées pour la modélisation géologique du toit du Houiller (carte de gauche) et de l'épaisseur du Permien (carte de droite) : compte tenu des données disponibles, le toit du Permien n'a pas pu être calculé directement, il a été calculé à partir des interpolations de la surface du toit du Houiller et de l'épaisseur du Permien ;
- 1 carte du résultat de l'intégration dans le modèle MARTHE de modèle géologique du toit du Permien ;
- 1 carte du résultat de l'intégration dans le modèle MARTHE du modèle géologique du toit Houiller;
- 1 carte du résultat de l'intégration dans le modèle MARTHE de la projection en surface des travaux miniers.
- 2 coupes verticales ouest-est du modèle MARTHE à travers le bassin houiller (secteur de Creutzwald) et à travers le modèle régional.



Données utilisées pour la modélisation géologique du toit des GTI





Légende

Mètres

8 Kilomètres

•

0

0 -5

-10

-15.2




Résultat de l'intégration dans le modèle MARTHE du modèle géologique du toit du grès du Trias inférieur

Données utilisées pour la modélisation géologique du toit du Houiller (carte de gauche) et de l'épaisseur du Permien (carte de droite)





Résultat de l'intégration dans le modèle MARTHE du modèle géologique du toit du Permien (via le calcul de son épaisseur)



Résultat de l'intégration dans le modèle MARTHE du modèle géologique du toit du Houiller



Résultat de l'intégration dans le modèle MARTHE de la projection en surface des travaux miniers



Coupe verticale ouest-est au niveau du sous-maillage gigogne du bassin houiller (secteur de Creutzwald)

Coupe verticale ouest-est au niveau du sous-maillage gigogne identique élargie à l'ensemble du modèle régional



BRGM/RP-67630-FR – Rapport final

Evaluation des zones soumises à la remontée des nappes du grès du Trias inférieur et des alluvions sus-jacentes dans le bassin houiller lorrain

Annexe 3 : Données hydrogéologiques et hydrologiques du modèle MARTHE du bassin houiller (version 2017)

L'annexe 3 présente sur 1 page A4 et 3 pages A3 les tableaux et cartes suivants :

- 2 tableaux du nombre de points de données hydrogéologiques présents dans la base de données du modèle hydrogéologique MARTHE, pour le bassin houiller sur le territoire français et sur le territoire allemand (Saarland), par aquifère (alluvions, GTI, Permien, réservoirs miniers, divers) et par type de point (piézomètres, points de pompage, points d'échange nappe-mine connus ou supposés, points exclus après vérification);
- 2 cartes des données hydrogéologiques prises en compte dans le modèle MARTHE (version 2018) : données piézométriques et de prélèvement (carte de gauche), points d'échange nappe-mine et failles à rôle hydrogéologique connu ou possible (carte de droite);
- 2 cartes des données hydrologiques prises en compte dans le modèle MARTHE (version 2018), pour le bassin versant de la Bisten (carte de gauche) et le bassin versant de la Rosselle (carte de droite) : stations hydrométriques et sous-bassins versants correspondant aux points du catalogue des débits d'étiage (contrôle des débits de débordement et de drainage calculés par le modèle MARTHE), tronçons cours d'eau influencés par les rejets anthropiques (exhaures, rejets industriels);
- 1 Carte des pertes de rivières du secteur Centre-Est d'après les pertes estimées en 2004 par Charbonnages de France (2005i).

Aquifère	Nombre total de points	Type de point	Nombre de points par type
Alluvions	33	Piézomètre	-
Grès du Trias inférieur	420	Piézomètre	371
		Pompage	201
Permien	130	Point d'échange	
		nappe-mine	-
Réservoir minier	11	Piézomètre	8
		Pompage	2
GTI perché, Muschelkalk, inconnu, erreur	19	Point exclu	-

Nombre de points de données hydrogéologiques du bassin houiller en France

Nombre de points de données hydrogéologiques du bassin houiller en Sarre allemande

Aquifère	Nombre total de points	Type de point	Nombre de points par type
Alluvions	0	Piézomètre	-
Grès du Trias inférieur	79	Piézomètre	69
		Pompage	44
Permien	0	Point d'échange	
		nappe-mine	
Réservoir minier	2	Piézomètre	2
		Pompage	0
GTI perché, Muschelkalk, inconnu, erreur	7	Point exclu	-



Données hydrogéologiques prises en compte dans le modèle MARTHE du bassin houiller (version 2018)



Légende



Données hydrologiques prises en compte dans le modèle MARTHE du bassin houiller (version 2018)

Carte des pertes de rivières du secteur Centre-Est d'après les pertes estimées en 2004 par Charbonnages de France (2005i)



Annexe 4 : Résultats de calibration du modèle MARTHE du bassin houiller et de sa périphérie

L'annexe 4 présente sur 23 pages A3 les cartes suivantes :

- 1 carte de situation du maillage gigogne du bassin houiller (version 2018) dans le maillage du modèle régional : ce maillage gigogne a été défini de manière être hydrogéologiquement cohérent, il inclut tous les travaux miniers en zone d'affleurement des GTI et en zone sous-couverture ; il correspond de plus au territoire du SAGE du bassin houiller et englobe donc l'ensemble des communes appartenant à ce SAGE ; enfin il englobe une partie du territoire Sarrois allemand compris entre la frontière franco-allemande et la limite des affleurements des GTI située au sud de la rivière Sarre ;
- 1 carte de situation des 11 secteurs définis dans le maillage gigogne du bassin houiller : ces secteurs ont été définis en considérant plusieurs types de limites (faille, limite de bassin versant, limite d'affleurement des GTI, limite du SAGE du bassin houiller, frontière franco-allemande);
- 11 cartes de présentation des résultats de calibration dans les 11 secteurs du bassin houiller disposant de mesures du niveau de la nappe des GTI (France et Allemagne) : chaque graphique de ces cartes permet de comparer en un point la chronique piézométrique observée sur la période 1976-2016 (courbe bleue, niveau piézométrique en mètre NGF) et la chronique calculée par le modèle (courbe rouge, niveaux piézométrique en mètre NGF) ;
- 2 cartes de présentation des résultats de calibration au niveau des nappes alluviales: chaque graphique de ces cartes permet de comparer en un point la chronique piézométrique observée sur la période 1976-2016 (courbe bleue, niveau piézométrique en mètre NGF) et la chronique calculée par le modèle (courbe rouge, niveaux piézométrique en mètre NGF);
- 1 carte de présentation des résultats de calibration au niveau du réservoir minier : chaque graphique de cette carte permet de comparer en un point la chronique piézométrique observée sur la période 2008-2016 (courbe bleue, niveau piézométrique en mètre NGF) et la chronique calculée par le modèle (courbe rouge, niveaux piézométrique en mètre NGF);
- 3 cartes de présentation des résultats de calibration à la périphérie du bassin houiller (secteur de Bitche, de Sarrebourg, département de la Moselle) : ces secteurs doivent être intégrés à la procédure de calibration car ils constituent à la fois les zones d'alimentation des dépressions piézométriques des secteurs Centre et Est du bassin houiller et un exutoire du dôme piézométrique présent au sud-ouest du bassin houiller;
- 2 cartes des niveaux piézométriques calculés par le modèle MARTHE pour les années 1976 et 2008 : l'année 1976 correspond au démarrage de la simulation, et l'année 2008 correspond à l'année d'impact maximal des infiltrations de la nappe des GTI vers les réservoirs miniers pour l'ensemble du bassin houiller ;
- 2 cartes des profondeurs de la première nappe rencontrée, calculées par le modèle MARTHE pour les années 1976 et 2008 : les mailles affichées en rouge correspondent aux profondeurs inférieures ou égales à 3 m ;
- 1 tableau récapitulatif du caractère imperméable ou semi-perméable des failles prises en compte dans le modèle MARTHE : positions, noms et incertitudes sur le rôle des failles ;

- 2 cartes et 2 graphiques démontrant l'existence de failles imperméables : faille du grand dérangement du siège 2 et faille de Longeville ;
- 1 carte de présentation des caractéristiques hydrogéologiques des failles implantées dans le modèle MARTHE : zoom sur le secteur Ouest (Creutzwald, Ham-sous-Varsberg, Hôpital).





Situation des 11 secteurs définis dans le maillage gigogne du bassin houiller



SAGE Bassin Houiller - Secteur Faulquemont



SAGE bassin houiller - Secteur Vouters Reumaux



SAGE Bassin Houiller - Secteur Forbach

Evaluation des zones soumises à la remontée des nappes du grès du Trias inférieur et des alluvions sus-jacentes dans le bassin houiller lorrain

BRGM/RP-67630-FR – Rapport final



SAGE bassin houiller - Secteur La Houve Falck



SAGE Bassin houiller - Secteur La Houve Traditionnel


SAGE Bassin houiller - Alluvions Ouest



SAGE Bassin Houiller - Secteur La Houve Vernejoul







SAGE Bassin houiller - Alluvions Est



SAGE bassin houiller - Secteur L'Hôpital

BRGM/RP-67630-FR - Rapport final



Hors SAGE bassin houiller - Secteur Saarland Bisten



Hors SAGE bassin houiller - Secteur Saarland Lauterbach

BRGM/RP-67630-FR - Rapport final



SAGE Bassin Houiller - Secteur La Houve Ouest



SAGE BH - Mines



Hors SAGE bassin houiller - Secteur Bitche



Hors SAGE bassin houiller - Secteur Sarrebourg



Hors SAGE bassin houiller - Secteur département 57



Niveaux piézométriques calculés par le modèle MARTHE pour l'année 1976



Niveaux piézométriques calculés par le modèle MARTHE pour l'année 2008



Profondeur de la nappe calculée par le modèle MARTHE pour l'année 1976



Profondeur de la nappe calculée par le modèle MARTHE pour l'année 2008

Choix des caractéristiques hydrogéologiques des failles

Noms	Caractéristique et étendue géographique	Incert
Grand dérangement du Siège 1	Totalement imperméables avec des passages perméables/peu perméables sur toute l'étendue Nord-ouest de la faille	Rôle imperméable introduit mais non démontré mesures pié
Grand dérangement du Siège 2 *	Totalement imperméable sur sa partie Ouest, peu perméable sur sa partie Est	Rôle imperméable visible par un décalage piéze annexe 4 : rôles imperméables des failles de L Rôle imperméable introduit mais no
Faille de Varsberg	Peu perméable sur sa partie Ouest	Rôle peu perméable introduit mais non démontro mesures pié
Faille de Longeville *	Totalement imperméable sur toute sa longueur Quelques ouvertures sur le Sud-Ouest entre la zone de Faulquemont et Rosselle-Amont	Rôle imperméable visible par un décalage piéze annexe 4 : rôles imperméables des failles de L
Faille Saint-Nicolas	Peu perméable proche de la faille de Longeville	Rôle peu perméable introduit mais non démontre mesures pié

* Les décrochements piézométriques indiquent le rôle hydraulique imperméable de la faille.

rtitudes

é à ce jour (pas de décalage visible au niveau des iézométriques)

zométrique d'environ 20 m sur sa partie Ouest (cf. Longeville et du Grand Dérangement du Siège 2)

on démontré à ce jour sur la partie Est

ré à ce jour (pas de décalage visible au niveau des iézométriques)

zométrique de plus de 50 m sur certains points (cf. Longeville et du Grand Dérangement du Siège 2)

ré à ce jour (pas de décalage visible au niveau des jézométriques)



Rôle imperméable des failles de Longeville et du Grand dérangement du Siège 2

Faille du Grand Dérangement 2








Annexe 5 : Résultats des simulations prévisionnelles

L'annexe 5 présente sur 36 pages A3 les 36 cartes suivantes :

- 1 carte de situation du maillage gigogne du bassin houiller (version 2017) dans le maillage du modèle régional : ce maillage gigogne a été défini de manière être hydrogéologiquement cohérent, il inclut tous les travaux miniers en zone d'affleurement des GTI et en zone sous-couverture ; il correspond de plus au territoire du SAGE du bassin houiller et englobe donc l'ensemble des communes appartenant à ce SAGE ; enfin il englobe une partie du territoire Sarrois allemand compris entre la frontière franco-allemande et la limite des affleurements des GTI située au sud de la rivière Sarre ;
- 1 carte de situation des 11 secteurs définis dans le maillage gigogne du bassin houiller : ces secteurs ont été définis en considérant plusieurs types de limites (faille, limite de bassin versant, limite d'affleurement des GTI, limite du SAGE du bassin houiller, frontière franco-allemande);
- 11 cartes de présentation des résultats de simulation dans les 11 secteurs du bassin houiller disposant de mesures du niveau de la nappe des GTI (France et Allemagne) : chaque graphique de ces cartes permet de comparer en un point la chronique piézométrique observée sur la période 1976-2016 (courbe bleue, niveau piézométrique en mètre NGF) et la chronique calculée par le modèle (courbe rouge scénario « sécuritaire » et courbe verte scénario « réaliste », niveaux piézométrique en mètre NGF) ;
- 2 cartes de présentation des résultats de simulation au niveau des nappes alluviales : chaque graphique de ces cartes permet de comparer en un point la chronique piézométrique observée sur la période 1976-2016 (courbe bleue, niveau piézométrique en mètre NGF) et la chronique calculée par le modèle (courbe rouge scénario « sécuritaire » et courbe verte scénario « réaliste », niveaux piézométrique en mètre NGF) ;
- 1 cartes de présentation des résultats de simulation au niveau du réservoir minier : chaque graphique de ces cartes permet de comparer en un point la chronique piézométrique observée sur la période 2008-2016 (courbe bleue, niveau piézométrique en mètre NGF) et la chronique calculée par le modèle (courbe rouge scénario « sécuritaire » et courbe verte scénario « réaliste », niveaux piézométrique en mètre NGF) ;
- 3 cartes de présentation des résultats de simulation à la périphérie du bassin houiller (secteur de Bitche, de Sarrebourg, département de la Moselle) : chaque graphique de ces cartes permet de comparer en un point la chronique piézométrique observée sur la période 1976-2016 (courbe bleue, niveau piézométrique en mètre NGF) et la chronique calculée par le modèle (courbe rouge scénario « sécuritaire » et courbe verte scénario « réaliste », niveaux piézométrique en mètre NGF) ;
- 8 cartes de présentation des résultats de simulations sur les points de contrôles fixés par GEODERIS. Les courbes vertes représentent les résultats de la simulation « réaliste », les courbes rouges représentent les résultats de la simulation « sécuritaire » et les tiretés noirs représentent le niveau du sol (dans le modèle en m NGF);
- 7 cartes des zones soumises à la remontée de la première nappe rencontrée pour le scénario « réaliste » ;
- 7 cartes piézométriques calculées pour la nappe des GTI et les nappes alluviales pour le scénario « réaliste » ;
- 7 cartes des zones soumises à la remontée de la première nappe rencontrée pour le scénario « sécuritaire » ;

