



Mise à jour 2024 de la cartographie des zones soumises à la présence de la nappe des Grès du Trias Inférieur à faible profondeur dans le bassin houiller lorrain (57)

Version finale
2024/168DE_BIS -24GRE21010

Le 11/03/2025

Diffusion :

Pôle après-mine Nord

Marc LITZENBURGER

DREAL Grand-Est

Maxime HIRSCH

Nom de l'antenne en charge du rapport : Antenne Nord,

1 Rue Claude Chappe, CS25098 – 57075 METZ CEDEX 3
Tél : +33(0)3 87 17 36 75

Rédaction : Pauline GALAS

Vérification : Olivier LEFEBVRE

Approbation : Pascal BIGARRÉ

RESUMÉ

L'exploitation minière dans le bassin houiller Lorrain (BHL) en France a soumis la nappe phréatique sus-jacente aux zones d'exploitation, dite des grès du Trias inférieur (GTI), à un rabattement profond lié à l'exhaure ainsi qu'aux pompages d'industries et de collectivités en développement dans la région. La baisse du niveau de la nappe entraînée par ces prélèvements a induit un assèchement de nombreuses zones humides. Des zones urbaines se sont ainsi développées sur ces secteurs, sans considération du caractère non durable de cette situation. En effet, une sollicitation bien moindre de la ressource en eau de la nappe des GTI est à l'origine de son actuelle reconstitution.

GEODERIS et le BRGM ont produit un modèle numérique hydrodynamique 3D afin d'estimer la situation actuelle et d'anticiper la situation future de la profondeur de cette nappe. Après une première étape de calibration, différentes simulations prédictives ont été réalisées pour identifier les zones soumises et l'échéance à laquelle la nappe pourrait éventuellement y affleurer avec ou sans mise en service progressive d'ouvrages de prélèvements. Deux scénarios climatiques, issus des travaux du GIEC, ont été utilisés afin de prendre en compte le changement climatique.

Les premières estimations issues des modélisations montrent une cinématique différente de part et d'autre d'une faille majeure, avec une nappe plus proche de la surface à l'ouest de cette dernière. Ces résultats ont mis en évidence de nombreuses zones bâties déjà soumises à la présence de la nappe des GTI à faible profondeur dans le secteur ouest et d'ici à 2040-2050 dans le secteur est. Les simulations prévisionnelles ont également permis par la suite d'évaluer les moyens qui pourraient localement s'avérer nécessaires pour atteindre un objectif d'écrêtage ou de rabattement de la nappe des GTI en vue de préserver des zones bâties situées au sein de zones autrefois influencées par l'activité minière de Charbonnages de France.

Afin de préserver les zones bâties existantes de la remontée de nappe, la solution d'un champ captant visant à stabiliser la cote ultime de la nappe à 3 m de profondeur dans ces zones a été retenue. En parallèle, un réseau dense de piézomètres est prévu pour surveiller au mieux la nappe en question et adapter les moyens de protection qui s'avéreraient nécessaires. La stratégie adoptée est ainsi basée sur une approche itérative par actualisation et fiabilisation des prévisions du modèle à partir des données les plus récentes. L'objectif est de réduire les incertitudes inhérentes à de telles prévisions, et d'affiner les interprétations hydrogéologiques de cet ancien bassin minier sur lequel existent encore des activités industrielles.

SOMMAIRE

1	Objet	7
2	Le modèle numérique de la nappe des GTI	9
2.1	Rappels sur le modèle numérique	9
2.1.1	Modèle régional des GTI	9
2.1.2	Maillage gigogne	10
2.2	Mise à jour du modèle numérique	12
2.3	Précisions des prévisions réalisées	13
3	Simulations	13
3.1	Scénario de prélèvements	13
3.2	Scénario climatique et situations piézométriques de référence	14
4	Résultats de modélisation	15
4.1	Calibration	15
4.1.1	Paramètres de la calibration du modèle	15
4.1.2	Résultats de calibration	15
4.2	Classes de profondeurs définies pour la cartographie	17
4.3	Notice des cartes présentées	18
4.3.1	Situation de nappe libre	18
4.3.2	Situation de nappe captive	18
4.3.2.1	Captivité en domaine alluvial	18
4.3.2.2	Captivité hors domaine alluvial	19
4.4	Situation estimée de la nappe des GTI selon la simulation prévisionnelle tendancielle avec solution de rabattement	20
4.4.1	Secteur Ouest	20
4.4.1.1	Situation 2023	20
4.4.1.2	Situation 2030	21
4.4.1.3	Situation 2065	21
4.4.1.4	Situation ME	21
4.4.1.5	Situation HE	21
4.4.2	Secteur Est	28
4.4.2.1	Situation 2023	28
4.4.2.2	Situation 2030	28
4.4.2.3	Situation 2065	28
4.4.2.4	Situation ME	28
4.4.2.5	Situation HE	28
5	Mise en place du réseau piézométrique et du champ captant de rabattement de la nappe des GTI	35

5.1	Champ captant	35
5.1.1	Secteur Ouest	35
5.1.2	Secteur est	38
5.2	Réseau piézométrique	38
5.2.1	Secteur Ouest	38
5.2.2	Secteur Est	39
5.3	Bilan comparatif avec le modèle V1	39
6	Conclusions et perspectives	41
7	Bibliographie	43

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1 – Courbe d'épaisseur minimum de la formation des GTI retenue pour construire le modèle numérique [14] . 9	
Figure 2 –Emprise du domaine maillé à 50 m x 50 m et points de données	10
Figure 3 – Coupe ouest-est du modèle de la nappe des GTI au niveau de Creutzwald [5]	11
Figure 4 – Topographie du bassin houiller lorrain (LIDAR) et localisation des failles prises en compte dans le modèle des GTI.....	12
Figure 5 – Exemples de graphiques de calibration comparant pour chaque ouvrage les niveaux mesurés et les niveaux modélisés	16
Figure 6 – Situation estimée des nappes : classes de profondeur définies pour la cartographie	17
Figure 7 – 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	18
Figure 8 – Situation de nappe captive	19
Figure 9 – Situation modélisée de la nappe des Grès du Trias Inférieur à l'année 2023 sur le secteur ouest ..	23
Figure 10 – Situation modélisée de la nappe des Grès du Trias Inférieur à l'année 2030 sur le secteur ouest	24
Figure 11 – Situation modélisée de la nappe des Grès du Trias Inférieur à l'année 2065 sur le secteur ouest	25
Figure 12 – Situation modélisée de la nappe des Grès du Trias Inférieur à long terme, en situation de moyennes eaux, sur le secteur ouest	26
Figure 13 – Situation modélisée de la nappe des Grès du Trias Inférieur à long terme, en situation de hautes eaux, sur le secteur ouest	27
Figure 14 – Situation modélisée de la nappe des Grès du Trias Inférieur à l'année 2023 sur le secteur est	30
Figure 15 – Situation modélisée de la nappe des Grès du Trias Inférieur à l'année 2030 sur le secteur est	31
Figure 16 – Situation modélisée de la nappe des Grès du Trias Inférieur à l'année 2065 sur le secteur est	32
Figure 17 – Situation modélisée de la nappe des Grès du Trias Inférieur à long terme, en situation de moyennes eaux, sur le secteur est	33
Figure 18 – Situation modélisée de la nappe des Grès du Trias Inférieur à long terme, en situation de hautes eaux, sur le secteur est	34
Figure 19 – Localisation des forages du champ captant	36

Tableau 1 – Caractéristiques et priorités des forages du champ captant	37
Tableau 2 – Bilan comparatif des caractéristiques du champ captant	39

Mots clés : bassin houiller lorrain ; remontée de nappe ; nappe des grès du Trias inférieur ; nappe alluviale ; gestion ; rabattement de nappe ; réseau de suivi ; engagements de l'État ; modélisation 2024.

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 exhaurees 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 reconstruit 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 actualisés par les services de l'État. Elles ont fait l'objet d'un premier rapport réalisé en 2018 [8]. Une identification des actions susceptibles de limiter les conséquences du phénomène de remontée de nappe a par ailleurs été réalisée [9][10]. La solution du déploiement d'un champ captant a été retenue et une première série de simulations ont été réalisées pour le dimensionner [11]. Dans ce cadre, la DREAL Grand-Est a transmis à GEODERIS la localisation de zones dites « à protéger », c'est-à-dire où la nappe des GTI ne doit pas remonter à moins de 3 m de profondeur selon les engagements pris par l'État le 10 mars 2021. Le dimensionnement de champ captant s'est appuyé sur la définition de ces zones d'engagement de l'État.

Une importante mise à jour du modèle a été réalisée entre 2023 et 2024 afin d'actualiser les prévisions de remontée de la nappe et d'adapter le réseau de surveillance piézométrique et les moyens de protection prévus au droit des zones d'engagement de l'État [12]. Le présent rapport reprend les résultats de cette actualisation du modèle numérique et en donne les éléments d'interprétation.

2 LE MODELE NUMERIQUE DE LA NAPPE DES GTI

2.1 Rappels sur le modèle numérique

2.1.1 Modèle régional des GTI

Le modèle numérique de la nappe des GTI, sur lequel reposent nos travaux, a été développé par le BRGM avec le logiciel MARTHE. Le modèle couvre la nappe sur toute sa partie captive (majoritaire) et sur sa partie libre, notamment dans le bassin houiller sarro-lorrain. L'extension occidentale de la nappe sous le bassin parisien a été limitée pour les besoins de la modélisation lorsque l'épaisseur des GTI se réduit à quelques mètres (cf. Figure 1).



Figure 1 – Courbe d'épaisseur minimum de la formation des GTI retenue pour construire le modèle numérique [14]

2.1.2 Maillage gigogne

Le maillage du modèle régional de la nappe des GTI est constitué de mailles de 500 m par 500 m, avec un sous-maillage de 50 m par 50 m dans le périmètre du SAGE du Bassin Houiller étendu à la commune de Grosbliederstroff ainsi qu'en Allemagne jusqu'à la limite des affleurements des GTI. Le sous-maillage gigogne recouvre une superficie de 749 km² au total (cf. sous-maillage en Figure 2).

L'ensemble des points disposant d'au moins une mesure de niveau piézométrique sur la période retenue pour la calibration du modèle numérique (1976 à 2016) a été recensé, soit près de 900 points en France et près de 100 points en Allemagne.

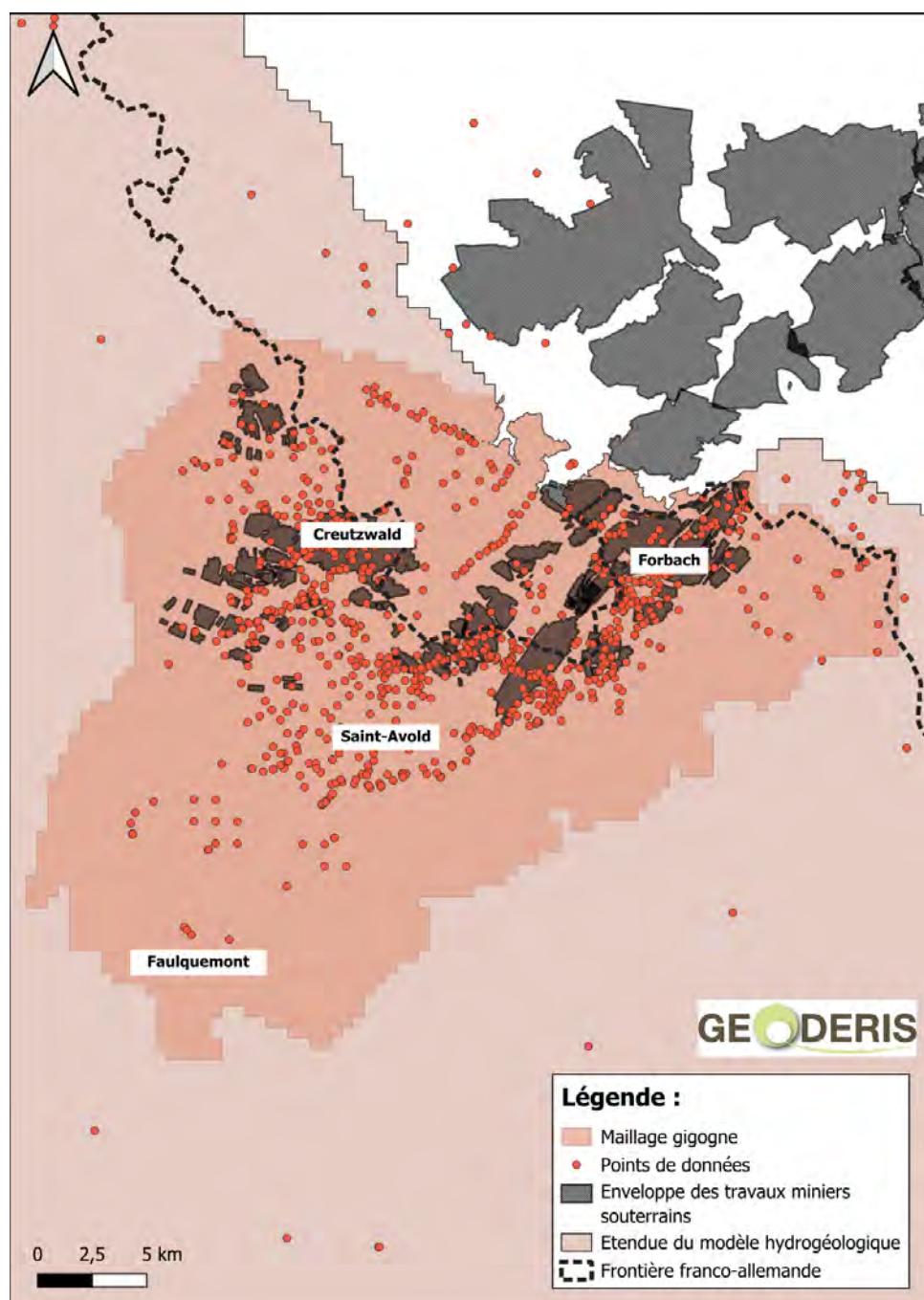


Figure 2 –Emprise du domaine maillé à 50 m x 50 m et points de données

Quatre couches sont modélisées, de manière à représenter du haut vers le bas (Figure 3) : les alluvions lorsqu'elles sont présentes, les GTI, le Permien et les travaux miniers dans le Carbonifère lorsqu'ils existent. Le modèle tient notamment compte du rôle hydrogéologique des failles ainsi que des échanges entre les nappes alluviales (et cours d'eau), la nappe des GTI et les réservoirs miniers. Les couleurs figurant sur la coupe schématique ci-dessous correspondent à différentes gammes de perméabilité qui ont été définies à l'issue de la calibration de la première version du modèle à l'échelle du bassin houiller lorrain (allant de 0,2 à $12 \cdot 10^{-5}$ m/s [5]).

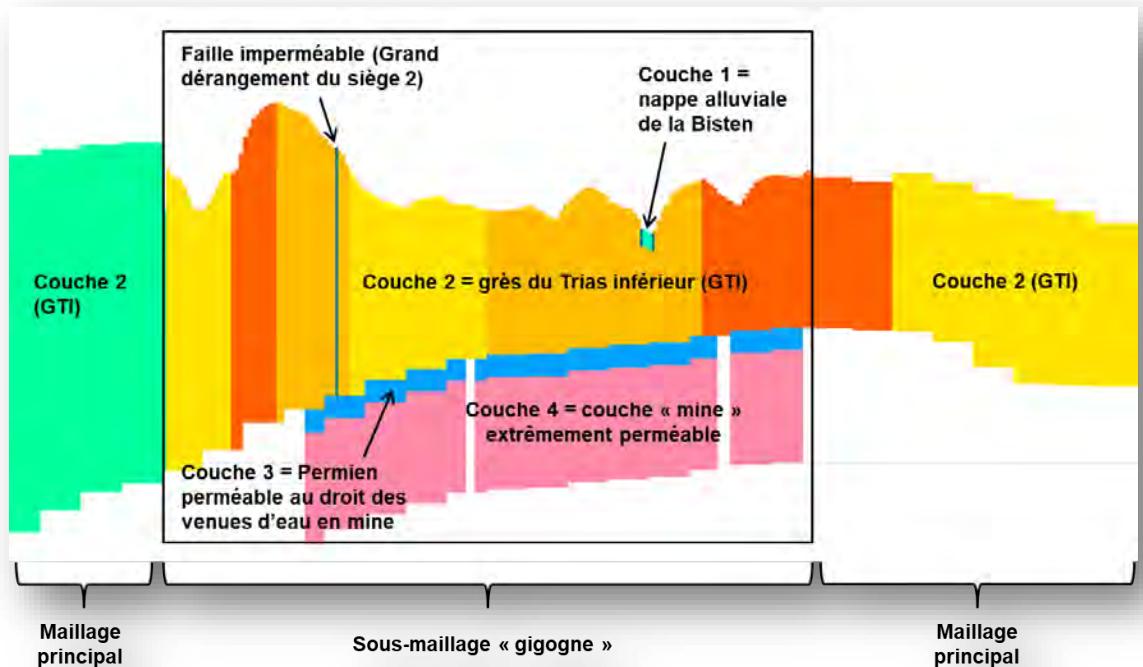


Figure 3 – Coupe ouest-est du modèle de la nappe des GTI au niveau de Creutzwald [5]

Les cartes présentées en annexe de ce rapport illustrent les résultats à un maillage de 5 m basé sur celui du MNT LIDAR (Figure 4).

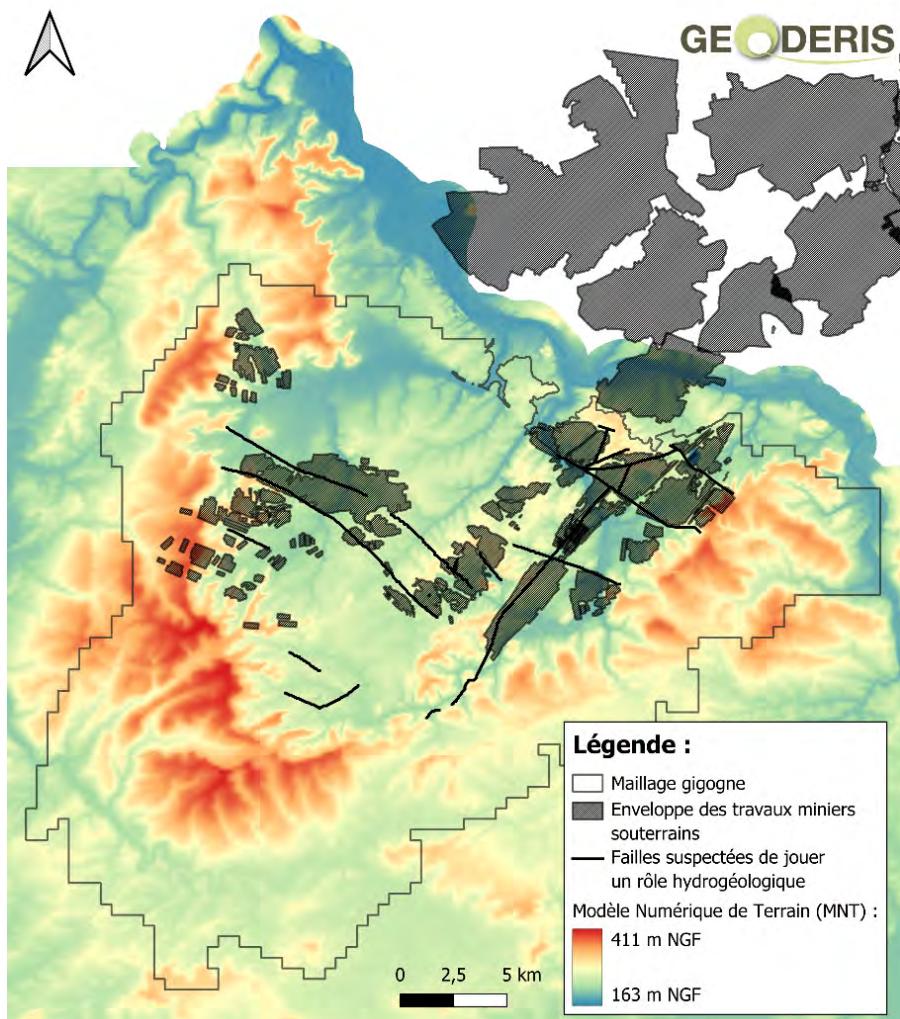


Figure 4 – Topographie du bassin houiller lorrain (LIDAR) et localisation des failles prises en compte dans le modèle des GTI

2.2 Mise à jour du modèle numérique

La mise à jour du modèle numérique est justifiée par :

- La prise en compte des données piézométriques et de débit sur la période de 2016 à 2022,
- La mise à jour des données météorologiques sur la période de 2016 à 2022 ;
- La prise en compte des prévisions liées au changement climatique,
- L'acquisition de nouvelles données suite aux campagnes de forages réalisées en 2017,
- La révision ou vérification de certains éléments du premier modèle (points d'échanges nappe/mine, affaissement, etc...),
- Le rôle des failles,
- L'automatisation du modèle lui-même afin de gagner en fiabilité,

Les débits de pompage ont été appliqués de la manière suivante :

- Prélèvements pour l'alimentation en eau industrielle (AEI) :
 - Ouvrages de la SEE (Sociétés des Eaux de l'Est) : Prolongement selon les données prévisionnelles communiquées pour 2023 et 2024 par la SEE ;

- Forage Triangle : Prolongement de la moyenne des volumes prélevés en 2021-2022 ;
- Projet de pompage dans la vallée de la Merle : pompage à partir de 2024 au débit projeté.
- Prélèvements pour l'alimentation en eau potable (AEP) :
 - Ouvrages de la SEE (Société des Eaux de l'Est) : Prolongement selon les données prévisionnelles communiquées pour 2023 et 2024 par la SEE ;
 - Ouvrages des collectivités et syndicats des eaux et forages F1bis et F19ter : Prolongement du volume annuel moyen des années 2021 et 2022 ;
- Prélèvements du Land de Sarre : Prolongement du volume annuel moyen des années 2021 et 2022 ;
- Pompages miniers : Application des mêmes modalités que lors des dernières modélisations avec l'adaptation des débits de pompage pour ne pas dépasser les cotes +200 m NGF sur le réservoir Ouest (station de La Houve) et +193 m NGF sur le réservoir Est (stations Simon 5 et Vouters) ;
- Forages P1 à P4bis : Prolongement des volume annuels moyens 2021-2022 jusqu'à la fin de la 2^{ème} année d'activation du dernier forage de rabattement préconisé dans la vallée de la Bisten puis arrêt définitif au-delà de cette échéance.

Par ailleurs, les modélisations réalisées en 2024 prennent en compte différentes améliorations de fond et changements spécifiés dans le rapport du BRGM [12] (§3) :

- Le maillage a été étendu à la commune de Grosbliederstroff à l'est du bassin houiller lorrain afin de prendre en compte les cours d'eau du Lixinger Bach et de la Sarre ;
- Une couche représentant la topographie a été ajoutée, basée sur le MNT LIDAR 5 m Français sur le territoire de la France et le MNT LIDAR 5 m Allemand sur le territoire de l'Allemagne ;
- Les contours de la couche des alluvions ont été redéfinis sur la base des cartes géologiques, d'un critère de pente faible et des courbes de niveau du MNT ;
- La représentation des failles a été améliorée, passant d'une perméabilité sur 3 mailles de large à une perméabilité entre 2 mailles ;
- Le réseau hydrographique a été vérifié et corrigé selon les couches cartographiques IGN et les imageries satellites, il est maintenant représenté par des objets concrets dans le modèle (mailles rivières, objet lacs) ;
- Les calculs de la recharge et du ruissellement ont été optimisés grâce à l'utilisation de la fonction « bilan hydroclimatique » du logiciel de modélisation et à partir des données de précipitations et d'évapotranspiration de Météo-France.

2.3 Précisions des prévisions réalisées

N.B. : pour les simulations, 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. Toutefois, les résultats ont pu être représentés par des mailles carrées de 5 m en s'appuyant sur la définition des mailles du MNT LIDAR.

Les travaux de modélisation sont complexes et requièrent une attention particulière à chaque étape afin de limiter les incertitudes. Toutefois, des écarts (notamment entre les niveaux d'eau mesurés en forages piézométriques et les niveaux d'eau calculés par modélisation numérique) et des inconnues peuvent persister. Il est important de les prendre en compte lors de la lecture des résultats. D'après le rapport BRGM présenté en Annexe 3 et les résultats de la calibration, ces incertitudes varient d'un secteur à un autre. Pour plus de détails concernant l'estimation des précisions des prévisions du modèle le lecteur est invité à se reporter à l'annexe 4.

3 SIMULATIONS

3.1 Scénario de prélèvements

Le scénario prévisionnel relatif aux prélèvements dans la nappe des GTI et dans le réservoir minier a été défini par l'État. Il est dit « tendanciel » : 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 § 2.2 de ce rapport ou encore dans le § 5.1.2 du rapport BRGM annexé (Annexe 3).

Deux types de simulations liées au scénario tendanciel ont été réalisées :

- « **Simulation prévisionnelle tendancielle** » (§ 5.1 du rapport BRGM [12]) qui vise à fournir des indications sur l'évolution de la remontée de la nappe comme cela avait été fait en 2018 (scénario alors appelé « réaliste »). C'est sur la base de cette simulation que va être initialisée la simulation suivante ;
- « **Simulation prévisionnelle tendancielle avec solution de rabattement** » (§ 5.2 du rapport BRGM [12]) qui reprend les conditions de la simulation précédente tout en prenant en compte la mise en place progressive des pompages de rabattement qui permettront de maintenir le niveau de la nappe à plus de 3 m de profondeur au droit des zones d'engagement de l'État.

Ce rapport présente les résultats de la « simulation prévisionnelle tendancielle avec solution de rabattement ». Toutefois, les cartes des résultats de la « simulation prévisionnelle tendancielle » sont reportées en Annexe 2.

3.2 Scénario climatique et situations piézométriques de référence

Les simulations visent à prendre en compte à l'échelle régionale le changement climatique qui fait l'objet de préoccupations internationales. Dans ce cadre, les projections climatiques du projet DRIAS ont été utilisées (cf. § 5.1.3 du rapport BRGM [12]). Le scénario moyen a été choisi car il est mentionné comme le plus probable. De ce scénario, il a été retenu une période de 20 ans cumulant un maximum d'infiltration comme période de référence pour simuler des périodes de pluies exceptionnelles.

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 ainsi 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 exceptionnelles. Pour l'analyse des résultats des simulations, la situation avec le maximum d'infiltration est retenue en tant que situation piézométrique de référence.

4 RESULTATS DE MODELISATION

4.1 Calibration

La calibration est une étape clé de toute modélisation. C'est elle qui permet de rendre le modèle le plus fiable possible. Elle repose sur l'ajustement des paramètres de perméabilité et d'anisotropie pour reproduire au mieux les données. Il s'agit de comparer les niveaux d'eau simulés avec les niveaux d'eau réellement observés en tout point du modèle où des données sont disponibles et représentatives. Cette étape de calibration permet d'estimer la précision des résultats.

4.1.1 Paramètres de la calibration du modèle

Les principaux paramètres utilisés pour calibrer le modèle sont la perméabilité des différentes formations géologiques et des failles et l'anisotropie verticale des alluvions (capacité des alluvions à échanger avec la formation des GTI sous-jacente).

Ces paramètres ont été initialisés sur la base de valeurs uniformes dans le modèle. La valeur moyenne de l'anisotropie verticale de la version 1 du modèle a été reprise tandis que la perméabilité a été définie à partir de la perméabilité moyenne de la couche des GTI.

La calibration a été réalisée avec l'outil PEST (algorithme visant à automatiser la variation des paramètres de calibration). Elle repose sur plusieurs itérations où la perméabilité et l'anisotropie varient pour essayer de minimiser la différence entre les résultats du modèle et les données mesurées. D'autres paramètres ont pu être modifiés manuellement, comme l'infiltration au droit des cours d'eau par exemple. La calibration globale a été arrêté lorsque l'algorithme a convergé vers une solution stable où les paramètres n'évoluaient plus de manière significative.

4.1.2 Résultats de calibration

La figure suivante présente quelques exemples de graphiques de calibration du modèle sur fond de piézométrie calculée pour l'année 2022. L'ensemble des résultats de calibration est présenté dans l'annexe 4 du rapport BRGM [12]. Au vu de ces graphiques, le modèle reproduit les principales variations piézométriques mises en évidence par les données. Certains artefacts ou décalages s'expliquent par des spécificités et contraintes du modèle, sans que cela ne remette en cause la qualité du résultat global.

L'analyse de la piézométrie au fil des années a permis de mettre en évidence deux secteurs de remontée de la nappe des GTI : le secteur situé à l'ouest de la faille de Longeville-Hombourg où la nappe est proche de la surface et le secteur situé à l'est de cette même faille où la nappe se situe encore aujourd'hui plus profonde qu'à l'ouest. Ce constat est notamment visible sur la piézométrie de 2022 présentée ci-après.

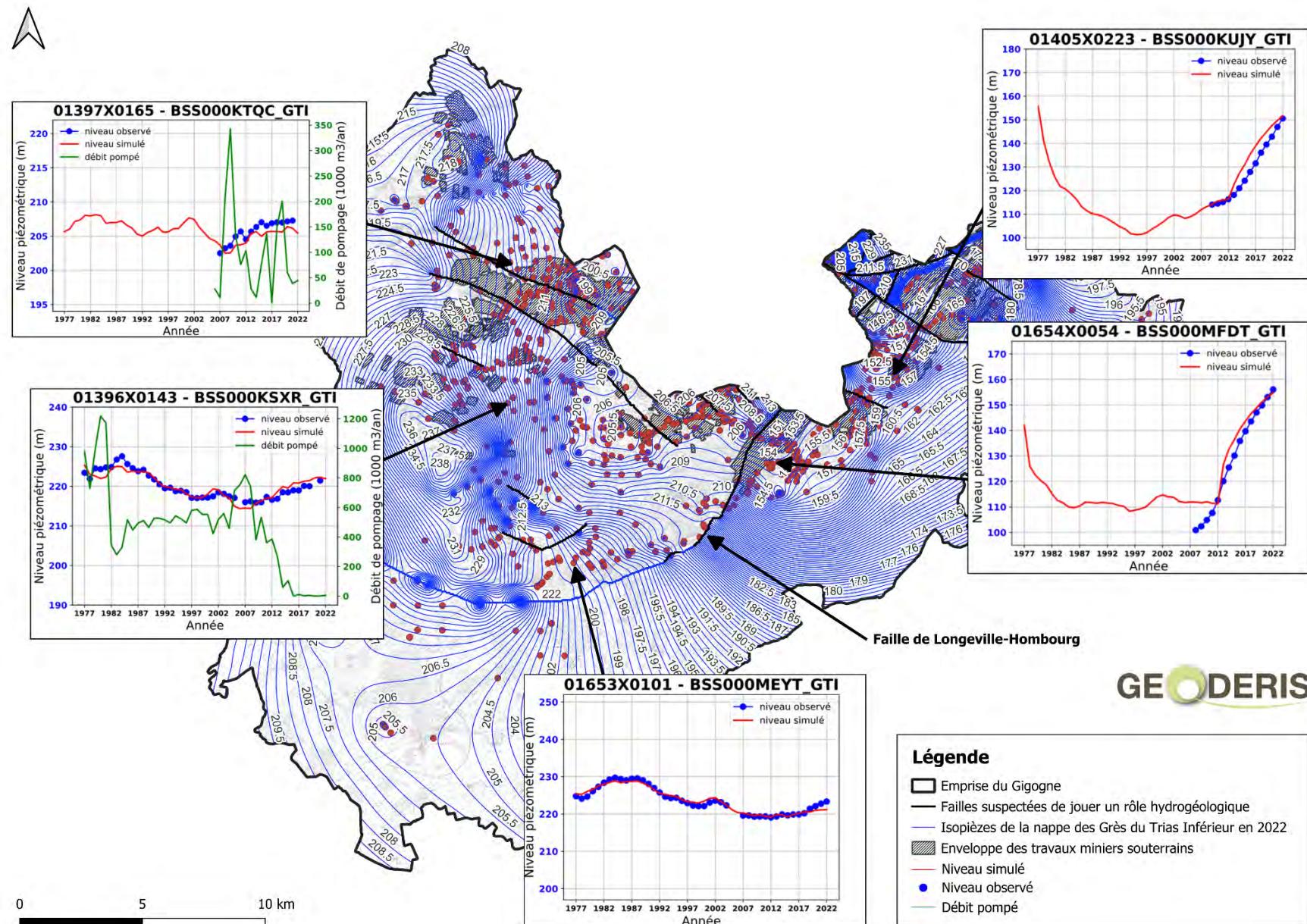


Figure 5 – Exemples de graphiques de calibration comparant pour chaque ouvrage les niveaux mesurés et les niveaux modélisés

4.2 Classes de profondeurs définies pour la cartographie

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 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 » ou « potentiellement affleurante » prenant en compte les fluctuations saisonnières estimées à $\pm 0,5$ m ;
- 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 » ou « potentiellement 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 ».

Selon la configuration de la nappe, libre ou captive (cas dans le schéma suivant de la nappe des GTI sous les horizons imperméables situés dans les alluvions), la notion de profondeur de nappe ici définie peut prendre différentes significations. Ces dernières sont détaillées dans les paragraphes suivants.

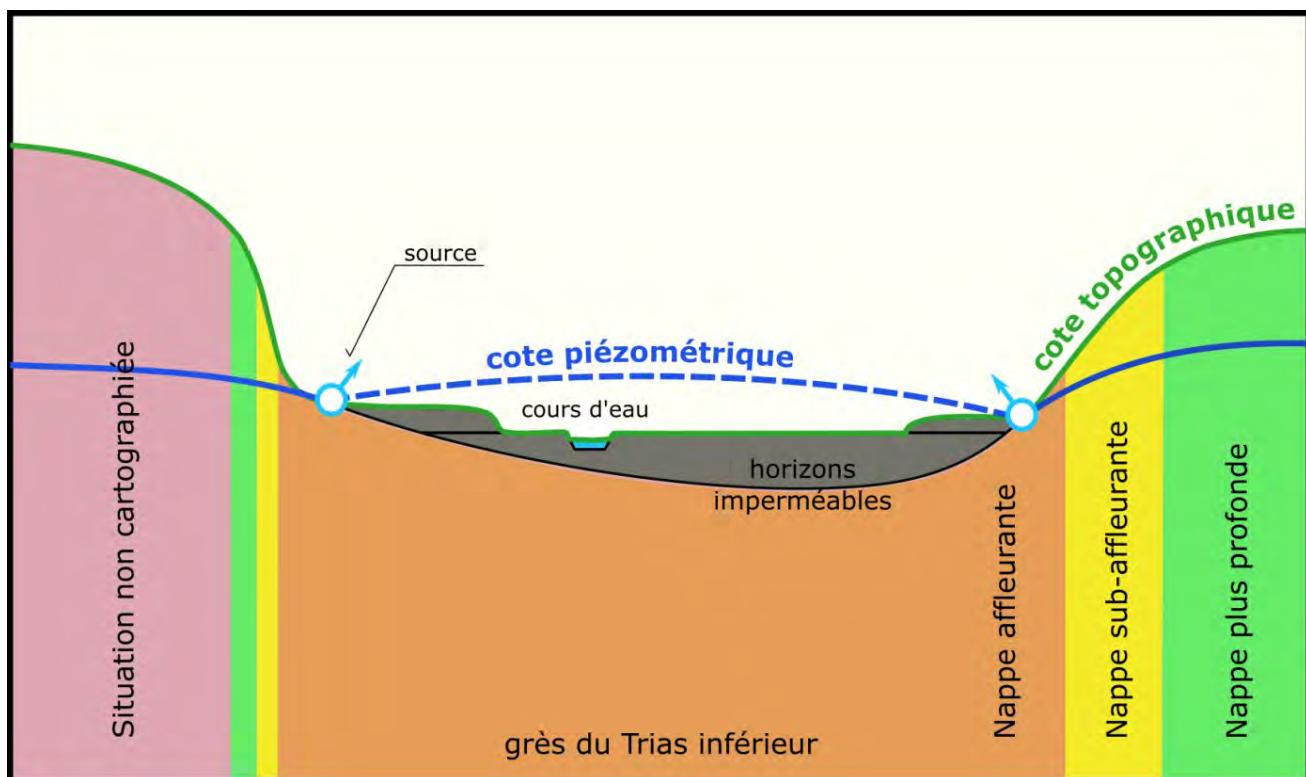


Figure 6 – Situation estimée des nappes : classes de profondeur définies pour la cartographie

4.3 Notice des cartes présentées

4.3.1 Situation de nappe libre

À l'extérieur des domaines de captivité suspectée de la nappe qui ont été cartographiés (voir § 4.3.2), 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 souterraine¹ (Figure 7). Il n'y a pas de couche imperméable pouvant empêcher la montée de la nappe et provoquer la mise en charge de cette dernière.

Pour les zones concernées, les trois classes de profondeur cartographiées (voir § 4.2) peuvent donc être lues directement.