 7 cartes piézométriques calculées pour la nappe des GTI et les nappes alluviales pour le scénario « sécuritaire » ;



Modèle GTI 2016



Secteurs du gigogne du bassin houiller



SAGE Bassin Houiller - Secteur Faulquemont



SAGE bassin houiller - Secteur Vouters Reumaux



SAGE Bassin Houiller - Secteur Forbach



SAGE Bassin Houiller - Secteur La Houve Vernejoul



SAGE Bassin houiller - Secteur La Houve Traditionnel





SAGE bassin houiller - Secteur La Houve Falck



Hors SAGE bassin houiller - Secteur Saarland Bisten



SAGE bassin houiller - Secteur Rosselle amont



SAGE Bassin houiller - Alluvions Est



SAGE bassin houiller - Secteur L'Hôpital



Hors SAGE bassin houiller - Secteur Saarland Lauterbach






Hors SAGE bassin houiller - Département 57



Hors SAGE bassin houiller - Secteur Bitche



Hors SAGE bassin houiller - Secteur Sarrebourg



SAGE bassin houiller - Points de contrôles - Secteur Vouters Reumaux



SAGE Bassin Houiller - Points de contrôles - Secteur Forbach



SAGE Bassin Houiller - Points de contrôles - Secteur La Houve Vernejoul







SAGE bassin houiller - Points de contrôles - Secteur La Houve Falck

BRGM/RP-67630-FR – Rapport final



SAGE bassin houiller - Points de contrôles - Secteur L'Hôpital









Zones soumises à la remontée de nappe - Scénario réaliste - Secteur Centre (Freyming-Merlebach)





Isopièzes calculées pour les GTI et les alluvions - Scénario réaliste - Secteur Centre (Freyming-Merlebach)





Zones soumises à la remontée de nappe - Scénario réaliste - Secteur Centre (Saint-Avold)



Isopièzes calculées pour les GTI et les alluvions - Scénario réaliste - Secteur Centre (Saint-Avold)



Zones soumises à la remontée de nappe - Scénario réaliste - Secteur Est (Forbach)



Isopièzes calculées pour les GTI et les alluvions - Scénario réaliste - Secteur Est (Forbach)

217
215.5
neek
01406X0082
5X0081 AD140520000
0 70140070085
N N N N N N N N N N N N N N N N N N N
1400K0069 10 05 210
A A A A A A A A A A A A A A A A A A A
0206
AN CONTRACTOR
20 221
A 320
01400
Better and the state of the state
HALL AND AND AND AND AND
1 12 1 1 1 1 1
alculees pour la situation de hautes eaux :
alculées nour la situation de hautes eaux :
viale (m NGF)
es venues d'eau dans les mines en 2004
Δ
000 /
²⁰² [′] N
drographique (BDTOPO)
reieves en 2014
000
239
niázomátsiou os do oslava du madèle
piezometriques de calage du modele
en surface des travaux miniers souterrains
cipales
que Scan25 IGN
ac alluvione
1 2 km

22



Zones soumises à la remontée de nappe - Scénario réaliste - Secteur Ouest (Creutzwald)


Isopièzes calculées pour les GTI et les alluvions - Scénario réaliste - Secteur Ouest (Creutzwald)



Zones soumises à la remontée de nappe - Scénario réaliste - Secteur Ouest (Falck - Merten)



Isopièzes calculées pour les GTI et les alluvions - Scénario réaliste - Secteur Ouest (Falck - Merten)





Zones soumises à la remontée de nappe - Scénario réaliste - Secteur Ouest (Ham-sous-Varsberg)



Isopièzes calculées pour les GTI et les alluvions - Scénario réaliste - Secteur Ouest (Ham-sous-Varsberg)



Zones soumises à la remontée de nappe - Scénario réaliste - Secteur Est (Spicheren - Alsting)



Isopièzes calculées pour les GTI et les alluvions - Scénario réaliste - Secteur Est (Spicheren - Alsting)



Zones soumises à la remontée de nappe - Scénario sécuritaire - Secteur Centre (Freyming-Merlebach)





Isopièzes calculées pour les GTI et les alluvions - Scénario sécuritaire - Secteur Centre (Freyming-Merlebach)



Zones soumises à la remontée de nappe - Scénario sécuritaire - Secteur Centre (Saint-Avold)



Isopièzes calculées pour les GTI et les alluvions - Scénario sécuritaire - Secteur Centre (Saint-Avold)



Zones soumises à la remontée de nappe - Scénario réaliste - Secteur Est (Forbach)



Isopièzes calculées pour les GTI et les alluvions - Scénario sécuritaire - Secteur Est (Forbach)



Zones soumises à la remontée de nappe - Scénario sécuritaire - Secteur Ouest (Creutzwald)



Isopièzes calculées pour les GTI et les alluvions - Scénario sécuritaire - Secteur Ouest (Creutzwald)



Zones soumises à la remontée de nappe - Scénario sécuritaire - Secteur Ouest (Falck - Merten)



Isopièzes calculées pour les GTI et les alluvions - Scénario sécuritaire - Secteur Ouest (Falck - Merten)



Zones soumises à la remontée de nappe - Scénario sécuritaire - Secteur Ouest (Ham-sous-Varsberg)


Isopièzes calculées pour les GTI et les alluvions - Scénario sécuritaire - Secteur Ouest (Ham-sous-Varsberg)







Centre scientifique et technique 3, avenue Claude-Guillemin – BP 6009 45060 – Orléans Cedex 2 – France Tél. : 02 38 64 34 34 Direction régionale Grand Est 1, avenue du parc de Brabois 54500 – Vandoeuvre-lès-Nancy – France Tél. : 03.83.44.81.49

<u>Annexe 4</u>

Rapport BRGM/RP-67633-FR

Hors texte



ccae reservi





Access reserve

Modélisation géologique des alluvions du bassin houiller lorrain sur la partie affleurante des grès du Trias inférieur

Rapport final

BRGM/RP-67633-FR

Janvier 2018

C. Cartannaz

Vérificateur :
Nom : S. Buschaert
Fonction : Directeur régional
Date : 19/10/2017
8 <u>P</u>
Signature :

Approbateur : Nom : Gael Bellenfant Fonction : RSP Date : 31/01/2018 allets Signature





Avertissement

Ce rapport est adressé en communication exclusive à GEODERIS, en 3 exemplaires (dont 1 non relié).

Le demandeur assure lui-même la diffusion des exemplaires de ce tirage initial.

Le BRGM ne saurait être tenu comme responsable de la divulgation du contenu de ce rapport à un tiers qui ne soit pas de son fait, et, des éventuelles conséquences pouvant en résulter.

Mots-clés : MODELE, GDM, BASSIN HOUILLER LORRAIN, NAPPE GRES TRIAS INF, ALLUVION, REMONTEE NAPPE, LORRAINE.

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

Cartannaz C. (2018) – Modélisation géologique des alluvions du bassin houiller lorrain sur la partie affleurante des grès du Trias inférieur. Rapport BRGM/RP-67633-FR, 105 p., 28 fig.

© BRGM, 2017, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Lors de la réalisation des premières études de modélisation hydrogéologique du bassin houiller lorrain commandées au BRGM par GEODERIS (rapport BRGM RP-64573-FR d'avril 2015), l'analyse de certaines données hydrogéologiques disponibles dans la banque de données du sous-sol (BSS) du BRGM et les tests de calage ont montré que la partie profonde de la nappe libre des GTI (Grès du Trias inférieur) peut être localement en charge (et même artésienne) dans les points bas des vallées alluviales ou bien se remettre en charge lors de sa remontée sous les tourbes argileuses des fonds de vallée, et/ou sous un ou plusieurs niveaux de grès argileux moins perméables.

Par ailleurs, les simulations de remontée de nappe réalisées pour le secteur Ouest du bassin houiller ont aussi montré que la présence d'un horizon imperméable au sein des alluvions ou de la partie supérieure de grès joue un rôle très important dans l'altitude finale de remontée de la nappe, et impacte ainsi fortement le nombre de bâtiments potentiellement concernés (cf. la « Note sur la sensibilité du paramètre débordement » en annexe du rapport RP-64573-FR relatif à la modélisation du secteur Ouest).

C'est pourquoi GEODERIS a demandé au BRGM de réaliser une étude de modélisation géologique des alluvions du bassin houiller, dans le but d'une part de redéfinir leur contour à l'aide des connaissances actuelles et des nouvelles données disponibles, et d'autre part d'identifier si possible les zones d'alluvions dans lesquelles un horizon peu perméable est probablement présent.

Les travaux réalisés ont abouti à :

- la compilation de l'ensemble des données géologiques relatives aux alluvions du bassin houiller lorrain, extraites principalement de la banque de données du sous-sol (BSS) du BRGM et d'une campagne de sondages réalisé en 2017 par la DREAL Grand Est ;
- la recherche des indices de présence d'un ou plusieurs horizons imperméables au sein des alluvions, le codage de ces indices puis l'intégration des données géologiques dans le logiciel de modélisation des surfaces géologiques (*Geological Data Management*, ou GDM) du BRGM ;
- la réalisation d'une nouvelle délimitation des alluvions du bassin houiller lorrain à l'aide (1) de la topographie précise fournie par un MNT Lidar au pas de 5 m, (2) de la compréhension du mode de dépôt de ces alluvions et (3) des données géologiques évoquées plus haut. Pour assurer la robustesse du modèle hydrodynamique dans lequel la nouvelle délimitation sera intégrée, cette dernière a été étendue au territoire allemand sur quelques kilomètres en aval de la frontière ;
- la réalisation d'une modélisation des surfaces géologiques des alluvions du bassin houiller à partir des données qui ont été interprétées et numérisées dans la présente étude.

Ainsi deux couches SIG sous format tif ont été produites. Il s'agit :

- du mur des alluvions ou de l'épaisseur des alluvions totales, qu'elles soient perméables ou imperméables ;
- de l'épaisseur cumulée des terrains imperméables compris dans les alluvions ;

Les résultats montrent que l'épaisseur totale des alluvions peut atteindre 14 m et largement dépasser les 10 m de puissance surtout au niveau de la Rosselle.

La présence de terrains imperméables au sein des alluvions semble être une caractéristique de l'ensemble de la dépression du Warndt. Sur la base des données exploitées, il apparaît que les secteurs qui présentent une très faible (voire une absence) de niveaux imperméables, sont rares. Par ailleurs, différentes incertitudes demeurent et affectent les résultats. Ces incertitudes ont été qualifiées et quantifiées autant que faire se peut dans le présent document. Elles sont indissociables des résultats produits et, à ce titre, doivent être gardées en mémoire dans le cadre de tout travail d'interprétation basé sur cette étude.

Modélisation géologique des alluvions du bassin houiller lorrain

Sommaire

1. I	Introduction	.9
	1.1. CONTEXTE ET OBJECTIFS DE L'ETUDE	.9
	1.2. SECTEUR D'ETUDE1	11
2. 0	Conceptualisation du phénomène de remontée de nappe dans le bassin houil son impact sur les bâtiments existants1	ller et de 13
	2.1. LIEN THEORIQUE ENTRE LA CONFIGURATION GEOLOGIQUE EN FOND I VALLEE ET L'ALTITUDE FINALE DE REMONTEE D'UNE NAPPE	DE 13
	2.2. MODELE CONCEPTUEL DE L'IMPACT DE LA REMONTEE DE LA NAPPE S BATIMENTS EXISTANTS DANS LE BASSIN HOUILLER	SUR LES 13
3. E	Exploitation des sondages de la BSS1	17
	3.1. SELECTION DES SONDAGES GEOLOGIQUES1	17
:	3.2. CODIFICATION DES INFORMATIONS LITHOLOGIQUES1	17
	3.3. CONSTITUTION D'UNE BASE DE DONNEES POUR GDM1	18
4. \$	Synthèse bibliographique1	19
5. (Campagne de sondages réalisée en 20172	25
5. (6. [Campagne de sondages réalisée en 20172 Délimitation des alluvions du bassin houiller sur les affleurements des GTI2	25 27
5. C 6. C	Campagne de sondages réalisée en 20172 Délimitation des alluvions du bassin houiller sur les affleurements des GTI2 6.1. LIMITES DE LA DELIMITATION EXISTANTE	25 27 27
5. (6. [(Campagne de sondages réalisée en 2017	25 27 27 S28 S28 S28 S28 28 28
5. C 6. C ((Campagne de sondages réalisée en 2017	25 27 27 S28 50ns 28 28 28 28 28
5. (6. [((Campagne de sondages réalisée en 2017	25 27 27 S28 ons 28 28 28 31
5. (6. [(((Campagne de sondages réalisée en 2017	25 27 27 27 28 28 28 28 31 31 RAIN
5. (6. [(((Campagne de sondages réalisée en 2017 2 Délimitation des alluvions du bassin houiller sur les affleurements des GTI2 2 6.1. LIMITES DE LA DELIMITATION EXISTANTE 2 6.2. METHODOLOGIE DE DELIMITATION CARTOGRAPHIQUE DES ALLUVIONS 6.2.1. Tentative de délimitation des alluvions par croisement SIG des information 6.2.1. Tentative de délimitation des alluvions par croisement SIG des information 2 6.2.2. Délimitation par tracé manuel guidé par les informations topographiques? 2 7.1. ESSAIS D'EAU PONCTUEL 3 7.2. NOUVELLE DELIMITATION DES ALLUVIONS DU BASSIN HOUILLER LORR 31 7.3. EPAISSEUR DES ALLUVIONS ET DES COUCHES IMPERMEABLES 3	25 27 27 S28 28 28 31 31 RAIN
5. (6. [(((Campagne de sondages réalisée en 2017	25 27 27 S28 28 28 28 31 31 RAIN 34

9. Bib	iographie	
--------	-----------	--

Liste des figures

Figure 1 - Localisation et dé	enomination des cours d'eau au sein de la dépression du Warndt	11
Figure 2 – Schéma concept finale de rei	uel théorique des relations entre la perméabilité du milieu et l'altitu montée de la nappe en fond de vallée	de 13
Figure 3 – Niveau de la nap lorsque les	pe des GTI (trait bleu) en travers d'un fond de vallée du bassin hou alluvions (Fz) ne comportent pas de niveau imperméable	uiller 15
Figure 4 – Niveau de la nap lorsque les	pe des GTI (trait bleu) en travers d'un fond de vallée du bassin hou alluvions (Fz) comportent un niveau imperméable	uiller 15
Figure 5 – Localisation des	872 sondages (rond vert) issus de la BSS	17
Figure 6 - Représentation g	raphique de la signification du code FORM	18
Figure 7 - Emplacement des	s cartes géologiques au droit de la dépression du Warndt	19
Figure 8 : Cartographie des d'après Har	alluvions des vallées de la Sarre moyenne et de la Nied inférieure mand (2007)	22
Figure 9 - Analyse de l'évole Saint-Avold rectangle bl	ution paysagère dans la vallée amont de la Rosselle (secteur Nord) ; source GECNAL ; (pas d'échelle communiquée, dimensions du leu estimées à 800 par 600 m)	de 23
Figure 10 - Lieu de stockag	e des échantillons de carottes et de cuttings	25
Figure 11- Photographie de	carottes de tourbe	25
Figure 12 – Photographie d basse)	e carottes de sable gris jaune (partie haute) et de grès rouge (parti	e 25
Figure 13 - Localisation des	s forages carottés (SC) et destructifs (SD) de la campagne 20172	26
Figure 14 – Incohérences e la carte géo niveau calc 5 m)	ntre les délimitations disponibles des alluvions récentes (bleu fonce ologique à 1/50 000 et des zones humides (bleu clair) et les courbes ulées à partir d'un MNT au pas de 5 m (lignes vertes à équidistance	é) de s de e 27
Figure 15 – Exemple de trac 1°(en rose f	cé des alluvions (en violet) à partir des mailles de pente inférieure à fushia) regroupées par zones de plus de trois mailles (en gris)	à 29
Figure 16 – Exemple de trac partir des m mailles (en	cé des alluvions sur le bassin versant de la Bisten en France (en vi nailles de pente inférieure à 1° regroupées par zones de plus de tro gris)	olet) à is 29
Figure 17 – Comparaison e la nouvelle inférieure à	ntre l'ancienne délimitation des alluvions et zones humides (en bleu délimitation (en violet), en gris les groupes de plus de 3 mailles de 1°	u) et pente 30
Figure 18 – Comparaison e la nouvelle détaillée iss de niveau to	ntre l'ancienne délimitation des alluvions et zones humides (en bleu délimitation (en violet), cette dernière étant guidée par la topograph sue du MNT au pas de 5 m (MNT ombré des pentes en gris et cour pous les 5 m en vert)	u) et nie bes 30
Figure 19 - Tableau de synt lithologique	hèse des essais de perméabilité horizontale avec la correspondan	ce 31
Figure 20 - Coupe des terra mètres (abs	isses étagées au niveau de la Froschenpfulh et de la Merle. Unités scisse) et mètres NGF (ordonnée)	: 32
Figure 21 – Nouvelle délimi de 5 m	tation des alluvions du bassin houiller superposée au MNT ombré a	au pas 33
Figure 22 - Coupe synthétic intercalaires	ue des alluvions récentes avec la localisation des morts-terrains et s imperméables	t 34

Figure 23 - Mur des alluvions ou épaisseur des alluvions totales qu'elles soient perméation imperméables	oles ou
Figure 24 - Epaisseur cumulée des terrains imperméables compris dans les alluvions (s morts-terrains)	ans les 38
Figure 25- Détail sur l'épaisseur des horizons imperméables et la fiabilité du modèle (se aval)	cteur Bisten 41
Figure 26- Détail sur l'épaisseur des horizons imperméables et la fiabilité du modèle (se amont et la Rosselle amont)	cteur Bisten 42
Figure 27- Détail sur l'épaisseur des horizons imperméables et la fiabilité du modèle (se Rosselle aval)	cteur la 43
Figure 28 - Absence de donnée au niveau du secteur d'Alsting-Spicheren (vallon du Sin Taille de l'image 6 km sur 4 km. Nord en haut. Il n'y a qu'un forage qui e horizon imperméable mais il est localisé à la limite des alluvions , la don donc peu fiable	าbach). est sans inée est 44

Liste des Annexes

Annexe 1 -	- Logs lithologiques des sondages carottés de la campagne de sondages	2017	.51
Annexe 2 -	- Logs lithologiques des sondages destructifs de la campagne de sondage	s 2017	.66

1. Introduction

1.1. CONTEXTE ET OBJECTIFS DE L'ETUDE

La nappe d'eau souterraine des grès du Trias inférieur (GTI) est en grande partie libre dans le bassin houiller lorrain (Moselle Est). Avant son peuplement et son développement économique et industriel, ce secteur de nappe libre était largement recouvert de zones humides ou marécageuses.

Au cours des 19^{ème} et 20^{ème} siècles, les eaux souterraines y ont été prélevées par l'activité minière, les industries et les collectivités, contribuant ainsi pendant des décennies à fortement rabattre l'aquifère sur une grande partie du bassin houiller lorrain et plus largement sur l'ensemble du département de la Moselle.

Sur les secteurs du bassin houiller lorrain dénommés Ouest, Centre et Est concernés par l'exploitation minière, le Permien, constituant le soubassement de l'aquifère des GTI et pouvant être considéré comme écran imperméable lorsqu'il est intègre, a subi une fracturation consécutive à l'exploitation, ce qui a induit des écoulements de la nappe d'eau souterraine des GTI vers les anciens travaux souterrains.

La fin de l'activité minière (2004) a conduit à l'arrêt des pompages d'exhaure (juin 2006 pour les secteurs Centre et Est, décembre 2006 pour le secteur Ouest) et à l'ennoyage des vides miniers résiduels (fin 2008 pour le secteur Ouest et fin 2012 pour l'essentiel des travaux souterrains des secteurs Centre et Est). Le phénomène de reconstitution de la nappe qui en a résulté a été annoncé et étudié depuis les années 2000. D'après ces études, il devait durer plusieurs décennies, amenant la nappe des GTI à un nouvel état d'équilibre proche de la surface dans les principaux fonds de vallée (Bisten et Rosselle moyenne et aval).

Notamment, entre 2003 et 2005, Charbonnages de France (CdF), dans le cadre de la réalisation de ses dossiers d'arrêt définitif de travaux miniers (DADT), a fait réaliser au bureau d'études ANTEA des prévisions de remontée de la nappe, et a identifié les zones où celle-ci se situerait à moins de 3 m du sol. Néanmoins, ANTEA avait précisé dans plusieurs de ses études que ses prévisions étaient à considérer avec précaution car elles pouvaient varier de manière significative, notamment selon les caractéristiques réelles de l'aquifère (porosité surtout), mais également selon l'évolution réelle des prélèvements dans la nappe des GTI lors des prochaines décennies, en particulier si les pompages de tiers (AEP, AEI, *etc.*) venaient à diminuer.

Il s'avère aujourd'hui que la désindustrialisation du bassin houiller lorrain à partir des années 1980-1990 et la transition vers des activités plus économes en eau constatée depuis plusieurs années jouent un rôle important dans la reconstitution de la nappe des GTI.

Ainsi, (i) consécutivement à la baisse des prélèvements d'eau à destination des collectivités et des industriels constatée notamment dans la zone des GTI affleurants sur la période 2008-2011, (ii) compte tenu de l'état d'avancement de la reconstitution dans le secteur Ouest et (iii) considérant les infiltrations d'eau signalées dans certains sous-sols d'immeubles de ce secteur en 2011-2012, le groupement d'intérêt public GEODERIS a été saisi par la Division Risques Miniers et Sous-Sol (DRMSS) de la Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement (DREAL) Grand Est afin d'actualiser les prévisions faites à l'époque de CdF.

Priorité a été donnée au secteur Ouest du bassin houiller lorrain pour les raisons précédemment évoquées. GEODERIS a demandé au Bureau de Recherches Géologiques et

Minières (BRGM) de réaliser ce travail, qui a fait l'objet du rapport BRGM RP-64573-FR (Vaute et *al.,* 2015) puis des rapports GEODERIS E2015-075DE (Reichart, 2015a), E2015-097DE (Reichart, 2015b) et E2015-098DE (Reichart, 2015c). Les prévisions ont été réalisées selon différents scénarios et les résultats des simulations ont été croisés avec la cartographie des zones bâties selon la BD-TOPO de l'Institut Géographique National (IGN).

A la suite de ce premier travail, GEODERIS a demandé au BRGM de réaliser des prévisions de remontée de la nappe des GTI sur les secteurs Centre et Est du bassin houiller lorrain, en considérant des scénarios analogues à ceux définis pour le secteur Ouest : un scénario dit « réaliste » mis à jour des données et prévisions de prélèvement réalisés dans la nappe des GTI et un scénario dit « sécuritaire¹ ».

Pour produire lesdites prévisions, le modèle régional de la nappe des GTI a dû être totalement reconstruit dans le bassin houiller : diminution de la taille de maille, révision de la géologie, introduction de données complémentaires, etc. Cette modification profonde de la structure du modèle numérique régional et l'introduction de nouvelles données a imposé le recalage du modèle de manière à ajuster au mieux les évolutions des paramètres observés et calculés (niveaux piézométriques, débits drainés par le réseau hydrographique). Dès le début des travaux de modélisation sur le secteur Ouest, des incohérences sont apparues entre les évolutions piézométriques observées et le modèle conceptuel d'écoulement initialement retenu pour le bassin houiller.

Un modèle conceptuel constitue une schématisation de la réalité à partir de laquelle le modèle numérique est construit. La robustesse du modèle numérique dépend fortement de l'adéquation entre cette schématisation de la réalité et les objectifs de la simulation. Les modifications apportées au modèle conceptuel d'écoulement des eaux souterraines du bassin houiller ont été exposées dans le rapport BRGM RP-64573-FR lors de la modélisation du secteur Ouest. La principale modification concerne la nature des relations « nappe des GTI – nappe des alluvions (lorsque cette dernière existe) – rivière ». En effet, les observations et les tests de calage montraient que la partie profonde de la nappe libre des GTI peut être localement en charge dans les points bas des vallées alluviales, ou bien se remettre en charge lors de sa remontée, sous un ou plusieurs niveaux de grès argileux moins perméables, et/ou sous les tourbes argileuses des fonds de vallée.

Les simulations de remontée de nappe réalisées pour le secteur Ouest du bassin houiller ont aussi montré que la présence d'un horizon imperméable au sein des alluvions joue un rôle très important dans l'altitude finale de remontée de la nappe, et impacte ainsi fortement le nombre de bâtiments potentiellement impactés (cf. la « Note sur la sensibilité du paramètre débordement » en annexe du rapport RP-64573-FR relatif à la modélisation du secteur Ouest).

C'est pourquoi GEODERIS a demandé au BRGM de réaliser une étude de modélisation géologique des alluvions du bassin houiller, dans le but d'une part de redéfinir leur contour à l'aide des connaissances géologiques actuelles et des nouvelles données disponibles, et d'autre part d'identifier si possible les zones d'alluvions dans lesquelles un horizon peu perméable est probablement présent.

¹ Anciennement appelé « pessimiste » dans les rapports de 2015

1.2. SECTEUR D'ETUDE

Le secteur d'étude correspond à la dépression du Warndt (Figure 1). Les principaux cours d'eau sont la Bisten, la Rosselle et la Lauterbach qui se jettent dans la Sarre. Pour l'essentiel, les travaux se sont focalisés sur le territoire français.



Figure 1 - Localisation et dénomination des cours d'eau au sein de la dépression du Warndt.

2. Conceptualisation du phénomène de remontée de nappe dans le bassin houiller et de son impact sur les bâtiments existants

2.1. LIEN THEORIQUE ENTRE LA CONFIGURATION GEOLOGIQUE EN FOND DE VALLEE ET L'ALTITUDE FINALE DE REMONTEE D'UNE NAPPE

La Figure 2 résume les situations qu'il est possible de rencontrer en fond de vallée lorsque des milieux de perméabilités² potentiellement différentes affleurent et sont soumis à un phénomène de remontée de nappe. La remontée de la nappe peut s'effectuer au sein d'un milieu de perméabilité homogène, c'est la situation de référence (schéma du centre). Si le milieu comporte une zone supérieure de plus forte perméabilité (alluvions par exemple), le drainage vers le cours d'eau associé est augmenté et l'altitude de remontée de la nappe est plus basse de *delta Z1* par rapport à la situation de référence (schéma de gauche). Au contraire, si le milieu comporte une zone de faible perméabilité (horizons de tourbe ou d'argiles au sein des alluvions par exemple), alors l'altitude de remontée de la nappe est plus élevée de *delta Z2* par rapport à la situation de référence : en effet, le drainage par le cours d'eau associé aux alluvions est limité voire impossible et la nappe se met en pression (en charge) sous les horizons peu ou pas perméables (schéma de droite).