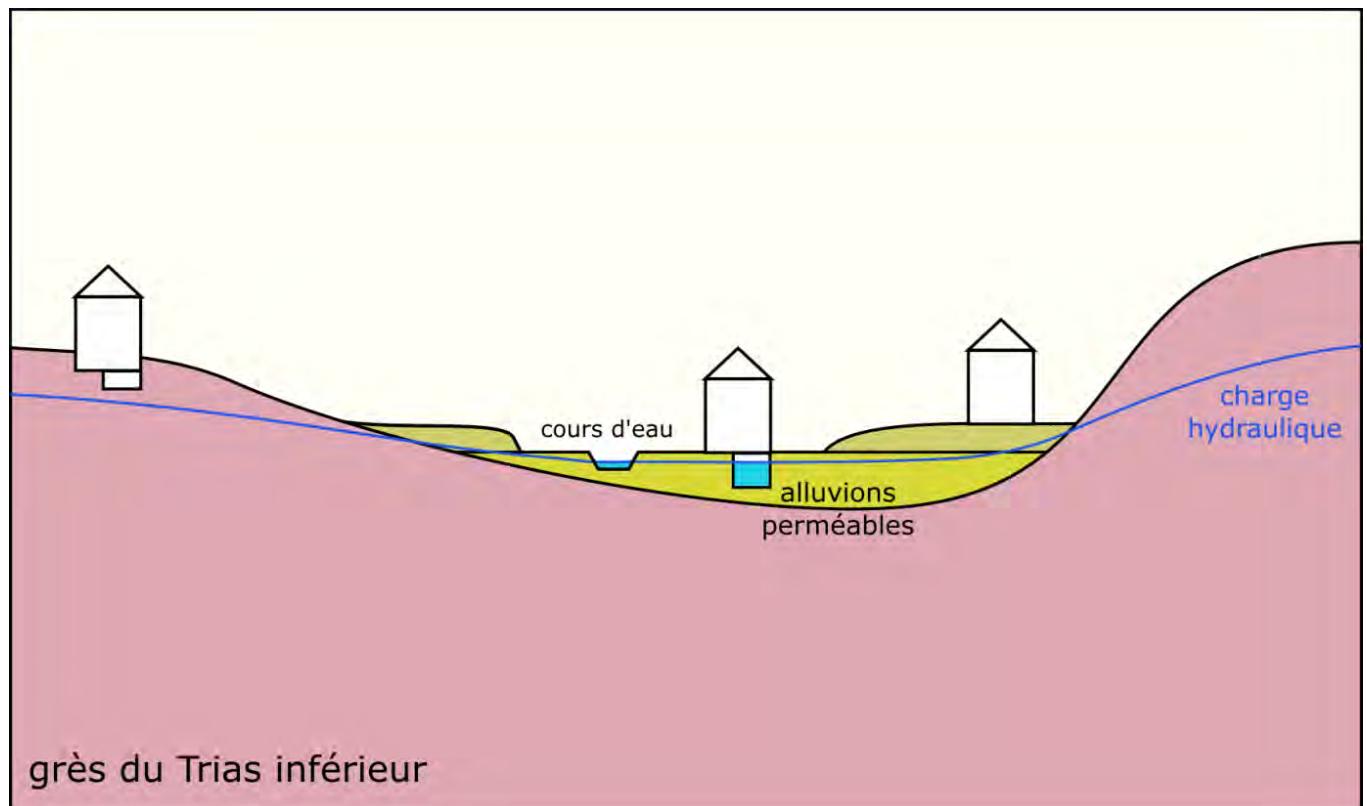


Figure 7 – Situation de nappe libre. La charge de pression est nulle dans le calcul des charges hydrauliques. Le niveau physique de l'eau correspond à la surface piézométrique des nappes

4.3.2 Situation de nappe captive

4.3.2.1 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 8). Ainsi, dans ces zones,

¹ 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.

le niveau physique de l'eau ne correspond pas à la surface piézométrique de la nappe et de manière générale, des situations d'artésianisme sont possibles (jaillissements lors de la réalisation de forages par exemple). Une drainance ascendante (autrement dit une alimentation des nappes alluviales) est toutefois possible vers les horizons alluvionnaires plus perméables, selon le degré d'imperméabilité des horizons et selon leur répartition dans l'espace. Des fuites sont également possibles à la faveur des faiblesses du terrain (type fracture naturelle ou bouleversements anthropiques tels que crevasses d'origine minière, purge du matériel alluvial lors de travaux de construction ou d'aménagements urbains, forages ou puits privés, ...). Au contact entre grès et formations imperméables à l'affleurement, l'activation (ou réactivation) de sources « classiques » est également envisageable. Enfin, des débordements latéraux souterrains de la nappe des GTI en bordure de zone alluvionnaire imperméable peuvent aussi se produire. Cependant, ces phénomènes ont été très peu répertoriés sur le secteur, y compris en zones déjà stabilisées et n'ont donc pas été modélisés.

Pour les zones concernées (dites « domaine de captivité suspectée de la nappe en domaine alluvial »), les trois classes de profondeur cartographiées (voir § 4.2) 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.

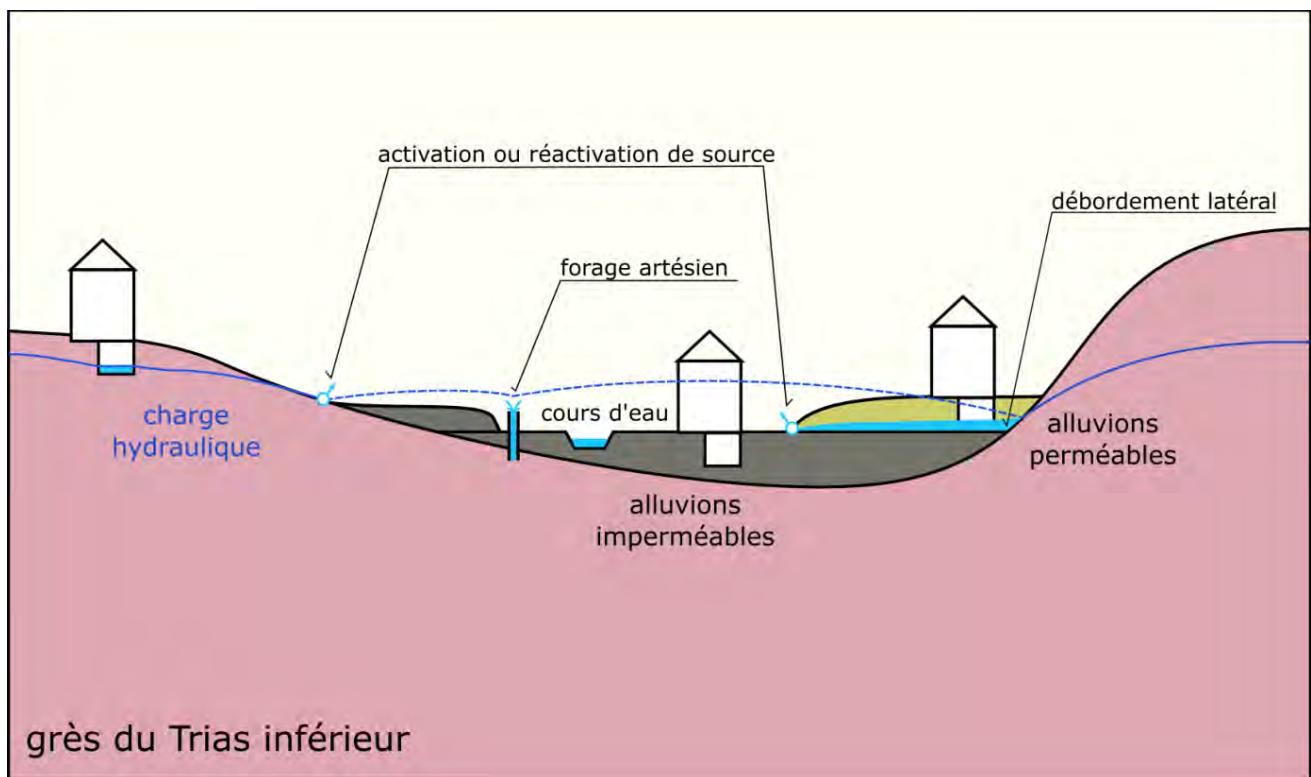


Figure 8 – Situation de nappe captive

4.3.2.2 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 au sein 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 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 fuites sont possibles à la faveur des faiblesses du terrain (type fracture naturelle ou crevasse d'origine minière par exemple). Cependant, compte tenu des inconnues, ces phénomènes ne peuvent être modélisés.

Une seule zone, centrée sur la commune de Ham-sous-Varsberg, est concernée dans cette version du modèle. Elle a été définie par nécessité de calibration. C'est-à-dire que pour que le modèle puisse reproduire les chroniques piézométriques situées dans ce secteur, il a été nécessaire d'imposer un indice de captivité. 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'écartier la continuité du caractère faiblement perméable des strates de grès qui occasionne la mise en charge locale de la nappe des GTI.

Pour cette zone (dite « domaine de captivité suspectée de la nappe hors domaine alluvial »), les trois classes de profondeur cartographiées (voir § 4.2) 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.

4.4 Situation estimée de la nappe des GTI selon la simulation prévisionnelle tendancielle avec solution de rabattement

Les cartes disponibles en Annexe 1 illustrent les résultats de profondeur de la nappe des GTI issus de la simulation prévisionnelle tendancielle avec solution de rabattement de nappe telle que présentée dans le paragraphe 3.1 :

- Situation de la nappe en 2023 ;
- Situation de la nappe à l'horizon 2030 ;
- Situation de la nappe à l'horizon 2065 ;
- Situation de la nappe à long terme, en situation de moyennes eaux ;
- Situation de la nappe à long terme, en situation de hautes eaux.

Étant donné que les cartes annexées à la présente étude ont été réalisées à l'échelle du bassin houiller lorrain global, il a été décidé d'intégrer à ce paragraphe des cartes se focalisant sur les secteurs est et ouest pour faciliter la lecture des résultats.

4.4.1 Secteur Ouest

Ce paragraphe reprend, situation par situation, l'évolution de la remontée de la nappe des GTI et l'influence du champ captant sur celle-ci au droit du secteur Ouest. Des figures sont disponibles à la fin du paragraphe afin d'illustrer ces observations.

Pour rappel, les forages en exploitation au droit du bassin houiller lorrain ont été pris en compte dans les simulations selon les modalités présentées en paragraphe 2.2.

4.4.1.1 Situation 2023

La situation 2023 de la nappe des GTI au droit du secteur Ouest est illustrée dans la Figure 9.

En 2023, la nappe des GTI est déjà proche de la surface topographique dans les vallées de Merten et de Falck ainsi qu'au droit de la commune de Petite-Rosselle. L'analyse des niveaux piézométriques historiques a mis en évidence que son niveau y est déjà stabilisé.

La remontée de la nappe à proximité de la surface s'étend à la vallée de la Bisten où elle continue à évoluer. Selon cette simulation, la nappe est déjà potentiellement affleurante. Dans cette vallée, la formation des GTI ainsi que les alluvions peuvent présenter des horizons imperméables qui ont été modélisés par un « domaine de captivité suspectée de la nappe ». Elle est en charge sous ces horizons moins perméables. Comme indiqué dans le paragraphe 4.3.2.2, l'eau peut être rencontrée à faible profondeur dans ces zones notamment par circulation dans des fractures ou des crevasses ou encore suite à des bouleversements anthropiques. Par ailleurs, les pompages de La Poste et de la Croix permettent depuis 2016 de rabattre la nappe des GTI au droit du centre-ville de Creutzwald.

4.4.1.2 Situation 2030

La situation 2030 de la nappe des GTI au droit du secteur Ouest est illustrée dans la Figure 10.

À l'horizon 2030, la modélisation tient compte de l'hypothèse où une dizaine de forages dits "fermes" seraient actifs afin de rabattre la nappe des GTI à plus de 3 m de profondeur au droit des zones d'engagement de l'État. Ils sont principalement situés dans la vallée de la Bisten, déjà concernée par des profondeurs inférieures à 0,5 m en 2023.

Des zones de nappe dites « plus profondes » (de 3 à 5 m de profondeur) apparaissent à Freyming-Merlebach et Hombourg-Haut. Un forage de rabattement serait mis en place d'ici 2030 au droit de cette dernière commune.

4.4.1.3 Situation 2065

La situation 2065 de la nappe des GTI au droit du secteur Ouest est illustrée dans la Figure 11.

À l'horizon 2065, les simulations prennent en compte que l'intégralité des forages « fermes » prévus seraient en exploitation dont un à Freyming-Merlebach et un à Diesen. Des forages dits « conditionnels » (c'est-à-dire qui ne seraient réalisés que dans les cas où le forage ferme associé ne suffirait pas à rabattre la nappe à plus de 3 m de profondeur sous les zones d'engagement de l'État) ont également été pris en compte. Ces ouvrages permettraient de maintenir la nappe des GTI à plus de 3 m de profondeur sous les zones d'engagement de l'État.

NB : La vallée de Saint-Avold est concernée par une nappe de 3 à 5 m de profondeur, voire localement de 0,5 à 3 m de profondeur tout comme la commune de Porcelette. Pour rappel, aucune zone d'engagement n'a été définie à ces endroits situés en dehors des zones d'influence des travaux miniers [13].

4.4.1.4 Situation ME

La situation de moyennes eaux de la nappe des GTI au droit du secteur Ouest est illustrée dans la Figure 12.

Comme indiqué dans le paragraphe 3.2, la situation de moyennes eaux représente un état stabilisé de la nappe à long terme.

Dans cette simulation, les mêmes ouvrages seraient en fonctionnement par rapport à la situation 2065.

Le secteur de Saint-Avold reste soumis à la remontée de la nappe avec l'apparition de nouvelles zones de nappe potentiellement sub-affleurante.

La commune de Porcelette est également sensible avec l'arrivée de la nappe à moins de 0,5 m de profondeur.

4.4.1.5 Situation HE

La situation de hautes eaux de la nappe des GTI au droit du secteur Ouest est illustrée dans la Figure 13.

Comme indiqué dans le paragraphe 3.2, la simulation de hautes eaux représente une situation de pluies exceptionnelles avec un maximum d'infiltration vers la nappe.

Pour cette situation, tous les forages « fermes » et « conditionnels » prévus pour le champ captant seraient activés. Ceux-ci permettraient de rabattre la nappe à plus de 3 m de profondeur sous les zones d'engagement de l'État.

Les vallées de Saint-Avold et Porcelette, dans lesquelles il n'y a pas de forages prévus, présentent des zones plus élargies de nappe potentiellement affleurante par rapport à la situation de moyennes eaux.

On peut également noter que la vallée de la Merten, qui était stable dans les situations précédentes, est également concernée par un élargissement des zones soumises à la remontée de la nappe des GTI (de 5 à 0.5 m de profondeur). Cette extension à long terme peut être due à la prise en compte du changement climatique dans la modélisation, qui intègre une pluviométrie plus importante en situation de hautes eaux.

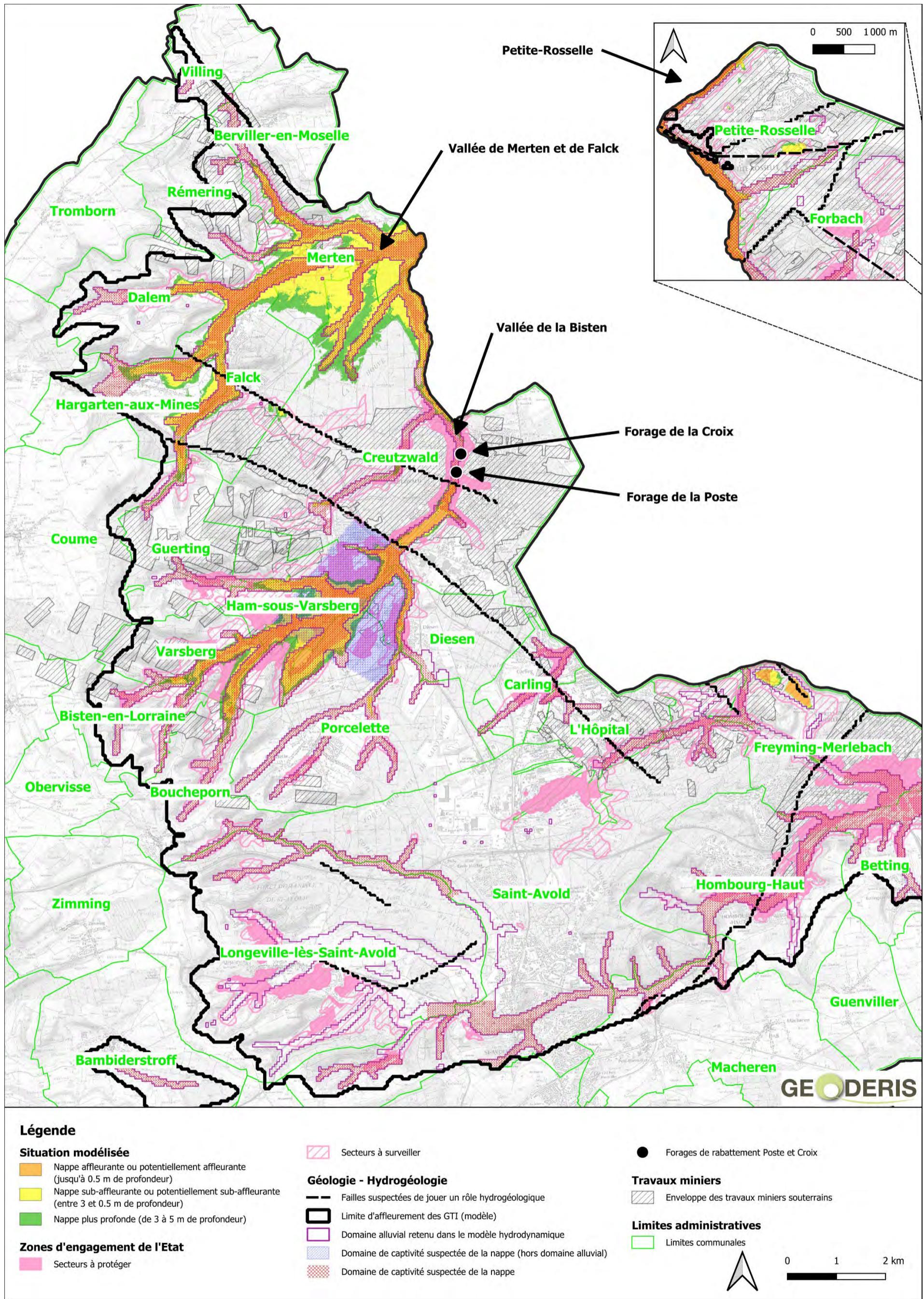


Figure 9 – Situation modélisée de la nappe des Grès du Trias Inférieur à l'année 2023 sur le secteur ouest

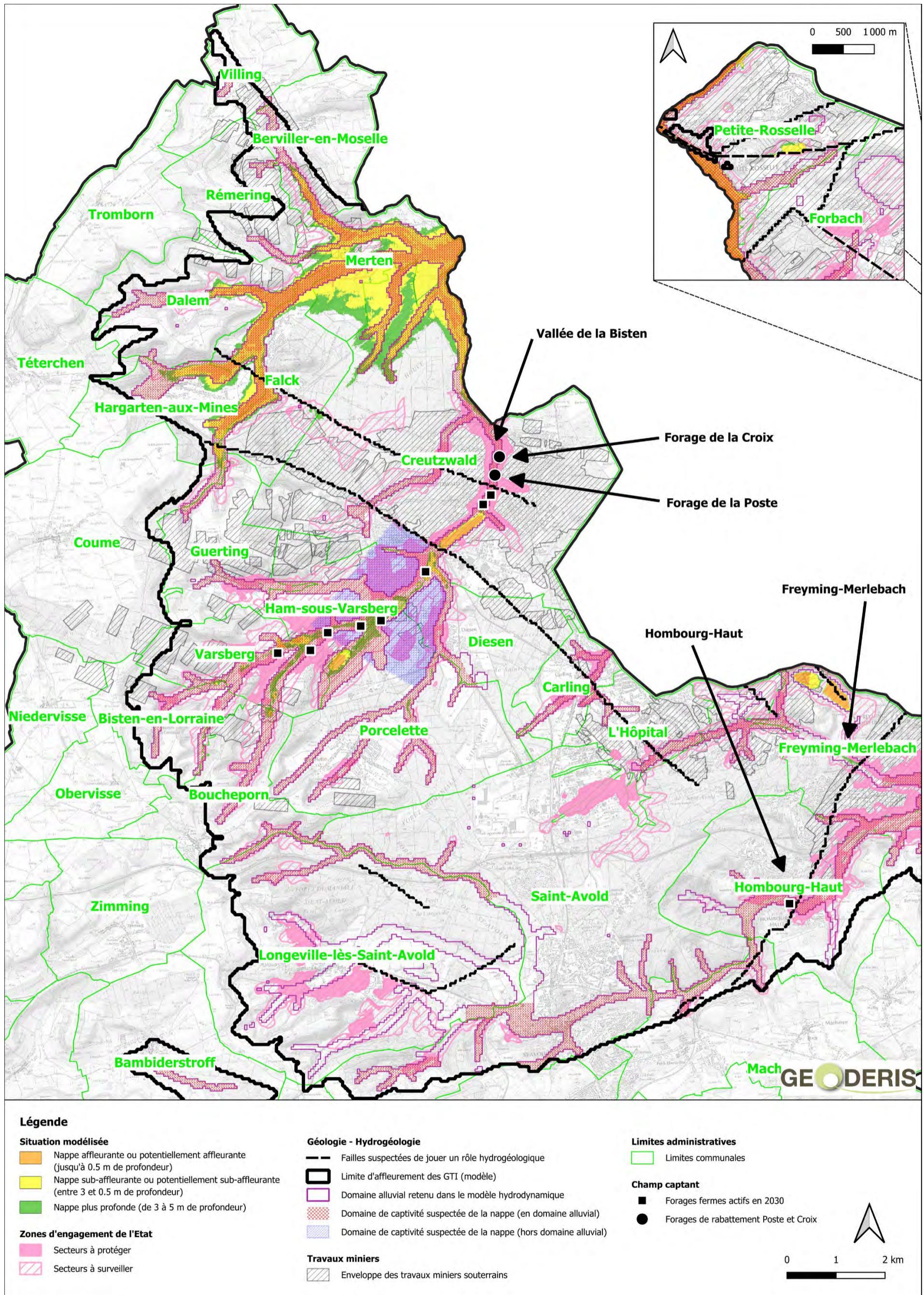
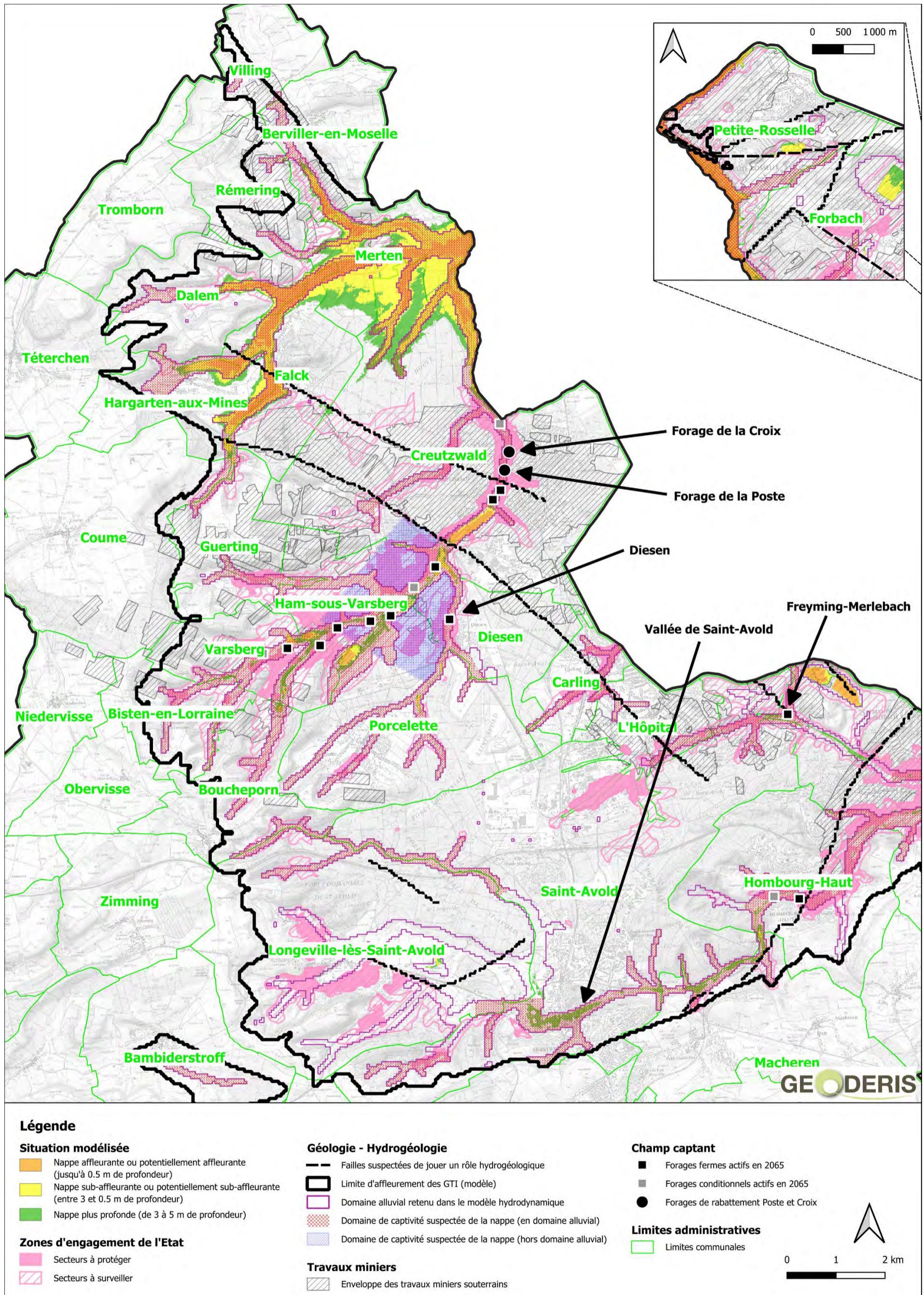
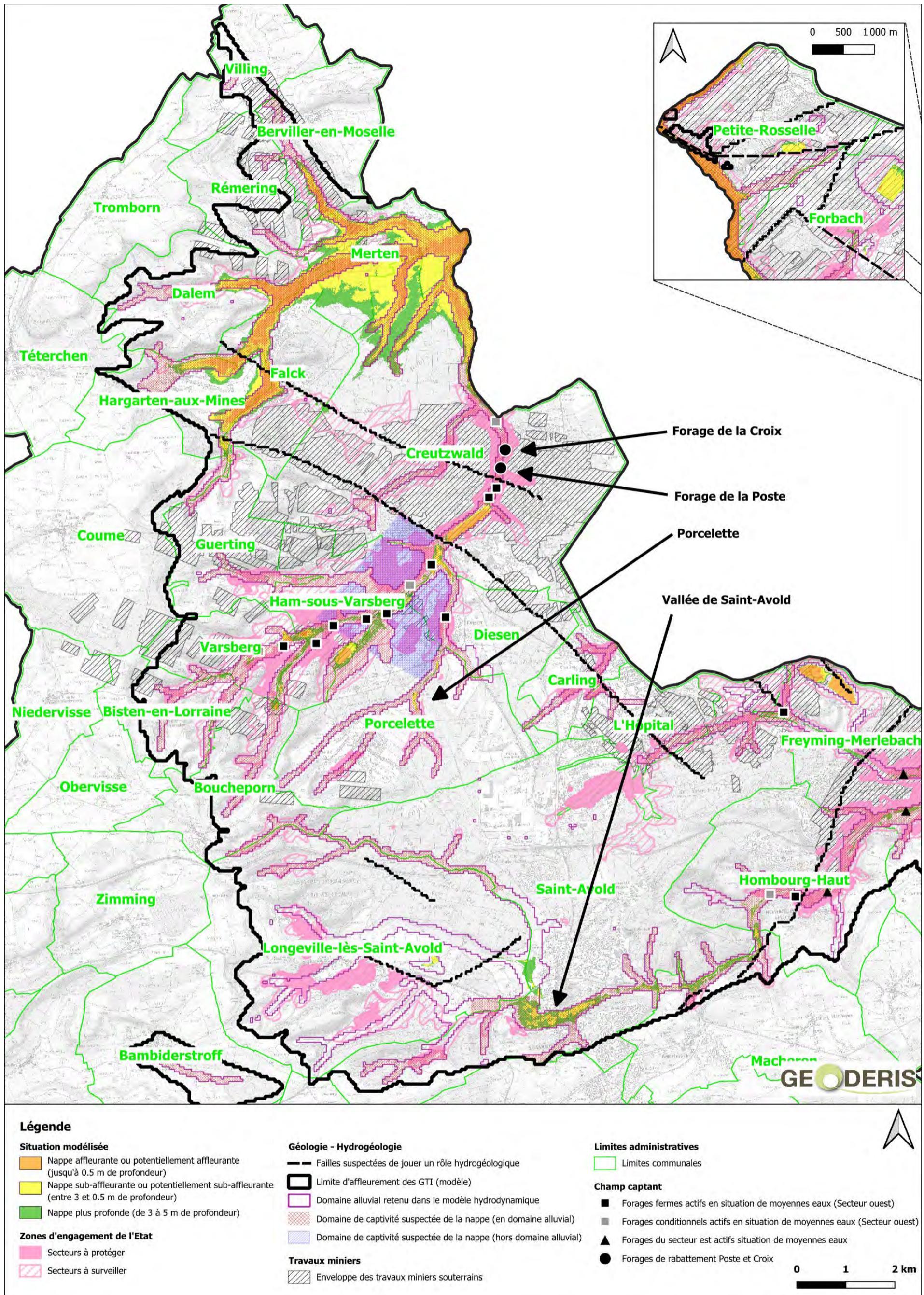
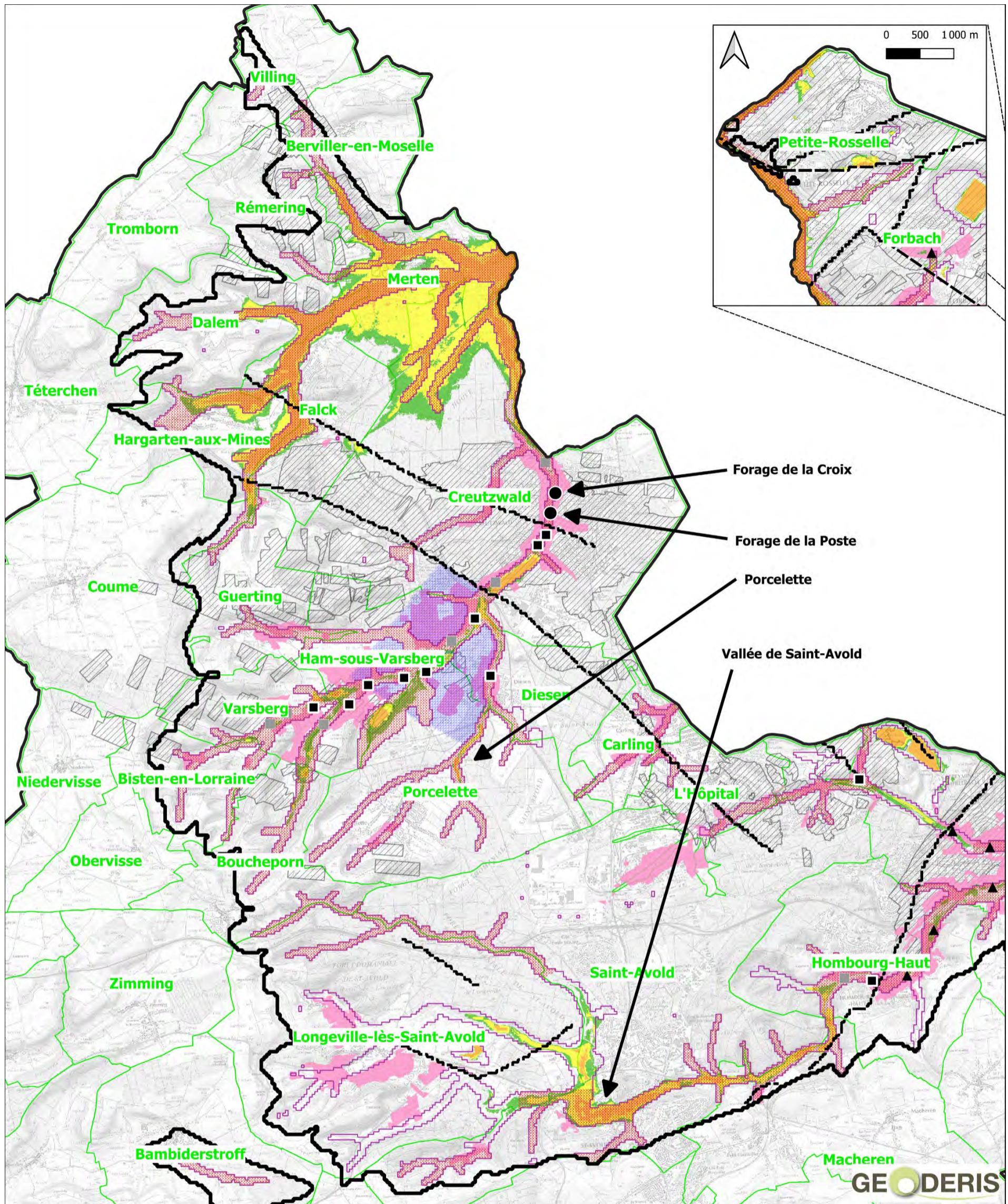


Figure 10 – Situation modélisée de la nappe des Grès du Trias Inférieur à l'année 2030 sur le secteur ouest







Légende

Situation modélisée

- Nappe affleurante ou potentiellement affleurante (jusqu'à 0.5 m de profondeur)
- Nappe sub-affleurante ou potentiellement sub-affleurante (entre 3 et 0.5 m de profondeur)
- Nappe plus profonde (de 3 à 5 m de profondeur)

Zones d'engagement de l'Etat

- Secteurs à protéger
- Secteurs à surveiller

Géologie - Hydrogéologie

- Failles suspectées de jouer un rôle hydrogéologique
- Limite d'affleurement des GTI (modèle)
- Domaine alluvial retenu dans le modèle hydrodynamique (considéré comme domaine de captivité suspectée de la nappe)
- Domaine de captivité suspectée de la nappe (hors domaine alluvial)

Travaux miniers

- Enveloppe des travaux miniers souterrains

Limites administratives

- Limites communales

Champ captant

- Forages fermes actifs en situation de hautes eaux (Secteur ouest)
- Forages conditionnels actifs en situation de hautes eaux (Secteur ouest)
- Forages du secteur est actifs en situation de hautes eaux
- Forages de rabattement Poste et Croix

Figure 13 – Situation modélisée de la nappe des Grès du Trias Inférieur à long terme, en situation de hautes eaux, sur le secteur ouest

4.4.2 Secteur Est

Ce paragraphe reprend, situation par situation, l'évolution de la remontée de la nappe des GTI et l'influence du champ captant sur celle-ci au droit du secteur Est. Des figures sont disponibles à la fin du paragraphe afin d'illustrer ces observations.

Pour rappel, les forages en exploitation au droit du bassin houiller lorrain ont été pris en compte dans les simulations selon les modalités présentées en paragraphe 2.2.

4.4.2.1 Situation 2023

La situation 2023 de la nappe des GTI au droit du secteur Est est illustrée dans la Figure 14.

D'après la simulation 2023, le secteur de la vallée de la Sarre à Grosbliederstroff est soumis à un niveau de nappe potentiellement affleurant. Cependant, tout comme la vallée de Merten et Falck dans le secteur ouest, l'analyse des données piézométriques historiques plus anciennes mettent en évidence que la nappe est stabilisée dans la vallée de la Sarre.

Dans le reste du secteur, la nappe reste plus profonde que 5 m en 2023.

4.4.2.2 Situation 2030

La situation 2030 de la nappe des GTI au droit du secteur Est est illustrée dans la Figure 15.

La remontée de la nappe reste à plus de 5 m de profondeur dans le secteur Est.

4.4.2.3 Situation 2065

La situation 2065 de la nappe des GTI au droit du secteur Est est illustrée dans la Figure 16.

D'après les résultats des simulations, les premières apparitions de nappe à moins de 5 m de profondeur se produisent à l'horizon 2045. Une vingtaine d'ouvrages seraient progressivement à activer jusqu'en 2065 pour maintenir la nappe à plus de 3 m de profondeur sous les zones d'engagement de l'État. Ils sont situés dans la vallée de la Rosselle, de Freyming-Merlebach à Stiring-Wendel où la nappe apparaît à moins de 5 m voire proche de 0,5 m de profondeur (nappe potentiellement sub-affleurante à la frontière avec l'Allemagne). Quelques zones de nappe potentiellement affleurante (profondeur inférieure à 0,5 m) sont visibles au nord-est de Stiring-Wendel.

4.4.2.4 Situation ME

La situation de moyennes eaux de la nappe des GTI au droit du secteur Est est illustrée dans la Figure 17.

Selon la modélisation, dans cette situation, environ 5 ouvrages de rabattement supplémentaires seraient nécessaires au maintien de la nappe sous 3 m de profondeur en zone d'engagement de l'État à long terme. La mise en place effective de ces forages fera l'objet d'une réévaluation à l'avancement des connaissances (piézomètres, pompages effectifs...).

Ainsi, en situation de moyennes eaux, la nappe se stabilise à une profondeur supérieure à 3 m dans la partie amont de la vallée de la Rosselle. Au niveau de Morsbach, près de la frontière avec l'Allemagne, des zones de nappes potentiellement sub-affleurante voire affleurante sont prédominantes. En effet, elles seraient situées hors zone d'influence du champ captant. Dans le secteur de Forbach, la nappe des GTI est maintenue sous 3 m de profondeur par les ouvrages de rabattement prévus. Une zone de nappe située entre 3 et 5 m de profondeur apparaît au droit de la commune de Hombourg-Haut, qui jusqu'ici n'était pas soumise à la remontée de la nappe des GTI. La remontée s'observe avec une direction ouest – est, c'est pourquoi la commune de Hombourg-Haut située à l'est du secteur ouest est soumise à cette remontée plus tardivement.

4.4.2.5 Situation HE

La situation de hautes eaux de la nappe des GTI au droit du secteur Est est illustrée dans la Figure 18.

D'après la modélisation, en situation de pluies exceptionnelles, une trentaine d'ouvrages au total serait nécessaire pour rabattre la nappe sous 3 m de profondeur dans les zones d'engagement de l'État, notamment en renforçant le dispositif dans la vallée de la Rosselle, sur la commune de Forbach et à l'est de Stiring-Wendel.

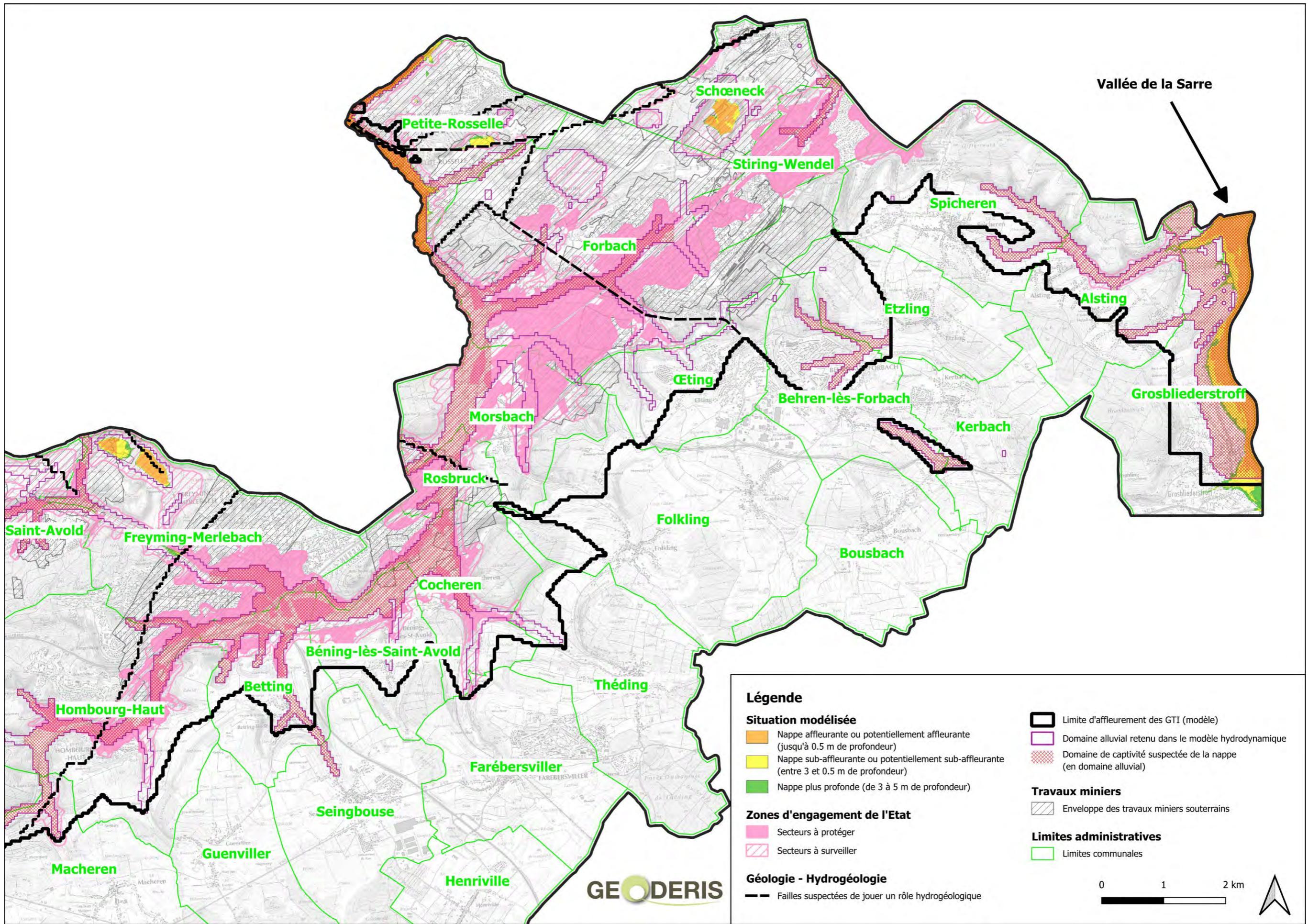


Figure 14 – Situation modélisée de la nappe des Grès du Trias Inférieur à l'année 2023 sur le secteur est

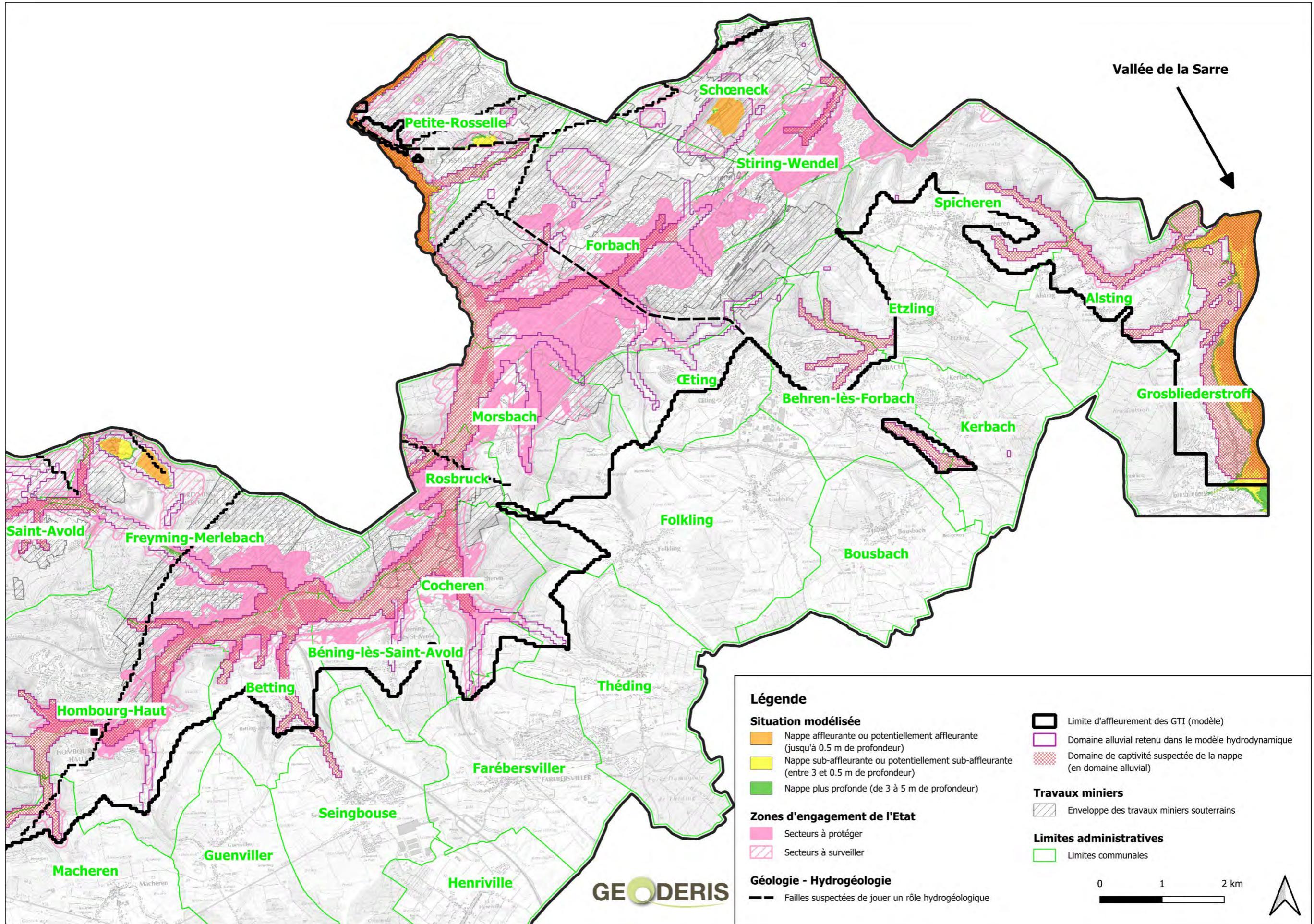


Figure 15 – Situation modélisée de la nappe des Grès du Trias Inférieur à l'année 2030 sur le secteur est

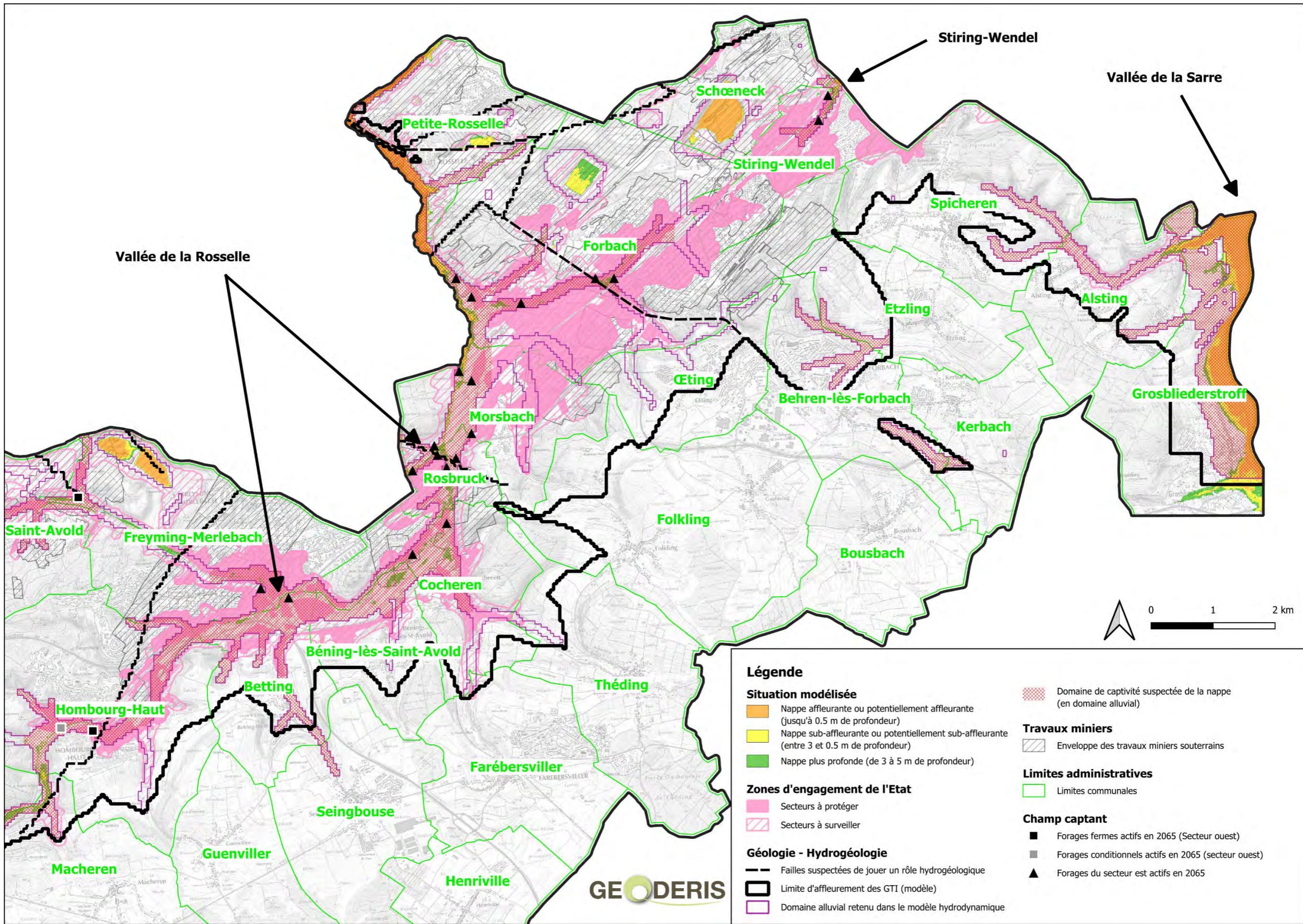
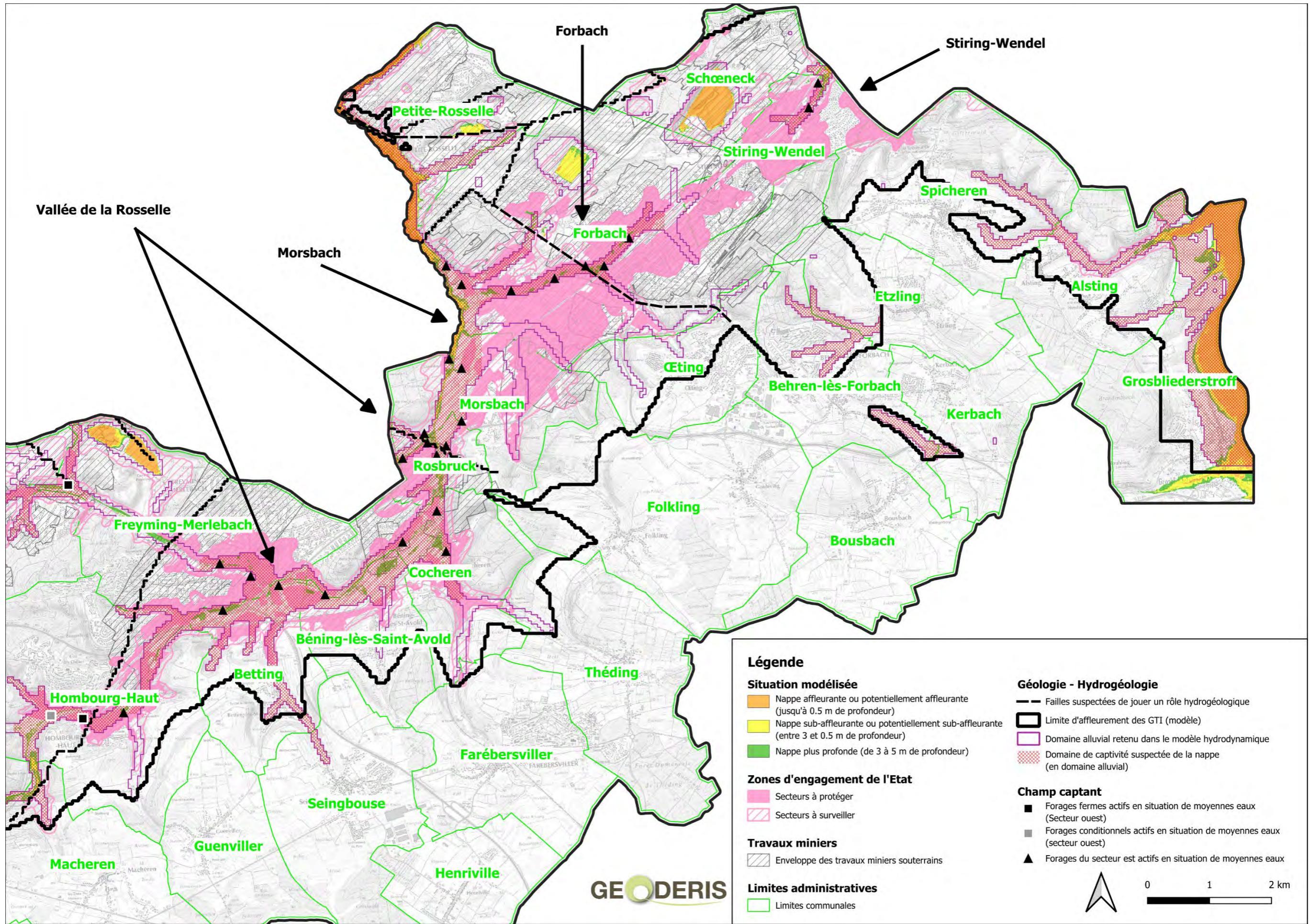


Figure 16 – Situation modélisée de la nappe des Grès du Trias Inférieur à l'année 2065 sur le secteur est



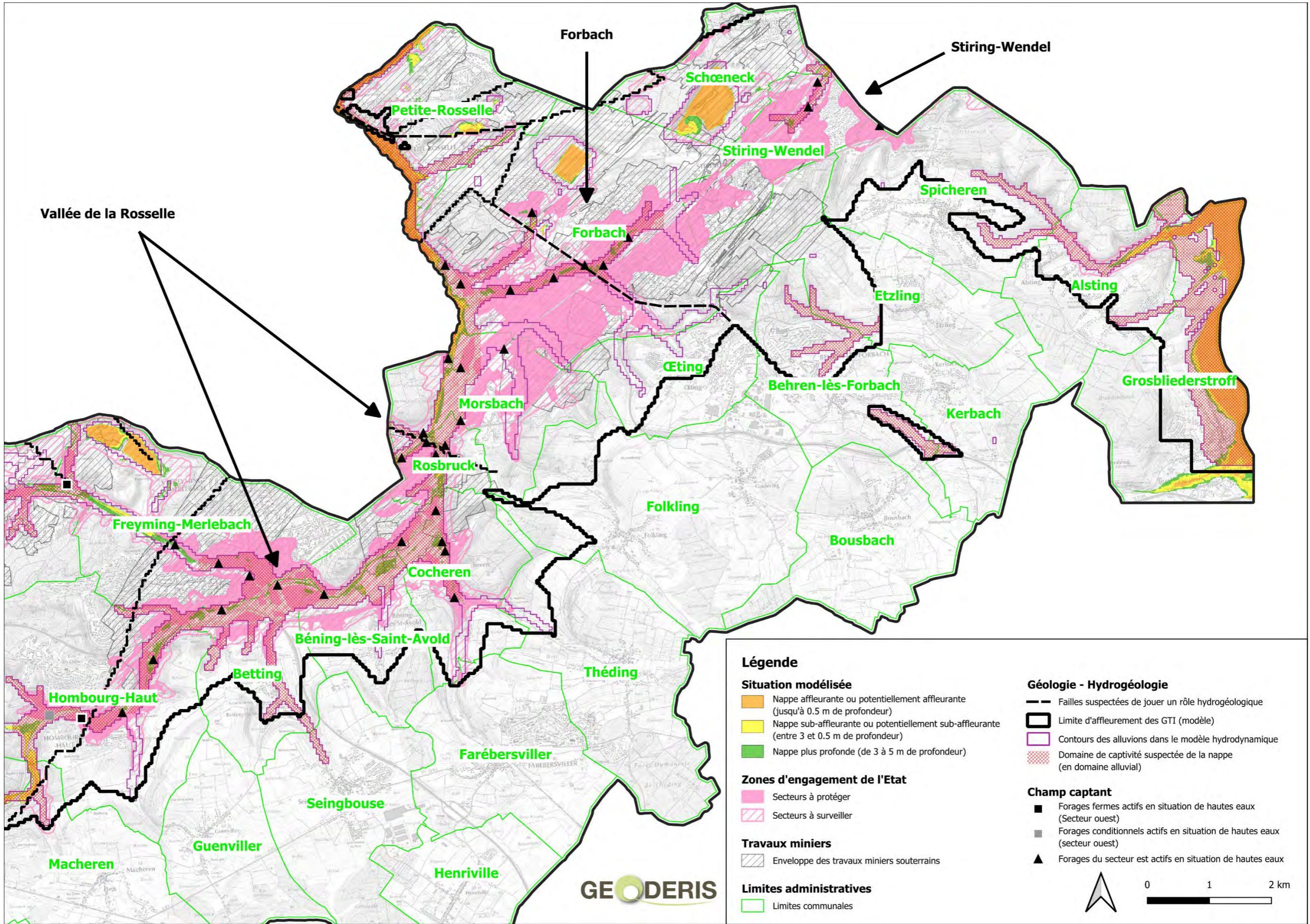


Figure 18 – Situation modélisée de la nappe des Grès du Trias Inférieur à long terme, en situation de hautes eaux, sur le secteur est

5 MISE EN PLACE DU RESEAU PIEZOMETRIQUE ET DU CHAMP CAPTANT DE RABATTEMENT DE LA NAPPE DES GTI

Dans le cadre de la recherche d'une solution durable et optimale au problème de la remontée de nappe, la mise en place d'un champ captant associée au déploiement d'un réseau de suivi piézométrique a été proposée en 2021 [11]. Ces propositions ont été reprises ici sur la base des résultats de la mise à jour 2024 du modèle numérique. Pour rappel, à la demande de la DREAL Grand Est, cette recherche obéit aux principes retenus pour les zones d'engagement de l'État.

Ce chapitre vise à présenter les différentes mesures proposées par secteur.

5.1 Champ captant

Afin de limiter les conséquences de la remontée de la nappe sur les enjeux existants, le dispositif proposé consiste en des pompages de rabattement de nappe fonctionnant de manière pérenne dans des puits forés et équipés à cet effet. Ces mesures à aire d'effet étendue sont accompagnées par des mesures à plus petite échelle pour des enjeux localisés (mesures ponctuelles).

5.1.1 Secteur Ouest

L'approche de mise en place de ces ouvrages se veut itérative. La position optimale a d'abord été définie par GEODERIS sur la base des résultats de la première version du modèle numérique [8]. En effet, des zones-cibles ont été délimitées aux endroits où la nappe se situe entre 0 et 3 m de profondeur, plus précisément au droit des zones d'engagement de l'État. Elles ont permis une première implantation des ouvrages. Une révision a ensuite été effectuée pour adapter leur position en fonction de la situation parcellaire et de la faisabilité technique des ouvrages [15]. Une seconde vérification a été effectuée par GEODERIS pour adapter le champ captant aux résultats de la mise à jour 2024 du modèle numérique. La localisation des forages suite aux récents résultats est illustrée dans la *Figure 19*.

Le tableau suivant récapitule les caractéristiques des ouvrages prévus suite à cette seconde vérification. Les forages dits « fermes » sont les ouvrages prioritaires. Comme indiqué dans le paragraphe 4.4.1.3, les forages dits « conditionnels » ne seront réalisés que dans les cas où le forage ferme associé (situé à proximité) ne suffit pas à rabattre la nappe à plus de 3 m de profondeur sous les zones d'engagement de l'État.

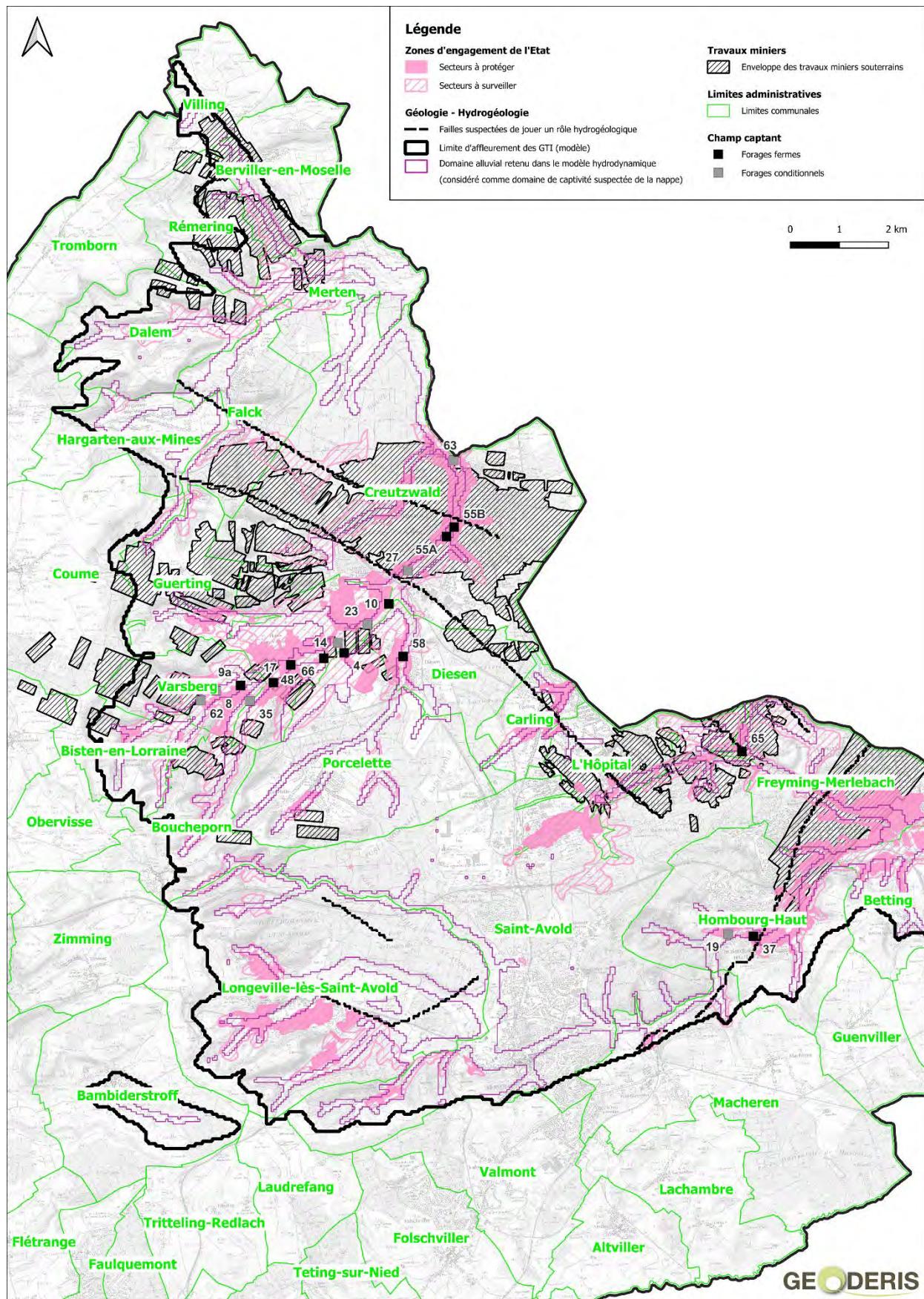


Figure 19 – Localisation des forages du champ captant

Tableau 1 – Caractéristiques et priorités des forages du champ captant

Nom du forage	Commune	Type (conditionnel ou ferme)	Priorité (pour les forages fermes)	Forage(s) associé(s)
55A	Creutzwald	Ferme	Déjà réalisé	-
48	Ham-sous-Varsberg	Ferme	1	-
66	Ham-sous-Varsberg	Ferme	2	
17	Ham-sous-Varsberg	Ferme	3	
4	Porcelette	Ferme	4	
58	Diesen	Ferme	5	
37	Hombourg-Haut	Ferme	6	
9a	Varsberg	Ferme	7	
10	Creutzwald	Ferme	8	
65	Freyming-Merlebach	Ferme	9	
55B	Creutzwald	Ferme	10	55A
63	Creutzwald	Conditionnel		2
52	Creutzwald	Conditionnel		55A et 55B
23	Ham-sous-Varsberg	Conditionnel		10
14	Ham-sous-Varsberg	Conditionnel		4 et 66
8	Varsberg	Conditionnel		9a
19	Hombourg-Haut	Conditionnel		37
2	Creutzwald	Conditionnel		63
35	Varsberg	Conditionnel		17 et 62
27	Creutzwald	Conditionnel		52, 55A et 55B
62	Varsberg	Conditionnel		8

Ces ouvrages se situent principalement dans la vallée de la Bisten. Trois autres forages sont prévus dans les communes de Freyning-Merlebach et à Hombourg-Haut (secteur Est).

Selon les résultats des modélisations, les volumes à pomper dans la nappe des GTI sur le secteur ouest représenteraient au total (en prenant en compte les forages Poste et Croix à Creutzwald, déjà en fonctionnement) :

- En moyennes eaux : environ 13,1 millions de m³/an ;
- En hautes eaux (situation exceptionnelle) : environ 24,8 millions de m³/an.

5.1.2 Secteur est

Dans la mesure où – selon les prévisions – aucune manifestation de la remontée de nappe à faible profondeur n'est attendue dans le secteur est avant 2045, le travail itératif réalisé pour le secteur ouest n'a pas été appliqué ici. Les forages ont été placés d'après les résultats du modèle actualisé sans vérification supplémentaire. Ils permettent de donner une première vision de l'étendue du déploiement du champ captant Est.

Le nombre de forage et leur priorité seront étudiés ultérieurement au cas par cas, d'après les premiers retours d'expérience sur le secteur ouest, afin d'actualiser les travaux de manière optimale techniquement et économiquement. De plus, le réseau piézométrique prévu sur le secteur Est permettra d'acquérir des données supplémentaires afin de dimensionner au mieux ce champ captant, si l'efficacité dans le secteur ouest est avérée.

Au total, une trentaine d'ouvrages (voir localisation figure 17) serait à prévoir pour rabattre la nappe à plus de 3 m de profondeur sous les zones d'engagement de l'État.

Selon les résultats des modélisations, les volumes à pomper dans la nappe des GTI sur le secteur est représenteraient au total :

- En moyennes eaux : environ 7,8 millions de m³/an ;
- En hautes eaux (situation exceptionnelle) : environ 16,4 millions de m³/an.

5.2 Réseau piézométrique

Afin de suivre la remontée de la nappe et ses effets, notamment dans les zones dites « à surveiller » définies par l'État, il est proposé que le champ captant soit accompagné d'un renforcement du réseau piézométrique existant. Des investigations complémentaires (diographies gamma-ray, thermo-conductivité, micro-moulinet, passage caméra ou encore analyses chimiques) sont également prévues afin d'acquérir le plus de données possibles et d'adapter au mieux les travaux à suivre.

5.2.1 Secteur Ouest

Le réseau de suivi a été dimensionné en intégrant une logique de fonctionnement en doublets entre piézomètres de la nappe des GTI et piézomètres des nappes alluviales.

La mise en place du réseau piézométrique sur le secteur ouest est prévue en plusieurs phases :

- Phase 1 : Réalisation d'une quarantaine de piézomètres captant la nappe des GTI dans la vallée de la Bisten (Creutzwald, Diesen, Ham-sous-Varsberg, Varsberg et Porcelette) ;
- Phase 2 : Réalisation d'une quarantaine piézomètres captant la nappe des alluvions également dans la vallée de la Bisten ;
- Phase 3 : Essais de pompage sur certains piézomètres ;
- Phases 4 & 5 : Réalisation de 9 forages fermes et essais de pompage sur les forages fermes ;
- Phase 6 : Réalisation d'une cinquantaine de piézomètres captant la nappe des GTI dans les vallées de la Merten, de la Bisten et de la Rosselle ;
- Phase 7 : Réalisation d'une soixantaine de piézomètres captant la nappe des alluvions également dans les vallées de la Merten, de la Bisten et de la Rosselle ;

D'autres phases sont prévues par la suite concernant les essais de pompage et la réalisation des autres forages prévus et présentés au paragraphe précédent.

Le réseau de suivi que nous proposons pour le secteur Ouest est constitué d'ouvrages répondant à un ou plusieurs rôles : amélioration de la calibration numérique du modèle avec une attention particulière donnée aux zones de failles majeures, contrôle de l'efficacité du champ captant et surveillance des zones soumises à une remontée de

nappe à moins de 3 m de profondeur où sur la base de nos connaissances actuelles, des mesures ne pourraient être nécessaires qu'à long-terme et localement.

Dans le but de répondre à ces différents objectifs, il est prévu au total environ 90 piézomètres captant la nappe des GTI et une centaine de piézomètres captant la nappe des alluvions.

5.2.2 Secteur Est

Contrairement au secteur ouest, et compte tenu de la dynamique de la remontée, le renforcement du réseau de suivi piézométrique du secteur Est sera réalisé en amont de l'implantation du champ captant du même secteur. Les données acquises par le réseau piézométrique permettront ainsi d'adapter au mieux le champ captant à mettre en place pour rabattre la nappe des GTI à plus de 3 m de profondeur sous les zones d'engagement de l'État.

Au total, un peu moins d'une quarantaine d'ouvrages est prévue pour le suivi piézométrique du secteur est. Ils permettront d'améliorer la calibration numérique du modèle, notamment au niveau des failles majeures dont le rôle hydrogéologique est suspecté, et de surveiller les zones qui pourraient nécessiter un jour la mise en place de mesures.

5.3 Bilan comparatif avec le modèle V1

Le tableau suivant récapitule les caractéristiques du champ captant adapté aux résultats de la seconde version du modèle de la nappe des GTI (V2), en reprenant celles qui avaient été estimées à partir des résultats de la première version (V1).

Sur le secteur ouest, il est prévu moins de forages de rabattement selon les résultats de la V2, les débits à prélever en situation prévisionnelle de moyennes eaux sont également moindres. Sur le secteur est, environ 30 ouvrages ont été estimés nécessaires pour rabattre la nappe à plus de 3 m de profondeur dans les zones d'engagement de l'État selon les deux versions du modèle. Toutefois, les prélèvements sont plus faibles en moyennes eaux et plus élevés en hautes eaux d'après la V2. Ces différences peuvent être expliquées par les changements apportés au modèle lors de sa mise à jour et présentés dans le paragraphe 2.2. La différence de prélèvements est principalement due au scénario climatique du modèle V2 prenant en compte les projections climatiques réalisées par la DRIAS (paragraphe 3.2).

Tableau 2 – Bilan comparatif des caractéristiques du champ captant

	V1		V2	
	Secteur ouest	Secteur est	Secteur ouest	Secteur est
Nombre de points de pompage	13 mesures fermes 13 mesures conditionnelles	Environ 30	11 forages fermes 10 forages conditionnels	Environ 30
Pompages annuels	ME : 15,4 millions m ³ HE : 26,2 millions m ³	ME : 7,3 millions m ³ HE : 12,1 millions m ³	ME : 11 millions m ³ HE : 22,7 millions m ³	ME : 7,8 millions m ³ HE : 16,4 millions m ³

ME : Moyennes Eaux / HE : Hautes eaux

6 CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

GEODERIS a établi en 2018, avec l'appui du BRGM, un modèle de la nappe des Grès du Trias Inférieur (GTI) à l'échelle du bassin houiller lorrain (BHL). Une actualisation majeure de ce modèle a été réalisée en 2024 en intégrant en particulier :

- la prise en compte des données piézométriques et de débit de 2016 à 2022 ;
- la mise à jour des données météo ;
- la prise en compte des prévisions liées au changement climatique ;
- l'acquisition de nouvelles données suite aux campagnes de forages réalisées en 2017 ;
- la révision ou vérification de certains éléments du premier modèle (points d'échanges nappe/mine, affaissement, etc...) ;
- la prise en compte du rôle des failles.

Dans le cadre de la recherche de solutions durables et optimales au phénomène de la remontée de nappe, le dimensionnement d'un champ captant associé au déploiement d'un réseau de suivi piézométrique a été proposé en 2021 sur la base des résultats de la première version du modèle. Les ouvrages du champ captant ont pour vocation de rabattre le niveau de la nappe des GTI à plus de 3 m de profondeur dans les secteurs déjà bâties en 2020 et identifiés comme soumis à la remontée de la nappe en zones d'affaissements créés suite à l'exploitation minière ou en zones historiquement protégées par l'influence des pompages miniers (zones d'engagement de l'État). Les résultats issus de la version actualisée du modèle de la nappe des GTI ont permis d'optimiser le développement du champ captant et du réseau piézométrique.

La situation future des nappes rencontrées a été estimée selon un scénario dit « tendanciel 2022 » basé sur la prise en compte d'un certain nombre de dispositions et de simulations d'évolutions des prélèvements d'eau, qui sont détaillées en § 2.2 de ce rapport. Ce scénario vise à identifier les débits nécessaires à la mise en place de solutions de rabattement pour atteindre l'objectif fixé par l'État. Plusieurs situations de la nappe des GTI ont ainsi été simulées :

- Une situation historique ayant servi à la calibration du modèle ;
- Une situation d'évolution future de la nappe lors de la phase transitoire de sa remontée, représentée par les années 2030 et 2065 dans ce rapport, et à partir de laquelle sont pris en compte un certain nombre d'ouvrages de rabattement ;
- Une situation d'évolution future moyenne de la nappe après quasi-stabilisation de la nappe appelée « moyennes eaux » ;
- Une situation d'évolution future possible de la nappe représentant une période de précipitations exceptionnelles dites de « hautes eaux ».

Les résultats ont été cartographiés sur l'ensemble du bassin. Les cartes proposées en Annexe 1 renseignent sur la profondeur de la nappe des GTI au droit du BHL.

La démarche de recherche et de développement de solutions se veut itérative. Les modélisations ont permis d'identifier le nombre d'ouvrages nécessaires au rabattement de la nappe à plus de 3 m de profondeur sous les zones d'engagement de l'État et d'estimer leur localisation et leurs débits de pompage. Toutefois, ces ouvrages seront créés un à un afin d'optimiser le dispositif au regard des données acquises au fil des investigations et ouvrages déjà réalisés. L'objectif est de renforcer les connaissances et de les intégrer le cas échéant aux modélisations pour pouvoir gérer au mieux les risques engendrés par une nappe peu profonde. Cette démarche est menée prioritairement pour le secteur Ouest, car selon les résultats des modélisations, le secteur Est sera localement ou très localement soumis à un niveau de nappe proche de la surface uniquement à l'horizon 2040. Les premiers retours d'expérience que nous aurons sur le déploiement du champ captant dans le secteur Ouest pourront ainsi être utilisés pour adapter le dimensionnement des solutions de rabattement dans le secteur Est.

La modélisation de la remontée de la nappe des GTI est un outil de prévision à l'échelle régionale. Les résultats ne peuvent être utilisés sans l'accompagnement d'une réflexion locale du contexte.

7 BIBLIOGRAPHIE

- [1] Rapport 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 », 2012.
- [2] Rapport GEODERIS E2015/075DE : « Zones soumises à la remontée de nappe dans le bassin houiller lorrain (57), secteur ouest. Note d'accompagnement », 2015.
- [3] Rapport GEODERIS E2015/097DE : « 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'État et aux communes », 2015.
- [4] Rapport GEODERIS E2015/098DE : « 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'État », 2015.
- [5] Rapport BRGM RP-64573-FR : « 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 », 2015.
- [6] Rapport BRGM RP-67630-FR : « 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 », 2018.
- [7] Rapport BRGM RP-67633-FR : « Modélisation géologique des alluvions du bassin houiller lorrain sur la partie affleurante des grès du Trias inférieur », 2018.
- [8] Rapport GEODERIS E2018/034DE : « Cartographie des zones soumises au phénomène de remontée des nappes dans le bassin houiller lorrain (57) », avril 2018.
- [9] Rapport GEODERIS E2018/074DE : « Actions susceptibles de limiter les conséquences des remontées de nappe dans le bassin houiller lorrain. Note d'accompagnement au rapport BRGM RP-67730- FR », 2018.
- [10] Rapport BRGM RP-67730-FR : « Analyse critique des actions susceptibles d'être mises en œuvre pour limiter les conséquences des remontées de nappe dans le bassin houiller lorrain », 2018.
- [11] Rapport GEODERIS 2021/165DE : « Remontée de nappe dans le bassin houiller lorrain Réponse à la saisine de la DREAL Grand Est du 11/08/2021 concernant les engagements de l'État Vision « projet » à un horizon de 10 ans », mai 2022.
- [12] Rapport BRGM RP-73887-FR : « 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 – Version 2024 », février 2025.
- [13] Rapport GEODERIS 2020-071DE : « Cartographie des zones soumises au phénomène de remontée des nappes dans le bassin houiller lorrain (57). Zones d'influence des travaux miniers du bassin en matière d'affaissements survenus et de rabattement historique de la nappe des GTI. Croisement avec l'enveloppe des zones sensibles potentielles », mai 2020.