Figure 2 – Schéma conceptuel théorique des relations entre la perméabilité du milieu et l'altitude finale de remontée de la nappe en fond de vallée

2.2. MODELE CONCEPTUEL DE L'IMPACT DE LA REMONTEE DE LA NAPPE SUR LES BATIMENTS EXISTANTS DANS LE BASSIN HOUILLER

La plaine du Warndt, dont la géographie est classiquement décrite comme une « dépression », constitue la zone d'affleurement des grès dans le bassin houiller. En simplifiant sa structure géologique, on peut considérer qu'elle consiste en des alluvions (récentes et anciennes) qui

² Par convention pour cette étude à composante hydrogéologique, la « conductivité hydraulique » (perméabilité d'un milieu poreux à l'eau) sera appelé « perméabilité » dans la suite du présent rapport.

reposent sur les grés du Trias inférieur. Au regard de ce contexte géologique, ce qui conditionne le futur niveau piézométrique après la remontée de la nappe des GTI est la présence de lithologies imperméables au sein des formations géologiques de surface. Nous partons du postulat que ces lithologies imperméables (tourbe, passées argileuses, etc.) sont surtout présentes dans les alluvions.

Nota bene : il faut garder à l'esprit qu'il est possible d'observer la présence de lithologies imperméables dans les roches du *bedrock* (substrat rocheux du Trias sur lequel reposent les formations alluvionnaires). En effet, les grès du Trias peuvent présenter des passées sédimentaires plus argileuses qui peuvent jouer en aquitard. En outre les périodes d'altérations anté-quaternaires (c'est-à-dire avant les dépôts des alluvions) sont très mal connues et il n'est pas impossible qu'une paléo-surface d'altération avec de fortes concentrations en argiles soit présente.

La vision théorique présenté au § 2.1 appliqué à la configuration géologique en fond de vallée dans le bassin houiller permet d'établir le modèle conceptuel présenté sur les Figure 3 et Figure 4.

Lorsque les alluvions récentes (Fz) ne comportent pas de niveau imperméable (Figure 3), l'altitude maximale de remontée de la nappe des GTI est contrôlée par le drainage de la nappe par le cours d'eau le plus proche. Les bâtiments dont l'altitude du sous-sol est inférieure au niveau piézométrique de la nappe sont inondés. Ces bâtiments sont généralement situés dans les parties les plus basses de la topographie, à proximité du cours d'eau.

Lorsqu'au contraire les alluvions (Fz) comportent au moins un niveau imperméable (Figure 4), la remontée de la nappe des GTI ne peut plus s'effectuer à proximité immédiate du cours d'eau, car la nappe se met en pression sous le niveau imperméable. Par rapport au cas précédent, toutes conditions égales par ailleurs, l'altitude maximale de remontée de la nappe des GTI est plus élevée et est contrôlée par l'extension et l'altitude du niveau imperméable présent dans les alluvions. Des bâtiments dont l'altitude du sous-sol est plus élevée que dans le cas précédent sont désormais inondés par effet de débordement latéral. Ces bâtiments peuvent se situer relativement loin du cours d'eau. Les bâtiments situés à proximité du cours d'eau sont protégés de la remontée de la nappe, sauf s'il existe une possibilité d'infiltration ponctuelle à travers des crevasses minières par exemple, et/ou si le niveau imperméable est traversé par les soubassements d'un bâtiment ou par un forage : dans ce cas, le niveau de l'inondation pourrait s'établir à l'altitude du niveau de pression de la nappe. Ce niveau de pression peut parfois être plus élevé que le niveau du sol, générant alors un phénomène d'artésianisme (Figure 4).

Nota bene : pour simplifier le propos, on a considéré dans les schémas ci-dessous qu'il n'existe pas de nappe alluviale indépendante de la nappe des GTI. Le raisonnement serait le même en présence d'une nappe alluviale de substratum peu perméable superposée à la nappe des GTI, la différence étant que c'est la remontée de la nappe alluviale (provoquée par transfert de charge ascendant en provenance de la nappe des GTI et/ou débordement latéral de cette dernière) qui serait responsable de l'inondation des bâtiments existants.



Figure 3 – Niveau de la nappe des GTI (trait bleu) en travers d'un fond de vallée du bassin houiller lorsque les alluvions (Fz) ne comportent pas de niveau imperméable.



Figure 4 – Niveau de la nappe des GTI (trait bleu) en travers d'un fond de vallée du bassin houiller lorsque les alluvions (Fz) comportent un niveau imperméable.

3. Exploitation des sondages de la BSS

3.1. SELECTION DES SONDAGES GEOLOGIQUES



Figure 5 – Localisation des 872 sondages (rond vert) issus de la BSS.

Dans l'objectif de connaître à la fois l'extension des alluvions (cf. chapitre 5) et d'identifier la présence de niveaux imperméables au sein de ces alluvions, tous les sondages présents dans un secteur débordant largement de la dépression du Warndt ont d'abord été extraits de la BSS, indépendamment de leur situation géographique précise.

Parmi ces sondages, 872 disposaient d'une description lithologique détaillée et estimée fiable et ont été retenus (Figure 5). On peut estimer que pour ces derniers la précision sur la profondeur des passes est de l'ordre de la dizaine de centimètres.

3.2. CODIFICATION DES INFORMATIONS LITHOLOGIQUES

Les sondages sélectionnés ont ensuite été interprétés et codifiés. Les paramètres renseignés concernent :

• la localisation des têtes de forages (coordonnées X, Y) ;

- la profondeur de début et de fin de chaque passe ;
- la description lithologique par passe forée ;
- une codification, basée sur la description lithologique, distinguant notamment les passes contenant principalement du matériel peu perméable. La codification des passes est basée sur la présence de termes tels que sables, graviers, galets, argiles, tourbes, etc., dans les descriptions lithologiques. Il convient de signaler que la plupart des descriptions ne sont pas suffisamment détaillées pour pouvoir faire des distinctions entre les dominantes de lithologies, à savoir entre un sable argileux ou bien une argile sableuse.

3.3. CONSTITUTION D'UNE BASE DE DONNEES POUR GDM

Les données ont ensuite été importées dans le logiciel de modélisation GDM (Geological Data Management © BRGM), puis traitées afin de distinguer, en fonction de la lithologie et de la profondeur :

- les terrains perméables ;
- les intercalaires imperméables ;
- le substratum.

Chaque sondage a reçu par ailleurs une codification spécifique à GDM appelée FORM (Figure 6). Ce code indique la position du sondage par rapport à la formation des alluvions :

- CROS : le sondage traverse la formation ;
- END : le sondage se termine dans la formation ;
- BGIN : le sondage commence dans la formation ;
- IN : le sondage est entièrement dans la formation ;
- NO : le sondage ne rencontre pas la formation.



Figure 6 - Représentation graphique de la signification du code FORM

L'épaisseur des intercalaires imperméables a ensuite été calculée, pour chaque sondage.

4. Synthèse bibliographique

Les notices des cartes géologiques (Boulay, Forbach et St-Avold, Figure 7) constituent les premiers documents de référence sur la description des alluvions.



Figure 7 - Emplacement des cartes géologiques au droit de la dépression du Warndt

En couverture des argiles du Keuper, des marnes de la Lettenkohle, des calcaires à Cératites, du calcaire ondulé et des schistes houillers se trouvent d'importants placages de lehm (OE), qui est une **roche argileuse** à grain fin, de teinte blanche ou jaunâtre. Ce sont des produits de l'altération du soubassement. La proportion des **éléments éoliens est importante**, surtout sur le grès vosgien de la dépression du Warndt et dans les vallées au niveau de la feuille de Boulay et sur une surface moins étendue sur la feuille voisine de Forbach. Sur le bassin houiller, les limons correspondent parfois à l'ancienne **surface infratriasique** exhumée (Wehrden, Ludweiler) qui avait déjà été fossilisée sous une argile rouge parfois épaisse de 2 à 3 mètres. Remarquons toutefois que cette formation est bien individualisée côté Allemagne et que sa **cartographie est absente côté France** (carte géologique de Boulay). L'âge de ces limons est donc des plus variables. Des limons de ruissellement sont souvent associés aux alluvions. La tuilerie de Krughutte en exploite 4 à 5 mètres (feuille de Forbach).

Les plaines alluviales de la **Sarre, de la Bisten, du Lauterbach sont encombrées de dépôts tourbeux** (T : Tourbes) dus à la remontée des eaux souterraines sous pression artésienne. L'implantation de nombreuses prises d'eau a abaissé la nappe phréatique et contribué à assainir les vallées. Sur la feuille de Forbach, des marais tourbeux se rencontrent dans de nombreux fonds de vallées, en particulier **de la Sarre et de la Rosselle**. Mais ils ne donnent jamais lieu à l'exploitation de la tourbe.

Les vallées majeures des rivières sont remblayées avec des limons, des sables, graviers et galets, d'origine en majeure partie latérale. Les éléments grossiers sont plus ou moins bien calibrés selon la longueur du transport. Dans les vallées de la Rosselle et de la Sarre ce sont des sables et graviers, assez mal lessivés à cause de la pente très faible. La pente de la vallée majeure de la Sarre est de 0,36 pour 1000. Dans la vallée de la Sarre, on observe une épaisseur maximale de 6 mètres d'alluvions à l'amont de Grosbliederstroff. La plaine alluviale de la Sarre est remblayée par 3 à 5 mètres d'alluvions récentes (Fa) (feuille de Boulay).

Les alluvions anciennes sont essentiellement des sables roux ou brunâtres mélangés de graviers et de galets, galets de quartzites, quartz, lydiennes, cornalines, originaires du Houiller et du grès vosgien, calcaires et dolomies en provenance du Muschelkalk. Elles s'étagent à plusieurs niveaux au-dessus de la plaine alluviale sur la carte de Boulay (le niveau d'origine étant celui de la terrasse alluviale récente) :

- + 5 à 8 mètres : W. et N.W. de Bous, sur la rive droite entre la gare de Hostenbach et la gare de Wadgassen sur la rive gauche ;
- + 15 à 20 mètres : entre Bous, Ensdorf et le puits Duhamel (rive droite); entre Hostenbach et Schaffhausen, à Wadgassen, au Nord de Beaumarais (rive gauche) ;
- + 35 à 40 mètres : vers l'altitude 220 à 2 25 mètres entre Bous, Griesborn et Ensdorf (rive droite) ; à l'Ouest de Wehrden, Wadgassen, au S.W. de Linsdorf (rive gauche) ;
- + 45 à 60 mètres : hauteurs Pfaffenberg et Flur entre Wadgassen et Lisdorf (rive droite) ;
- + 70 mètres : vers l'altitude 256 au S.E. de Bous. Au Galgenberg (+ 120 mètres) existent des lehms enrichis en galets ayant en partie soliflué³ sur les pentes.

Elles s'étagent à plusieurs niveaux au-dessus de la plaine alluviale sur la carte de Forbach :

- + 5 à 8 mètres : Chapelle de Kurhlingen, Sarrebruck, Vôlklingen ;
- + 15 à 20 mètres : Grossblitterstroff, Burbach, Malstatt, cimetière de Furstenhausen ;
- + 30 à 35 mètres : Schonbach et Saint-Arnual (rive gauche) ; Kleinbliederstroff (rive droite) : 5 mètres de sables et graviers ; Sarrebruck, au-dessus de la gare centrale ; au N. et à l'E. de Volklingen. Dans la région entre Sarrebruck et Volklingen les alluvions disparaissent souvent sous une épaisse couverture de limons masquant ce niveau et les niveaux qui l'encadrent ;
- + 55 à 60 mètres : sur la rive gauche (W. de Gersweiler, S. de Clarenthal) ; sur la rive droite (Sarrebruck-Rastpfu, N. de Burbach, S. de Neudorf, N. de Volklingen).

Les alluvions plus élevées encore sont difficiles à synchroniser.

Concernant les Alluvions de la Rosselle (feuille de Forbach), les anciennes feuilles 1/25 000 Forbach et Sarrebruck portaient de larges placages d'alluvions sur les hauteurs entre Forbach et Vieille-Verrerie d'une part, et dans la dépression s'étendant de Morsbach à Forbach Stiring-

³ solifluxion. Mouvement lent affectant des matériaux riches en éléments colloïdaux possédant donc une forte capacité d'absorption d'eau (roches argileuses ou marneuses et formations superficielles du type lœss, limon ou altérite argileuse) après qu'ils ont franchi la limite de liquidité.

Wendel et au-delà vers Saint-Arnual. Il faut les réduire à quelques lambeaux d'alluvions au Sud de Forbach et à des résidus d'altération superficielle du grès vosgien au Nord de Forbach. Des phénomènes de solifluxion ont été observés au N.E. de Forbach. Ces restes ne fournissent pas la preuve que la Rosselle se soit écoulée vers Saint-Arnual à l'époque du niveau + 35 mètres (par rapport à la terrasse alluviale récente).

Sur la carte de Saint-Avold, les limons, éboulis des pentes et alluvions anciennes ont été cartographiés sous un même signe (FL). Ces formations sont toutes d'âge quaternaire, ou parfois peut-être pliocènes. Elles correspondent à des limons argilo-sableux, parfois épais de plusieurs mètres, ou bien aux résidus d'une altération importante de formations sous-jacentes, dont les contours géologiques ne peuvent plus être tracés avec précision. Dans ce dernier cas la composition de ces terrains dépend largement de la nature de l'horizon géologique dont ils dérivent. Ainsi, en recouvrement du Muschelkalk supérieur, ce sont des limons caillouteux qui masquent souvent le passage aux dolomies inférieures de la Lettenkohle.

L'organisation des différentes terrasses alluviales de la Sarre a été précisée par Dominique Harmand en 2007. La Boutonnière de la Warndt se situe en rive gauche de la Sarre au niveau de sa vallée moyenne (Figure 8). De petits ruisseaux ou rivières comme la Rosselle, la Bisten et le Lauterbach sont ses affluents.

Historiquement, on retiendra d'abord l'étude synthétique réalisée par Fischer sur toute l'étendue de la vallée (Fischer, 1957). Dans la section amont, située à l'extrémité orientale du bassin de Paris, Fischer décrit, de Sarrebourg à Sarrebruck (Saarbrücken), un dispositif de quatre terrasses (appelées « Horizonte ») notées de la plus basse à la plus ancienne : A, B, C et D. En territoire allemand, ce dispositif est complété par deux terrasses plus élevées notées E et F. Ajoutons que cette nomenclature est encore utilisée aujourd'hui sur la carte géologique du Land de Sarre, notamment sur la feuille Saarbrücken-West à 1/25 000 (Klinkhammer et Konzan, 1975).