[14] Rapport BRGM RP-64573-FR : « 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 », 2015.


[15] Rapport INGENERIA : « Etude générale du champ captant du secteur ouest et centre du BHL », avril 2023


ANNEXE 1


Situations futures estimées de la nappe des GTI selon la simulation prévisionnelle tendancielle avec solution de rabattement de nappe


(Hors texte)







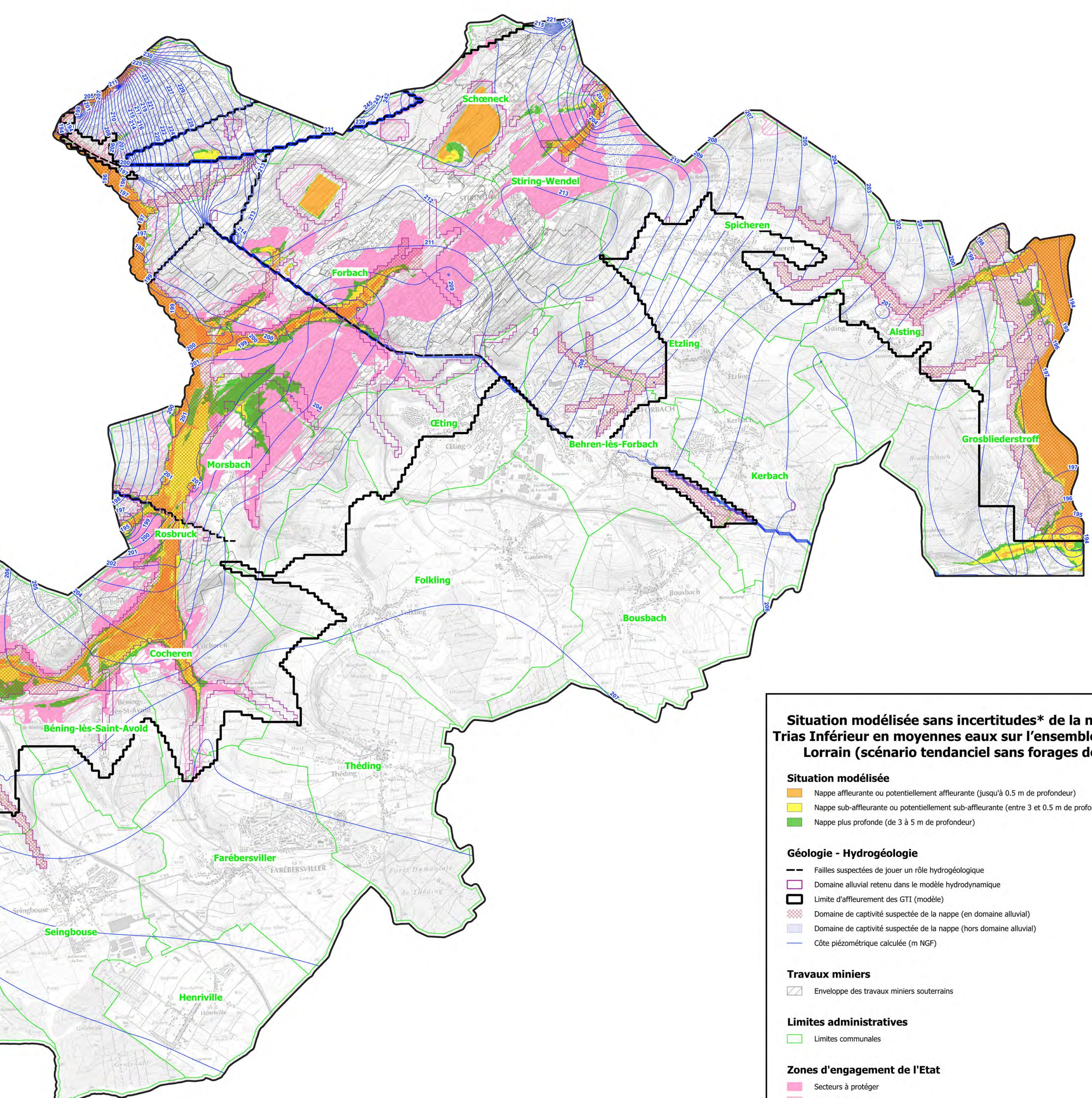
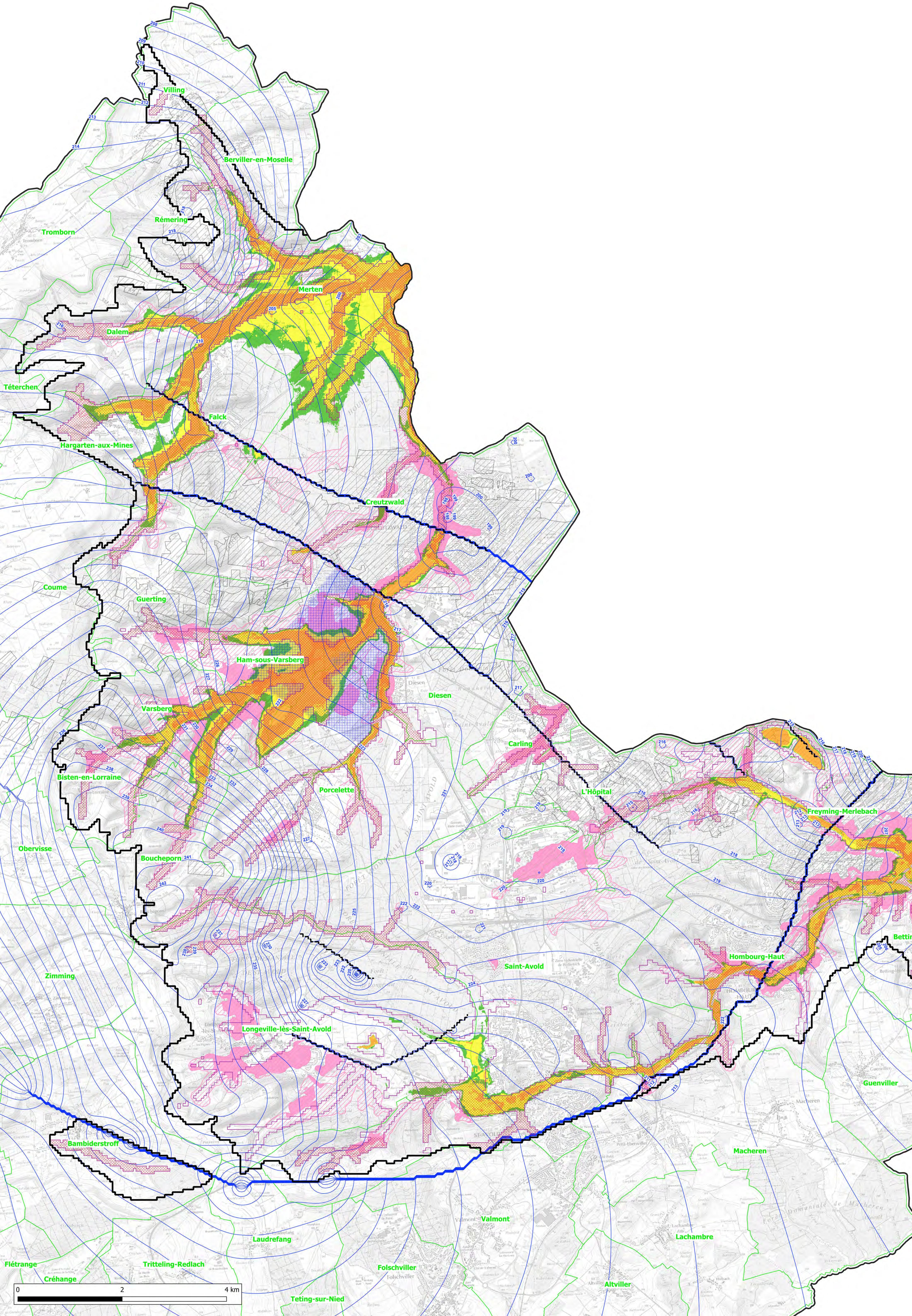




ANNEXE 2

Situations futures estimées de la nappe des GTI selon la simulation prévisionnelle tendancielle

(Hors texte)



Situation modélisée sans incertitudes* de la nappe des Grès du Trias Inférieur en moyennes eaux sur l'ensemble du Bassin Houiller Lorrain (scénario tendanciel sans forages de rabattement)

Situation modélisée

- Nappe affleurante ou potentiellement affleurante (jusqu'à 0,5 m de profondeur)
- Nappe sub-affleurante ou potentiellement sub-affleurante (entre 3 et 0,5 m de profondeur)
- Nappe plus profonde (de 3 à 5 m de profondeur)

Géologie - Hydrogéologie

- Faillies suspectées de jouer un rôle hydrogéologique
- Domaine alluvial retenu dans le modèle hydrodynamique
- Limite d'affleurement des GTI (modèle)
- Domaine de captivité suspectée de la nappe (en domaine alluvial)
- Domaine de captivité suspectée de la nappe (hors domaine alluvial)
- Côte piézométrique calculée (m NGF)

Travaux miniers


- Enveloppe des travaux miniers souterrains

Limites administratives

- Limites communales

Zones d'engagement de l'Etat

- Secteurs à protéger
- Secteurs à surveiller



ANNEXE 3

Rapport BRGM RP-73887-FR



Document à 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 – Version 2024

Rapport final

BRGM/RP-73887-FR

Version 0 du 13 février 2025

Étude réalisée dans le cadre des projets d'appui aux politiques publiques

Laurent Vaute, Bastien Morin

1.89 3740.46 -625.5

Ce rapport a été vérifié le 03/02/2025 et approuvé le 04/02/2025 selon la procédure interne en vigueur au sein du BRGM, qui garantit le respect de ses engagements contractuels, de l'intégrité et de l'impartialité du contenu scientifique et technique du présent rapport, de l'éthique et de la déontologie du BRGM, ainsi que des dispositions réglementaires et législatives auquel il est soumis pour l'exercice de son activité.

Le système de management de la qualité et de l'environnement du BRGM est certifié selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.
Contact : qualite@brgm.fr

Avertissement

Ce rapport est adressé en communication exclusive au demandeur, au nombre d'exemplaires prévu contractuellement.

Le demandeur assure lui-même la diffusion qu'il souhaite des exemplaires de ce tirage initial, dont il est seul propriétaire.

La communicabilité et la réutilisation de ce rapport sont régies selon la réglementation en vigueur, ainsi que par les termes de la convention.

Les justificatifs du contrôle qualité de ce rapport (auteur, vérificateur, approbateur) peuvent être communiqués à titre confidentiel au destinataire du rapport, à sa demande et dans le strict respect de la réglementation applicable au traitement des données à caractères personnels.

Le BRGM ne saurait être tenu responsable de la divulgation du contenu total ou partiel de ce rapport à un tiers non-autorisé qui ne soit pas de son fait et des éventuelles conséquences pouvant en résulter.

Votre avis nous intéresse

Dans le cadre de notre démarche qualité et de l'amélioration continue de nos pratiques, nous souhaitons mesurer l'efficacité de réalisation de nos travaux.

Aussi, nous vous remercions de bien vouloir nous donner votre avis sur le présent rapport en complétant le formulaire accessible par cette adresse <https://forms.office.com/r/yMgFcU6Ctq> ou par ce code :



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 :

Vaute L., Morin B. (2025) – 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 – Version 2024. Rapport BRGM/RP-73887-FR, 150 p., 29 ill., 5 ann.

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 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.

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 économies en eau constatée depuis plusieurs années jouent un rôle important dans l'évolution 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 de la nappe des GTI 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 « sécuritaire¹ ». Le rapport BRGM RP-67630-FR daté de 2018 présente le travail entrepris et les résultats obtenus. Le modèle correspondant à ce rapport de 2018 sera désigné dans la suite du présent rapport par « modèle des GTI du bassin houiller version 1 de 2018 », ou plus simplement modèle v1 (2018).

Le présent rapport BRGM RP-73887-FR présente les résultats de la mise à jour du modèle v1 (2018), dont le but est d’actualiser les prévisions de remontée de nappe et de fournir à GEODERIS les éléments lui permettant de dimensionner un réseau de surveillance de la nappe des GTI, et un réseau de protection de certaines zones bâties soumises à un risque de remontée de nappe. Le modèle correspondant au présent rapport est désigné par « modèle des GTI du bassin houiller version 2 de 2024 », ou plus simplement modèle v2 (2024).

Dans le chapitre 2, 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 le chapitre 3, on détaille l’historique de la révision du modèle régional, puis les changements importants apportés lors des mises à jour successives du modèle régional pour obtenir la version v1 (2018) puis la version v2 (2024), réalisées dans le but d’affiner les prévisions de remontée de la nappe dans l’ensemble du bassin houiller lorrain. Les principales évolutions et mises à jour du modèle GTI version v1 (2028) vers la version v2 (2024) sont les suivantes :

- Elargissement du sous-maillage gigogne,
- Correction du modèle numérique de terrain en Allemagne,
- Modification de la « topographie » du modèle,
- Redéfinition de la couche des alluvions,
- Modification de la méthode de modélisation des failles,
- Redéfinition du réseau hydrographique,
- Modification de la méthode de modélisation de l’infiltration en pied de côte du Muschelkalk,
- Mise à jour de la base de données hydrogéologiques du modèle (sous Excel) sur la période 1968-2022,
- Modification de la méthode de calcul de la recharge spatialisée de la nappe.

Le chapitre 4 présente la méthodologie et les résultats de la calibration du modèle v2 (2024). Après une première phase manuelle de calibration par essai et erreur, une phase de calibration assistée par un algorithme de la suite d’algorithmes PEST a été mise en oeuvre

¹ Anciennement appelé « pessimiste » dans les rapports de 2015

(PEST : Model-Independent Parameter Estimation and Uncertainty Analysis, <https://pesthomepage.org/>). Tous les points disposant d'au moins une mesure de niveau piézométrique sur la période 1977-2022 ont été considérés pour la calibration du modèle, soit pour le bassin houiller et pour l'ensemble des nappes 450 piézomètres en France et 71 en Allemagne. Les tendances d'évolution sont bien reproduites sur la plupart des points de mesure. Pour la nappe des GTI dans le maillage gigogne du bassin houiller (incluant les parties françaises et allemandes), la moyenne des médianes des écarts absolus pondérée par le nombre d'observations annuelles par chronique est de 2,64 m ; la moyenne des médianes des écarts absolus est de 3,58 m ; l'erreur quadratique moyenne (RMSE) est de 4,18 m.

Le chapitre 5 présente les objectifs et les résultats des deux simulations prévisionnelles réalisées à l'aide du modèle de la nappe des GTI v2 (2024) calibré jusqu'en 2022.

La première simulation prévisionnelle réalisée est nommée « tendancielle », elle est basée sur un scénario de prélèvements futurs constants dans la nappe des GTI et de niveau constant dans les réservoirs miniers, combiné à deux scénarios hydroclimatiques successifs décrivant les évolutions futures possibles de la recharge des nappes en tenant compte du changement climatique. Cette simulation prévisionnelle tendancielle n'a pas pour but de prévoir l'évolution future précise à long terme de la nappe des GTI année après année, car le calcul de cette évolution dépendrait trop fortement des hypothèses très incertaines qu'on pourrait formuler sur les évolutions futures à très long terme des entrées et sorties d'eau dans la nappe, et notamment des pompages et de la recharge. La simulation vise toutefois à fournir des informations très importantes sur l'évolution moyenne annuelle de la nappe ; sur le temps moyen qu'il faudra pour qu'elle remonte puis se stabilise ; sur la situation future de moyennes eaux après stabilisation ; sur une situation future possible de hautes eaux dans une période climatique de pluviosité exceptionnelle ; et sur la localisation des zones bâties soumises à un risque de remontée de nappe si aucun moyen de rabattement complémentaire à ceux déjà existants n'est mis en place.

Le nombre de bâtiments présents dans les mailles soumises à une remontée de nappe à moins de 3 m de profondeur pour les situations de moyennes eaux et de hautes eaux de la simulation tendancielle s'élèvent à près de 12500 bâtiments en moyennes eaux et 16000 bâtiments en hautes eaux, pour un total de 33 communes potentiellement concernées.

La deuxième simulation prévisionnelle réalisée est nommée « tendancielle avec solution de rabattement à 69 pompages », elle reprend les conditions de la simulation tendancielle en ajoutant une contrainte sur le niveau de la nappe des GTI : le niveau de la nappe ne doit pas se situer à une profondeur inférieure à 3 mètres, dans les zones bâties soumises à un risque de remontée de nappe déterminées par la simulation tendancielle et pour lesquelles l'Etat s'est engagé à mettre les moyens de rabattement nécessaires. Ces zones sont nommées « Zones d'engagement de l'Etat » et ont été fournies par la DREAL Grand Est.

Cette condition supplémentaire de non dépassement d'une cote altimétrique située à une profondeur de 3 mètres vise à identifier et dimensionner les moyens à mettre en œuvre pour protéger les infrastructures bâties souterraines (fondations, caves, parkings souterrains...), et doit s'appliquer durant toute la simulation tendancielle à partir de 2023, c'est-à-dire à toutes les situations de la nappe calculées par le modèle : phase transitoire de remontée de la nappe, quasi-stabilisation de la nappe (situation de moyennes eaux), situation exceptionnelle de hautes eaux.

L'objectif de la simulation consiste donc à rechercher l'emplacement des ouvrages de rabattement nécessaires, et à calculer pour chacun le volume à pomper chaque année, pour que la nouvelle condition soit respectée par le modèle, en tout temps et en tout point des zones d'engagement de l'Etat. Pour atteindre l'objectif, une méthode itérative a été appliquée. Au terme

de 37 itérations de simulation, 69 zones à protéger ont été identifiées, et les volumes à pomper annuellement ont été calculés. Il est à noter que le dimensionnement réel du réseau de pompages de rabattement doit faire l'objet d'études locales approfondies et d'une adaptation aux réalités de terrain actuelles et futures, pour tenir compte du ou des risques potentiels (sur tous types d'enjeux) résultant de la remontée de nappe.

Les résultats détaillés des simulations, ainsi que les résultats de l'ensemble du travail de modélisation effectué et décrit dans le présent rapport, ont été transmis sous forme numérique à GEODERIS.

Sommaire

1. Introduction.....	11
2. Le modèle régional de la nappe des GTI en Lorraine.....	15
2.1. LE RESERVOIR AQUIFERE DES GTI	15
2.2. REGIME DE LA NAPPE DES GTI	16
2.3. LE BASSIN HOUILLER LORRAIN	17
2.4. CONSEQUENCES DE L'EXPLOITATION DE LA NAPPE DES GTI.....	18
3. Révision du modèle v1 (2018) dans le bassin houiller aboutissant à la version v2 (2024).....	21
3.1. DESCRIPTION DES ELEMENTS CONSTITUTIFS DU MODELE REGIONAL	21
3.1.1. Conditions aux limites du modèle régional avant sa révision dans le cadre de la présente étude	21
3.1.2. Définition du maillage et de l'emprise du sous-maillage gigogne.....	25
3.1.3. Construction d'un modèle géologique dans l'emprise du sous-maillage gigogne.....	26
3.1.4. Modélisation du réseau hydrographique, des surfaces en eau permanentes, des carrières, des zones d'infiltration supplémentaire naturelles et anthropiques dans l'emprise du sous-maillage gigogne	28
3.1.5. Spécificités de modélisation induites par les affaissements miniers dans l'emprise du sous-maillage gigogne	31
3.2. MISE A JOUR DES DONNEES HYDROGEOLOGIQUES ET HYDROLOGIQUES SUR LA PERIODE 1968-2022	32
3.2.1. Constitution d'une base de données du modèle hydrogéologique MARTHE sous Excel	32
3.2.2. Introduction des nouvelles données acquises concernant la nappe des GTI.....	33
3.3. MODELE CONCEPTUEL D'ECOULEMENT DANS LE SECTEUR DU BASSIN HOUILLER.....	37
3.3.1. Echanges nappe-rivières	37
3.3.2. Echanges nappe-mine	41
4. Calibration du modèle MARTHE dans le bassin houiller et sa périphérie	45
4.1. METHODOLOGIE DE CALIBRATION	45
4.2. PARAMETRES HYDRODYNAMIQUES DU MODELE RETENUS A L'ISSUE DE LA CALIBRATION.....	46
4.3. DIFFICULTES PERSISTANTES ET INCERTITUDES	48

4.4. RESULTATS DE CALIBRATION.....	51
5. Simulations prévisionnelles	61
5.1. SIMULATION PREVISIONNELLE TENDANCIELLE	61
5.1.1.Objectifs de la simulation	61
5.1.2.Définition d'un scénario de prélèvements futurs : hypothèses de prélèvements futurs constants dans la nappe des GTI et de niveau constant dans les réservoirs miniers	62
5.1.3.Définition de deux scénarios hydroclimatiques successifs : hypothèses de recharge future des nappes.....	63
5.1.4.Résultats de la simulation prévisionnelle « tendancielle »	67
5.2. SIMULATION PREVISIONNELLE TENDANCIELLE AVEC SOLUTION DE RABATTEMENT.....	72
5.2.1.Objectifs de la simulation	72
5.2.2.Méthodologie itérative de la simulation.....	72
5.2.3.Résultats de la simulation	73
6. Conclusion	75
7. Bibliographie	79

Liste des illustrations

Illustration 1 : Cadre géographique de l'étude (Vautre et al., 2015)	11
Illustration 2 : 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.....	19
Illustration 3 : 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.....	19
Illustration 4 : 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	20
Illustration 5 : Tableau de synthèse des conditions aux limites du modèle régional de la nappe des GTI version 2005	23
Illustration 6 : Carte hydrogéologique de la nappe des GTI en Lorraine dans le bassin houiller et conditions aux limites du modèle régional avant leur révision dans les modèles v1 (2018) puis v2 (2024) (Vautre et al., 2007)	24
Illustration 7 : Extension du sous-maillage gigogne du bassin houiller à la commune de Grossbliederstroff pour la version v2 du modèle du bassin houiller.	25
Illustration 8 : Résultat de la calibration du modèle GARDENIA du bassin versant de la Rosselle à Forbach sur la période 2009-2019.	36
Illustration 9 : Résultat de la calibration du modèle GARDENIA du bassin de la Zorn à Saverne sur la période 2009-2019.	36

Illustration 10 : Paramètres de calibration des modèles GARDENIA des bassins versants de la Rosselle à Forbach et de la Zorn à Saverne sur la période 2009-2019.....	37
Illustration 11 : Synthèse des paramètres hydrodynamiques retenus à l'issue de la calibration du modèle hydrodynamique	46
Illustration 12 : Indicateurs de qualité de la calibration sur la période 1977-2022 pour les secteurs du maillage gigogne du bassin houiller (397 piézomètres) et le maillage principal du département de la Moselle (16 piézomètres).	53
Illustration 13 : Graphique de comparaison des moyennes des niveaux piézométriques observés et simulés sur la période 1977-2022 (un point sur le graphique représente un piézomètre), pour l'ensemble du modèle régional (507 points de mesures piézométriques de la nappe des GTI, des réservoirs miniers et des alluvions).	55
Illustration 14 : Graphique de comparaison des moyennes des niveaux piézométriques observés et simulés sur la période 1977-2022 (un point sur le graphique représente un piézomètre), pour la nappe des GTI dans le maillage gigogne du bassin houiller (372 points de mesures piézométriques de la nappe des GTI).....	55
Illustration 15 : Distribution de la médiane des valeurs absolues des écarts entre les niveaux piézométriques observés et simulés entre 1977 et 2022 pour l'ensemble du modèle régional (507 points de mesures piézométriques de la nappe des GTI, des réservoirs miniers et des alluvions) – Indicateurs statistiques associés (moyenne et moyenne pondérée).....	56
Illustration 16 : Distribution de la médiane des valeurs absolues des écarts entre les niveaux piézométriques observés et simulés entre 1977 et 2022, pour la nappe des GTI dans le maillage gigogne du bassin houiller (372 points de mesures piézométriques de la nappe des GTI) – Indicateurs statistiques associés (moyenne et moyenne pondérée).....	56
Illustration 17 : Evolution des termes du bilan hydrodynamique annuel calculés pour la période de calibration 1977-2022 pour l'ensemble du modèle régional, toutes nappes confondues (nappe des GTI, réservoirs miniers et nappe des alluvions). 57	57
Illustration 18 : Evolution des termes du bilan hydrodynamique annuel (zoom sans la courbe « Stockage dans les nappes ») calculés pour la période de calibration 1977-2022 pour l'ensemble du modèle régional, toutes nappes confondues (nappe des GTI, réservoirs miniers et nappe des alluvions). 57	57
Illustration 19 : Evolution des termes du bilan hydrodynamique annuel calculés pour la période de calibration 1977-2022 pour le maillage gigogne du bassin houiller (parties française et allemande) et pour la nappe des GTI (zone géométrique 12 du modèle). 58	58
Illustration 20 : Evolution des termes du bilan hydrodynamique annuel (zoom sans la courbe « Stockage dans les nappes ») calculés pour la période de calibration 1977-2022 pour le maillage gigogne du bassin houiller (parties française et allemande) et pour la nappe des GTI (zone géométrique 12 du modèle). 58	58
Illustration 21 : Graphiques en barres des termes du bilan des débits pour les années 1978 (année située au début de la période de calibration), 2010 (année située dans la période de baisse maximale des nappes du bassin houiller) et 2022 (année de fin de la période de calibration).....	59
Illustration 22 : Tableau des termes du bilan des débits pour les années 1978 (année située au début de la période de calibration), 2010 (année située dans la période de baisse maximale des nappes du bassin houiller) et 2022 (année de fin de la période de calibration).	60

Illustration 23 : Illustration des périodes successives de la simulation prévisionnelle tendancielle correspondant aux scénarios climatiques de moyennes eaux (en vert) et de hautes eaux (en violet). La période de calibration (en bleu) est ajoutée au début du graphique pour faire comprendre comment la simulation prévisionnelle se raccorde à la période de calibration.	63
Illustration 24 : Les 12 jeux de données climatiques DRIAS 2020 disponibles sur le site DRIAS (DRIAS, Les futurs du climat - Accompagnement (drias-climat.fr)).	64
Illustration 25 : Scénarios RCP (Representative Concentration Pathway) d'émission de gaz à effet de serre (DRIAS, Les futurs du climat - Accompagnement (drias-climat.fr)).	65
Illustration 26 : Comparaison des couples de modèles GCM/RCM DRIAS 2020 pour chaque saison, pour le scénario RCP 4.5. ΔT = écart de la température moyenne sur 30 ans par rapport à la période de référence 1976-2005 ; ΔP = écart relatif des précipitations sur 30 ans par rapport à la période de référence 1976-2005, indicateurs calculés sur les données corrigées et agrégé sur la France, pour chaque modèle individuellement pour la période 2071-2100 (20200914_DRIAS-ScenarioRCP4.5_support_selection_modeles_v3 (drias-climat.fr)).....	66
Illustration 27 : Evolution des termes du bilan hydrodynamique annuel (zoom sans la courbe « Stockage dans les nappes ») calculés pour l'ensemble du modèle régional, toutes nappes confondues (nappe des GTI, réservoirs miniers et nappe des alluvions), pour la période de calibration (1977-2022) suivie des deux périodes de la simulation tendancielle : remontée moyenne de la nappe jusqu'à quasi-stabilisation (2023-2147), période exceptionnelle de hautes eaux (2148-2167). ..	69
Illustration 28 : Evolution des termes du bilan hydrodynamique annuel (zoom sans la courbe « Stockage dans les nappes ») calculés pour le maillage gigogne du bassin houiller (parties française et allemande) et pour la nappe des GTI (zone géométrique 12 du modèle), pour la période de calibration (1977-2022) suivie des deux périodes de la simulation tendancielle : remontée moyenne de la nappe jusqu'à quasi-stabilisation (2023-2147), période exceptionnelle de hautes eaux (2148-2167). ..	70
Illustration 29 : Dénombrement par commune des bâtiments présents dans les mailles soumises à une remontée de nappe à moins de 3 m de profondeur, pour les situations de moyennes eaux et de hautes eaux de la simulation tendancielle. ...	71

Liste des annexes

Annexe 1 : Cartes et coupes hydrogéologiques d'information générale	83
Annexe 2 : Données géologiques du modèle MARTHE dans le bassin houiller.....	91
Annexe 3 : Données hydrogéologiques et hydrologiques du modèle MARTHE dans le bassin houiller	103
Annexe 4 : Résultats de la calibration du modèle MARTHE dans le bassin houiller et sa périphérie	111
Annexe 5 : Résultats des simulations prévisionnelles	145

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.



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'envoyage 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.

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 économies en eau constatée depuis plusieurs années jouent un rôle important dans l'évolution 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 de la nappe des GTI 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 « sécuritaire² ». Le rapport BRGM RP-67630-FR daté de 2018 présente le travail entrepris et les résultats obtenus. Le modèle correspondant à ce rapport de 2018 sera désigné

² Anciennement appelé « pessimiste » dans les rapports de 2015

dans la suite du présent rapport par « modèle des GTI du bassin houiller version 1 de 2018 », ou plus simplement modèle v1 (2018).

Le présent rapport BRGM RP-73887-FR présente les résultats de la mise à jour du modèle v1 (2018), dont le but est d'actualiser les prévisions de remontée de nappe et de fournir à GEODERIS les éléments lui permettant de dimensionner un réseau de surveillance de la nappe des GTI, et un réseau de protection de certaines zones bâties soumises à un risque de remontée de nappe. Le modèle correspondant au présent rapport sera désigné dans la suite du présent rapport par « modèle des GTI du bassin houiller version 2 de 2024 », ou plus simplement modèle v2 (2024).

2. Le modèle régional de la nappe des GTI en Lorraine

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 constraint 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 km^2), 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 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 Sarre³. 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 « plateuères » 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 Déarrangement 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 2, l'évolution des volumes prélevés sur la période 1968-2010 est présentée sur l'Illustration 3, et l'évolution de 1990 à 2012 du total des prélèvements effectués dans le bassin houiller est présentée sur l'Illustration 4.

³ Les puits Merlebach Nord et Saint-Charles 4 sont associés à une amodiation en territoire allemand.

Nature des prélevements	Département	Millions de m ³ /an	% du total
AEP-AEI	Sarre (Allemagne)	12,97	18,2
	Moselle (57)	48,38	68,0
	Meurthe-et-Moselle (54)	4,15	5,8
	Vosges (88)	5,70	8,0
	Total	71,2	100

Illustration 2 : Répartition des prélevements 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 prélevements destinés à l'alimentation en eau potable (AEP) ou industrielle (AEI), et des prélevements 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 prélevements 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.

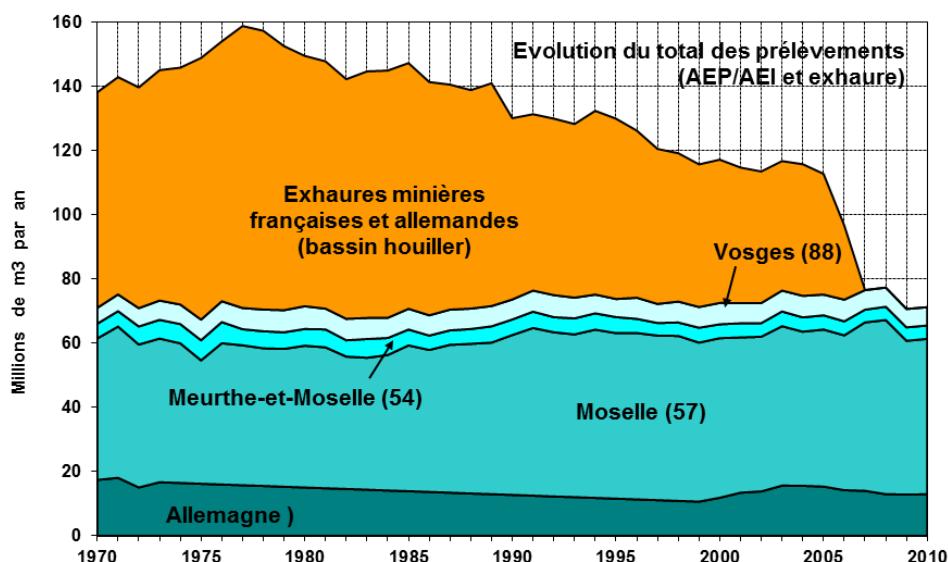


Illustration 3 : Evolution de 1968 à 2010 du total des prélevements effectués dans l'intégralité de la partie captive de la nappe des GTI, et dans sa partie libre au droit du bassin houiller lorrain

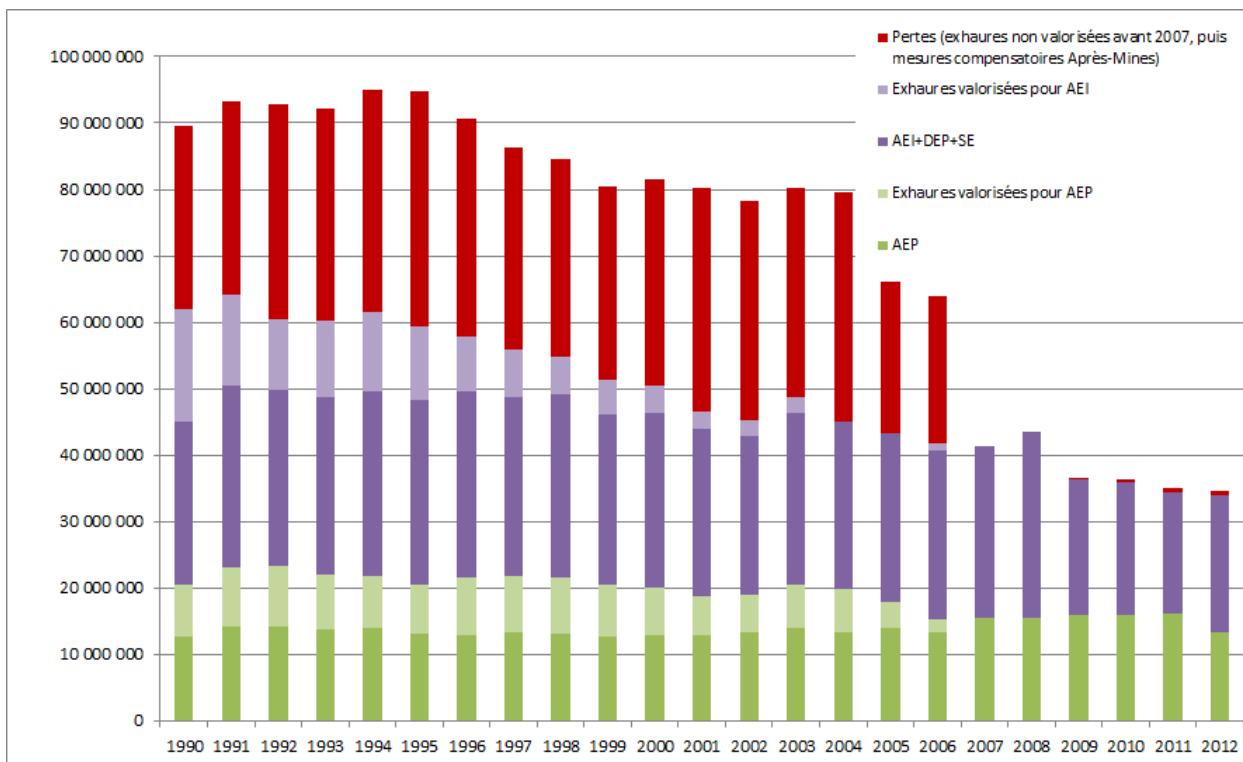


Illustration 4 : Evolution de 1990 à 2012 du total des prélèvements effectués dans le bassin houiller sous forme de pompages dans la nappe des GTI pour l'alimentation en eau potable (AEP) ou industrielle (AEI), le soutien d'étiage (SE) et les pompages de dépollution (DEP) ; ainsi que sous forme d'exhaures 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. Révision du modèle v1 (2018) dans le bassin houiller aboutissant à la version v2 (2024)

Dès 2015, pour répondre à la demande de GEODERIS, et améliorer la précision des prévisions dans le secteur Ouest du bassin houiller, une modification 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. 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 ultérieur réalisé en 2018 avait permis d'étendre les modifications de 2015 aux secteurs Centre et Est, d'apporter de nombreuses modifications supplémentaires, et de mettre à jour les données jusqu'à la date de 2016, aboutissant ainsi à la version 1 du modèle du bassin houiller (Guillemoto *et al.*, 2018).

Lors de la mise à jour du modèle v1 vers la version v2 du modèle du bassin houiller de 2024, de nombreuses modifications supplémentaires ou mises à jour ont été réalisées, elles sont décrites dans le présent chapitre. Les cartes des annexes 2 (données géologiques) et 3 (données hydrogéologiques et hydrologiques) illustrent le contenu de ce chapitre.

Nota bene : afin de conserver dans le présent rapport l'historique de la construction du modèle du bassin houiller et de ses différentes mises à jour, le texte de ce chapitre reprend l'essentiel du rapport de la version v1 du modèle (Guillemoto *et al.*, 2018), et est enrichi des modifications et ajouts effectués pour la version v2, qui seront à chaque fois signalés dans le texte.

3.1. DESCRIPTION DES ELEMENTS CONSTITUTIFS DU MODELE REGIONAL

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 5 et la carte de l'Illustration 6.

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 des grès 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. Lorsque la nappe des GTI est située sous des alluvions, le débordement des grès est interdit, car les alluvions comportent souvent un horizon imperméable. Cette condition est sécuritaire et permet de calculer le risque maximal de mise en charge de la nappe des GTI sous les alluvions. Par ailleurs, afin de représenter les cours d'eau majeurs pérennes du bassin houiller, des mailles-rivières sont introduites dans le modèle, généralement situées au droit des alluvions, en considérant une perméabilité de colmatage de fond de rivière. Les débits d'échange entre la nappe alluviale et les cours d'eau sont alors contrôlés par la valeur de perméabilité de colmatage du fond de rivière.

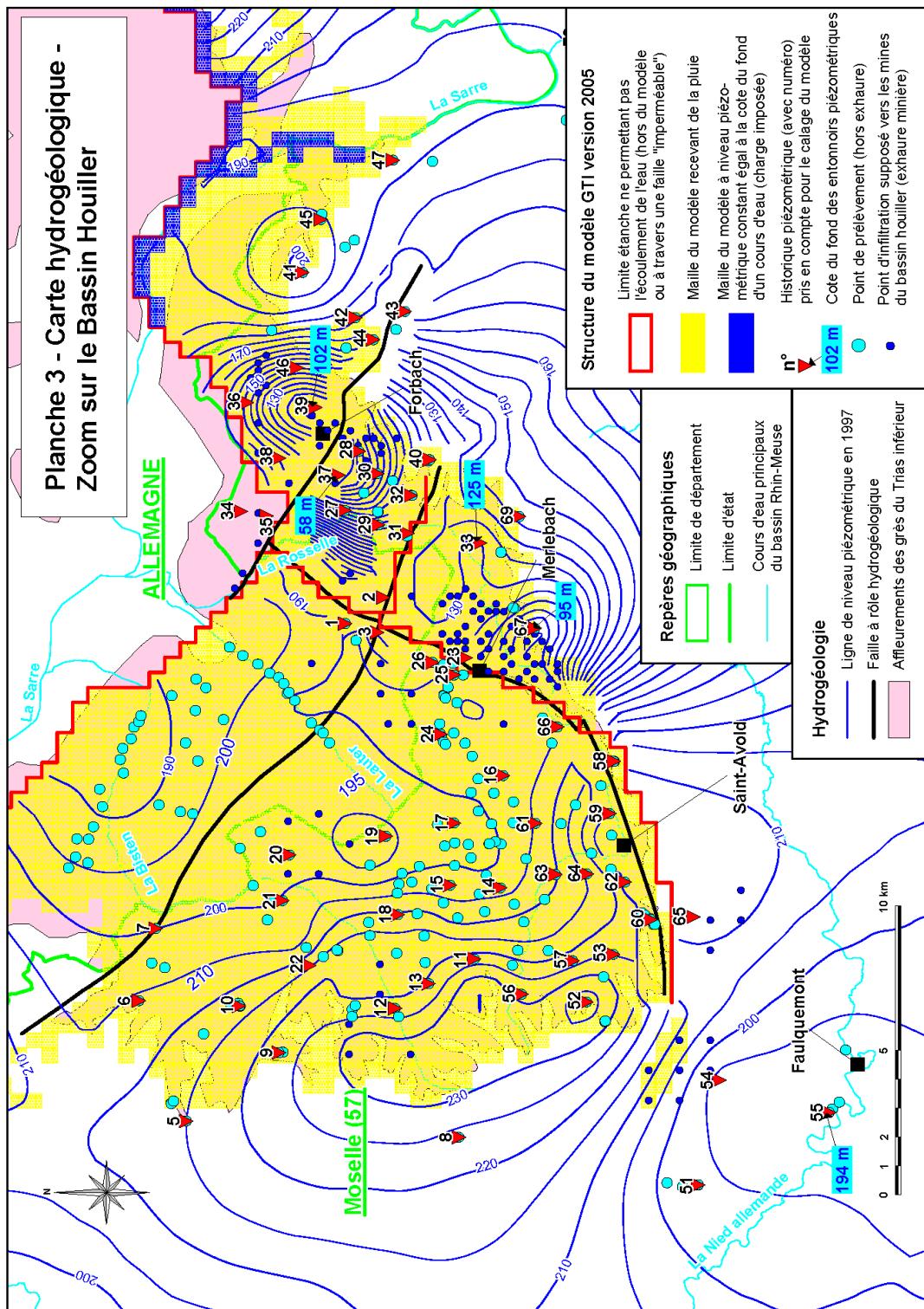
d) **Prise en compte de failles**

Les principales failles dont le rôle de barrière hydraulique était connu ou vraisemblable compte tenu des différences de niveau piézométrique que l'on pouvait observer de part et d'autre de ces accidents géologiques, avaient été prises en compte dans les modèles antérieurs à la version v1 (2018) 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 : on citera notamment 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 Déarrangement 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 : <ul style="list-style-type: none"> - massif des Vosges - cours d'eau drainants (Moselle, Sarre, Blies, Horn, Zorn et Zinsel) 	Charges imposées : <p>→ 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).</p>
Certains affleurements en limite nord, est et sud, dans les régions suivantes : <ul style="list-style-type: none"> - Bassin houiller - Phalsbourg – Saverne - Vittel – Contrexéville 	Zones de recharge (infiltration d'eau de pluie) : <p>→ hauteurs de pluie annuelle ajustées lors de la calibration du modèle et mises au regard des données fournies par Météo-France.</p>
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 : <p>→ 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).</p>
Limites sud et ouest de la nappe captive principalement	Limites à flux nul (limite étanche)

Illustration 5 : Tableau de synthèse des conditions aux limites du modèle régional de la nappe des GTI version 2005



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 large 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.
- Pour la version v2 (2024) du modèle mis à jour dans le bassin houiller, le maillage gigogne a été étendu sur sa bordure nord-est pour inclure la commune de Grosbliederstroff. Cette extension englobe la partie libre de la nappe des GTI dans la commune. Elle comprend également le Lixinger Bach au sud et la Sarre à l'est, afin d'améliorer la modélisation du réseau hydrographique dans ce secteur.

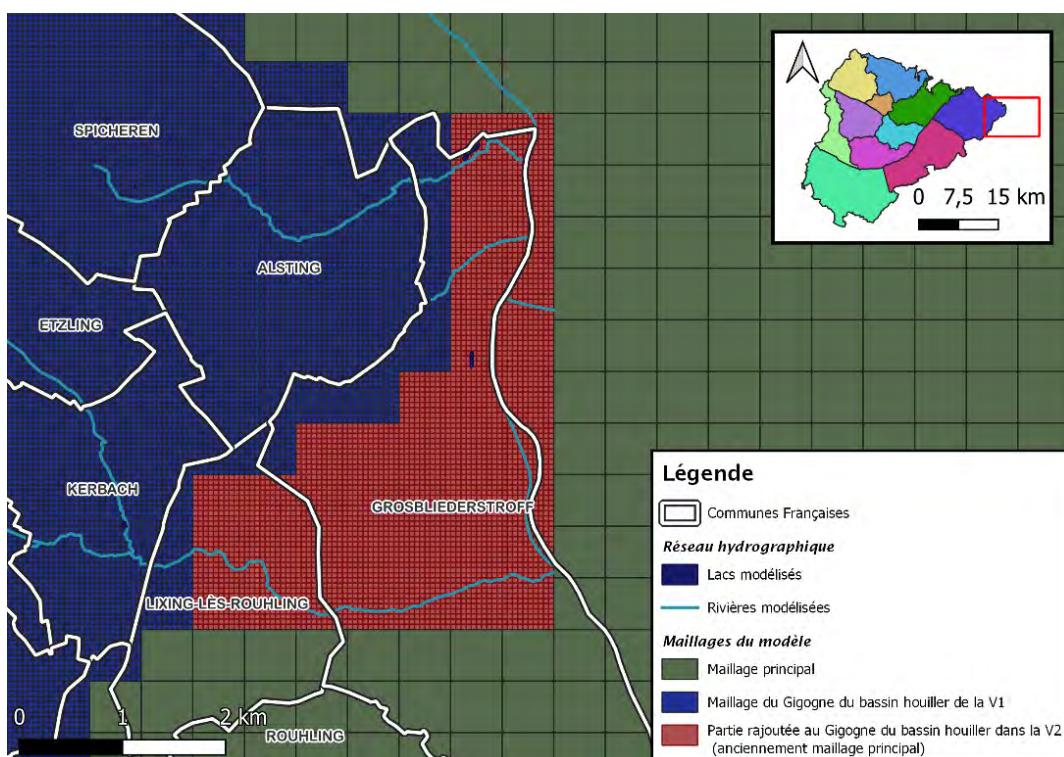


Illustration 7 : Extension du sous-maillage gigogne du bassin houiller à la commune de Grossbliederstroff pour la version v2 du modèle du bassin houiller.

La taille de maille du maillage régional du modèle v1 (2018) avait été divisée par 10, en passant d'une taille initiale de 500 m de côté à une 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 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 modèles numériques de terrain (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 version 1 entre 2015 et 2018, le modèle régional avait été converti dans la projection RGF93 - Lambert 93 / EPSG :2154 (les précédentes versions du modèle étaient en Lambert 2 étendu), de manière à le mettre en conformité avec la norme officielle française.

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 entre 2015 et 2018 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 isohypsés 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 modèle numérique de terrain (MNT).

A l'occasion de la refonte de la structure géologique du modèle du bassin houiller pour la version 1 du modèle du bassin houiller, il avait 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 une très grande valeur ajoutée aux résultats des simulations puisque les drainages de nappe par les cours d'eau sont correctement caractérisés, calculés à la bonne altitude et au bon emplacement géographique.

Toutefois, lors du travail réalisé pour la version v2 (2024) du modèle, il a été constaté des erreurs d'altitude en bordure du MNT LIDAR Français, dans la zone qu'il couvre en Allemagne. Ces erreurs n'avaient pas d'impact sur les résultats des simulations en France, mais par souci de cohérence le choix a été fait, pour la version v2 (2024) du modèle et pour le territoire allemand, de ne plus utiliser le MNT LIDAR français, et de le remplacer par le MNT LIDAR allemand. La topographie du modèle version 2 (2024) correspond ainsi au :

- minimum du MNT LIDAR 5 m français pour chaque maille de 50 x 50 m, dans le gigogne du bassin houiller côté français,
- minimum du MNT LIDAR 5 m allemand pour chaque maille de 50 x 50 m, dans le gigogne du bassin houiller côté allemand,
- minimum du MNT Lorraine IGN 25 m pour chaque maille de 500 x 500 m, dans le maillage principal.

Le choix d'attribuer, pour chaque maille, la valeur minimale des altitudes des points du MNT qui tombent dans son périmètre, est sécuritaire du point de vue de la remontée de la nappe. Cette approche sécuritaire est constante depuis la création du gigogne du bassin houiller dans le modèle, ainsi que dans les versions encore antérieures du modèle.

Une modification supplémentaire relative au MNT a été apportée au modèle version v2 (2024), sans impact sur les calculs. La « topographie » du modèle version v1 (2018), qui décrit la surface supérieure du domaine modélisé, correspondait au MNT LIDAR au droit des affleurements des GTI ou des alluvions, et à la cote du toit des grès lorsqu'ils sont sous couverture du Muschelkalk et des terrains sus-jacents. Pour déterminer la profondeur de la nappe par rapport au sol, un calcul manuel était systématiquement opéré, ce qui pouvait entraîner des erreurs. Afin d'éviter ce problème et de permettre la représentation de la géométrie de l'ensemble des couches de couverture des GTI, la couche 1 du modèle version v2 (2024) correspond désormais aux terrains de couverture de la formation des grès du Trias. Cette modification permet de connaître l'épaisseur des terrains de couverture en tout point du modèle. Il faut bien noter que les écoulements ne sont pas considérés dans cette couche de couverture dont la base est réputée imperméable : lorsqu'elle existe la couche de couverture est considérée comme inerte dans les calculs, elle constitue aussi une barrière imperméable empêchant tout échange entre la surface du sol et la couche des GTI.

c) **Modélisation de la couche superficielle alluvionnaire**

La couche alluvionnaire présente dans la version v1 du modèle (2018) avait été définie par une méthodologie (Cartannaz, 2018) dont les résultats n'étaient pas satisfaisants dans certaines zones, notamment en ce qui concerne certaines zones « planes » identifiées à tort comme terrasses alluviales secondaires déconnectées du réseau hydrographique. La méthodologie a donc été révisée, et les contours de la couche ainsi que son épaisseur ont donc été entièrement redéfinis. La révision des contours de la couche alluvionnaire s'est déroulée en plusieurs étapes successives :

- **Côté allemand**, sélection des contours des alluvions selon la carte géologique allemande au 1/200 000,
- **Côté français**, sélection des contours de la géologie harmonisée du BRGM au 1/25 000,
- De manière analogue à la méthode mise en œuvre pour le rapport du modèle v1 (2018), **vérification de l'existence de zones alluviales potentielles en recherchant les zones planes par calcul de la pente du MNT Lidar** : dans les fonds de vallées, les zones planes de pente inférieure à 1 degré sont considérées comme potentiellement alluviales ; puis une analyse géomorphologique et l'analyse de photos aériennes permet de confirmer ou non le caractère alluvial des surfaces ; enfin les contours des zones planes sont éventuellement dessinés manuellement pour corriger les contours des cartes géologiques,
- **Correction supplémentaire éventuelle des contours des alluvions pour respecter les courbes de niveau du MNT** : notamment, lorsque des langues alluvionnaires issues des cartes géologiques traversaient les courbes de niveau, elles ont été déplacées en fond de vallée et modifiées pour suivre les courbes de niveau, pour garder une cohérence avec leurs conditions de dépôt.

On trouvera en annexe 2 deux cartes des nouveaux contours géologiques des alluvions dans le bassin houiller considérés dans le modèle v2 - 2024, montrant les classes d'épaisseur considérées dans le modèle et les zones estimées de présence d'un horizon imperméable selon les observations dans les sondages géologiques disponibles.

Dans les zones de vallées du bassin houiller, les alluvions reposant sur l'aquifère des GTI peuvent influencer localement la nappe des GTI selon leur épaisseur (jusqu'à 15 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. Cette limitation des échanges étant insuffisamment connue dans son extension spatiale, une condition sécuritaire est appliquée et le débordement de la nappe de GTI vers les alluvions est interdit lorsque les deux nappes sont en contact, ce qui provoque le cas échéant la mise en charge locale de la nappe des GTI sous les alluvions lorsque le niveau de la nappe des GTI dépasse le toit des grès (notamment en phase de remontée de la nappe). Lorsque la nappe des GTI est déconnectée de la nappe des alluvions (c'est-à-dire que la nappe des GTI est plus basse que le toit des grès sous les alluvions, les échanges d'eau descendants des alluvions vers les grès sont réglés par un critère d'anisotropie de perméabilité verticale de la nappe des alluvions qui fait l'objet d'une calibration).

3.1.4. **Modélisation du réseau hydrographique, des surfaces en eau permanentes, des carrières, des zones d'infiltration supplémentaire naturelles et anthropiques dans l'emprise du sous-maillage gigogne**

a) Modélisation du réseau hydrographique

Dans le modèle v1 (2018), toutes les surfaces en eau (lacs, retenues d'eau, rivières) étaient modélisées comme des rivières du point de vue du code de calcul MARTHE. Leur rôle majeur était d'échanger avec la nappe sous-jacente, participant ainsi à son drainage ou à son alimentation. Cependant, le niveau de toutes ces surfaces en eau demeurait constant, ne rendant pas compte des variations temporelles et du réel impact du ruissellement superficiel. De ce fait, il était impossible de calculer le débit transitant dans les rivières.

Dans cette mise à jour du modèle, le réseau hydrographique a été complètement remanié, avec l'utilisation d'objets de modélisation adaptés afin de reproduire de manière plus réaliste le comportement naturel du réseau.

L'objet « rivière » de MARTHE était également utilisé afin de modéliser un surplus d'infiltration en pied de côte de la nappe du Muschelkalk (drainance, infiltration du ruissellement), ce n'est plus le cas dans la version v2 (2024) du modèle (cf. ci-après).

Le réseau des rivières a subi les modifications suivantes :

- tracé du réseau : seules les rivières référencées par la BD_TOPAGE comme permanentes ont été retenues pour le réseau. Une vérification par photographie satellite a été effectuée en cas de doute,
- largeur de la rivière : la largeur de chaque tronçon de rivière a été mesurée sur photo satellite,
- longueur du tronçon de rivière sur la maille : étant donné qu'il est possible d'attribuer seulement une unique rivière par maille du modèle, la somme des longueurs de toutes les rivières traversant cette maille a été attribuée à celle-ci.

b) Modélisation des surfaces en eau permanentes

L'objet « lac » récent de MARTHE a été utilisé pour modéliser les dépressions topographiques en eau permanentes. Les propriétés principales d'un objet « lac » sont les suivantes :

- un lac est composé d'un ensemble de mailles de la couche affleurante, toutes caractérisées par une altitude d'eau uniforme,
- l'altitude du fond du lac correspond à l'altitude de la topographie du modèle ; il a donc été nécessaire de surcroiser le MNT pour créer une profondeur de lac,
- un lac peut recevoir les débits de rivières en amont,
- il peut également posséder un exutoire, par lequel le débit sortant transite à l'amont une rivière, ou vers un autre lac,
- les échanges entre un lac et la nappe sous-jacente s'effectuent à travers le lit du lac, de la manière similaire aux échanges entre un cours d'eau et la nappe,
- enfin, un lac peut s'assécher localement ou totalement.

Les lacs ont été identifiés grâce à la BD TOPAGE. Seuls ceux caractérisés comme permanents et situés à l'affleurement des GTI ou des alluvions ont été retenus. Une vérification des données a été effectuée à l'aide d'images satellite actuelles et historiques afin de ne conserver seulement les lacs pertinents.

Dans cette version du modèle, l'objet "lac" a été appliqué de manière polyvalente, couvrant trois cas de figure distincts. Tout d'abord, il est utilisé pour des lacs connectés au réseau de rivières,

comme c'est le cas, par exemple, des retenues d'eau telles que le lac de Creutzwald, ou des lacs formés suite à des affaissements miniers. Le deuxième cas concerne les lacs déconnectés du réseau de rivières, tels que les étangs ou des lacs naturels résultants de la convergence des eaux de pluies. Enfin, le troisième cas correspond aux dépressions topographiques majeures du bassin houiller identifiées par GEODERIS comme potentiellement ennoyées dans le futur (carrières). Ces types de lacs sont considérés comme secs au début des simulations, puis leur niveau d'eau augmente conjointement avec la remontée globale de la nappe. C'est le cas, par exemple de la carrière Simon qui présente d'ores et déjà un lac en fond dont le niveau ne cesse d'augmenter.

c) *Calcul des débits dans les cours d'eau*

Dans le code MARTHE, il est possible de créer un arbre de branchement entre les différentes rivières et lacs du réseau afin d'optimiser les calculs des directions de ruissellement, et d'assurer une continuité dans les débits transitant d'une rivière à l'autre. Par exemple, s'il est connecté au réseau, le débit à la sortie d'un lac doit en théorie se retrouver à l'amont de la rivière qui le suit dans l'arbre de branchement. Cependant, cette version du modèle n'a pas abouti à un calcul correct des débits à la sortie des lacs ce qui fausse les débits calculés dans les rivières. Il est important de noter que cela impacte peu la calibration, car les échanges entre le réseau hydrographique et la nappe ne dépendent pas du débit des mailles « rivières » du modèle.

d) *Modélisation des dépressions topographiques du bassin*

Les principales dépressions topographiques présentes dans le périmètre d'étude, notamment les gravières et carrières utilisées pour l'industrie minière, avaient été prises en compte dans le modèle v1 (2018) sous la forme de groupes de mailles à seuils de débordement imposés par la topographie (sur la base des données LIDAR). Lors de la mise à jour du modèle v1 vers la version v2 (2024), la modélisation explicite des dépressions topographiques sous la forme de « lacs » dans le modèle a permis de simplifier la gestion de ces objets. Le fond des objets « lacs » du modèle possède une perméabilité qui règle l'échange d'eau avec la nappe sous-jacente (généralement la nappe des GTI), ces « lacs » peuvent être vides ou pleins, et si la dépression se remplit et vient à déborder, le débordement se produit vers le réseau hydrographique par le point de la topographie le plus bas du périmètre du « lac », c'est-à-dire que le débordement est contrôlé par le MNT introduit dans le modèle (rappelons qu'il s'agit pour chaque maille du modèle de l'altitude minimale des points du MNT LIDAR qui tombent dans la maille).

e) *Modélisation des bassins d'infiltration*

Au cours du processus de calibration, des déficits significatifs de recharge de la nappe des GTI ont été constatés dans certaines zones, pendant une période définie. Ce phénomène avait été en partie identifié dans la précédente version v1 (2018) du modèle, et attribué à des bassins de décantation perdant de l'eau vers la nappe.

Dans la version actuelle du modèle v2 (2024), les bassins contribuant à ces infiltrations ont pu être clairement localisés grâce à l'analyse des chroniques de piézomètres présentant des niveaux anormalement élevés qui ne pouvaient être reproduits avec des paramètres hydrodynamiques classiques. Une analyse des photos aériennes historiques a permis pour chaque bassin de définir une période d'activité. Quant aux valeurs des flux d'infiltrations, elles ont fait partie du processus de calibration. Les flux d'infiltration ont probablement fortement varié dans le temps, et la calibration des piézomètres concernés est difficile à reproduire manuellement.

f) **Modélisation de l'infiltration en pied de côte du Muschelkalk**

Au cours des précédentes mises à jour du modèle, la nécessité d'avoir une infiltration supplémentaire au pied du Muschelkalk avait été identifiée. Dans version v1 (2018), l'approche choisie était l'ajout de rivières fictives qui infiltreraient de l'eau vers la nappe. Cette approche a été modifiée pour plus de cohérence et a été remplacée dans la version v2 (2024) par l'ajout d'un flux d'infiltration à l'emplacement des anciennes rivières fictives. Les valeurs de ces flux ont été calculées de manière à reproduire les débits qu'échangeaient les anciennes rivières fictives avec la nappe.

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

a) **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 français⁴.

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 surrection⁵ ultérieurs sont considérés comme négligeables pour l'objectif de modélisation hydrogéologique poursuivi dans la présente étude. Le MNT est donc supposé invariant après 2005.

Les données chronologiques d'affaissement (différence d'altitude entre les points de nivelllements 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

⁴ Amodiatis inclusions

⁵ Voir Reichart, 2015f.

(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.). Contrairement à la version v1 du modèle, où sur la frange de coexistence des données franco-allemandes le choix avait été fait de retenir les données françaises considérées comme plus fiables, pour cette version v2 (2024) du modèle le MNT allemand a été retenu pour tout le territoire allemand, en raison des erreurs repérées sur le MNT français sur sa limite en territoire allemand.

b) 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.

c) 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.

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 de cartographie Qgis.

3.2. MISE A JOUR DES DONNEES HYDROGEOLOGIQUES ET HYDROLOGIQUES SUR LA PERIODE 1968-2022

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 identifiant national et leur code BSS⁶, ce qui évite 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. L'identifiant national unique permet aussi d'accéder immédiatement aux données bancarisées notamment dans la BSS et dans ADES⁷.

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 2022 voire 2023 pour certaines données disponibles. Dans le bassin houiller exclusivement, cette mise à jour a concerné 613 points en France (cf. tableaux de l'annexe 3). 74 points en Allemagne n'ont pas été mis à jour car les données correspondantes n'ont pas pu être obtenues. Toutefois, ces points situés dans la partie allemande du bassin houiller se trouvent essentiellement à l'aval des écoulements de surface et souterrains en provenance de la partie française ; par ailleurs l'historique des données acquises antérieurement est long (1977-2016) : ainsi, l'absence de mise à jour des données allemandes n'a pas été jugée préjudiciable à la bonne réalisation de l'étude.

Les données mise à jour sont les suivantes :

- Niveaux piézométriques mesurés jusqu'en 2022 sur les points de la nappe des GTI appartenant au réseau piézométrique suivi par le BRGM Grand Est,
- Volumes annuels prélevés jusqu'en 2022, 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 2022, 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 DPSM ; chaque nouveau point a été vérifié et a été mis en correspondance avec son code national BSS,

⁶ Banque du Sous-Sol (BRGM)

⁷ Banque nationale d'Accès aux Données sur les Eaux Souterraines (BRGM)

Pour mémoire, certaines données anciennes prises en compte par le modèle ne sont pas mises à jour car la mesure n'est plus possible, il s'agit notamment des 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 :

$$Q_T = Q_0 \times ((100 - \% \text{ réduction}) / 100) (T - T_0)$$

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

Q_0 = débit initial de la venue d'eau mesuré lors de l'année T_0

% 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 quarantaine 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 la version v1 (2018) du modèle du bassin houiller, une amélioration très significative avait été apportée : la recharge où la nappe est libre était 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'ETP⁸ fournies par MétéoFrance. La recharge appliquée au modèle hydrogéologique était calculée en utilisant la méthode de Thornthwaite (1955) pondérée d'un coefficient calibré (de l'ordre de 0,5 sur le bassin houiller). Celle-ci était 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'appliquait uniquement aux affleurements des niveaux géologiques gréseux compris entre le Muschelkalk inférieur (grès Coquiller) et le grès Vosgien inclus.

Cette approche restait cependant définie par le schéma le plus simple et pouvait être consolidée en utilisant le schéma du réservoir sol à capacité progressive du modèle GARDÉNIA inclus dans MARTHE. Pour cette version v2 (2024) du modèle, le calcul de la recharge et du ruissellement superficiel a donc été effectué grâce à la fonction « bilan hydroclimatique » de MARTHE. Ce calcul est réalisé à partir :

- de données climatiques :
 - précipitations liquides,
 - précipitations neigeuses,
 - flux d'évapotranspiration (ETP),
 - température de l'air (si la fonte des neiges est prise en compte),
- de paramètres de bilan hydroclimatique :
 - une capacité de rétention du sol qui peut être une « réserve progressive du sol » ou un « déficit maximal du sol » de type « réserve utile »,
 - un paramètre de répartition de l'excédent de pluie en ruissellement et infiltration.
 - un temps de demi-percolation de l'infiltration vers la nappe qui règle la recharge de la nappe.

Ce calcul n'est pas réalisé dans chaque maille du domaine, mais dans deux types de zones (cf. cartes en annexe 3) :

- « Zones Météo » dans lesquelles les données climatiques sont uniformes,
- « Zones de Sol » dans lesquelles les paramètres de bilan hydroclimatique sont uniformes.

Un bilan hydroclimatique est réalisé pour chaque zone hydroclimatique du modèle, qui correspond à l'intersection entre une zone météo et une zone de sol du modèle, soit un total de $n_{Zone\ de\ sol} \times n_{Zone\ Meteo}$ bilans à chaque pas de temps, indépendamment du nombre de mailles.

Les données climatiques intégrées au modèle, incluant la pluie totale et l'évapotranspiration potentielle (ETP), proviennent de Météo-France. Ces flux sont disponibles à l'échelle d'une maille SAFRAN numérotée, issue d'une grille régulière de 8 km x 8km au sein de laquelle ils sont constants et homogènes. Ces mailles SAFRAN ont donc été conservées en tant que « Zones Météo » dans le modèle.

⁸ Evapotranspiration potentielle

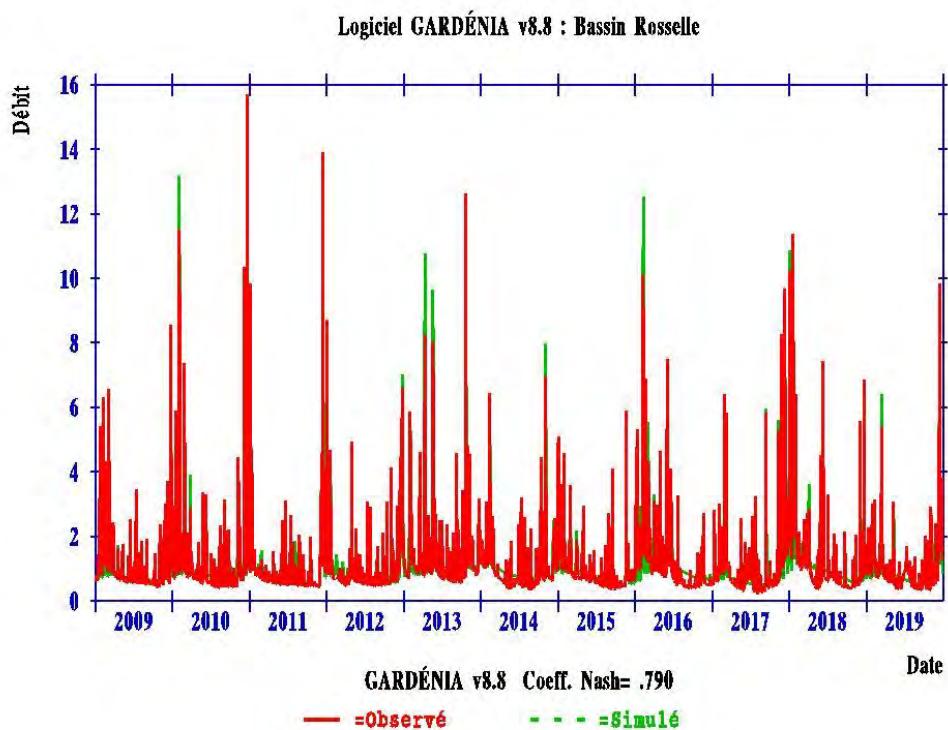


Illustration 8 : Résultat de la calibration du modèle GARDENIA du bassin versant de la Rosselle à Forbach sur la période 2009-2019.

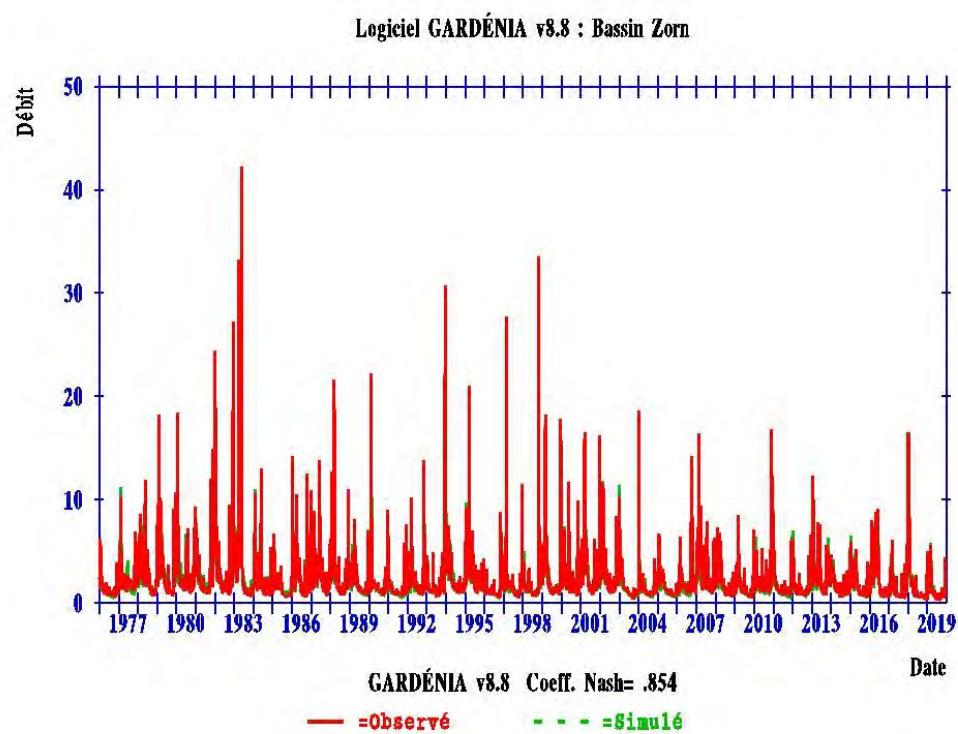


Illustration 9 : Résultat de la calibration du modèle GARDENIA du bassin de la Zorn à Saverne sur la période 2009-2019.

Les zones de sol ont été définies en s'appuyant sur les données de différentes stations hydrométriques (cf. cartes en Annexe 3) : la Bisten à Creutzwald, la Rosselle à Forbach, la Zorn à Saverne. Afin de déterminer les valeurs des paramètres hydroclimatiques, des modèles GARDENIA ont été construits pour leur bassin versant : bassin versant de la Bisten à Creutzwald, bassin versant de la Rosselle à Forbach et bassin versant de la Zorn à Saverne, ce dernier modèle ayant pour objectif de calculer le bilan hydroclimatique pour les zones situées à l'est du maillage principal.

Les modèles GARDENIA de la Rosselle et de la Zorn ont présenté de bons résultats de calibration (Illustration 8 et Illustration 9). En revanche, le modèle de la Bisten n'a pas été concluant, principalement en raison de l'influence passée des diverses exhaures du secteur sur les débits observés à la station. Compte tenu de la qualité des résultats obtenus, les paramètres hydroclimatiques calculés par le modèle GARDENIA de la Rosselle ont été appliqués à l'ensemble du bassin houiller ainsi qu'aux zones de sol de la partie nord-est du maillage principal. De la même manière, les résultats du modèle de la Zorn ont été appliqués à la partie est du maillage principal.

	Temps de demi-percolation (mois)	Equi ruissellement / percolation (mm)	Capacité du sol progressive (mm)
Zorn	0.049	49.88	173.37
Rosselle	0.59	38.98	277.16

Illustration 10 : Paramètres de calibration des modèles GARDENIA des bassins versants de la Rosselle à Forbach et de la Zorn à Saverne sur la période 2009-2019.

Afin de calculer l'évolution annuelle des flux de ruissellement et d'infiltration pour chaque zone hydroclimatique (intersection d'une zone de sol et d'une zone météo du modèle MARTHE), le bilan hydroclimatique utilisant les paramètres des modèles GARDENIA ont été pré-calculés par une simulation spécifique à un pas de temps mensuel pour accroître la précision des calculs. Une fois les flux mensuels ruissellement et d'infiltration obtenus, ils ont été cumulés pour obtenir des valeurs annuelles en mm/an.

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 retenus pour le modèle du bassin houiller v1 (2018) et conservés pour le modèle v2 (2024) 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 sous-jacente. 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 (Vautre 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 (01392X0032⁹) 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.

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 les contours cartographiques des alluvions et de caractériser la présence d'un horizon imperméable au sein des alluvions à partir des informations ponctuelles disponibles (forages de la BSS et sondages carottés). Pour la version actuelle v2 (2024) du modèle MARTHE, les contours des alluvions et la caractérisation ont été corrigés. **Compte-tenu du caractère ponctuel des informations disponibles sur la présence ou non d'un horizon imperméable, la possibilité de mise en charge de la nappe des GTI sous les alluvions a été étendue à l'ensemble des alluvions du bassin houiller, sous la forme d'une interdiction du débordement de la nappe des GTI sous les alluvions. Cette approche simplificatrice est sécuritaire du point de vue du risque de remontée de la nappe des GTI.**

Pour ce qui concerne les grès moins perméables, plusieurs points de piézométrie anormalement hautes à l'échelle du bassin pourraient être reliés 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, ces

⁹ Voir aussi Reichart, 2017a.

piézométries n'ont pas été considérées comme représentatives d'une zone suffisamment grande de la nappe des GTI pour que nous cherchions à les reproduire.

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.

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 dans les versions antérieures à la version v1 (2018) 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 intégrées à la modélisation depuis la version v1 (2018) du modèle.

Dans le secteur de la nappe alluviale de la Bisten au niveau de l'agglomération de Creutzwald, 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 $3 \text{ à } 6.10^{-5}$ 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 (cf. 2^{ème} carte en annexe 4) (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 de la portion canalisée du centre-ville ; elle était située 1,3 m sous le fond du canal, et au même niveau que la Bisten en aval de la portion canalisée (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 infiltrants, 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 la fonctionnalité « réseau hydrographique » de MARTHE, qui permet de calculer le sens et la valeur des débits échangés entre la rivière et la nappe sous-jacente (c'est-à-dire la nappe alluviale en général, car dans le bassin houiller la nappe des GTI est rarement directement en contact avec une 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 encore pu être modélisé dans la version actuelle v2 (2024), le transfert d'eau au travers des objets « lacs » connectés aux tronçons de cours d'eau ne se faisant pas correctement. Par ailleurs, le débit qui serait modélisé serait très différent du débit réel s'écoulant dans les cours d'eau dans tous les tronçons 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 :

$$\text{Débit}_{\text{venue d'eau}} = K_v \times \text{Surface}_{\text{d'échange}}$$

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 $T_v = K_v \times \text{Epaisseur}_{\text{Permien}}$. 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 envoys), 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 variables simulées sur les données observées (niveaux piézométriques notamment). La calibration du modèle régional dans le bassin houiller nécessite de très nombreux essais 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 1977-2022 ont été considérés pour la calibration du modèle, soit pour le bassin houiller et pour l'ensemble des nappes 450 piézomètres en France et 71 en Allemagne (cf. le décompte des piézomètres par nappe et par pays dans les 2 tableaux des points de donnée du bassin houiller en annexe 3).

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 calibrées en même temps que les secteurs du bassin houiller.

Après une première phase manuelle de calibration par essai et erreur, une phase de calibration assistée par un algorithme de la suite d'algorithmes PEST a été mise en oeuvre (PEST : Model-Independent Parameter Estimation and Uncertainty Analysis, <https://pesthomepage.org/>). La méthode numérique utilisée vise à optimiser les paramètres hydrodynamiques du modèle de manière à minimiser la différence entre les prédictions du modèle et les données observées. Une interface spécifique a été utilisée pour permettre un « dialogue » entre l'algorithme PEST et le modèle MARTHE (PyMarthe). Le processus est fondamentalement équivalent à une calibration manuelle, et consiste à opérer des itérations de modification du modèle conceptuel, d'ajustement des paramètres hydrodynamiques, puis d'évaluation du résultat ; toutefois, lors de la phase d'ajustement des paramètres hydrodynamiques, grâce à la réalisation automatique de milliers de tests de calibration au lieu d'un seul test, l'algorithme d'optimisation peut trouver une solution optimale impossible à trouver manuellement. Ce système d'optimisation est complexe à mettre en œuvre et gourmand en puissance de calcul, c'est pourquoi les calculs ont été réalisés à distance sur un puissant serveur de calcul.