Dans les années 50, Théobald distinguait un dispositif comprenant quatre ou cinq terrasses étagées : cinq terrasses à + 5/8 m, + 15/20 m, 35/40 m, + 45/60 m, + 70 m sur la feuille Boulay (Théobald et al., 1955a) ; quatre terrasses à + 5/8 m, + 15/20 m, 30/35 m, + 55/60 m sur la feuille Forbach (Théobald et al., 1955b).


Figure 8 : Cartographie des alluvions des vallées de la Sarre moyenne et de la Nied inférieure d'après Harmand (2007).

D'après le GECNAL (Groupement d'Étude et de Conservation de la NAture en Lorraine) (<u>https://www.gecnal-du-warndt.org/Le-Warndt-34/Milieux-naturels/Milieux-humides/Evolution-generale-des-milieux</u>), qui a étudié l'évolution générale des milieux humides et des vallées dans le Warndt, les fonds de vallées étaient à l'origine essentiellement alimentés par les alluvions issues du bassin gréseux, siliceuses et acides.

C'est dans les dépressions des vallées, au niveau des zones d'affleurement de nappe et de ralentissement des écoulements que se sont formés, sur substrat acide, les marais tourbeux. Ces marais étaient localisés au cœur des massifs forestiers.

Les défrichements successifs et les drainages ont permis la minéralisation de la tourbe et donc un enrichissement du milieu permettant la fauche et la pâture. Les zones les plus mal drainées ont conservé le fonctionnement propre aux tourbières, dont la tourbière de l'étang d'Oderfang (Figure 9).

La déprise agricole des années 60 a engendré un processus inverse de recolonisation du milieu par les boisements. Les secteurs humides sont actuellement laissés à l'abandon et les arbres et arbustes progressent et tendent à fermer le milieu à partir des lisières forestières et des fossés.

Les prairies de fauche, une fois abandonnées, ont évolué rapidement en cariçaies eutrophes (carex) puis ont été envahies par les roseaux : un enrichissement en alluvions a abouti à l'eutrophisation d'une partie de ces milieux. Le développement des grandes roselières met en évidence ce phénomène. L'alluvionnement engendre la disparition progressive des dernières zones de tourbières.

L'analyse de l'évolution paysagère dans la vallée amont de la Rosselle (secteur Nord de Saint-Avold) a été réalisée à partir de photographies aériennes et de la carte géologique du secteur, et des connaissances du GECNAL du Warndt sur le terrain.

NORD DE SAINT - AVOLD EN 1951



NORD DE SAINT - AVOLD EN 2003



- Développement de zones de friches lié à l'abandon des prés de fauche (en bas à droite).
 Présence d'arbres et d'arbustes
- d'ornement (au centre) en raison de l'implantation d'une pépinière, aujourd'hui abandonnée.



Disparition de l'étang d'Oderfang, présence d'une décharge (au centre en clair) Colonisation par les boisements liée à l'abandon des pratiques culturales traditionnelles (franges

Est et Nord).

Figure 9 - Analyse de l'évolution paysagère dans la vallée amont de la Rosselle (secteur Nord de Saint-Avold) ; source GECNAL ; (pas d'échelle communiquée, dimensions du rectangle bleu estimées à 800 par 600 m).

Dans les années 1950, les vallées apparaissent très clairement. La ville de Saint-Avold forme une unité compacte, implantée en bordure de la vallée de la Rosselle. Le parcellaire est très morcelé et caractéristique d'une agriculture extensive et / ou familiale (de petite extension).

Les fonds de vallée et les zones humides s'insèrent dans un paysage très ouvert, aux vues lointaines coupées par les accidents du relief. Seules les forêts constituent des zones fermées, visibles de loin et donnant une échelle au paysage. Deux vallées se rejoignaient donc au Nord-Ouest de Saint-Avold : la Rosselle amont et le Muehlegraben. Les deux fonds de vallées, « enchâssés » en milieu boisé, étaient constitués de prairies de fauche de part et d'autre d'un fossé où s'écoulaient les eaux issues du drainage de la nappe. Des étangs avaient été aménagés dans ces deux vallons grâce à la construction de digues : l'étang d'Oderfang et l'étang de Merbette. Des secteurs tourbeux (ancienne tourbière d'Oderfang) se localisaient à la jonction de ces vallées et certains furent exploités les années antérieures.

Dans les années 2000, la lecture paysagère semble beaucoup plus difficile. De nombreux secteurs du ban communal ont été cédés à l'urbanisation, souvent concentrée le long des voies de circulation. Les unités paysagères sont plus difficilement différentiables et la distinction entre milieu ouvert (cultures, vallées) et milieu fermé (forêts) est moins claire. Les zones humides et les vallées n'ont plus leur place dans l'utilisation humaine de l'espace du ban communal. Les lisières forestières ne sont pas nettes et les boisements se diffusent sur les terrains laissés à l'abandon. La vallée de la Rosselle a ainsi été profondément dégradée. L'étang d'Oderfang a disparu pour laisser la place à une roselière eutrophe.

5. Campagne de sondages réalisée en 2017

En 2017, une campagne de sondages a été réalisée par la DREAL Grand Est entre le 13 mars et le 30 mai 2017 sur l'ensemble des alluvions du bassin houiller lorrain. Au total, 37 sondages destructifs et 13 sondages carottés ont été réalisés (Reichart, 2017). Les échantillons ont été stockés et étudiés dans les locaux de Terrafor à Retonfey (Figure 10). La localisation des sondages est présentée dans la Figure 13.

Dans le cadre de la présente étude, les 13 carottes et les centaines d'échantillons récupérés ont été analysés par le BRGM. Les relevés des carottes et des cuttings ont fait l'objet de logs lithologiques présentés en Annexe 1 et 2 de ce rapport. L'objectif était de caractériser les formations imperméables comme les argiles ou la tourbe (Figure 11) des autres formations perméables comme le grès (Figure 12).



Figure 10 - Lieu de stockage des échantillons de carottes et de cuttings



Figure 11- Photographie de carottes de tourbe



Figure 12 – Photographie de carottes de sable gris jaune (partie haute) et de grès rouge (partie basse)



Figure 13 - Localisation des forages carottés (SC) et destructifs (SD) de la campagne 2017

6. Délimitation des alluvions du bassin houiller sur les affleurements des GTI

6.1. LIMITES DE LA DELIMITATION EXISTANTE

Un contrôle des délimitations existantes relatives à la géologie des alluvions (carte géologique au 1/50 000 du BRGM) et aux zones humides actuelles et disparues (Inventaire des zones humides du Bassin Houiller, Asconit Consultants – SCoT du Val de Rosselle, SAGE du Bassin Houiller, 2012) montre d'une part l'existence d'incohérences entre les deux délimitations, et d'autre part des incohérences avec la topographie issue d'un MNT au pas de 5 m.

La Figure 14 montre que les zones d'alluvions et les zones humides qui devraient affleurer en fond de vallée, ne sont plus corrélées avec le relief lorsque l'on considère la topographie très détaillée et précise issue du MNT au pas de 5 m. Le relief a été représenté sur l'illustration en recalculant les courbes de niveaux tous les 5 m à partir des données du MNT au pas de 5 m.



Figure 14 – Incohérences entre les délimitations disponibles des alluvions récentes (bleu foncé) de la carte géologique à 1/50 000 et des zones humides (bleu clair) et les courbes de niveau calculées à partir d'un MNT au pas de 5 m (lignes vertes à équidistance 5 m).

Le premier travail a donc consisté à cartographier les limites des alluvions au sein de la dépression du Warndt.

6.2. METHODOLOGIE DE DELIMITATION CARTOGRAPHIQUE DES ALLUVIONS

La nouvelle cartographie tire à la fois parti de l'information très précise apportée par le MNT au pas de 5 m et, lorsque cela est possible, des informations généralement moins précises disponibles sur la nature lithologique des alluvions et de leurs conditions de dépôt. Deux approches ont été testées pour établir la nouvelle délimitation des alluvions, l'une par croisement SIG des informations topographiques et géologiques, et l'autre par tracé manuel guidé par les informations topographiques : dans les deux cas, le nouveau tracé s'appuie sur l'hypothèse que le processus de dépôt des alluvions dans le bassin houiller induit des morphologies aux pentes très faibles, voire nulles.

6.2.1. Tentative de délimitation des alluvions par croisement SIG des informations topographiques et géologiques

Après compilation de l'ensemble des données géologiques disponibles dans la BSS du BRGM (cf. chapitre 3), la première approche a consisté à s'appuyer sur l'analyse de la lithologie de chaque sondage BSS afin de déterminer l'extension maximale des alluvions, puis à croiser cette information avec la pente du MNT au pas de 5 m afin de déterminer un seuil de pente qui soit représentatif de la morphologie des alluvions.

Ce travail ne s'est pas révélé concluant dans cette première phase car des verrous empêchant sa bonne application n'ont pas pu être levés. Les verrous sont les suivants :

- la qualité souvent insuffisante de l'information lithologique disponible pour les sondages disponibles ;
- la présence d'argiles dans les alluvions qui empêche de caractériser cette formation en tant que telle ;
- la présence de grès du Trias altéré en sable qui se confond avec les sables alluvionnaires;
- la présence de lithologies de colluvions et de formations de pentes qui sont également semblables aux lithologies alluvionnaires.

6.2.2. Délimitation par tracé manuel guidé par les informations topographiques

Une autre approche a donc été mise en œuvre pour délimiter un contour préliminaire des alluvions du bassin houiller. En faisant l'hypothèse qu'à l'échelle de la dépression du Warndt, le contexte dynamique de dépôt est identique sur l'ensemble de la région, la seconde approche a consisté à tracer manuellement le contour des alluvions sur la base d'une réflexion géomorphologique (pente du relief) guidée par les lignes de niveau du MNT au pas de 5 m, ceci afin d'assurer une objectivité et une logique dans le tracé.

Dans un premier temps, toutes les mailles de taille 5 x 5 m de pente inférieure à 1 degré ont été sélectionnées à partir du MNT au pas de 5 m (Figure 15). Le résultat étant peu exploitable pour servir de guide à un tracé manuel du contour des alluvions, on a, dans un deuxième temps, retenu seulement les groupes de mailles de largeur supérieure ou égale à 3 mailles contiguës : ce sont ces groupes de plus de 3 mailles contiguës de pente inférieure à 1 degré qui ont servi de guide au tracé de l'extension des alluvions (Figure 16 et Figure 17).

Le tracé s'est également appuyé sur le MNT ombré des pentes et les courbes de niveau calculées à partir du MNT au pas de 5 m (Figure 18). Le MNT ombré a permis de mieux visualiser la rupture des pentes qui reflètent dans certains cas la limite de l'extension des alluvions.



Figure 15 – Exemple de tracé des alluvions (en violet) à partir des mailles de pente inférieure à 1°(en rose fushia) regroupées par zones de plus de trois mailles (en gris).



Figure 16 – Exemple de tracé des alluvions sur le bassin versant de la Bisten en France (en violet) à partir des mailles de pente inférieure à 1° regroupées par zones de plus de trois mailles (en gris).



Figure 17 – Comparaison entre l'ancienne délimitation des alluvions et zones humides (en bleu) et la nouvelle délimitation (en violet), en gris les groupes de plus de 3 mailles de pente inférieure à 1°.



Figure 18 – Comparaison entre l'ancienne délimitation des alluvions et zones humides (en bleu) et la nouvelle délimitation (en violet), cette dernière étant guidée par la topographie détaillée issue du MNT au pas de 5 m (MNT ombré des pentes en gris et courbes de niveau tous les 5 m en vert).

7. Résultats

7.1. ESSAIS D'EAU PONCTUEL

Treize essais d'eau ponctuel destinés à évaluer la perméabilité horizontale des terrains, de type Lefranc / Nasberg, ont été conduits au sein des forages carottés qui ont été réalisés en 2017 par la DREAL Grand Est.

L'interprétation des formations géologiques et la correspondance des perméabilités horizontales a donné les résultats suivants :

- Le grès altéré a une perméabilité de l'ordre de 10⁻⁶ m/s ;
- Le grès non altéré semble avoir une perméabilité du même ordre de grandeur ;
- Les alluvions semblent être d'un ordre de grandeur plus perméables dans le plan (10⁻⁵ m/s) lorsqu'elles sont sableuses et d'un ordre de grandeur plus imperméables dans le plan (10⁻⁷ m/s) lorsqu'elles sont argileuses.

Sondage	Date	profondeur	k en m/s	lithologie	interprétation
SC 985	07/04/2017	6,5 m - 7,2 m	2,4 x 10-7	argile glaiseuse grise noire localement tourbeuse	alluvion imperméable
SC 988	27/04/2017	8 m - 8,5 m	1,29 x 10-5	sable argileux orangé avec des graviers de quartz blanc de 1 cm	alluvion perméable
SC 958	24/03/2017	3,4 m - 5 m	1,06 x 10-6	sable : grès altéré	grès altéré
SC 966	29/03/2017	3,5 m - 5 m	4,9 x 10-6	sable jusqu'à 4,5 puis tourbe jusqu'à 5 m	grès altéré
SC 980	04/04/2017	4,5 m - 5 m	2,34 x 10-6	sable : grès altéré	grès altéré
SC 986	14/04/2017	10 m - 10,5 m	1,53 x 10-6	grès blanc jaune avec rare feldspath et mica	grès
SC 987	21/04/2017	4,5 m - 5 m	1,8 x 10-6	sable : grès altéré	grès altéré
SC 990	11/05/2017	4 m - 4,5 m	1,1 x 10-6	sable blanc beige	grès altéré
SC 992	25/05/2017	3,8 m - 4,3 m	2 x 10-6	sable : grès altéré	grès altéré
SC 943	14/03/2017	Sondage artésien	Pas de mesure		
SC 944	21/03/2017	Sondage artésien	Pas de mesure		
SC 989	04/05/2017	4,5 m - 5 m	Non interprété		
SC 991	22/05/2017	6,5 m - 7 m	Non interprété		

Figure 19 - Tableau de synthèse des essais de perméabilité horizontale avec la correspondance lithologique.

Il est à noter que 7 mesures ont été réalisées dans la formation des grès altérés. La valeur de perméabilité horizontale de 10⁻⁶ m/s semble donc être bien représentative de cette formation.

7.2. NOUVELLE DELIMITATION DES ALLUVIONS DU BASSIN HOUILLER LORRAIN

La nouvelle délimitation des alluvions du bassin houiller lorrain (débordant de quelques kilomètres en Allemagne) est présentée en Figure 21. L'approche pourrait être étendue à toute la dépression du Warndt si une optimisation des prévisions de remontée de nappe en territoire allemand était un jour souhaitée. La précision du tracé des limites est discutée dans le paragraphe « Incertitude sur les résultats ». Ce travail a également permis de discerner les terrasses alluviales récentes de celles qui sont anciennes. La cartographie des alluvions anciennes n'est pas exhaustive et ne constitue pas l'objectif de cette étude.

Les terrasses anciennes sont des terrasses étagées (terrasses qui sont superposées en étages selon des niveaux altimétriques différents). Plusieurs ont été mises en évidence :

• Une terrasse, à un niveau de +5 m par rapport au lit du cours d'eau principal, est observée au niveau de la Bitzelbach, cette terrasse n'est pas distinguée

cartographiquement des terrasses d'alluvions récentes car elles sont hydrogéologiquement connectées ;

- de +5 m au niveau de la Neuwaldbach ;
- de +5 m au niveau de la Merle (Figure 20);
- de +10 m au niveau de la Leibsbach ;
- de +5, +17 et +20 m au niveau de la Morsbach ;
- de +25 m au niveau de la Lauterbach ;
- de +25/30 m au niveau de la Froschenpfuhl (Figure 20);
- de +40 m au niveau de la Rosselle.





Figure 20 - Coupe des terrasses étagées au niveau de la Froschenpfulh et de la Merle. Unités : mètres (abscisse) et mètres NGF (ordonnée)



Figure 21 – Nouvelle délimitation des alluvions du bassin houiller superposée au MNT ombré au pas de 5 m.

7.3. EPAISSEUR DES ALLUVIONS ET DES COUCHES IMPERMEABLES

Le travail réalisé prend en compte la campagne de forage réalisée en 2017 par la DREAL Grand Est. Il est important de préciser que ces résultats ont été fondamentaux, d'une part pour caractériser le plus précisément et correctement possible les formations géologiques, et d'autre part pour pallier la couverture limitée de certains secteurs dans la BSS ; les nouvelles données étaient ainsi indispensables pour caractériser les secteurs en question.

Les données ont été traitées à l'aide de GDM ce qui a permis de distinguer, en fonction de la lithologie et de la profondeur (Figure 22) :

- les morts-terrains (terrains de surface stériles : terre végétale, argile, technosol, macadam, etc...) :
- les intercalaires imperméables ;
- les alluvions perméables ;
- le substratum (ou *bed-rock*).



Figure 22 - Coupe synthétique des alluvions récentes avec la localisation des morts-terrains et intercalaires imperméables.

L'épaisseur de chaque unité géologique a ensuite été calculée, pour chaque sondage, par différence entre les cotes du toit et du mur. Ainsi, l'analyse des forages et le traitement sous GDM a permis de réaliser la cartographie des différentes unités géologique suivantes :

- le mur des alluvions ou l'épaisseur des alluvions totales, qu'elles soient perméables ou imperméables (en bleu sur la Figure 22) ;
- l'épaisseur cumulée des terrains imperméables compris dans les alluvions (avec les morts-terrains, en bleu foncé sur la Figure 22) ;

Les cartes sont issues d'une interpolation triangulaire sous QGIS entre les différents sondages qui ont servi à faire le modèle. Au préalable, seuls les sondages pertinents ont été sélectionnés et les autres sondages ont été écartés. Tous les sondages qui ont été effectués lors de la campagne 2017 ont été gardés pour l'interpolation. De même, de façon à assurer une cohérence dans le résultat de l'interpolation, des sondages virtuels ont été rajoutés à dire d'expert lorsque l'information était absente. Ainsi, par exemple, il a été placé sur les limites d'alluvions des sondages virtuels avec une épaisseur théorique d'alluvions de 0,5 m de façon à forcer l'interpolation à réduire l'épaisseur des alluvions en bordure et de rendre l'image cohérente avec une certaine réalité.

Ce travail, à dire d'expert ne prend pas en compte la dissymétrie possible des coupes transversales des alluvions (Figure 22). Le résultat ne reflète qu'une tendance de la profondeur

du substratum dans un secteur donné de 0,1 à 2 kilomètres de longueur. Il est parfaitement possible que les profondeurs varient rapidement au sein d'un même secteur mais l'absence de sondages et/ou de profils géophysiques empêche de statuer sur une image réelle de la profondeur du substratum.

Il est cependant possible de fournir les informations suivantes :

L'épaisseur totale des alluvions peut atteindre 14 m et souvent dépasser largement les 10 m de puissance (Figure 23), que ce soit sur des cours d'eau primaires (principaux) comme la Rosselle à l'ouest de Forbach, à Freyming-Merlebach ou encore à Hombourg-Haut, ou bien sur des cours d'eau secondaires (cours d'eau qui se jette dans un cours d'eau primaire) comme la Schlosserbach au nord-ouest de Creutzwald.

La Muehlegraben présente quant à elle des épaisseurs d'alluvion qui ne dépassent pas 2 m d'épaisseur. Il en est de même pour les terrasses secondaires de la Rosselle au sud de la ville de Petite-Rosselle ou bien au niveau du ruisseau de la Bitzelbach au nord-ouest du Creutzwald.



Figure 23 - Mur des alluvions ou épaisseur des alluvions totales qu'elles soient perméables ou imperméables

Les niveaux imperméables peuvent largement dépasser les 4 m en cumulé (Figure 24) et peuvent atteindre 7,8 m d'épaisseur comme observé dans le forage 975 (SD_Rosselle_5) de la campagne 2017. La présence de terrains imperméables est importante au sein des alluvions et cela semble être une caractéristique de l'ensemble de la dépression du Warndt. Dans l'ensemble, il semble y avoir une corrélation entre l'épaisseur des niveaux imperméables et l'épaisseur totale des alluvions. Sur la base des données exploitées, il apparaît que les secteurs qui présentent une très faible (voire une absence) de niveaux imperméables sont rares (Figure 24) :

- à l'est de la Bitzelbach ;
- localement au niveau de la Leibsbach à l'ouest de Creutzwald ;
- au niveau de la Bisten au sud de Creutzwald ;
- la partie amont et terminale de la Lauterbach et de la Merle ;
- la Merle à l'ouest de Freyming-Merlebach ;
- une grande partie de la Muehlegraben à l'ouest de Saint-Avold ;
- la Kochernbach et la Wimbornbach à l'est de Freming-Merlebach;
- la plaine au niveau de la jonction entre Morsbach et la Rosselle ;
- quelques zones réduites autour de Forbach ;
- peut-être localement la terrasse secondaire au sud de la commune de Petite-Rosselle ;
- probablement la partie aval de la Rosselle.



Figure 24 - Epaisseur cumulée des terrains imperméables compris dans les alluvions (sans les mortsterrains)

7.4. INCERTITUDES SUR LES RESULTATS

Avant de discuter des incertitudes sur les résultats, soulignons l'importance des données issues de la campagne de forage de 2017. Certaines zones ne sont caractérisées que par ces données. En outre, une confiance plus importante est attribuée sur l'interprétation des données lithologiques décrites et la présence de niveau imperméable. Néanmoins, des rivières comme la Kohlachlagbach, la Saint Nikolausbach et la Grohbruchbach (Ouest de Forbach) n'ont pas de données pour pouvoir être caractérisées (Figure 27 et Figure 28). Il est recommandé de prendre des valeurs sécuritaires pour la modélisation hydrogéologique (présence d'horizon imperméable et épaisseur des alluvions faible).

Malgré tout le soin porté aux travaux de modélisation et aux investigations complémentaires menées dans le cadre de l'étude, des incertitudes de diverses natures demeurent et doivent être gardées en mémoire dans le cadre de tout travail d'interprétation ultérieur des résultats.

La géométrie des alluvions, bien que considérablement améliorée dans le cadre d'une étude récente, ne peut naturellement être modélisée de manière exacte, pas plus qu'elle ne peut être connue avec une précision absolue. En effet, bien que le tracé géologique des alluvions soit basé sur une méthode objective de l'utilisation du MNT à partir des pentes inférieures à 1 degré, ce tracé n'en reste pas moins une décision d'expert qui est entachée parfois d'indécision due soit à une forte urbanisation et/ou un remodelage anthropique du relief qui cache le relief naturel et empêche de définir un tracé qui soit en adéquation avec la réalité des dépôts sédimentaires, soit à une géomorphologie naturelle peu marquée. En effet, lorsque les alluvions en contexte plat bordent un versant abrupt, il est aisé de dessiner le trait de la limite cartographique mais cela est beaucoup moins évident lorsque les pentes varient peu sur une grande étendue comme cela est le cas sur les alluvions anciennes de la Bitzelbach (confondues cartographiquement avec les alluvions récentes car elles sont continues).

En outre, la limite des alluvions ne se résume pas à un simple trait dans l'espace, il s'agit davantage d'une zone de transition progressive entre les dépôts alluvionnaires et les colluvions ou dépôts de versants comme les argiles de fond de vallées. Les dépôts sont en réalité plus ou moins biseautés en fonction des conditions de sédimentation. De même, la distinction entre les sables alluvionnaires et les sables issus de l'altération des grés n'est toujours pas évidente lors de la description des échantillons. L'épaisseur des alluvions s'en trouve donc entachée d'une certaine imprécision. La couleur des sables a principalement été l'indicateur pour distinguer son origine.

D'autre part, les alluvions ne sont pas d'épaisseur constante sur toute leur largeur surtout lorsque les forages qui ont servi à établir les épaisseurs sont espacés de plusieurs centaines de mètres voire de plusieurs kilomètres. Ce type d'incertitude peut avoir pour conséquence une surestimation ou sous-estimation de la future cote d'équilibre de la nappe des GTI et des nappes alluviales sus-jacentes. Nous conjecturons que ce point pourrait avoir des conséquences sur plusieurs mètres (zones fortement pentées) à dizaines de mètres (zones faiblement pentées) de part et d'autre de la limite actuelle des alluvions. L'écart piézométrique associé pourrait localement atteindre quelques dizaines de centimètres (zones faiblement pentées) voire davantage (zones fortement pentées).

La réalisation d'un modèle géologique des alluvions du bassin houiller lorrain a apporté de nombreuses réponses sur les échanges attendus entre la nappe des GTI et les nappes alluviales sus-jacentes. Pour autant, il est impossible de connaître exactement la répartition et les paramètres hydrodynamiques des horizons peu perméables, qui sont le plus souvent hétérogènes dans les trois directions de l'espace. Tout au plus peut-on qualifier ces hétérogénéités. On ne peut non plus exclure que la remontée de la nappe des GTI puisse avoir

des conséquences structurelles sur les horizons superficiels. Une telle incertitude impacte le caractère libre/captif de la nappe des GTI et peut donc avoir pour conséquence une surestimation (substratum de nappe alluviale moins perméable que supposé) ou sousestimation (substratum de nappe alluviale plus perméable que supposé) de la future cote d'équilibre de la nappe des GTI et des nappes alluviales sus-jacentes. Nous conjecturons que ce point pourrait avoir des conséquences sur toutes les zones associées à une nappe alluviale et sur quelques mètres à dizaines de mètres de part et d'autre de ces zones. L'écart piézométrique associé pourrait localement atteindre quelques dizaines de centimètres voire plusieurs mètres.

Tous les travaux de terrassement, creusement, imperméabilisation des terrains, étanchéification ou renaturation des cours d'eau etc. sont susceptibles d'impacter localement le comportement des eaux souterraines. De même que pour les alluvions, la parfaite connaissance des modifications anthropiques des terrains de surface et de proche surface ne peut naturellement pas être exhaustive, pas plus que ne peut raisonnablement l'être son évolution dans le futur. Estimer l'influence spatiale de ces modifications anthropiques aléatoires et se prononcer sur les perturbations piézométriques associées est selon nous inenvisageable.

Enfin, il faut garder à l'esprit qu'il est possible d'observer la présence de lithologies imperméables dans les roches du bedrock (substrat rocheux du Trias sur lequel reposent les formations alluvionnaires). En effet, les grès du Trias peuvent présenter des passées sédimentaires plus argileuses qui peuvent jouer en aquitard. En outre les périodes d'altérations anté-quaternaires (c'est-à-dire avant les dépôts des alluvions) sont très mal connues et il n'est pas impossible qu'une paléo-surface d'altération avec de fortes concentrations en argiles soit présente. Cela revient à dire qu'il est possible que des mises en charge de la nappe se produisent ailleurs que sous les alluvions.

Les cartes présentées en Figure 25, Figure 26 et Figure 27 synthétisent la fiabilité du modèle, ainsi que les zones où il y aurait une absence d'horizon imperméable. Elles localisent également les forages qui ont été sélectionnés pour le modèle. Ces derniers ont été jugés bien décrit et fournissent assez de détail pour pouvoir statuer sur la présence d'un horizon imperméable. Il a été également décidé de conserver quelques forages localisés dans le bedrock à titre d'information car ce dernier pouvait également contenir un horizon imperméable.



Figure 25- Détail sur l'épaisseur des horizons imperméables et la fiabilité du modèle (secteur Bisten aval)



Figure 26- Détail sur l'épaisseur des horizons imperméables et la fiabilité du modèle (secteur Bisten amont et la Rosselle amont)



Figure 27- Détail sur l'épaisseur des horizons imperméables et la fiabilité du modèle (secteur la Rosselle aval).



Figure 28 - Absence de donnée au niveau du secteur d'Alsting-Spicheren (vallon du Simbach). Taille de l'image 6 km sur 4 km. Nord en haut. Il n'y a qu'un forage qui est sans horizon imperméable mais il est localisé à la limite des alluvions , la donnée est donc peu fiable.