Dans cette version v2 (2024) du modèle, la méthode de modélisation des failles a été modifiée. En effet, deux types de failles sont identifiées dans le bassin houiller : les failles imperméables, qui bloquent totalement les écoulements, et les failles semi-perméables à travers lesquelles un flux d'eau peut transiter. Avec le code MARTHE, le moyen classique de modéliser une faille semi-perméable est d'attribuer une perméabilité plus faible que la matrice poreuse environnante sur trois rangées de mailles, le long du linéaire de la fracture. Le BRGM a développé en 2022, dans le cadre de la première phase d'une étude d'analyse de la sensibilité du rôle des failles dans le

bassin houiller (Vaute et Morin, 2022), un nouvel objet de modélisation « fracture semi-perméable » destiné à supprimer les limitations de l'approche habituelle consistant à attribuer une perméabilité très faible à trois rangées de mailles suivant le tracé de la faille. Toutes les failles du modèle v2 (2024) ont été modélisées par ce nouvel objet, en attribuant à chacune une perméabilité équivalente à celle des trois rangées de mailles du modèle v1 (2018). La perméabilité des failles n'a pas fait l'objet d'une optimisation assistée par un algorithme PEST, car les premiers essais ont montré que la trop forte corrélation de la perméabilité des fractures avec celles des grès empêche une optimisation correcte. L'ajustement de la perméabilité des objets « fractures semi-perméables » de MARTHE a donc été réalisée manuellement, à partir des valeurs initiales issues du modèle v1 (2018).

La très grande quantité de données à visualiser pour évaluer la qualité de la calibration obtenue a nécessité le développement d'un outil spécifique d'interfaçage entre un logiciel de cartographie (Qgis) 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.

4.2. PARAMETRES HYDRODYNAMIQUES DU MODELE RETENUS A L'ISSUE DE LA CALIBRATION

Les paramètres hydrodynamiques retenus dans l'ensemble du modèle pour les couches aquifères des GTI et des alluvions sont synthétisés dans l'illustration 11 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. Les cartes des perméabilités de la couche des GTI et des failles figurent en annexe 4.

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	$0,4 \cdot 10^{-5}$	10	$10 \cdot 10^{-4}$	$2,9 \cdot 10^{-5}$ à $2 \cdot 10^{-2}$
GTI	0,1 à $10 \cdot 10^{-5}$	10	$1 \cdot 10^{-4}$	$3,75 \cdot 10^{-6}$ à 3,42
Mines	$46,5$ à $500 \cdot 10^{-5}$	Non concerné	0,8 à $1 \cdot 10^{-4}$	$2,4 \cdot 10^{-7}$ à 0,187

Illustration 11 : 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.
- La position et le débit des points d'échange nappe-mine dans les secteurs Centre et Est des réservoirs miniers : 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 : 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

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 de tous les historiques piézométriques présents dans un secteur donné. 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 certaines zones.
- 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 une amplitude de 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), 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 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 déstructurer les horizons superficiels même imperméables et que l'eau puisse se frayer un chemin jusqu'à la surface. 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'écartier la possibilité de mises en charge localisées de la nappe associée (voir §3.3.1.b). A l'exception d'un unique secteur, 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 tient lui-même compte d'un scénario de changement climatique qui pourrait être inexact et viendrait 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, 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

a) *Cartes comportant un graphique d'appréciation visuelle de la qualité de la calibration pour chaque piézomètre*

On rappelle en préambule que les « observations » intervenant dans les calculs et présentées dans les graphiques sont des **moyennes annuelles** des mesures piézométriques effectuées sur le terrain, pour permettre la comparaison avec les niveaux piézométriques calculés par le modèle MARTHE, qui effectue les calculs hydrodynamiques au pas de temps annuel. La majorité des piézomètres ayant été mesurés 1 à 2 fois par an au maximum (parfois beaucoup moins, tous les 5 à 10 ans par exemple), le choix d'un pas de temps annuel de calcul hydrodynamique est cohérent avec les données disponibles.

L'une des spécificités du modèle des GTI est de permettre l'appréciation visuelle de la qualité de la calibration pour chaque piézomètre par comparaison des chroniques piézométriques calculées sur la période 1977-2022 avec les chroniques observées sur la même période, ces dernières étant de fiabilité et de complétude variable, certaines chroniques observées pouvant ne comporter qu'une ou deux mesures piézométriques très anciennes ou au contraire très récentes. Les graphiques sont présentés sur la carte du secteur correspondant (cf. cartes en annexe 4), ce qui permet une évaluation visuelle intégrant à la fois l'espace (la localisation du piézomètre sur la carte) et du temps (les chroniques piézométriques observées et calculées correspondantes). L'annexe 4 comporte une carte d'appréciation visuelle de la qualité de la calibration pour : la nappe des GTI pour chacun des 11 secteurs du sous-maillage gigogne ; les réservoirs miniers ; la nappe alluviale ; le maillage principal dans 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 calculées par le modèle MARTHE pour les années 1977, 2010 et 2022.

b) *Graphiques de comparaison des moyennes des niveaux piézométriques observés et simulés*

La qualité de la calibration d'un modèle est habituellement évaluée graphiquement à l'aide d'un graphique de comparaison des moyennes des niveaux piézométriques observés et simulés. Ces graphiques sont présentés sur l'Illustration 13 et l'Illustration 14 et concernent l'ensemble du modèle toutes nappes confondues, ainsi que la nappe des GTI dans le maillage gigogne du bassin houiller (parties françaises et allemandes), pour la période de calibration 1977-2022. On peut constater que le modèle calibré ne comporte pas de biais, les écarts de calibration sont répartis de manière symétrique autour de la droite $y=x$.

c) *Indicateurs statistiques résumant la qualité de la calibration*

Des indicateurs statistiques peuvent également être calculés pour résumer par un chiffre unique la qualité de la calibration, pour le modèle entier, pour chaque nappe ou pour chaque secteur du modèle. Pour cette version v2 (2024) du modèle GTI mis à jour dans le bassin houiller, nous avons choisi de présenter les indicateurs « moyenne des médianes des écarts absolus », « moyenne des médianes des écarts absolus pondérée par le nombre d'observations annuelles par chronique » et « erreur quadratique moyenne – RMSE ». Ces indicateurs d'écart de calibration sont calculés comme suit :

- **Moyenne des médianes des écarts absolu**s :

- pour chaque ouvrage piézométrique, on calcule une valeur absolue d'« écart de simulation » entre chaque paire de valeur moyenne annuelle observée disponible et la valeur simulée de l'année correspondante,
- 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 durs, sur une même chronique piézométrique, à des problèmes de représentativité des mesures piézométriques (cf. Illustration 15 et Illustration 16 qui représentent la distribution des médianes des valeurs absolues des écarts de niveau « observé / simulé » pour l'ensemble des points de calibration) ;
- enfin, la moyenne des écarts médians en valeur absolue est calculée pour permettre 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).

- **Moyenne des médianes des écarts absolu**s pondérée par le nombre d'observations annuelles par chronique :

- la seule différence avec l'indicateur précédent est le fait que la moyenne des médianes des écarts absolus est calculée en pondérant la moyenne par le nombre d'observations disponibles pour chaque chronique piézométrique : ainsi, le poids d'une chronique dans la moyenne des médianes des écarts absolus est proportionnel au nombre d'observations moyennes annuelles disponibles pour la chronique ; cet indicateur permet d'attribuer une plus forte importance dans la moyenne aux chroniques longues et donc généralement plus représentatives des évolutions de la nappe sur une longue période de temps.

- **Erreur quadratique moyenne (RMSE) :**

- un indicateur habituel en modélisation hydrogéologique pour quantifier l'écart entre valeurs observées et simulées est l'erreur quadratique moyenne (root mean square error ou RMSE). 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 :

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

Il est à noter que les points jugés a priori peu ou pas représentatifs du système modélisé ont été conservés dans le calcul des trois indicateurs de qualité de la calibration, pour éviter de biaiser ces derniers 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.

On trouvera dans le tableau de l'Illustration 12 les résultats des calculs des trois indicateurs décrits ci-dessus pour la période de calibration 1977-2022, pour chaque secteur et nappe. **Pour la nappe des GTI dans le maillage gigogne du bassin houiller (incluant les parties**

françaises et allemandes), les indicateurs de qualité de la calibration sur la période 1977-2022 ont les valeurs suivantes :

- la moyenne des médianes des écarts absolu pondérée par le nombre d’observations annuelles par chronique est de 2,64 m, et varie entre 1,68 m et 5,93 m selon les secteurs (en excluant les deux secteurs en Allemagne qui ne disposent que d’une seule chronique piézométrique ancienne et très peu complète),
- la moyenne des médianes des écarts absolu est de 3,58 m, et varie entre 1,79 m et 9,34 m selon les secteurs (en excluant les deux secteurs en Allemagne qui ne disposent que d’une seule chronique piézométrique ancienne et très peu complète),
- l’erreur quadratique moyenne (RMSE) est de 4,18 m, et varie entre 2,23 m et 10,16 m (en excluant les deux secteurs en Allemagne qui ne disposent que d’une seule chronique piézométrique ancienne et très peu complète).

Secteurs du maillage gigogne du bassin houiller (+ maillage principal du département 57)	Nombre de piézomètres utilisés pour la calibration	Moyenne pondérée des médianes des écarts absolu (mètre)	Moyenne des médianes des écarts absolu (mètre)	Erreur quadratique moyenne - RMSE (mètre)
Hors SAGE BH - Département 57	16	2,22	3,77	3,8
Saarland - GTI - Bisten	34	1,68	1,79	2,23
Saarland - GTI - Forbach	1	10,18	10,18	10,12
Saarland - GTI - Lauterbach	23	2,86	3,67	4,24
Saarland - GTI - Vouters-Reumaux	1	12,09	12,09	10,67
SAGE BH - Alluvions - Est	14	12,37	13,27	14,84
SAGE BH - Alluvions - Ouest	17	1,53	1,97	2,04
SAGE BH - GTI - Falck	27	1,64	1,79	2,35
SAGE BH - GTI - Faulquemont	7	2,12	1,92	2,61
SAGE BH - GTI - Forbach	43	6,73	7,65	8,46
SAGE BH - GTI - La Houve Ouest	1	2,17	2,17	2,67
SAGE BH - GTI - La Houve Trad	28	1,82	1,9	2,37
SAGE BH - GTI - La Houve Vernejoul	49	1,93	2,3	2,79
SAGE BH - GTI - Lauterbach	7	4,11	6,38	6,4
SAGE BH - GTI - L'Hopital	81	2,12	2,2	2,85
SAGE BH - GTI - Rosselle Amont	39	2,74	4,81	5,78
SAGE BH - GTI - Vouters-Reumaux	14	5,93	9,34	10,16
SAGE BH - Mines	11	2,59	2,68	4,76

Illustration 12 : Indicateurs de qualité de la calibration sur la période 1977-2022 pour les secteurs du maillage gigogne du bassin houiller (397 piézomètres) et le maillage principal du département de la Moselle (16 piézomètres).

Il est à noter que les plus fortes valeurs des indicateurs, indiquant une moins bonne qualité de la calibration, concernent les secteurs de nappe des GTI ou des alluvions situés au droit des anciennes exploitations minières des réservoirs miniers Centre-Est : Vouters-Reumaux, Forbach, Lauterbach, et Alluvions Est. Ceci s’explique par les très fortes variations des niveaux piézométriques de la nappe des GTI dans ces secteurs (plusieurs dizaines de mètres) liée à la modification au cours du temps des écoulements souterrains au sein de la nappe des GTI, en raison des travaux miniers sous-jacents. La méconnaissance de l’historique de ces modifications d’écoulement (fractures dans le Permien et les GTI, crevasses minières, affaissements miniers, infiltration de cours d’eau) empêche une modélisation plus précise.

Toutefois on peut constater sur les cartes de l’annexe 4 que malgré la valeur relativement élevée des indicateurs de qualité de la calibration, le modèle reproduit correctement les grandes variations piézométriques observées dans le passé : le modèle prend donc correctement en compte les principaux phénomènes responsables des variations piézométriques, ce qui est le gage d’une prévision correcte à long terme.

d) **Evolution des termes du bilan des débits annuels**

Pour la période de calibration 1977-2022, l’Illustration 17 montre l’évolution des termes du bilan des débits annuels pour l’ensemble du modèle, toutes nappes confondues (nappe des GTI, réservoirs miniers et nappe des alluvions). L’Illustration 18 montre la même évolution avec un zoom sur les valeurs de débits comprises entre -30000 et +30000 m³/an.

Pour la période de calibration 1977-2022, l’Illustration 19 montre l’évolution des termes du bilan des débits annuels pour le maillage gigogne et pour la nappe des GTI (zone géométrique 12 du modèle). L’Illustration 20 montre la même évolution avec un zoom sur les valeurs de débits comprises entre -30000 et +30000 m³/an.

Les termes du bilan des débits annuels sont liés par l’équation suivante :

$$\sum \text{Débits annuels entrants} - \sum \text{Débits annuels sortants} = \text{Stockage annuel} + \text{Ecart de bilan}$$

Sur les graphiques, certaines courbes toujours positives correspondent à des débits entrants uniquement (« + Recharge par les pluies », « + Infiltration eau de surface »), les valeurs de débits annuels sont donc positives uniquement (entrées d’eau, comptabilisées positivement par le modèle MARTHE, par convention).

Sur les graphiques, certaines courbes toujours négatives correspondent à des débits sortants uniquement (« - Pompages », « - Débordements »), les valeurs de débits annuels sont donc négatives uniquement (sorties d’eau, comptabilisées négativement par le modèle MARTHE, par convention).

Sur les graphiques, certaines courbes positives ou négatives correspondent, pour simplifier l’affichage en diminuant le nombre de courbes, à des soldes partiels de débits qui peuvent être entrants ou sortants selon l’année (« +/- Echange zones voisines », « +/- Echanges nappes-rivières », « +/- Echanges nappes-lac ») ; les valeurs de débits annuels sont donc positives ou négatives selon le sens majoritaire de l’échange d’eau pour une année donnée.

La courbe « → Stockage dans les nappes » correspond au solde général de toutes les entrées et sorties d’eau, tandis que la courbe « ! Ecart de bilan » correspond à l’erreur numérique totale liée à la convergence du modèle.

Les graphiques de l’Illustration 21 et le tableau de l’Illustration 22 présentent le détail des termes du bilan des débits pour le maillage gigogne et pour la nappe des GTI (zone géométrique 12 du modèle), pour les 3 années suivantes :

- **année 1978**, située au début de la période de calibration,
- **année 2010**, située dans la période de baisse maximale des nappes du bassin houiller,
- **année 2022**, année de fin de la période de calibration.

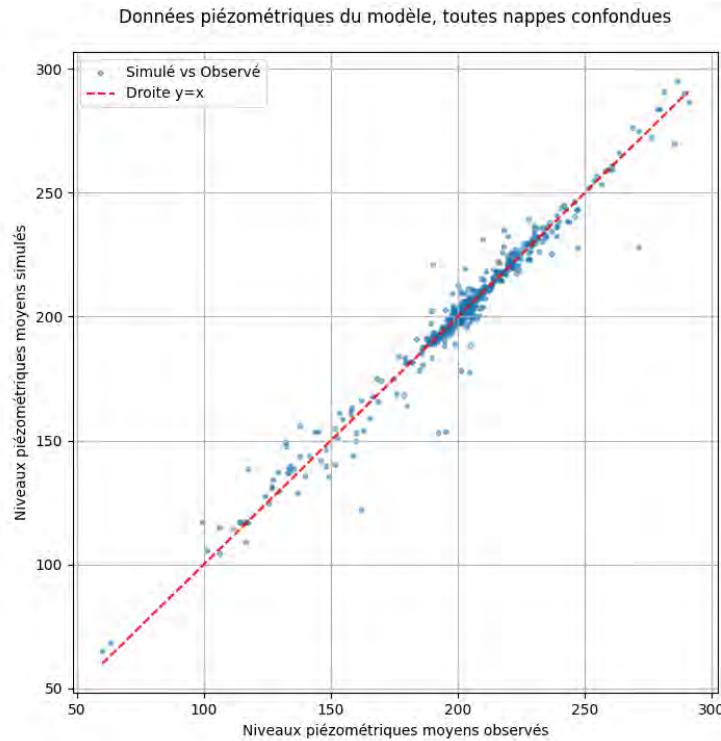


Illustration 13 : Graphique de comparaison des moyennes des niveaux piézométriques observés et simulés sur la période 1977-2022 (un point sur le graphique représente un piézomètre), pour l'ensemble du modèle régional (507 points de mesures piézométriques de la nappe des GTI, des réservoirs miniers et des alluvions).

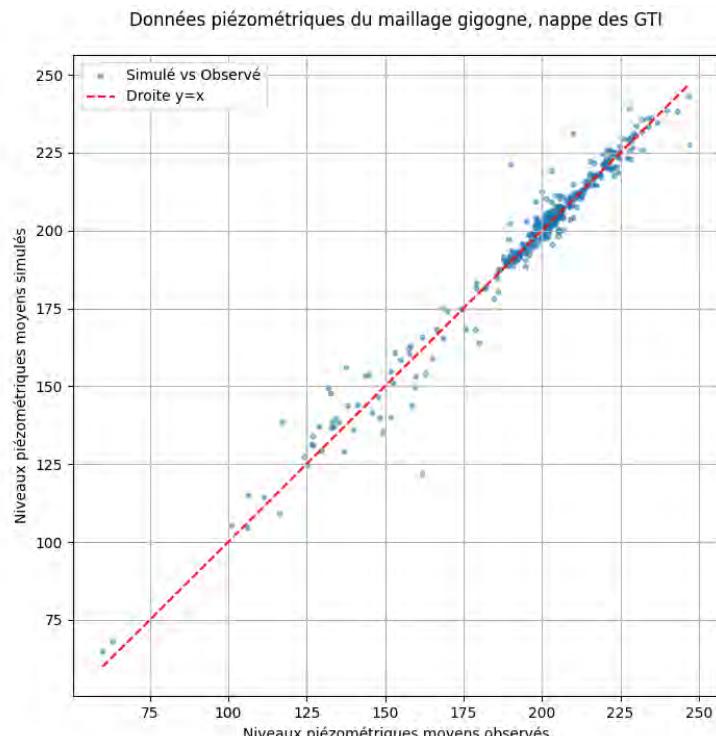


Illustration 14 : Graphique de comparaison des moyennes des niveaux piézométriques observés et simulés sur la période 1977-2022 (un point sur le graphique représente un piézomètre), pour la nappe des GTI dans le maillage gigogne du bassin houiller (372 points de mesures piézométriques de la nappe des GTI).

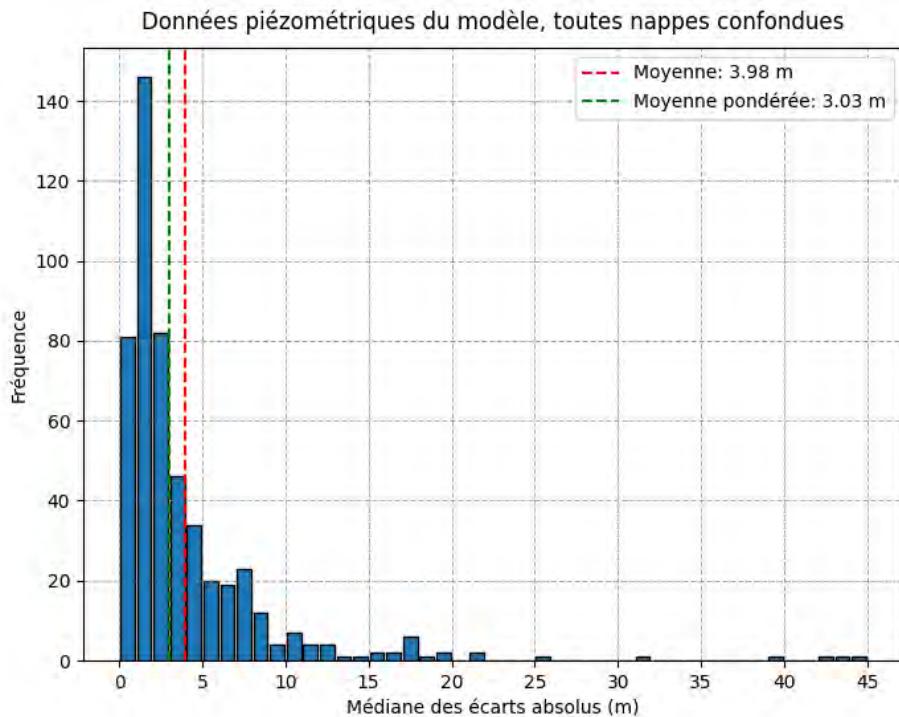


Illustration 15 : Distribution de la médiane des valeurs absolues des écarts entre les niveaux piézométriques observés et simulés entre 1977 et 2022 pour l'ensemble du modèle régional (507 points de mesures piézométriques de la nappe des GTI, des réservoirs miniers et des alluvions) – Indicateurs statistiques associés (moyenne et moyenne pondérée).

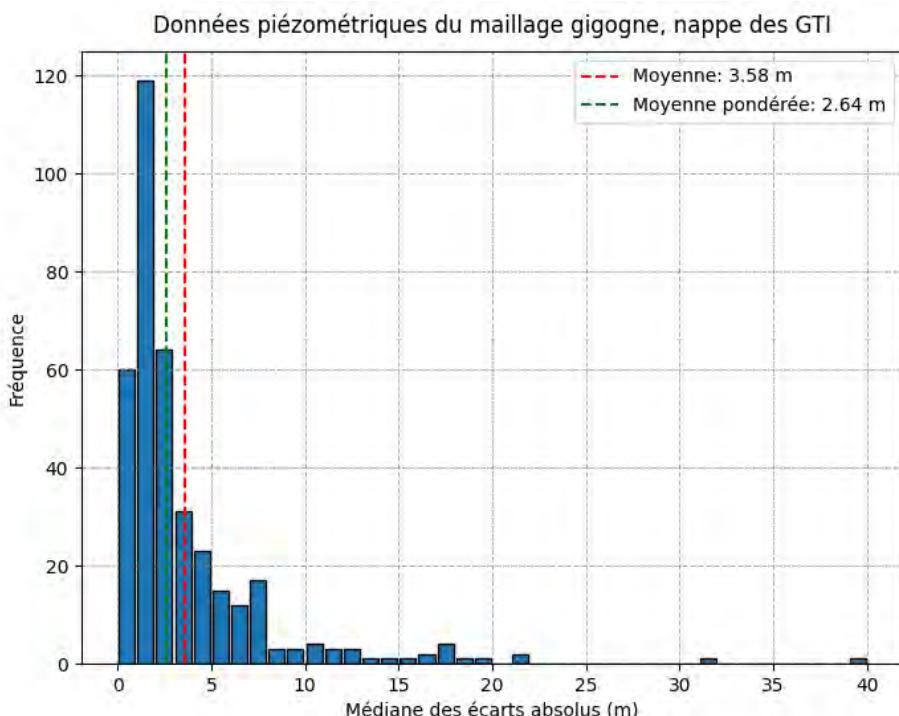


Illustration 16 : Distribution de la médiane des valeurs absolues des écarts entre les niveaux piézométriques observés et simulés entre 1977 et 2022, pour la nappe des GTI dans le maillage gigogne du bassin houiller (372 points de mesures piézométriques de la nappe des GTI) – Indicateurs statistiques associés (moyenne et moyenne pondérée).

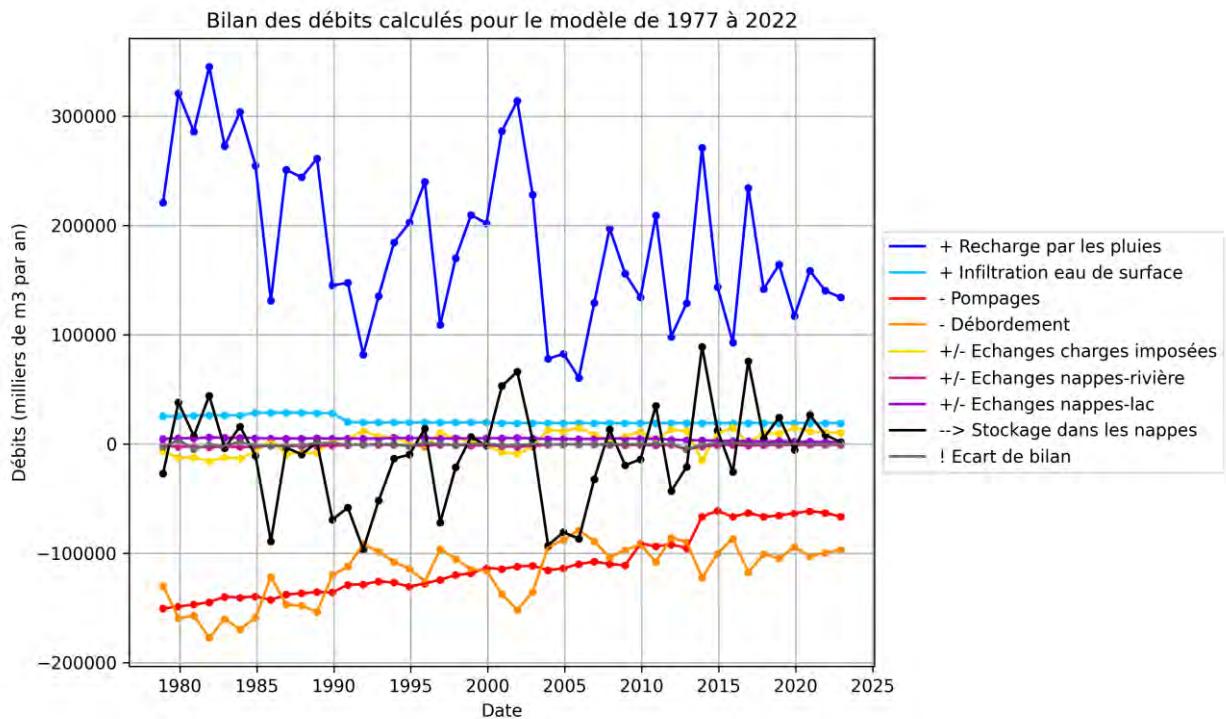


Illustration 17 : Evolution des termes du bilan hydrodynamique annuel calculés pour la période de calibration 1977-2022 pour l'ensemble du modèle régional, toutes nappes confondues (nappe des GTI, réservoirs miniers et nappe des alluvions).

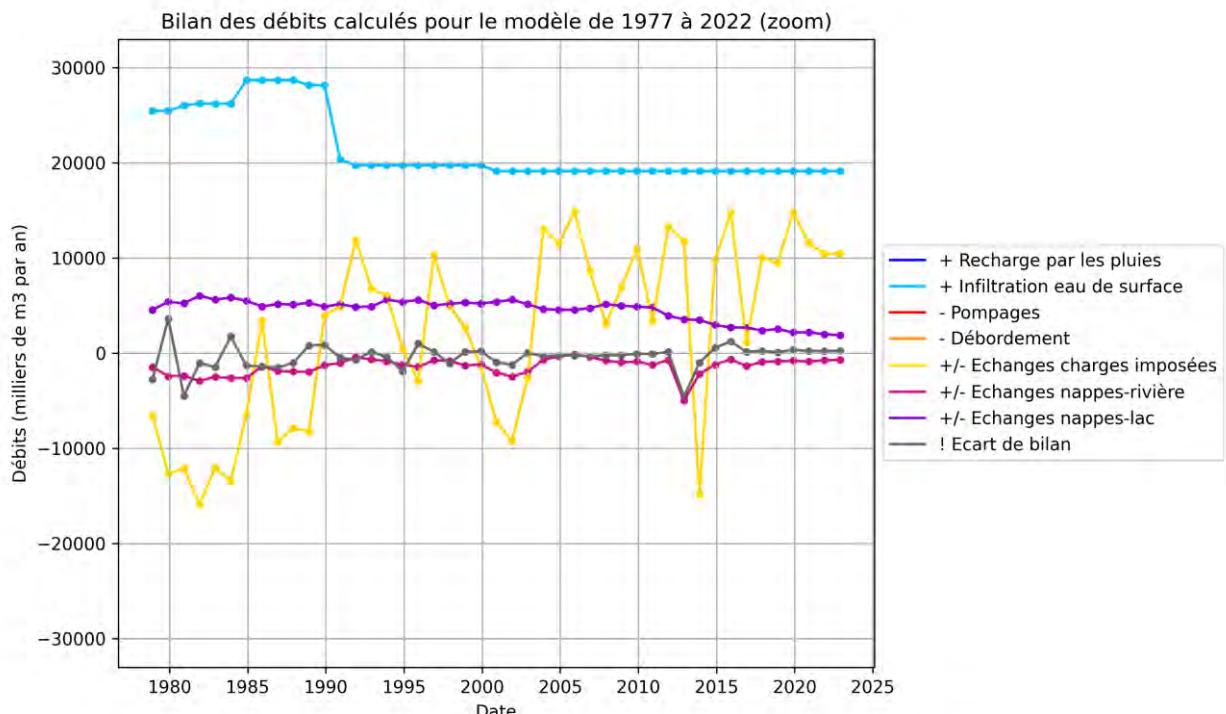


Illustration 18 : Evolution des termes du bilan hydrodynamique annuel (zoom sans la courbe « Stockage dans les nappes ») calculés pour la période de calibration 1977-2022 pour l'ensemble du modèle régional, toutes nappes confondues (nappe des GTI, réservoirs miniers et nappe des alluvions).

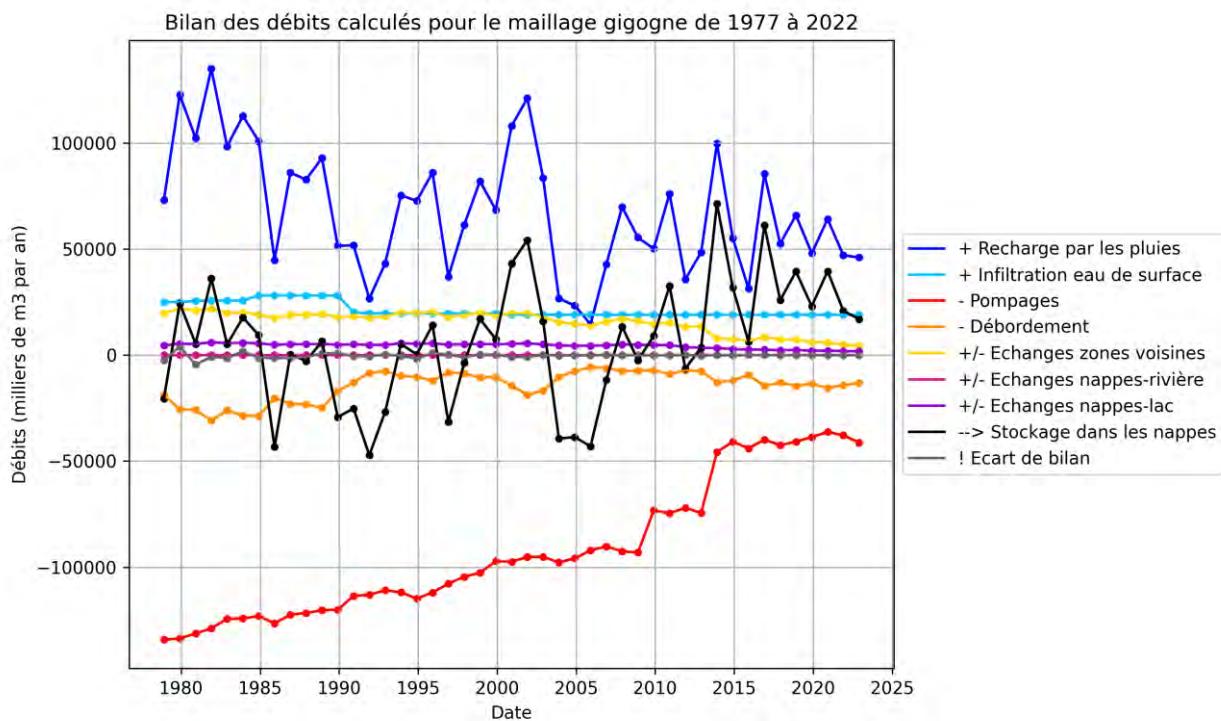


Illustration 19 : Evolution des termes du bilan hydrodynamique annuel calculés pour la période de calibration 1977-2022 pour le maillage gigogne du bassin houiller (parties française et allemande) et pour la nappe des GTI (zone géométrique 12 du modèle).

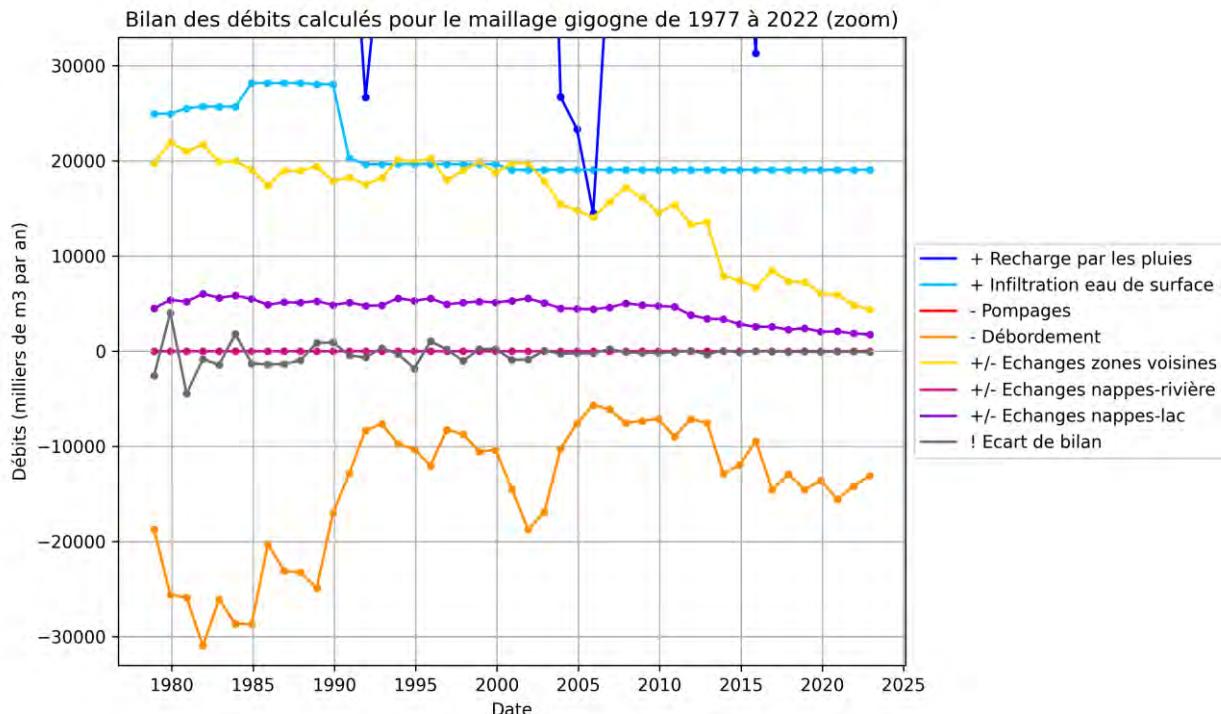


Illustration 20 : Evolution des termes du bilan hydrodynamique annuel (zoom sans la courbe « Stockage dans les nappes ») calculés pour la période de calibration 1977-2022 pour le maillage gigogne du bassin houiller (parties française et allemande) et pour la nappe des GTI (zone géométrique 12 du modèle).

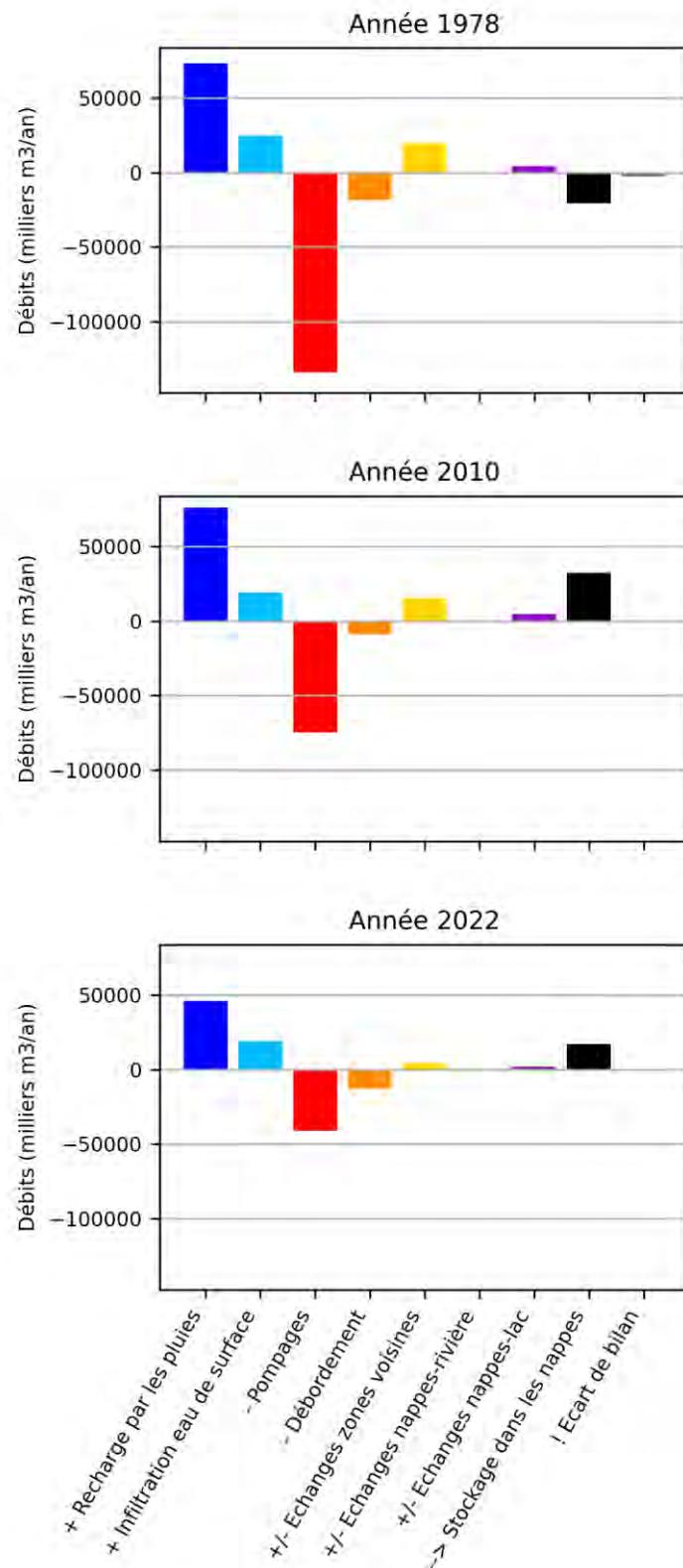


Illustration 21 : Graphiques en barres des termes du bilan des débits pour les années 1978 (année située au début de la période de calibration), 2010 (année située dans la période de baisse maximale des nappes du bassin houiller) et 2022 (année de fin de la période de calibration).

Termes du bilan des débits (milliers de m ³ /an)	1978	2010	2022
+ Recharge par les pluies	73188	76170	46036
+ Infiltration eau de surface	24960	19052	19052
- Pompages	-134262	-74588	-41252
- Débordement	-18727	-8969	-13081
+/- Echanges zones voisines	19744	15397	4376
+/- Echanges nappes-rivière	0,70	0,70	0,70
+/- Echanges nappes-lac	4515	4673	1768
--> Stockage dans les nappes	-20458	32501	16976
! Ecart de bilan	-2576	-95	-77

Illustration 22 : Tableau des termes du bilan des débits pour les années 1978 (année située au début de la période de calibration), 2010 (année située dans la période de baisse maximale des nappes du bassin houiller) et 2022 (année de fin de la période de calibration).

5. Simulations prévisionnelles

5.1. SIMULATION PREVISIONNELLE TENDANCIELLE

5.1.1. Objectifs de la simulation

Cette simulation prévisionnelle est réalisée à l'aide du modèle de la nappe des GTI v2 (2024) calibré jusqu'en 2022. Elle est basée sur un scénario de prélèvements futurs constants dans la nappe des GTI, combiné à deux scénarios hydroclimatiques successifs décrivant les évolutions futures possibles de la recharge des nappes en tenant compte du changement climatique.

Cette simulation prévisionnelle tendancielle n'a pas pour but de prévoir l'évolution future précise à long terme de la nappe des GTI année après année, car le calcul de cette évolution dépendrait trop fortement des hypothèses très incertaines qu'on pourrait formuler sur les évolutions futures à très long terme des entrées et sorties d'eau dans la nappe, et notamment des pompages et de la recharge. La simulation vise toutefois à fournir des informations très importantes sur l'évolution moyenne annuelle de la nappe ; sur le temps moyen qu'il faudra pour qu'elle remonte puis se stabilise ; sur la situation future de moyennes eaux après stabilisation ; sur une situation future possible de hautes eaux ; et sur la localisation des zones bâties soumises à un risque de remontée de nappe si aucun moyen de rabattement complémentaire à ceux déjà existants n'est mis en place.

Plus précisément, **cette simulation prévisionnelle tendancielle a pour objectifs :**

- de calculer **l'évolution future de la situation moyenne annuelle de la nappe des GTI lors de la phase transitoire de sa remontée**, qui va s'étendre sur des décennies, sans prendre en compte les fluctuations saisonnières des niveaux liées à la pluvirosité,
- de calculer **la situation future moyenne de la nappe des GTI après quasi-stabilisation de sa remontée** selon un critère de variation maximale annuelle du niveau piézométrique moyen dans le bassin houiller ; cette situation moyenne est nommée « **moyennes eaux** », et la simulation permettra donc aussi **d'évaluer le temps nécessaire pour la reconstitution quasi-complète de la nappe des GTI**,
- de calculer **une situation future possible de la nappe des GTI dans une période climatique de pluvirosité exceptionnelle** favorisant l'élévation saisonnière des niveaux de la nappe, après sa remontée quasi-complète ; cette situation de hautes eaux possible est nommée « **hautes eaux** »,
- d'identifier **toutes les zones bâties soumises à un risque de remontée de nappe à moins de 3 m de profondeur si aucun moyen de rabattement complémentaire à ceux déjà actifs en 2023 n'est mis en place à l'avenir**.

5.1.2. Définition d'un scénario de prélèvements futurs : hypothèses de prélèvements futurs constants dans la nappe des GTI et de niveau constant dans les réservoirs miniers

Pour les forages situés en dehors du périmètre du maillage gigogne du bassin houiller, la moyenne des volumes annuels prélevés 2021 et 2022 par chaque ouvrage dans la nappe des GTI est prolongée au-delà de 2022.

Dans le périmètre du maillage gigogne du bassin houiller, les volumes annuels de prélèvements dans la nappe des GTI et les réservoirs miniers sous-jacents sont basés sur les hypothèses listées ci-dessous.

- **Prélèvements pour l'alimentation en eau industrielle (AEI) y compris ceux affectés au piège hydraulique de Carling**
 - Forages de la Société des Eaux de l'Est (SEE) utilisés pour l'AEI (y compris ceux affectés au piège hydraulique de Carling) : prolongement du dernier volume annuel prévisionnel communiqué pour 2023 ou 2024.
 - Forage Triangle (Total Energie) : prolongement de la moyenne des volumes annuels prélevés en 2021 et 2022.
 - Projet de forage dans la vallée du Merle par les industriels de la plate-forme chimique de Carling : début de pompage en 2024 au débit projeté de 60 m³/h.
- **Prélèvements pour l'alimentation en eau potable (AEP), la protection de la ressource en eau ou le soutien de zones humides**
 - Forages de la SEE utilisés pour l'AEP : prolongement du dernier volume annuel prévisionnel communiqué pour 2023 et/ou 2024.
 - Forages des collectivités ou Syndicats des eaux qui étaient actifs en 2021 et/ou en 2022 : prolongement de la moyenne des volumes annuels prélevés 2021 et 2022.
 - Forages F1bis et F19 ter utilisés pour la protection de la ressource en eau : prolongement de la moyenne des volumes annuels prélevés 2021 et 2022.
- **Prélèvements du Land de Sarre**
 - Forages du Land de Sarre en Allemagne : prolongement de la moyenne des volumes annuels prélevés 2021 et 2022.
- **Prélèvements pour le soutien d'étiage du lac de Creutzwald et la déchloruration de la bulle salée de Diesen dans la nappe des GTI**
 - Forages P1 à P4bis : prolongement de la moyenne des volumes annuels prélevés 2021 et 2022 jusqu'en 2032, puis arrêt définitif.
- **Prélèvements pour le rabattement de la nappe des GTI dans l'agglomération de Creutzwald (« Croix » et « Poste »)**
 - Forages de rabattement « Croix » et « Poste » en service depuis 2016 : prolongement de la moyenne des volumes annuels prélevés 2021 et 2022.

- **Prélèvements dans les réservoirs miniers pour maintenir le niveau de l'eau des réservoirs à une cote évitant les échanges d'eau de la mine vers la nappe des GTI**
 - Puits miniers La Houve 1 (réservoir minier Ouest), Simon 5 et Vouters 2 (réservoirs miniers Centre et Est) : des pompages sont effectués dans ces 3 anciens puits miniers respectivement depuis 2009, 2012 et 2015, de façon à assurer que les cotes de l'eau dans les réservoirs miniers ne puissent jamais dépasser la cote 200 m NGF pour le réservoir Ouest et 193 m NGF pour les réservoirs Centre et Est, pour éviter les échanges d'eau ascendants entre les mines ennoyées et la nappe des GTI ; le calcul des débits nécessaires pour maintenir ces cotes à partir de l'année 2023 (première année de la simulation prévisionnelle) est effectué automatiquement par le modèle à l'aide d'« altitudes de débordement » définies dans les mailles de la couche mine du modèle correspondant à ces 3 puits miniers.

5.1.3. Définition de deux scénarios hydroclimatiques successifs : hypothèses de recharge future des nappes

Conformément aux objectifs de la simulation prévisionnelle « tendancielle » présentés plus haut, on définit un scénario hydroclimatique prévisionnel comportant deux périodes successives, que l'on va nommer respectivement « **scénario hydroclimatique de moyennes eaux** » et « **scénario hydroclimatique de hautes eaux** » (Illustration 23).

Illustration des scénarios hydroclimatiques retenus pour la simulation prévisionnelle tendancielle
Exemple pour le piézomètre BSS000KTLZ_GTI dans le secteur "L'Hôpital" du modèle GTI

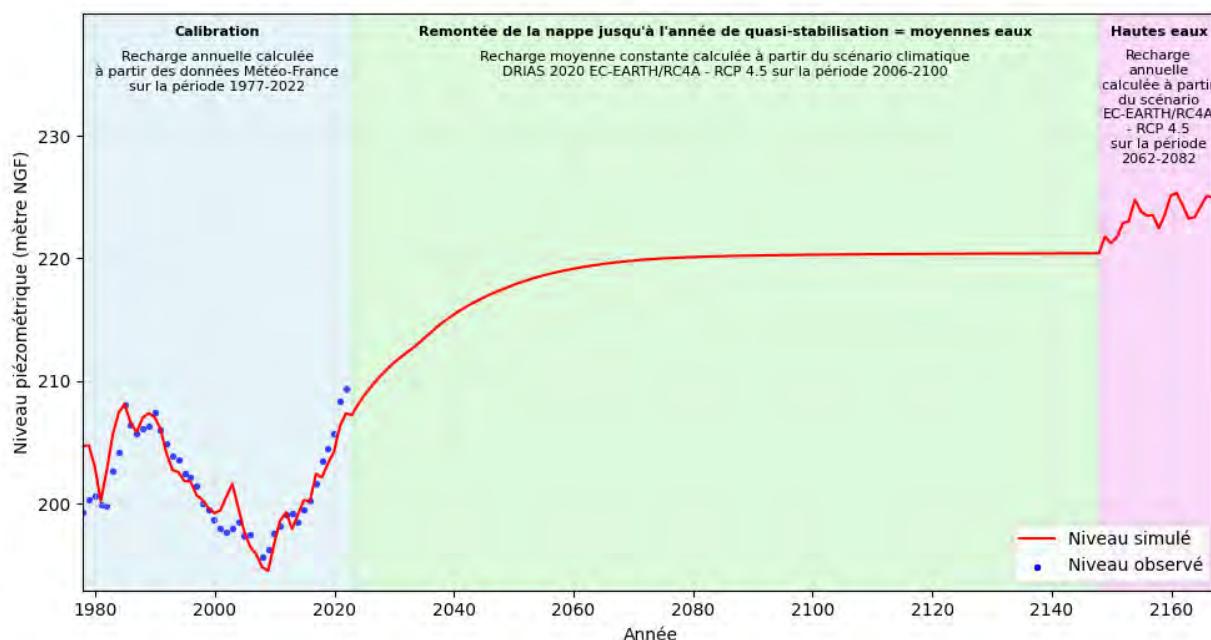


Illustration 23 : Illustration des périodes successives de la simulation prévisionnelle tendancielle correspondant aux scénarios climatiques de moyennes eaux (en vert) et de hautes eaux (en violet). La période de calibration (en bleu) est ajoutée au début du graphique pour faire comprendre comment la simulation prévisionnelle se raccorde à la période de calibration.

Les données climatiques utilisées pour construire ces deux scénarios hydroclimatiques qui sont enchaînés dans la même simulation MARTHE proviennent du portail www.drias-climat.fr, qui met à disposition des projections futures de pluie et d'évapotranspiration calculées par des modèles climatiques planétaires en tenant compte de différents scénarios futurs d'émission de CO₂ dans l'atmosphère (Illustration 24). Les séries chronologiques de pluie et d'évapotranspiration potentielle (ETP) choisies pour la simulation tendancielle font partie du jeu de données DRIAS 2020 ([DRIAS, Les futurs du climat - Accompagnement \(drias-climat.fr\)](http://DRIAS_Les_futurs_du_climat - Accompagnement (drias-climat.fr))), chaque jeu de données contient notamment une chronique prévisionnelle de pluie et une chronique prévisionnelle d'ETP calculées pour la période 2006-2100. Parmi les 12 jeux de données DRIAS 2020 disponibles, nous avons choisi pour la simulation tendancielle le jeu de données EC-EARTH/RC4A tenant compte du scénario d'émission RCP 4.5.

Nom de la simulation	Institution	GCM	RCM	Scénarios	Périodes disponibles	Variab
CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_CNRM-ALADIN63	CNRM	CNRM-CM5	ALADIN63	RCP8.5, RCP4.5, RCP2.6	1951-2100	9
MPI-M-MPI-ESM-LR_CLMcom-CCLM4-8-17	CLMcom	MPI-ESM	CCLM4-8-17	RCP8.5, RCP4.5, RCP2.6	1950-2100	7
MOHC-HadGEM2-ES_ICTP-RegCM4-6	ICTP	HadGEM2	RegCM4-6	RCP8.5, —, RCP2.6	1970-2099	7
ICHEC-EC-EARTH_SMHI-RCA4	SMHI	EC-EARTH	RCA4	RCP8.5, RCP4.5, RCP2.6	1970-2100	7
IPSL-IPSL-CM5A-MR_IPSL-WRF381P	IPSL	IPSL-CM5A	WRF381P	RCP8.5, RCP4.5, —	1951-2100	7
NCC-NorESM1-M_GERICS-REMO2015	GERICS	Nor-ESM1	REMO2015	RCP8.5, —, RCP2.6	1950-2100	7
MPI-M-MPI-ESM-LR_MPI-CSC-REMO2009	CSC	MPI-ESM	REMO2009	RCP8.5, RCP4.5, RCP2.6	1970-2100	7
MOHC-HadGEM2-ES_CLMcom-CCLM4-8-17	CLMcom	HadGEM2	CCLM4-8-17	RCP8.5, RCP4.5, —	1950-2099	7
ICHEC-EC-EARTH_KNMI-RACMO22E	KNMI	EC-EARTH	RACMO22E	RCP8.5, RCP4.5, RCP2.6	1950-2100	9
IPSL-IPSL-CM5A-MR_SMHI-RCA4	SMHI	IPSL-CM5A	RCA4	RCP8.5, RCP4.5, —	1970-2100	7
CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_KNMI-RACMO22E	KNMI	CNRM-CM5	RACMO22E	RCP8.5, RCP4.5, RCP2.6	1950-2100	9
NCC-NorESM1-M_DMI-HIRHAM5	DMI	Nor-ESM1	HIRHAM5 v3	RCP8.5, RCP4.5, —	1951-2100	7

Illustration 24 : Les 12 jeux de données climatiques DRIAS 2020 disponibles sur le site DRIAS ([DRIAS, Les futurs du climat - Accompagnement \(drias-climat.fr\)](http://DRIAS_Les_futurs_du_climat - Accompagnement (drias-climat.fr))).

Le scénario d'émission RCP 4.5 (Representative Concentration Pathway) correspond à un scénario de stabilisation modérée où les efforts sont faits au niveau mondial pour limiter les émissions de gaz à effet de serre (Illustration 25). Ce scénario postule qu'à l'horizon 2100, le forçage radiatif supplémentaire, c'est-à-dire l'énergie supplémentaire piégée dans l'atmosphère par les gaz à effet de serre, atteindrait environ 4,5 W/m² par rapport à l'ère préindustrielle, d'où le nom « RCP 4.5 ». Ce scénario suppose une réduction graduelle des émissions de CO₂ grâce à des efforts d'atténuation modérés comme l'adoption accrue des énergies renouvelables, l'amélioration de l'efficacité énergétique, et l'introduction de technologies de captage et de stockage du carbone. Dans ce scénario, les concentrations atmosphériques de CO₂ atteindraient environ 650 ppm (parties par million) à la fin du siècle, contre environ 400 ppm aujourd'hui (2023). Le RCP 4.5 est associé à une augmentation de la température moyenne globale d'environ 1,8 à 2,6 °C au-dessus des niveaux préindustriels d'ici 2100, selon les modèles climatiques utilisés.

Un couple GCM/RCM désigne l'utilisation conjointe d'un modèle climatique global (GCM) et d'un modèle climatique régional (RCM) pour produire des simulations climatiques à haute résolution à l'échelle régionale. Le modèle climatique EC-EARTH est un modèle climatique global (GCM) développé par un consortium européen d'instituts de recherche et de services météorologiques, il est utilisé pour des simulations climatiques mondiales à une résolution d'environ 125 km. Pour produire le jeu de données EC-EARTH/RC4A, le modèle climatique global a été couplé à un modèle régional, en l'occurrence le RCA4, développé par le SMHI, l'Institut météorologique et hydrologique suédois, pour affiner les simulations climatiques à une échelle régionale d'environ 50 km, permettant une meilleure prise en compte des processus locaux.

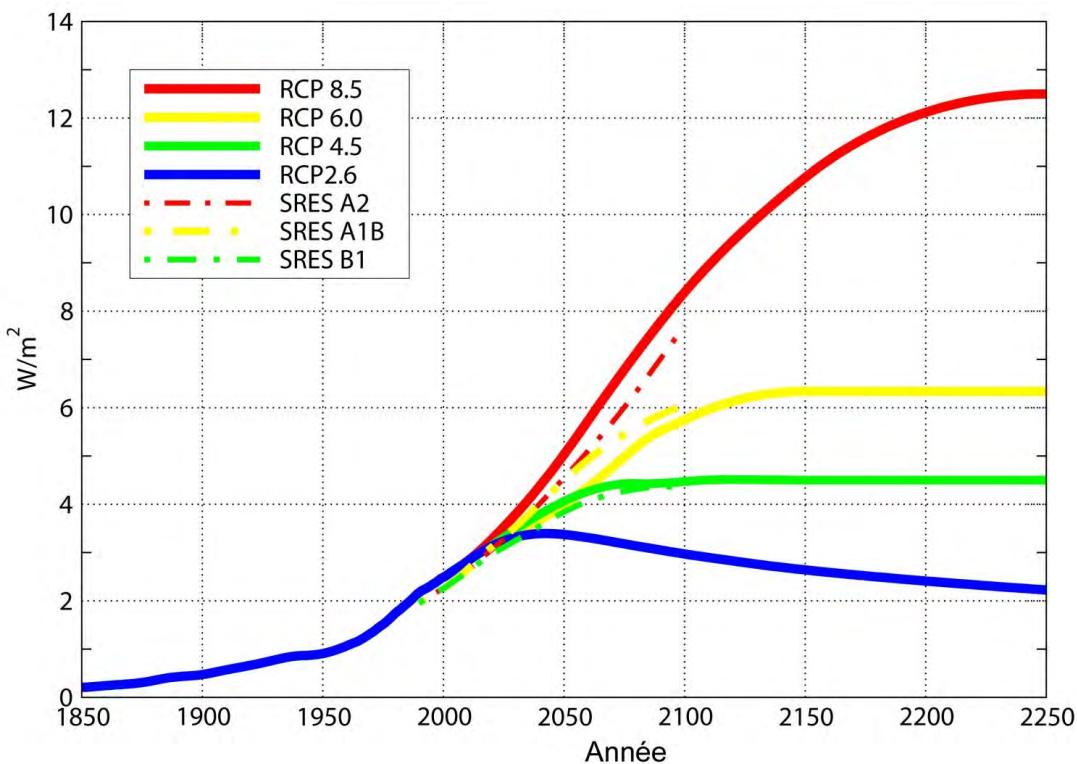


Illustration 25 : Scénarios RCP (Representative Concentration Pathway) d'émission de gaz à effet de serre ([DRIAS, Les futurs du climat - Accompagnement \(driias-climat.fr\)](http://driias.les-futurs-du-climat.com)).

Cette combinaison EC-EARTH/RCA4 est souvent utilisée pour les études d'impact climatique régional en Europe. Elle permet de fournir des projections climatiques détaillées sur lesquelles s'appuient les politiques d'adaptation au changement climatique à l'échelle locale et nationale. Par ailleurs, ce couple GCM/RCM produit des projections qui se situent dans la moyenne des projections des autres couples GCM/RCM du jeu de données DRIAS 2020 pour le scénario d'émission de CO₂ RCP 4.5 (Illustration 26), à la fois du point de vue de la température moyenne et de la pluie moyenne sur la période 2006-2100 ([20200914 DRIAS-ScenarioRCP4.5 support selection modeles v3 \(driias-climat.fr\)](http://20200914_DRIAS-ScenarioRCP4.5_support_selection_modeles_v3 (driias-climat.fr))). Cette caractéristique en fait un choix pertinent pour construire les scénarios hydroclimatiques tendanciels à appliquer au modèle de la nappe des GTI.

Le scénario hydroclimatique de moyennes eaux est défini pour la période de remontée de la nappe des GTI jusqu'à la stabilisation de la nappe. Le critère de stabilisation de la nappe est que dans toutes les mailles du modèle qui correspondent à des piézomètres captant la nappe des GTI, le maximum de variation du niveau piézométrique soit inférieur à 3 cm par an. Sur cette période de remontée de la nappe jusqu'à stabilisation, on applique sur chaque zone hydroclimatique du modèle GTI une valeur moyenne annuelle constante d'infiltration et de ruissellement, déterminée à partir données de pluie et d'ETP de la simulation EC-EARTH/RCA4 - RCP 4.5 sur la période 2006-2100. Ces valeurs moyennes constantes d'infiltration et de ruissellement tenant compte du changement climatique sont déterminées au préalable par un calcul de bilan hydroclimatique par zone hydroclimatique du modèle GTI utilisant les données de la simulation EC-EARTH/RCA4 - RCP 4.5.

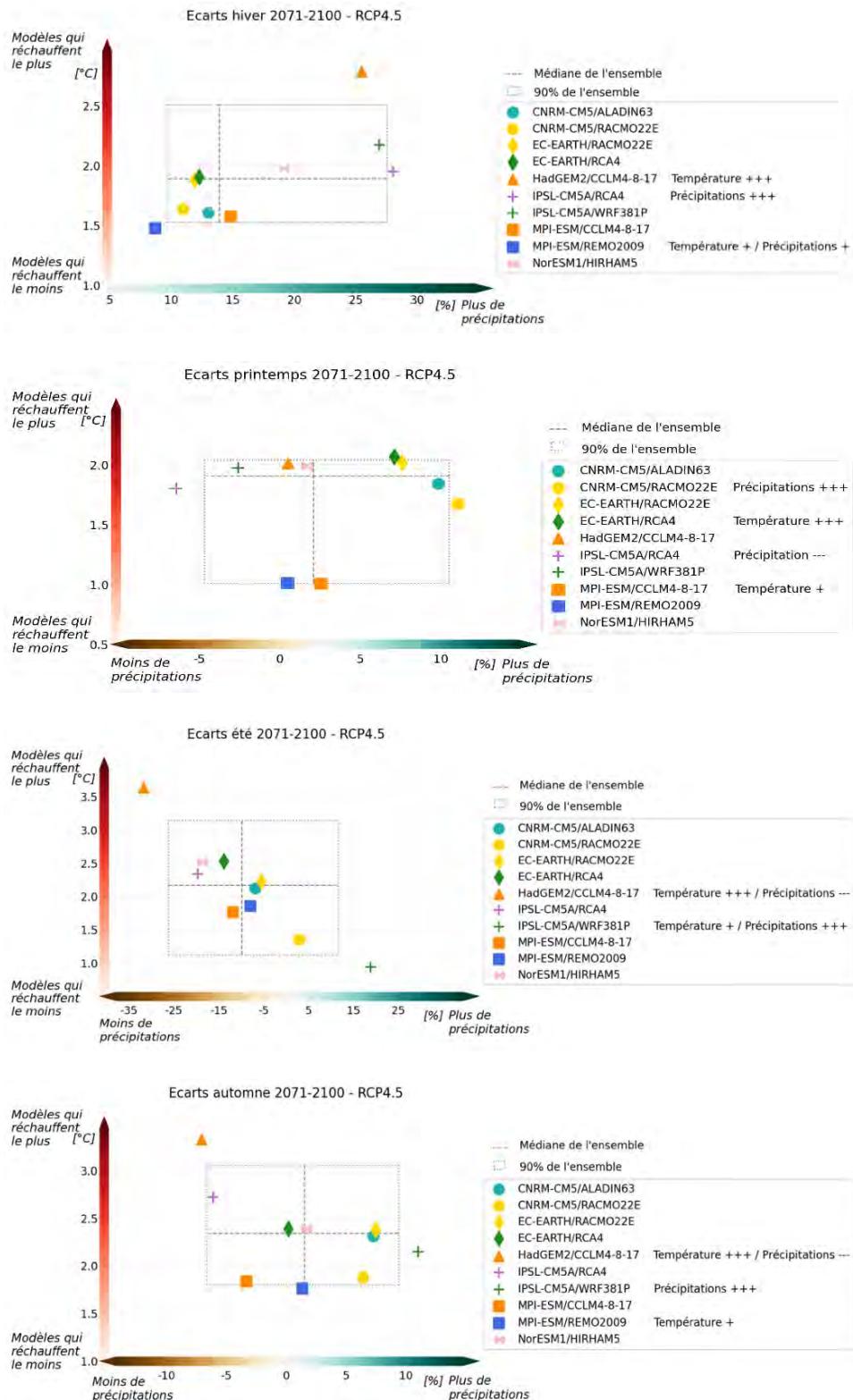


Illustration 26 : Comparaison des couples de modèles GCM/RCM DRIAS 2020 pour chaque saison, pour le scénario RCP 4.5. ΔT = écart de la température moyenne sur 30 ans par rapport à la période de référence 1976-2005 ; ΔP = écart relatif des précipitations sur 30 ans par rapport à la période de référence 1976-2005, indicateurs calculés sur les données corrigées et agrégé sur la France, pour chaque modèle individuellement pour la période 2071-2100 ([20200914_DRIAS-ScenarioRCP4.5_support_selection_modeles_v3\(driasis-climat.fr\)](https://20200914_driasis.ScenarioRCP4.5_support_selection_modeles_v3(driasis-climat.fr).)).

Le scénario hydroclimatique de hautes eaux est défini pour une période de 21 ans commençant après l'année de stabilisation de la nappe des GTI. Pour respecter les objectifs de la simulation tendancielle, cette période de 21 ans doit correspondre à une période climatique exceptionnelle au sein de laquelle on recherchera une année d'infiltration exceptionnelle. Pour rechercher cette période exceptionnelle au sein des chroniques de pluie et d'ETP de la simulation DRIAS 2020 EC-EARTH/RCA4 - RCP 4.5, l'indicateur « maximum de la somme sur 21 ans glissants de la différence entre la somme annuelle de la pluie journalière et la somme annuelle de l'ETP » a été calculé :

$$\text{Max} \left(\sum_{21 \text{ ans glissants}} \left(\sum_{\text{Année}} \text{Pluie journalière} - \sum_{\text{Année}} \text{ETP journalière} \right) \right)$$

Plus la valeur de cet indicateur est élevée, plus l'infiltration et le ruissellement sont élevés sur la période climatique considérée. La valeur maximum de l'indicateur a été trouvée pour la période 2062-2082 de la simulation DRIAS 2020 EC-EARTH/RCA4 - RCP 4.5 : les valeurs d'infiltration et de ruissellement calculées par zone hydroclimatique du modèle GTI (cf. paragraphe précédent) pour cette période de 21 ans ont donc été retenues et appliquées au modèle GTI, après l'année de stabilisation de la nappe, pour constituer le scénario hydroclimatique de hautes eaux. Au sein de cette période climatique exceptionnelle, on recherchera l'année pour laquelle le maximum des niveaux piézométriques, dans toutes les mailles du modèle qui correspondent à des piézomètres captant la nappe des GTI, est maximum.

5.1.4. Résultats de la simulation prévisionnelle « tendancielle »

On rappelle que la simulation prévisionnelle tendancielle est réalisée à l'aide du modèle de la nappe des GTI v2 (2024) calibré jusqu'en 2022, et qu'elle est basée sur un scénario de prélèvements futurs constants dans la nappe des GTI et de niveau constant dans les réservoirs miniers, combiné à deux scénarios hydroclimatiques successifs décrivant les évolutions futures possibles de la recharge des nappes en tenant compte du changement climatique.

a) Cartes piézométriques futures

La simulation tendancielle a permis de calculer l'évolution future de la situation moyenne annuelle de la nappe des GTI lors de la phase transitoire de sa remontée, à partir de 2023, et d'évaluer que le temps moyen (indicatif) nécessaire pour la reconstitution quasi-complète de la nappe des GTI est de 145 ans, compte-tenu des hypothèses des scénarios d'évolution des prélèvements et de la recharge de la nappe retenus pour la simulation.

La situation future moyenne de la nappe des GTI après quasi-stabilisation de sa remontée est nommée « moyennes eaux » (et à titre indicatif correspond à l'année 2147 de la simulation tendancielle). La carte piézométrique de situation de moyennes eaux est présentée en Annexe 5.

Une situation future possible de la nappe des GTI dans une période climatique de pluviosité exceptionnelle favorisant l'élévation saisonnière des niveaux de la nappe, après sa remontée quasi-complète a été aussi calculée, cette situation de hautes eaux possible est nommée « hautes eaux » (et à titre indicatif correspond à l'année 2167 de la simulation transitoire). La carte piézométrique de situation de hautes eaux est présentée en Annexe 5.

Nota bene important : la durée de remontée et les années de situation de la nappe des GTI fournies à titre indicatif ci-dessus et dans la suite du présent document ne correspondent pas à des durées ou des années réelles d'atteinte d'une situation particulière de la nappe.
Elles ne sont en effet que le résultat des hypothèses retenues 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, la survenue d'une crue de nappe exceptionnelle n'est évidemment pas limitée à la période suivant l'année de stabilisation de la nappe. Un tel événement pourrait très bien se produire dans les prochaines années et ainsi accélérer 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 la date déterminée par la simulation « tendancielle ». Pour ces mêmes raisons, la configuration piézométrique la plus haute pourrait être atteinte bien avant ou bien après l'année climatique exceptionnelle déterminée par la simulation.

b) Bilans hydrodynamiques

Pour toute la durée de la simulation, l'Illustration 27 montre l'évolution des termes du bilan des débits annuels pour le maillage gigogne et pour la nappe des GTI (zone géométrique 12 du modèle). L'Illustration 28 montre la même évolution avec un zoom sur les valeurs de débits comprises entre -30000 et +30000 m³/an.

Les termes du bilan des débits annuels sont liés par l'équation suivante :

$$\sum \text{Débits annuels entrants} - \sum \text{Débits annuels sortants} = \text{Stockage annuel} + \text{Ecart de bilan}$$

Sur les graphiques, certaines courbes toujours positives correspondent à des débits entrants uniquement (« + Recharge par les pluies », « + Infiltration eau de surface »), les valeurs de débits annuels sont donc positives uniquement (entrées d'eau, comptabilisées positivement par le modèle MARTHE, par convention).

Sur les graphiques, certaines courbes toujours négatives correspondent à des débits sortants uniquement (« - Pompages », « - Débordements »), les valeurs de débits annuels sont donc négatives uniquement (sorties d'eau, comptabilisées négativement par le modèle MARTHE, par convention).

Sur les graphiques, certaines courbes positives ou négatives correspondent, pour simplifier l'affichage en diminuant le nombre de courbes, à des soldes partiels de débits qui peuvent être entrants ou sortants selon l'année (« +/- Echange zones voisines », « +/- Echanges nappes-rivières », « +/- Echanges nappes-lac ») ; les valeurs de débits annuels sont donc positives ou négatives selon le sens majoritaire de l'échange d'eau pour une année donnée.

La courbe « → Stockage dans les nappes » correspond au solde général de toutes les entrées et sorties d'eau, tandis que la courbe « ! Ecart de bilan » correspond à l'erreur numérique totale liée à la convergence du modèle.

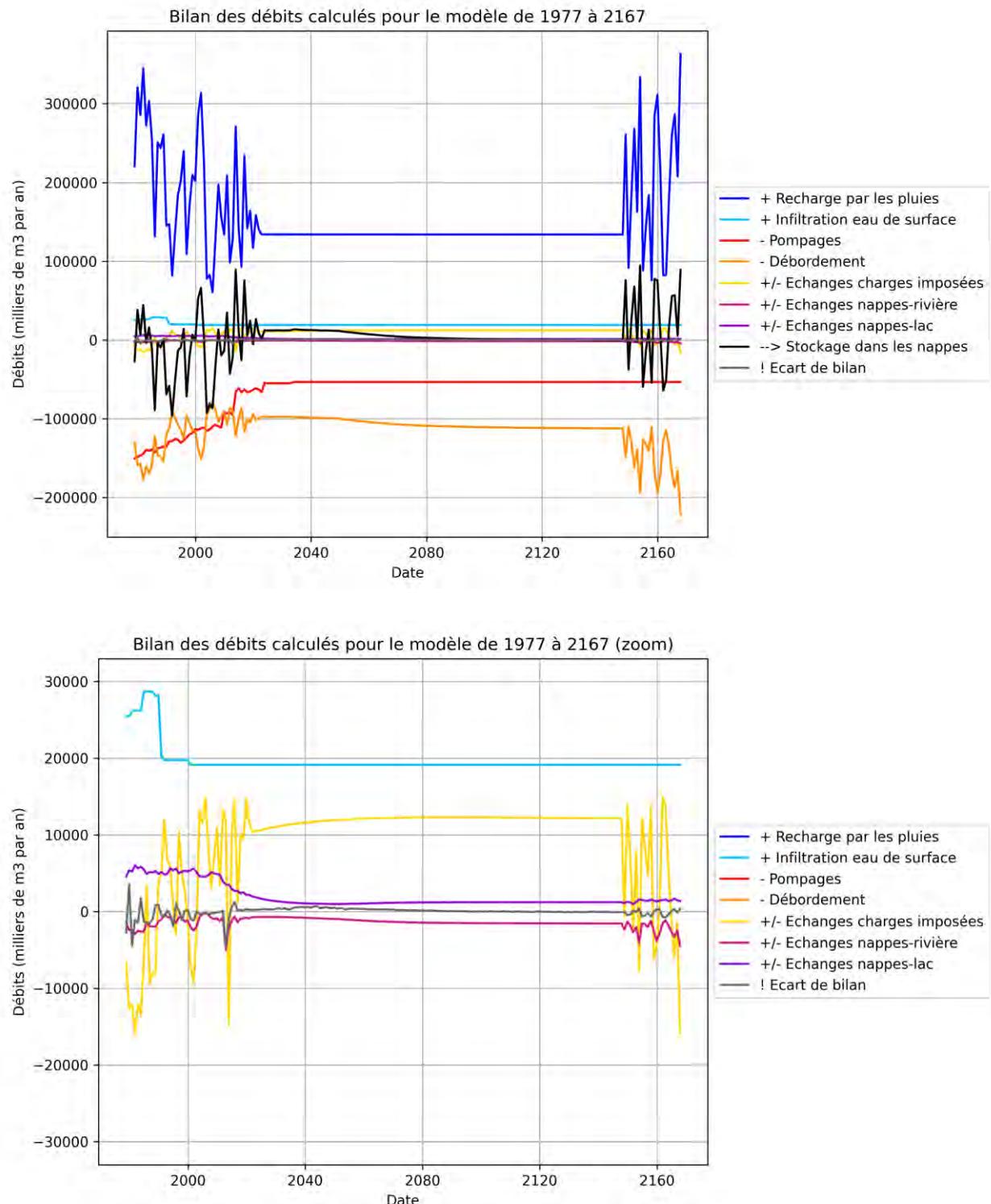


Illustration 27 : Evolution des termes du bilan hydrodynamique annuel (zoom sans la courbe « Stockage dans les nappes ») calculés pour l'ensemble du modèle régional, toutes nappes confondues (nappe des GTI, réservoirs miniers et nappe des alluvions), pour la période de calibration (1977-2022) suivie des deux périodes de la simulation tendancielle : remontée moyenne de la nappe jusqu'à quasi-stabilisation (2023-2147), période exceptionnelle de hautes eaux (2148-2167).

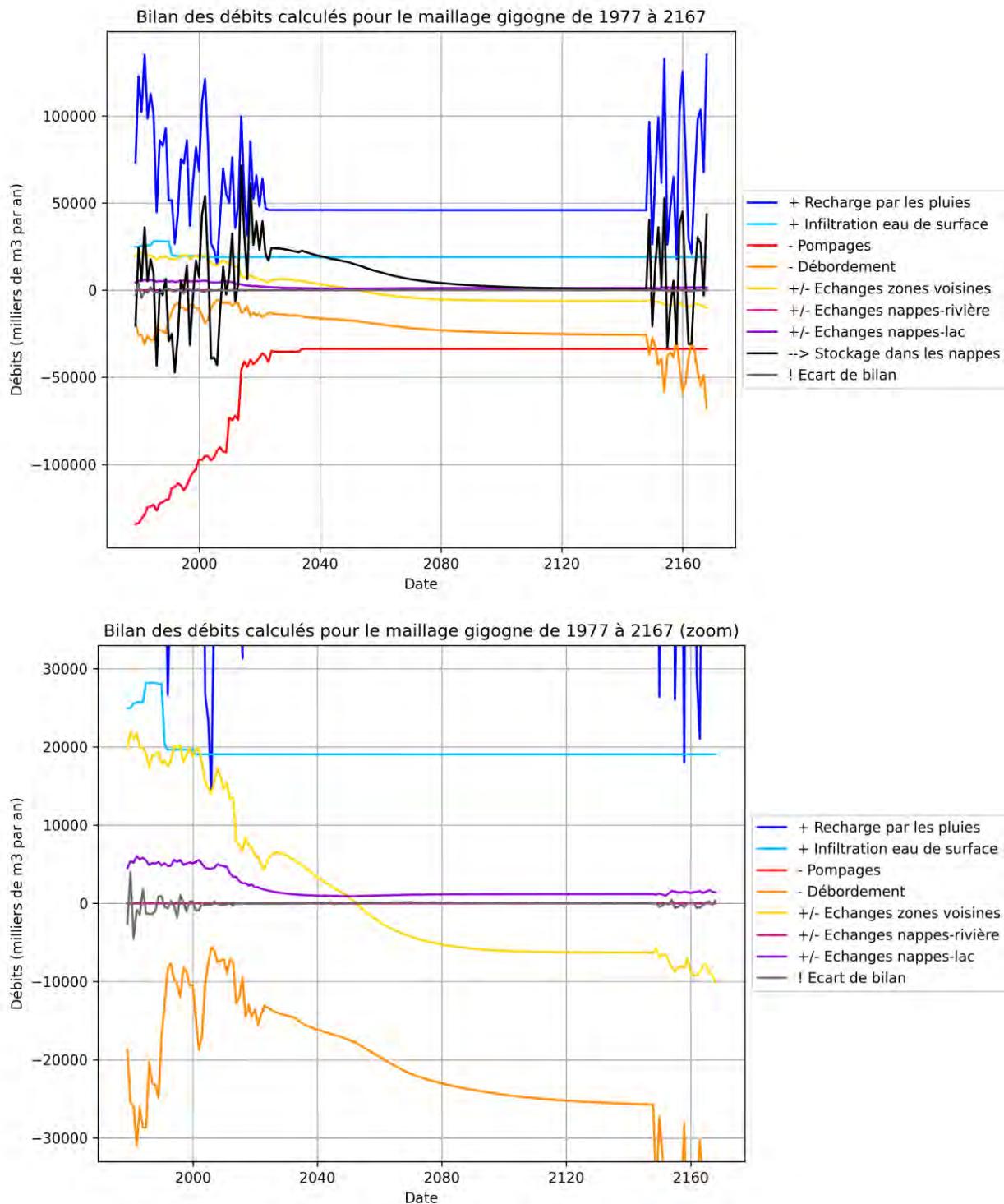


Illustration 28 : Evolution des termes du bilan hydrodynamique annuel (zoom sans la courbe « Stockage dans les nappes ») calculés pour le maillage gigogne du bassin houiller (parties française et allemande) et pour la nappe des GTI (zone géométrique 12 du modèle), pour la période de calibration (1977-2022) suivie des deux périodes de la simulation tendancielle : remontée moyenne de la nappe jusqu'à quasi-stabilisation (2023-2147), période exceptionnelle de hautes eaux (2148-2167).

c) Dénombrement par commune des bâtiments situés dans les mailles soumises à une remontée de nappe à moins de 3 m de profondeur

Le tableau de l'Illustration 29 dénombre par commune le nombre de bâtiments présents dans les mailles soumises à une remontée de nappe à moins de 3 m de profondeur pour les situations de moyennes eaux et de hautes eaux de la simulation tendancielle.