8. Conclusion

Le présent rapport concerne la modélisation géologique des alluvions du bassin houiller lorrain commandée par GEODERIS.

Les travaux réalisés ont abouti à :

- la compilation de l'ensemble des données géologiques relatives aux alluvions du bassin houiller lorrain, extraites principalement de la banque de données du sous-sol (BSS) du BRGM et d'une campagne de sondages réalisé en 2017 par la DREAL Grand Est ;
- la recherche des indices de présence d'un ou plusieurs horizons imperméables au sein des alluvions, le codage de ces indices puis l'intégration des données géologiques dans le logiciel de modélisation des surfaces géologiques (GDM) du BRGM ;
- la réalisation d'une nouvelle délimitation des alluvions du bassin houiller lorrain à l'aide (1) de la topographie précise fournie par un MNT Lidar au pas de 5 m, (2) de la compréhension du mode de dépôt de ces alluvions et (3) des données géologiques évoquées plus haut. Pour assurer la robustesse du modèle hydrodynamique dans lequel la nouvelle délimitation sera intégrée, cette dernière a été étendue au territoire allemand sur quelques kilomètres en aval de la frontière ;
- la réalisation d'une modélisation des surfaces géologiques des alluvions du bassin houiller à partir des données qui ont été interprétées et numérisées dans la présente étude.

Ainsi deux couches SIG sous format tif ont été produites. Il s'agit :

- du mur des alluvions ou de l'épaisseur des alluvions totales, qu'elles soient perméables ou imperméables ;
- de l'épaisseur cumulée des terrains imperméables compris dans les alluvions ;

Les résultats montrent que l'épaisseur totale des alluvions peut atteindre 14 m et largement dépasser les 10 m de puissance surtout au niveau de la Rosselle.

La présence de terrains imperméables au sein des alluvions semble être une caractéristique de l'ensemble de la dépression du Warndt. Sur la base des données exploitées, il apparaît que les secteurs qui présentent une très faible (voire une absence) de niveaux imperméables, sont rares. Par ailleurs, différentes incertitudes demeurent et affectent les résultats. Ces incertitudes ont été qualifiées et quantifiées autant que faire se peut dans le présent document. Elles sont indissociables des résultats produits et, à ce titre, doivent être gardées en mémoire dans le cadre de tout travail d'interprétation basé sur cette étude.

9. Bibliographie

ASCONIT CONSULTANTS - SCOT du Val de Rosselle (2012) – Inventaire des zones humides du Bassin Houiller. Notice d'utilisation des données, DVD, décembre 2012.

BONVALLET.J. (Novembre 1978) – BRGM/78-SGN-664-LOR commune de Forbach (Moselle). Centre d'animation culturelle. Choix et calcul des fondations d'après les sondages et essais de sol. 10 p.

FISCHER F. (1957) Beiträge zur Morphologie des Flußsystems der Saar. – Ann. Univ. Sarav., Phil. 5, 104-192, Saarbrücken.

GOGUEL J., THEOBALD N., LEMOINE M. (1955) - Carte géol. France (1/50 000), feuille Boulay-Moselle (139). Orléans : BRGM. Notice explicative par Goguel J., Théobald N. (1955), 6 p.

GOGUEL J., THEOBALD N. (1955) - Notice explicative, Carte géol. France (1/50 000), feuille Boulay-Moselle (139). Orléans : BRGM, 6 p. Carte géologique J. Goguel, N. Théobald, M. Lemoine (1955).

GOGUEL J., GUILLAUME M., GUILLAUME L., MEYER G., SCHUMACHER E., VAN WERVEKE L., LEMOINE M. (1960) - Carte géol. France (1/50 000), feuille Saint-Avold (165). Orléans : BRGM. Notice explicative par Goguel J., Guillaume M., Guillaume L., Meyer G., Schumacher E., Van Werveke L., Segond R. (1960), 6

GOGUEL J., GUILLAUME M., GUILLAUME L., MEYER G., SCHUMACHER E., VAN WERVEKE L., SEGOND R. (1960) - Notice explicative, Carte géol. France (1/50 000), feuille Saint-Avold (165). Orléans : BRGM, 6 p. Carte géologique J. Goguel, M. Guillaume, L. Guillaume, G. Meyer, E. Schumacher, L. Van Werveke, M. Lemoine (1960).

GOGUEL J., THEOBALD N., SCHÖMER R., BRITZ K., MANDERSCHEID G., LEMOINE M. (1955) - Carte géol. France (1/50 000), feuille Forbach (140). Orléans : BRGM. Notice explicative par Goguel J., Théobald N., Schömer R., Britz K., Manderscheid G. (1955), 6 p.

GOGUEL J., THEOBALD N., SCHÖMER R., BRITZ K., MANDERSCHEID G. (1955) - Notice explicative, Carte géol. France (1/50 000), feuille Forbach (140). Orléans : BRGM, 6 p. Carte géologique J. Goguel, N. Théobald, R. Schömer, K. Britz, G. Manderscheid, M. Lemoine (1955).

HARMAND Dominique, « Révision du système des terrasses alluviales de la Sarre entre Sarrebourg (France, Lorraine) et la confluence avec la Moselle à Konz (Allemagne, Rhénanie-Palatinat) », Revue Géographique de l'Est [En ligne], vol. 47 / 4 | 2007, mis en ligne le 25 janvier 2012, consulté le 02 mai 2017. URL : http://rge.revues.org/1536

KLINKHAMMER B. F., HEIZMANN G. (1965).— Geologische Karte des Saarlandes 1 : 25 000, Blatt Nr. 6808 Kleinblittersdorf, Saarbrücken.

KLINKHAMMER B. F., KONZAN H.-P. (1975).— Mit einen Beitrag von Heizmann G. Erläuterungen zur Geologischen Karte des Saarlandes 1 : 25 000. Blatt Nr. 6707 Saarbrücken, 118 S.

REICHART G. (2015a) – Zones soumises à la remontée de nappe dans le bassin houiller lorrain (57) – secteur ouest. Note d'accompagnement. Rapport GEODERIS E2015/075DE.

REICHART G. (2015b) – Actualisation de la cartographie des zones soumises à la remontée de la nappe dans le bassin houiller lorrain (57) – secteur ouest. Note de synthèse destinée aux services de l'Etat et aux communes. Rapport GEODERIS E2015/097DE.

REICHART G. (2015c) – Actualisation de la cartographie des zones soumises à la remontée de la nappe dans le bassin houiller lorrain (57) – secteur ouest. Note de synthèse destinée aux services de l'Etat. Rapport GEODERIS E2015/098DE.

REICHART G. (2017) – Bassin houiller Iorrain. Compte-rendu de la campagne de sondages réalisée par la DREAL Grand Est avec l'appui technique de GEODERIS. Rapport GEODERIS E2017/094DE.

THÉOBALD N. (1952). Aperçu Géologique du Territoire de la Sarre. Publications de l'Université de la Sarre, West-Ost- Verlag, 80 p + IX p h. t.

THÉOBALD N. et al. (1955a) Notice explicative, Carte géol. France (1/50 000), feuille BOULAY (139). – Orléans, Bureau de Recherches Géologiques et Minières.

THÉOBALD N. et al. (1955b). Notice explicative, Carte géol. France (1/50 000), feuille FORBACH (140). – Orléans, Bureau de Recherches Géologiques et Minières.

VAUTE L., FOURNIGUET G. (2015) – Evaluation des zones à risque lié à la remontée de nappe consécutive à la diminution des prélèvements d'eau dans le bassin houiller lorrain, secteur Ouest (La Houve), révision du rapport RP-63542-FR. Rapport BRGM/RP-64573-FR, 110 p., 18 ill., 4 ann.

https://www.gecnal-du-warndt.org/Le-Warndt-34/Milieux-naturels/Milieux-humides/Evolution-generale-des-milieux

Annexe 1

Logs lithologiques des sondages carottés de la campagne de sondages 2017

966	SC_Bisten_1
958	SC_Bitzelbach_1
991	SC_Forbach_1
943	SC_Grossbach_1
944	SC_Grossbach_2
987	SC_Merle_1
980	SC_Muehlegrabe
990	SC_Pulverbach_1
986	SC_Rosselle_1
985	SC_Rosselle_2
988	SC_Rosselle_3
989	SC_Rosselle_4
992	SC_Spicheren_1

Correspondance entre les numéros de sondages de Terrafor (à droite) et de GEODERIS (à gauche).



	Nom du sondage : 991 Echelle : 1 / 200 Tranche de profondeur : 0.00 M - 19.50 M Alluvions du bassin de la Wardnt Auteur : C. Cartannaz			
Echelle profondeur (m)	Profondeur litho (m)	Lithologie	Log lithologique	
	0.05 1.20 1.50 2.50 2.70	goudron tout venant granulat sable gris tout venant granulat sable beige tout venant granulat sable gris noir sable beige cendre pulvérulente noire légère		
- 5 -	6.60 6.90 7.00 7.80 8.10 8.40	béton clair avec sable beige rouille calcaire carrié sable beige claire sable induré gris grès rouge bordeaux avec muscovite sable arkosique avec des galets de 2 cm de quartz blancs		
- 10 -	10.00 10.50 10.80 11.10 12.20	silt beige orange silt beige orange avec des graviers de quartz blanc (1 cm) grès arkosique jaune orange sable arkosique orange grès rouge (faible pourcentage en feldspath)		
- 15 -	- 15.90 - 16.20 - 17.00 - 17.30 - 19.50	sable blanc grès arkosique rouge grès blanc grès rouge		



Nom du sondage : 989 Echelle : 1 / 200 Tranche de profondeur : 0.00 M - 25.60 M Alluvions du bassin de la Wardnt Auteur : C. Cartannaz			
Echelle profondeur (m)	Profondeur litho (m)	Lithologie	Log lithologique
- 5 -	- 2.50 - - 4.00 - - 5.50 - - 7.10 -	schiste, houille : terril houiller (tout venant) argile sableuse indurée gris noire argile sableuse grise sable blanc (grès altéré) grès rouge	
- 15 - - 20 -		grès rouge claire à blanc	



Nom du sondage : 987 Echelle : 1 / 200 Tranche de profondeur : 0.00 M - 25.50 M Alluvions du bassin de la Wardnt Auteur : C. Cartannaz			
Echelle profondeur (m)	Profondeur litho (m)	Lithologie	Log lithologique
- 5 -	- 1.50 - 3.10 - 4.50 - 4.60 - 4.85 - 6.20 - 6.55 - 6.65 - 7.00 - 8.50 - 9.30 - 11.10	pré-fouille béton tout-venant blocs de conglomérat et quartz anguleux grès altéré orange grès orange grès orange avec passée ferrugineuse millimétrique à la base grès orange grès orange avec passée ferrugineuse millimétrique à la base grès orange grès blanc grès blanc à rouge avec stratifications entrecroisées grès rouge avec quelques passées blanchâtres grès blanc	
- 15 -	- 19.50	grès blanc grès rouge avec quelques passées blanchâtres	
- 20 -	20.40 20.60 - 22.00	grès blanc avec stratifications entrecroisées sable blanc grès rouge grès bicolore (70% blanc, 30% rouge)	


	Nom Echel Tranc Alluvi Auteu	du sondage : 985 le : 1 / 200 che de profondeur : 0.00 M - 25.20 M ons du bassin de la Wardnt ır : C. Cartannaz	
Echelle profondeur (m)	Profondeur litho (m)	Lithologie	Log lithologique
- 5 -	- 1.20 1.50 - 3.10 - 3.75 - 4.30	pré-fouille sable rouge sable gris argile grise argile gris claire argile glaiseuse grise noire localement tourbeuse	
- 10 -	- 9.20 / 11.30 11.50 11.80 12.30	sable gris sable orange sable gris orangé sable orange	
- 15 -	-	grès orange en alternance avec grès blanc (lamine)	
- 20 -			



	Nom o Echel Tranc Alluvi Auteu	du sondage : 966 le : 1 / 200 he de profondeur : 0.00 M - 25.00 M ons du bassin de la Wardnt r : C. Cartannaz	
Echelle profondeur (m)	Profondeur litho (m)	Lithologie	Log lithologique
	0.05 - - 1.00 - - 2.00 -	terre végétale tout-venant sable gris foncé tout-venant sable gris clair sable fin brun	
- 5 -	- 4.50 -	tourbe sable fin gris	
- 10 -	7.40	sable gris rouge grès bicolore rouge à blanc	
	- 12.40 - 13.00 -	grès blanchâtre	
- 15 -	-	grès essentiellement rouge avec passages blanchâtres et altérés au sommet	
	25.00		



	Nom Echel Tranc Alluvi Auteu	du sondage : 944 le : 1 / 200 he de profondeur : 0.00 M - 23.00 M ons du bassin de la Wardnt rr : C. Cartannaz	
Echelle profondeur (m)	Profondeur litho (m)	Lithologie	Log lithologique
	- 2.00	gravier sable gris rouge (tout venant)	
	- 3.00	gravier sable gris rouge (tout venant) avec trace de tourbe	
- 5	4.90 5.00	bois	
	- 7.50	tourbe	
- 10 -	- 8.00	sable gris rouge (forte perte : faible taux de récupération)	
- 15	- 11.90 -		
- 20 -	-	grès rouge	

	Nom (Echel Tranc Alluvi Auteu	du sondage : 943 le : 1 / 200 he de profondeur : 0.00 M - 25.00 M ons du bassin de la Wardnt ir : C. Cartannaz	
Echelle profondeur (m)	Profondeur litho (m)	Lithologie	Log lithologique
	- 1.45	tout-venant sable noir verdâtre avec racines d'arbre	
	2.25	argile sableuse grise indurée	
	- 2.23	sable argileux gris noir	
- 5	5.00	sable gris noir avec traces de tourbe	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
	- 8.55	tourbe	
- 10 -	- 9.90	sable gris blanc rouge	
	- 11.00	tourbe	
		grès rouge	
	13.80	grès blanc	
- 15 -	14.50	grès rouge	
	16.30	grès blanc	
	- 17.30	-	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
- 20 -	-	grès rouge	
	24.00	arào blano	
65	24.70	gres blanc grès rouge	
- 25	25.00		i

Annexe 2

Logs lithologiques des sondages destructifs de la campagne de sondages 2017

of fe bit we	Date 14/03/2017	10:	11:00)	Do	ssier n	1°	
Alerrafor					32	0/20	16	
					Lie	u		
					Sono	tage	1	
	945_5					rback	h_1	
Coupe schématique du terrain		OUTIL	NIVEAU DEAU		V1/	4 (m/h 00) <u>~</u>	
Pavés (10cm) sur crasse grise (20 c finement limoneux rouge avec quelques	m) puis sable débris de calcaire	200		-	F			
Sable moyen beige avec dévris grav	eleux gréseux	8				E		
Limon argileux légèrement sableux e	t tourbeux noir							
Limon argileux sableux gris-no <mark>i</mark> r avec qu grès gris	uelques débris de	2 2		Y				
Limon argileux gris		Tartére Ø 63 mm	Tarière Ø 63 mm	Eau vers 2.1 m				
Sable limoneux graveleux gr	éseux					7	28 - 20 28 - 20 38 - 20	
Grès sableux orangé		8		9	WHW T			
-		83	12.5	+		-		



AN THE REAL	Date 14/03/2017		07:00	Dossier nº
ANTEINOTON				Lieu Hargarten aux Mines
	947_	SD	14	Sondage Banngraben_1
Coupe schématique du terrain		OUTIL	NIVEAU DEAU	VIA (mvh)
Terre végétale		-		2
Limon gris-noir finement sableux avec végétaux	quelques débris	sm)	26 m)	
Limon tourbeux brun à débris v	égétaux	Bmm	1m m en fin de sondage (éboulé 25	
Sable limoneux gris		083	ers.	
Sable moyen orangé à roug	eâtre	Tantére	rs de forage. Eau v	
 Sable gréseux orangé à roug	geâtre	3 2	Eauvers 26 m en cour	May and a start of the start of
Grès sableux orangé		-	0.25	

-84



-

	/4×	Date 15/03/2017		54:00	Dossier nº
	ANIErrator				320 / 2016 Lieu Merten
		949	SD	28_	Sondage Grossbach_3
10 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 0	Coupe schematique du terrain		OUTIL	NIVEAU DEAU	VIA (m/h)
-	Terre végétale		6.0	100	0 3
╞	Argile limoneuse beige		2		
	Argile limoneuse grise		8		
- 	Argile tourbeuse brun gris avec déb	ris végétaux	8	96	2
	Sable moyen rouge-orang	gé .	~	in de sonds	,
	Sable gréseux orangé		F	n surface en f	
	Grès sableux orangé avec passa	ge induré	arière Ø 63 m	forage. Eau e	A A A
			H.	rs de	Z
				BD COL	1
				0.1 m	5
				Vers	7
				Eau	E.
1					
					5
					3 And
					<u></u>
1			88	39	10
1					
					11







-

AL TOWN	Date 16/03/20	017 15:0	2:00	Dossier nº		
Alterrator				Lieu Creutzwald		
	95	3_SD_1	18_Bi	Sondage sten_3		
Coupe schématique du terrain		OUTIL	NIVEAU UEAU	VIA (m/h) 🛌		
Sable moyen brun-roux à débri	is végétaux			1		
Sable moyen gris			5			
Sable tourbeux gris-noirâtre à vei	ne <mark>limoneus</mark> e			5		
Sable moyen brun		E				
Sable finement limoneux	blanc	Tattére Ø63	7	My Andr		
Sable verdâtre à veine	noir			ALCON THE REAL		
Sable gréseux rougeâtre à	Sable gréseux rougeâtre à blanc					
Grès sableux beige		tallant Ø 66 mm å l'eau	100 A	hall have been and have been a		
			- 10			
			1			







	Torrator	Date 17/03/201	7 14:	13:00	320 / 2016
					Lieu Varsberg
110		<mark>957</mark>	SD	15_Bi	stbach_1
Linua and	Coupe schématique du terrain		OUTIL	NIVEAU DEAU	VIA (m/h) 🛌
-	Sable moyen brun-noir	8		-	
1	Limon tourbeux brun-noi	r			
tun	Argile finement sableuse brun-ro	ougeâtre			
(munitum)	Sable argileux brun-rougeå	itre	5	1	
- Annual I	Sable finement argileux brun-ro	ugeâtre	Ø 63 mm	in de sondage	
11 million	Sable moyen orangé		Tarlére	n 9.3 m en	- -
դաստարունու	Sable moyen orangé avec quelques v	veine noirâtre	10	10.5 m ne cours de forage. Eau ve	
արդա	Sable gréseux rougeâtre	į		Eau vers	, ,
	Grès sableux rougeâtre		Taillant Ø66mm å feat	12	
14	Gres sabieux rougeatre		Taillant	14 15 16	



17 (1 1) W	and the second se	Date 27/03/201	7 15:	24:00	Dossier n°
ANIE	rrator				320 / 2016 Lieu
					Porcelette
		960_	SD	24	Sondage Froschenpfuhl_1
	Coupe schematique du terrain		OUTIL	NIVEAU DEAU	VIA (m/h)
	Terre végétale				
	Sable orangé	15	Î		
	Limon sableux brun-ora	ingé	mm		
	Sable brun		083	de p	
	Sable tourbeux noirai	tre	8.0	108 0	
	sable moyen rouge	e la	Tan	nen fin de	5
	Grès sableux rouge	2	Tallant Ø66mm å	Eau vers 5.4	W Wa Bayler
					13 12 13 14 14 15



	N A M W	Date 28/03/2017 08			Dossiel n-
	Alerrator				320 / 2016
					Ham sous Varsberg
		652845	1928	0.4545	Sondage
		962	SD	29	_Guerting_1
	Coupe schematique du terrain		OUTL	NIVEAU DEAU	VIA (m/h)
	Terre végétale		199		
	Sable limoneux noirâtre avec débr	is végétaux	1		
_	Sable limoneux brun vaec quelques d	ébris végétaux	1		
					5
					2
			E		
			93 m		
	Sable limoneux et tourbeux n	oiråtre	00		»
			lane		
				8	
				and	
				-	
				5	5
	Cable and an an an		1	5 m	A
	Sable greseux rouge			80	Z
			55	Eauv	
	Grès sableux rouge		188		
			18 m		
			8		8
			DIG		K
			Talla		3
			1		*
			88	39	



7.9.8.4	Date 28/03/2017	14:13:00		Dossier nº
Alerrator				320 / 2016 Lieu
				Saint Avold
	964_	SD_	42	Rosselle_3
Coupe schémalique du terrain		OUTIL	NIVEAU DEAU	VIA (mvh) 🛌
Macadam + concassé de calo	aire jaune	2		
Remblais limoneux et sableux brun av	ec débris de brique	Ī		
Limon sableux		55		2
Limon mélangé avec du graviers et <mark>d</mark> u avec débris de briqu	sable jaune à noir e		ondage	
Sable moyen brun		Ø 63 mm	en fin de s	
Sable moyen rosâtre		Tantere	rs 9.2 m	
Sable gréseux rosâtre à	blanc		Eauve	
Sable gréseux jaunâtre à	blanc			
				11
				13
				14
				15
				16







969 orangé xrange-blanc : d'argile	Tarière Ø 63 mm OUTIL GS		320 / 2 Lieu Saint / Sondage eanne_1 VIA (m/	016 Avold
969 orangé xrange-blanc : d'argile	Tarière Ø 63 mm OUTIL 0	NIVEAU DEAU	Sondage eanne_1 VIA (m/	h)
orangé prange-blanc : d'argile	Tariére Ø 63 mm OUTIL	NINEAU DEAU	VIA (m/	400 600
orangé xrange-blanc : d'argile	Tarlére Ø 63 mm			
orangé prange-blanc d'argile	Tariére Ø63mm		2	
orange-blanc : d'argile	Tarlére Ø63mm		2	
e d'argile	Tariére Ø 63		3	- S- S-
		adapu	4	
	2	en fin de so		
Grès sableux rouge-blanc				
			12	
	21	Tailan (266 mm Åf ar	Tailant Ø66mm ålfar Pas deeu	Tailart Ø00 mm af ar



	7 4 K	Date 30/03/2017		04:00	Dossier nº			
	Alerrator				320 / 2016 Lieu			
					L'Hopital Sondage			
110		971_SD_35_Merle_1						
	Coupe schématique du terrain		OUTIL	NIVEAU DEAU	VIA (mVh) 🛌			
إستستليب	Schiste noir localement sableux avec o rouge	débris de brique						
ահատանատանպ	Sable moyen brun rougeâ	itre	iére Ø 63 mm	ndage				
փողուտ	Tourbe noire		Tar	m en fin de so	5			
Jumming	Sable moyen brun graveleux			au vers 4.8 i				
ատունուսունուսու	Grès sableux orangé		Tallant Ø 68 mmå l'eau					
մաստեստեսունուսու								
mm					16			



PLAN A	Date 31/03/20	017 08:	43:00	Dossier n°		
A Terrafor				320 / 2016 Lieu Rotting Los Spint Avald		
	Sondage 973_SD_43_Rosselle_4					
Coupe schematique du terrain		OUTIL	NIVEAU DEAU	VIA (m/h)		
Macadam puis crasse		6-22	-			
t Sable moyen jaune-roug	ge		100			
Limon finement argileux gri	s-noir		2			
Sable argileux beige		E				
Sable moyen brun gravel	eux	Tarière Ø 63	au vers 3,2 m en fin de sondage			
Grès sableux brun orang	Grès sableux brun orangé		ш			
Grès brun orangé		Tailart Ø66mm à				
			11	2		
			3 1 2 12 12			
			10			


MAN	Date 31/03/2017	14:	45:00	Dossier nº			
Alerrafor				320 / 2016			
				Cocheren			
	975_	Sondage 975 SD 44 Rosselle 5					
Coupe schématique du terrain		OUTIL	NIVEAU DEAU	VIA (m/h) 🛌			
Terre végétale Argile beige à veine grise							
		S					
Argile limoneuse brun-	roux						
Limon argileux brun légèreme	nt tourbeux	2		3			
Argile grise tourbeuse à passage brur	n et débris végétaux	3 mm	n de sondage	4			
Tourbe marron	Tourbe marron		wes2.8 m en fi				
Sable gréseux gris			Ea				
Sable gréseux rouge or	angé						
				12			
				14			
				16			



	1944	Date 03/04/2017	7 11:	31:0	0 Dossier nº		
	Alerrator				320 / 2016 Lieu Forbach		
10		Sondage 977_SD_22_Forbach_1					
	Coupe schematique du terrain	Coupe schematique du terrain		NIVEAU DEAU	VIA (m/h) 🛌 0 200 400 600		
	Avant trou						
200	Remblais argileux beige mélangé avec calcaire, brique et bétor	du concassé de	19 Ø 63 mm				
-	Tourbe noire Sable moyen gris-noir avec odeur et pa rouge	assage sableux	Tarie	le sondag			
	Sable finement limoneux brun-bl	lanc-noir		nen fn d	5		
	Sable gréseux orangé avec queqlu	gé avec queqlues graviers		Eau vers 3,2 r			
	Sable gréseux jaune-orangé Sable gréseux jaune				2		
					M.		
	Sable gréseux rose à jauná	itre	Taila				
					11		
					12		
					13		
					14		
111111111							
					12		
					16		



-

	/44	Date 04/04/201	7 08:	55:00	00 Dossier nº
	riendfor				320 / 2016 Lieu Stiring-Wendel
		979	SD	30	Sondage _Habsterdick_1
	Coupe schematique du terrain		OUTL	NIVEAU DEAU	VIA (m/h)
	Remblais argileux brun avec débris de cailloux et brigue	nblais argileux brun avec débris de blocs de béton, cailloux et brique			
	Sable moyen brun finement lin	noneux	ľ		
	Sable moyen rougeâtre Sable moyen rougeâtre à veine brune graviers	avec quelques	Tattére Ø63mm	as deau en fin de sondage	4
	Savle gréseux rougeâtre	Savle gréseux rougeâtre		a.	, 7
	Sable gréseux rougeâtre à vein	ie jaune	8		
	Sable gréseux rougeâtre à veine	blanche			
					12
					13
					14
					15
					15
արությունություն					13



		Date 04/04/20	017 14:	35:0	0 Dossier nº
1	Nierrator	_			320 / 2016 Lieu
					Petite-Rosselle
1		98	2_SD	46	Rosselle_7
	Coupe schematique du terrain		OUTIL	NIVEAU DEAU	VIA (m/h)
	Macadam sur crasse limoneus	e noirâtre			
	Schlamm noirâtre à débris de c	rasse noir	8.		
	Limon sableux gris-noir gra	veleux			2
	Sable moyen brun-beige-	noir			
	Sable moyen brun beige gra	weleux	363 mm	n fin de sondage	
	Sable graveleux et argileux beige-jaunåtre Sable et graviers argileux kaki		Tathéne G	Eauvers 3.2 m ei	
	Sable gréseux rosâtre				9
					12
					10
					** <u>1</u>



198	Date 05/04/20	17 14:	06:00	Dossier nº		
Alterrator				320 / 2016 Lieu		
	984	Sondage 4_SD_32_Kochernbach_1				
Coupe schematique du terrain		OUTL	NIVEAU DEAU	VIA (mvh)		
Macadam puis crasse grise						
Grès sableux rouge à veine jaune						
Grès rosâtre à rougeâtre avec pass	ages sableux	Tallart Ø 68 mmå l'eau	Eau vers 1.5 m en fin de sondage	A Constant of the second secon		
				12		

Modélisation géologique des alluvions du bassin houiller lorrain



Centre scientifique et technique 3, avenue Claude-Guillemin – BP 6009 45060 – Orléans Cedex 2 – France Tél. : 02 38 64 34 34 **Direction régionale Grand Est** 1, allée du parc de Brabois 54500 – Vandoeuvre-lès-Nancy – France Tél. : 03.83.44.81.49