Nota bene : 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.

Nom de la commune	Code de la commune	Nombre de bâtiments menacés en situation de moyennes eaux	Nombre de bâtiments menacés en situation de hautes eaux
Alsting	57013	25	30
Béning-lès-Saint-Avold	57061	22	185
Berviller-en-Moselle	57069	1	1
Betting	57073	216	225
Bisten-en-Lorraine	57087	1	3
Bouchepron	57095	1	1
Cocheren	57144	668	787
Creutzwald	57160	668	1144
Dalem	57165	125	187
Diesen	57765	386	399
Falck	57205	737	823
Forbach	57227	1473	2055
Fouligny	57230	24	43
Freyming-Merlebach	57240	678	895
Grosbliederstroff	57260	772	859
Ham-sous-Varsberg	57288	1396	1513
Hargarten-aux-Mines	57296	296	344
Hombourg-Haut	57332	689	924
L'Hôpital	57336	0	5
Longeville-lès-Saint-Avold	57413	1	9
Macheren	57428	92	92
Merten	57460	968	1094
Morsbach	57484	134	368
Petite-Rosselle	57537	619	672
Porcelette	57550	55	103
Raville	57563	1	1
Rosbruck	57596	175	227
Saint-Avold	57606	1603	1902
Schœneck	57638	0	1
Spicheren	57659	0	6
Stiring-Wendel	57660	133	306
Varsberg	57696	487	547
Velving	57705	1	1
Total		12447	15752

Illustration 29 : Dénombrement par commune des bâtiments présents dans les mailles soumises à une remontée de nappe à moins de 3 m de profondeur, pour les situations de moyennes eaux et de hautes eaux de la simulation tendancielle.

5.2. SIMULATION PRÉVISIONNELLE TENDANCIELLE AVEC SOLUTION DE RABATTEMENT

5.2.1. Objectifs de la simulation

Cette simulation reprend les conditions de la simulation tendancielle en ajoutant une contrainte sur le niveau de la nappe des GTI : le niveau de la nappe ne doit pas se situer à une profondeur inférieure à 3 mètres, dans les zones bâties soumises à un risque de remontée de nappe déterminées par la simulation tendancielle et pour lesquelles l'Etat s'est engagé à mettre les moyens de rabattement nécessaires. Ces zones sont nommées « Zones d'engagement de l'Etat » et ont été fournies par la DREAL Grand Est.

Cette condition supplémentaire de non dépassement d'une cote altimétrique située à une profondeur de 3 mètres vise à identifier et dimensionner les moyens à mettre en œuvre pour protéger les infrastructures bâties souterraines (fondations, caves, parkings souterrains...), et doit s'appliquer durant toute la simulation tendancielle à partir de 2023, c'est-à-dire à toutes les situations de la nappe calculées par le modèle : phase transitoire de remontée de la nappe, quasi-stabilisation de la nappe (situation de moyennes eaux), situation exceptionnelle de hautes eaux.

L'objectif de la simulation consiste donc à rechercher l'emplacement des ouvrages de rabattement nécessaires, et à calculer pour chacun le volume à pomper chaque année, pour que la nouvelle condition soit respectée par le modèle, en tout temps et en tout point des zones d'engagement de l'Etat.

5.2.2. Méthodologie itérative de la simulation

La méthodologie qui a été proposée et mise en œuvre par le BRGM pour atteindre cet objectif est la suivante :

- une première simulation tendancielle n°0 avec altitude de débordement à -3 m sous le sol permet de rechercher la localisation des mailles qui débordent et de calculer le débit nécessaire de débordement pour maintenir le niveau de la nappe des GTI à une profondeur de 3 mètres et sur lesquelles se trouvent des bâtiments à risque d'inondation par remontée de nappe et qui intersectent les zones d'engagement de l'Etat ; on utilise pour cette simulation n°0 une fonctionnalité récente de MARTHE, développée spécifiquement pour le cas du bassin houiller, qui permet de fixer l'altitude du débordement dans une maille à n'importe quelle altitude sous le toit de la maille, au lieu du toit de la maille lui-même ;
- les mailles bâties qui débordent et qui sont situées dans les zones d'engagement de l'Etat sont sélectionnées puis regroupées ; on dessine alors des polygones qui englobent chaque groupe de mailles sélectionnées, en cherchant à obtenir des polygones aussi « compacts » que possible et qui ne traversent pas de faille modélisée : le nombre de polygones générés s'est élevé à 69, ils correspondent à autant de points de pompage de rabattement simulés pour protéger les zones bâties ;
- dans chaque polygone, on calcule la somme des débits de débordement des mailles qui s'y trouvent, cette somme correspondant au débit minimum de pompage nécessaire pour protéger les zones bâties ;
- dans chaque polygone, la localisation d'une maille devant recevoir un point de pompage destiné à protéger les mailles voisines est définie à l'emplacement du barycentre des débits générés par les mailles qui débordent (sauf cas particulier : pour certains petits

polygones comportant peu de mailles de débordement, dont le débit de débordement est faible et qui concernent très peu de bâtiments, chaque maille qui déborde est gardée telle quelle en considérant qu'elle simule un moyen de rabattement très local, tel qu'une pompe vide-cave) ;

- dans chaque polygone, la maille correspondant au point de pompage défini reçoit la somme des débits de débordement des mailles voisines, cette somme est convertie en débit total à pomper pour protéger les mailles du polygone,
- une simulation tendancielle n°1 avec solution de rabattement à 69 pompages permet de savoir si l'ensemble des mailles à protéger de la remontée de la nappe des GTI le sont effectivement, grâce aux pompages de rabattement simulés dans chaque polygone : ce n'est jamais le cas lors de cette première itération en raison de l'influence spatiale plus limitée des pompages en comparaison avec les mailles à débordement qui en sont une approximation sous-estimée (à cause du fait qu'un pompage appliqué en un point crée un cône de rabattement qui exige un débit plus élevé pour obtenir le même rabattement qu'un ensemble de mailles à débordement),
- on recommence la simulation tendancielle avec solution de rabattement à 69 pompages après avoir ajouté au débit de pompage dans chaque polygone les débits résiduels de débordement des mailles voisines, cette simulation porte le n°2,
- on poursuit les itérations jusqu'à ce que toutes les mailles soumises à risque de remontée de nappe à une profondeur de 3 m ne débordent plus, ce qui signifie que chaque pompage permet de maintenir le niveau de la nappe à moins de 3 m sous le sol en toutes situation de la nappe : le nombre d'itérations nécessaires pour atteindre cet objectif s'est élevé à 36.

5.2.3. Résultats de la simulation

Au terme de la simulation tendancielle avec débordement (itération n°0), suivie de la simulation tendancielle itérative avec solution à 69 points de pompage (itérations n°1 à 36), il a été possible de calculer la localisation souhaitable et les chroniques de débit des points de pompage de rabattement nécessaires pour maintenir le niveau de la nappe à moins de 3 m sous le sol, dans les zones bâties situées dans les zones d'engagement de l'état et en toute situation de la nappe (remontée, moyennes eaux, hautes eaux).

Nota bene : l'emplacement des futurs points de pompage de rabattement calculés par la simulation et les valeurs de débits de pompage qui seraient nécessaires pour maintenir la nappe des GTI à une profondeur de 3 m dans les mailles bâties soumises à une remontée de nappe ne sont pas cartographiés ni présentés en détail ici, car ils doivent être utilisés uniquement par des experts comme des guides de travail pour le dimensionnement d'un futur réseau de protection des mailles bâties dans les zones d'engagement de l'Etat. Le dimensionnement réel du réseau de protection doit faire l'objet d'études locales approfondies et d'une adaptation aux réalités de terrain actuelles et futures, pour tenir compte du ou des risques potentiels (sur tous types d'enjeux) résultant de la remontée de nappe. Les résultats détaillés de cette simulation, ainsi que les résultats de l'ensemble du travail de modélisation effectué et décrit dans le présent rapport, ont été transmis sous une forme numérique à GEODERIS.

6. Conclusion

GEODERIS a demandé au BRGM de faire évoluer et de mettre à jour le modèle de la nappe des GTI dans le bassin houiller version 1 (2018), dans le but d'actualiser les prévisions de remontée de nappe et de fournir à GEODERIS les éléments lui permettant de dimensionner un réseau de surveillance de la nappe des GTI, et un réseau de protection de certaines zones bâties soumises à un risque de remontée de nappe. Le modèle mis à jour est nommé « modèle des GTI du bassin houiller version 2 de 2024 », ou plus simplement modèle v2 (2024). Le présent rapport présente le travail réalisé et les résultats obtenus.

Dans le chapitre 2, 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 le chapitre 3, on détaille l'historique de la révision du modèle régional, puis les changements importants apportés lors des mises à jour successives du modèle régional pour obtenir la version v1 (2018) puis la version v2 (2024), réalisées dans le but d'affiner les prévisions de remontée de la nappe dans l'ensemble du bassin houiller lorrain. Les principales évolutions et mises à jour du modèle GTI version v1 (2028) vers la version v2 (2024) sont résumées ci-dessous.

- **Elargissement 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 pour la version v1 (2018) sur une superficie qui débordait largement de la superficie des travaux miniers, pour des raisons de cohérence géologique et hydrogéologique : le sous-maillage gigogne englobait 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. Pour la version v2 (2024), le sous-maillage gigogne a été élargi afin d'inclure la commune de Grosbliederstroff.
- **Correction du modèle numérique de terrain en Allemagne** : lors du présent travail de mise à jour, des erreurs d'altitude en bordure du MNT LIDAR Français, dans la zone qu'il couvre en Allemagne, ont été détectées. Ces erreurs n'avaient pas d'impact sur les résultats des simulations en France, mais par souci de cohérence le choix a été fait, pour la version v2 (2024) du modèle et pour le territoire allemand, de ne plus utiliser le MNT LIDAR français, et de le remplacer par le MNT LIDAR allemand.
- **Modification de la « topographie » du modèle** : la « topographie » du modèle MARTHE décrit la surface supérieure du modèle. Dans le modèle version v1 (2018), cette surface correspondait au MNT LIDAR au droit des affleurements des GTI ou des alluvions, et à la cote du toit des grès lorsqu'ils sont sous couverture du Muschelkalk et des terrains sus-jacents. Afin de permettre une représentation de la géométrie de l'ensemble des couches de couverture des GTI, la couche 1 du modèle version v2 (2024) correspond désormais aux terrains de couverture de la formation des grès du Trias. Cette modification permet de connaître l'épaisseur des terrains de couverture en tout point du modèle. Les écoulements ne sont pas considérés dans cette couche de couverture, dont la base est réputée imperméable : lorsqu'elle existe la couche de couverture est considérée comme inerte dans les calculs, mais constitue une barrière imperméable empêchant tout échange entre la surface du sol et la couche des GTI.

- **Redéfinition de la couche des alluvions** : la structure géologique décrite par le modèle v2 (2024) a été conservée à l'identique de la version v1 (2018) du modèle GTI, sauf en ce qui concerne la modélisation de la couche des alluvions dans le bassin houiller : les contours géologiques des alluvions ont été entièrement redéfinis à partir des cartes géologiques et d'un critère de pente faible, puis ajustées localement pour suivre les courbes de niveau du MNT, et une épaisseur moyenne et un indicateur de présence d'un écran imperméable ont été attribués à chaque secteur d'alluvions considéré comme homogène.
- **Modification de la méthode de modélisation des failles** : deux types de failles sont identifiées dans le bassin houiller : les failles imperméables, qui bloquent totalement les écoulements, et les failles semi-perméables à travers lesquelles un flux d'eau peut transiter. Avec le code MARTHE, le moyen classique de modéliser une faille semi-perméable est d'attribuer une perméabilité plus faible que la matrice poreuse environnante sur trois rangées de mailles, le long du linéaire de la fracture. Le BRGM a développé en 2022, dans le cadre de la première phase d'une étude d'analyse de la sensibilité du rôle des failles dans le bassin houiller, un nouvel objet de modélisation « fracture semi-perméable » destiné à supprimer les limitations de l'approche habituelle consistant à attribuer une perméabilité très faible à trois rangées de mailles suivant le tracé de la faille. Toutes les failles du modèle v2 (2024) ont été modélisées par ce nouvel objet, en attribuant à chacune une perméabilité équivalente à celle des trois rangées de mailles du modèle v1 (2018).
- **Redéfinition du réseau hydrographique** : le réseau hydrographique a été entièrement vérifié et corrigé à partir des couches cartographiques IGN et des photographies satellitaires historiques et actuelles. Le réseau hydrographique du modèle a ainsi pu être reconstruit de manière plus précise, et la version v2 (2024) fait appel à des objets de modélisation plus adaptés afin de reproduire de manière plus réaliste le comportement hydrologique du réseau. Les principales modifications concernent les tronçons de cours d'eau, les surfaces en eau permanentes, les dépressions topographiques (anciennes carrières, pour certaines en cours de remplissage), les anciens bassins d'infiltration.
- **Modification de la méthode de modélisation de l'infiltration en pied de côte du Muschelkalk** : au cours des précédentes mises à jour du modèle, la nécessité d'avoir une infiltration supplémentaire au pied du Muschelkalk avait été identifiée. Dans version v1 (2018), l'approche choisie était l'ajout de rivières fictives qui infiltreraient de l'eau vers la nappe. Cette approche a été modifiée pour plus de cohérence et a été remplacée dans la version v2 (2024) par l'ajout d'un flux d'infiltration à l'emplacement des anciennes rivières fictives. Les valeurs de ces flux ont été calculées de manière à reproduire les débits qu'échangeaient les anciennes rivières fictives avec la nappe.
- **Mise à jour de la base de données hydrogéologiques du modèle (sous Excel) sur la période 1968-2022** : ajout des nouveaux points de mesure et des nouvelles données annuelles de niveau piézométrique (France) et de volume prélevé (France et Allemagne).
- **Modification de la méthode de calcul de la recharge spatialisée de la nappe** : dans le modèle v2 (2024), la recharge est calculée de la manière la plus précise possible via un véritable bilan hydroclimatique réalisé par le modèle MARTHE pour chaque zone correspondant à l'intersection entre une maille de données météorologiques de la grille SAFRAN de Météo-France et une zone de sol, elle-même correspondant à une portion d'un bassin versant hydrologique situé sur un affleurement des GTI ; cette méthode permet de calculer l'infiltration vers les eaux souterraines et le ruissellement vers les cours

d'eau et remplace avantageusement la méthode simplifiée mise en œuvre dans le modèle v1 (2018).

Le chapitre 4 présente la méthodologie et les résultats de la calibration du modèle v2 (2024). En effet, la modification de la structure d'un modèle numérique et/ou l'introduction de nouvelles données impose toujours une nouvelle calibration du modèle de manière à ajuster au mieux les évolutions des variables simulées sur les données observées (niveaux piézométriques notamment). La calibration du modèle régional dans le bassin houiller nécessite de très nombreux essais 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 simuler aux mieux les chroniques des niveaux observés sur les points de suivi piézométrique.

Après une première phase manuelle de calibration par essai et erreur, une phase de calibration assistée par un algorithme de la suite d'algorithmes PEST a été mise en œuvre (PEST : Model-Independent Parameter Estimation and Uncertainty Analysis, <https://pesthomepage.org/>). La méthode numérique utilisée vise à optimiser les paramètres hydrodynamiques du modèle de manière à minimiser la différence entre les prédictions du modèle et les données observées. Une interface spécifique a été utilisée pour permettre un « dialogue » entre l'algorithme PEST et le modèle MARTHE (PyMarthe). Le processus est fondamentalement équivalent à une calibration manuelle, et consiste à opérer des itérations de modification du modèle conceptuel, d'ajustement des paramètres hydrodynamiques, puis d'évaluation du résultat ; toutefois, lors de la phase d'ajustement des paramètres hydrodynamiques, grâce à la réalisation automatique de milliers de tests de calibration au lieu d'un seul test, l'algorithme d'optimisation peut trouver une solution optimale impossible à trouver manuellement. Ce système d'optimisation est complexe à mettre en œuvre et gourmand en puissance de calcul, c'est pourquoi les calculs ont été réalisés à distance sur un puissant serveur de calcul.

Tous les points disposant d'au moins une mesure de niveau piézométrique sur la période 1977-2022 ont été considérés pour la calibration du modèle, soit pour le bassin houiller et pour l'ensemble des nappes 450 piézomètres en France et 71 en Allemagne. Les tendances d'évolution sont bien reproduites sur la plupart des points de mesure. Pour la nappe des GTI dans le maillage gigogne du bassin houiller (incluant les parties françaises et allemandes), la moyenne des médianes des écarts absolu pondérée par le nombre d'observations annuelles par chronique est de 2,64 m ; la moyenne des médianes des écarts absolu est de 3,58 m ; l'erreur quadratique moyenne (RMSE) est de 4,18 m.

Le chapitre 5 présente les objectifs et les résultats des deux simulations prévisionnelles réalisées à l'aide du modèle de la nappe des GTI v2 (2024) calibré jusqu'en 2022.

La première simulation prévisionnelle réalisée est nommée « tendancielle », elle est basée sur un scénario de prélèvements futurs constants dans la nappe des GTI et de niveau constant dans les réservoirs miniers, combiné à deux scénarios hydroclimatiques successifs décrivant les évolutions futures possibles de la recharge des nappes en tenant compte du changement climatique. Cette simulation prévisionnelle tendancielle n'a pas pour but de prévoir l'évolution future précise à long terme de la nappe des GTI année après année, car le calcul de cette évolution dépendrait trop fortement des hypothèses très incertaines qu'on pourrait formuler sur les évolutions futures à très long terme des entrées et sorties d'eau dans la nappe, et notamment des pompages et de la recharge. La simulation vise toutefois à fournir des informations très importantes sur l'évolution moyenne annuelle de la nappe ; sur le temps moyen qu'il faudra pour qu'elle remonte puis se stabilise ; sur la situation future de moyennes eaux après

stabilisation ; sur une situation future possible de hautes eaux dans une période climatique de pluviosité exceptionnelle ; et sur la localisation des zones bâties soumises à un risque de remontée de nappe si aucun moyen de rabattement complémentaire à ceux déjà existants n'est mis en place.

Le nombre de bâtiments présents dans les mailles soumises à une remontée de nappe à moins de 3 m de profondeur pour les situations de moyennes eaux et de hautes eaux de la simulation tendancielle s'élèvent à près de 12500 bâtiments en moyennes eaux et 16000 bâtiments en hautes eaux, pour un total de 33 communes potentiellement concernées.

La deuxième simulation prévisionnelle réalisée est nommée « tendancielle avec solution de rabattement à 69 pompages », elle reprend les conditions de la simulation tendancielle en ajoutant une contrainte sur le niveau de la nappe des GTI : le niveau de la nappe ne doit pas se situer à une profondeur inférieure à 3 mètres, dans les zones bâties soumises à un risque de remontée de nappe déterminées par la simulation tendancielle et pour lesquelles l'Etat s'est engagé à mettre les moyens de rabattement nécessaires. Ces zones sont nommées « Zones d'engagement de l'Etat » et ont été fournies par la DREAL Grand Est.

Cette condition supplémentaire de non dépassement d'une cote altimétrique située à une profondeur de 3 mètres vise à identifier et dimensionner les moyens à mettre en œuvre pour protéger les infrastructures bâties souterraines (fondations, caves, parkings souterrains...), et doit s'appliquer durant toute la simulation tendancielle à partir de 2023, c'est-à-dire à toutes les situations de la nappe calculées par le modèle : phase transitoire de remontée de la nappe, quasi-stabilisation de la nappe (situation de moyennes eaux), situation exceptionnelle de hautes eaux.

L'objectif de la simulation consiste donc à rechercher l'emplacement des ouvrages de rabattement nécessaires, et à calculer pour chacun le volume à pomper chaque année, pour que la nouvelle condition soit respectée par le modèle, en tout temps et en tout point des zones d'engagement de l'Etat. Pour atteindre l'objectif, une méthode itérative a été appliquée. Au terme de 37 itérations de simulation, 69 zones à protéger ont été identifiées, et les volumes à pomper annuellement ont été calculés. Il est à noter que le dimensionnement réel du réseau de pompages de rabattement doit faire l'objet d'études locales approfondies et d'une adaptation aux réalités de terrain actuelles et futures, pour tenir compte du ou des risques potentiels (sur tous types d'enjeux) résultant de la remontée de nappe.

Les résultats détaillés des simulations, ainsi que les résultats de l'ensemble du travail de modélisation effectué et décrit dans le présent rapport, ont été transmis sous forme numérique à GEODERIS.

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, <http://www.lorraine.developpement-durable.gouv.fr/debits-mensuels-d-eteage-et-modules-bassin-rhin-r1484.html>.

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.

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.

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 lasergrammétiques 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.

Thornthwaite C.W., Mather J.R. (1955) – The water balance. Publ. Climatol., 8(1).

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 consécutif 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.

Vaute L., Morin B. (2022) – Bassin houiller lorrain : analyse de la sensibilité du rôle des failles dans les prévisions de remontée de nappe - Phase 1. Rapport final V0. BRGM/RP-72000-FR, 119 p., 17 fig, 15 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.

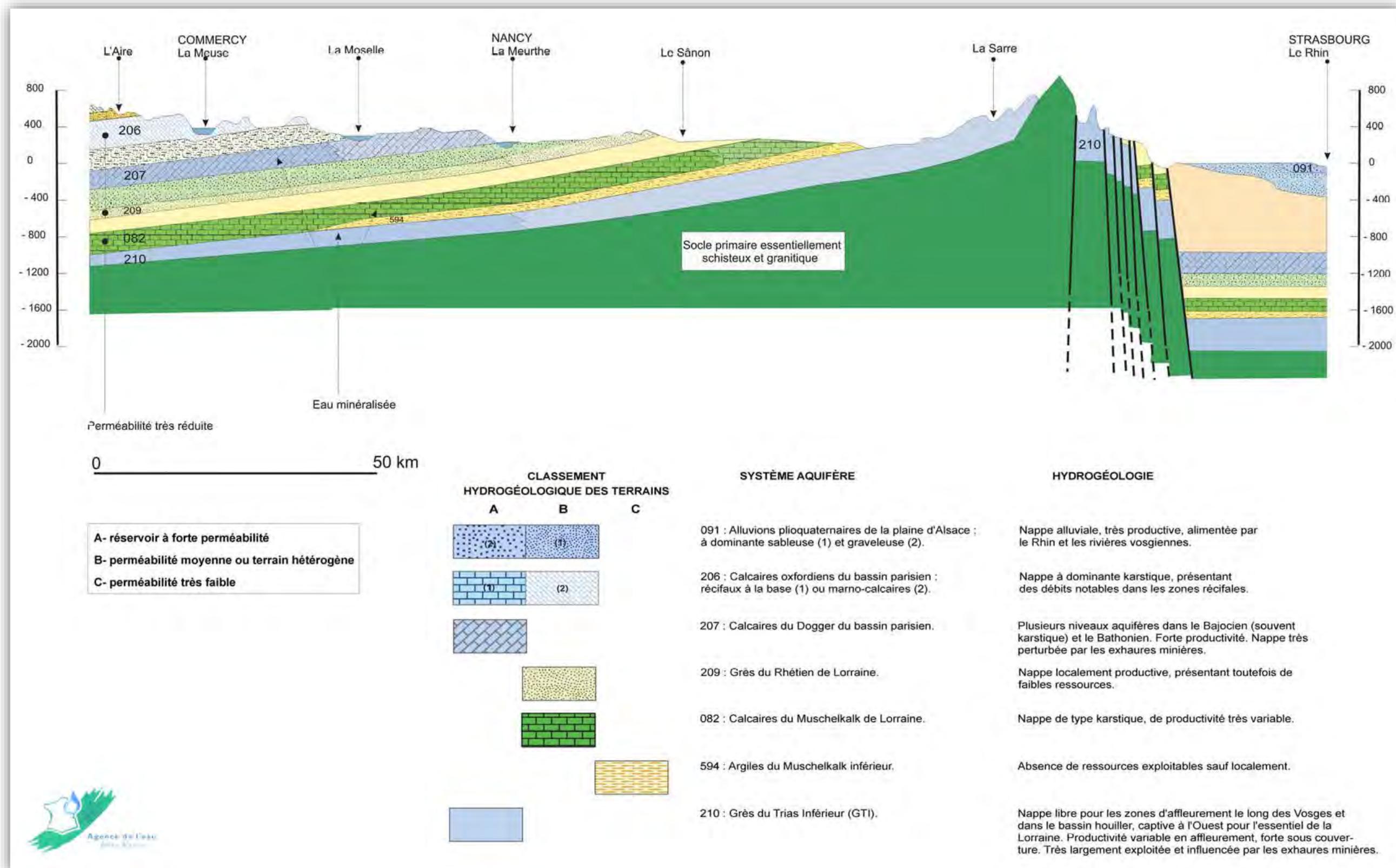
Service Géologique d'Alsace et de Lorraine (1967) – Etude hydrogéologique du bassin houiller Lorrain.

Annexe 1 : Cartes et coupes hydrogéologiques d'information générale

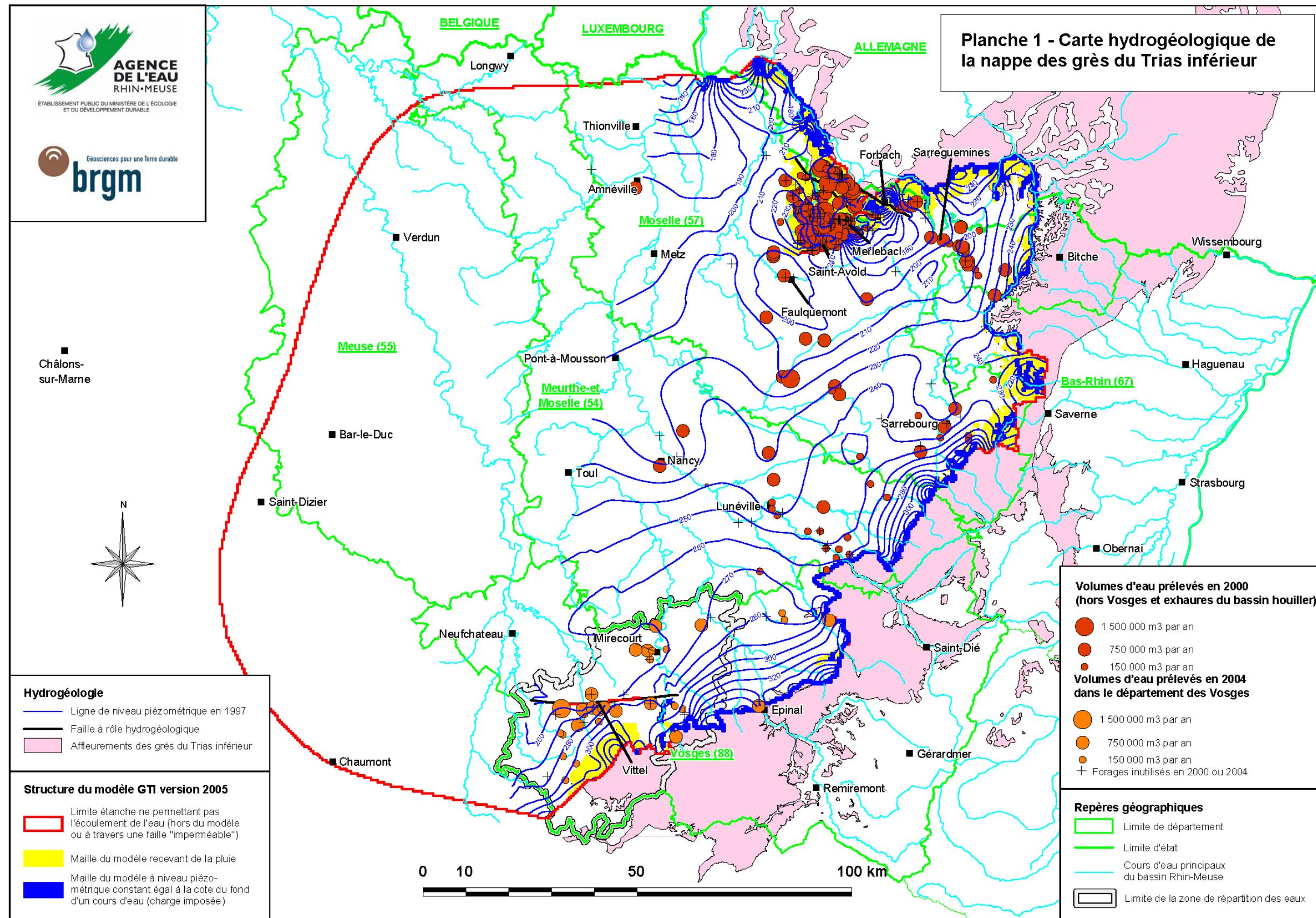
L'annexe 1 présente sur 5 pages A3 les cartes et coupes hydrogéologiques suivantes :

- **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).

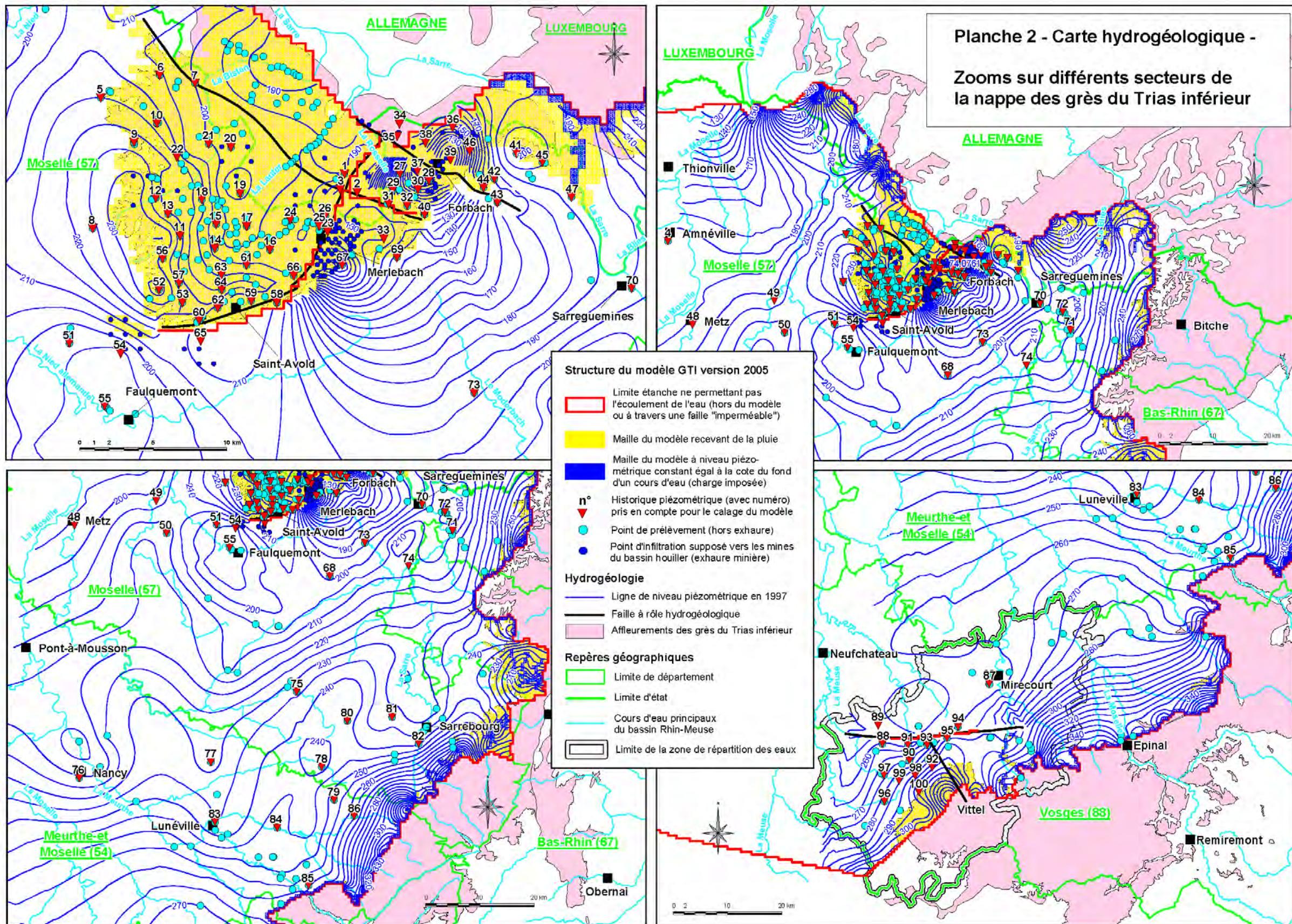
Coupe hydrogéologique ouest-est du bassin Rhin-Meuse (extrait de la Carte hydrogéologique du bassin Rhin-Meuse, Agence de l'eau Rhin-Meuse, 2004).



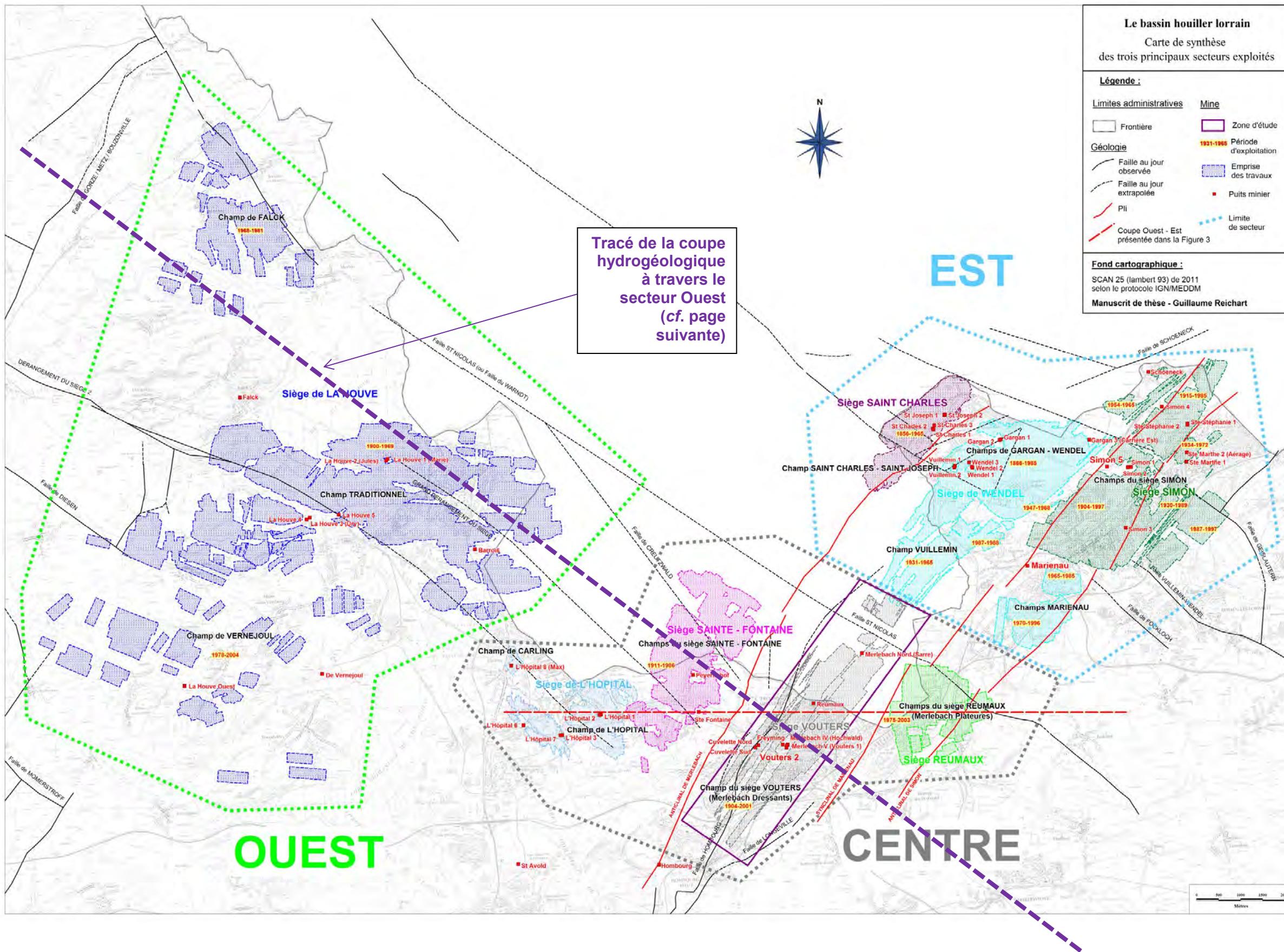
Carte hydrogéologique de la nappe des GTI et conditions aux limites du modèle régional (Vaute et al., 2007).



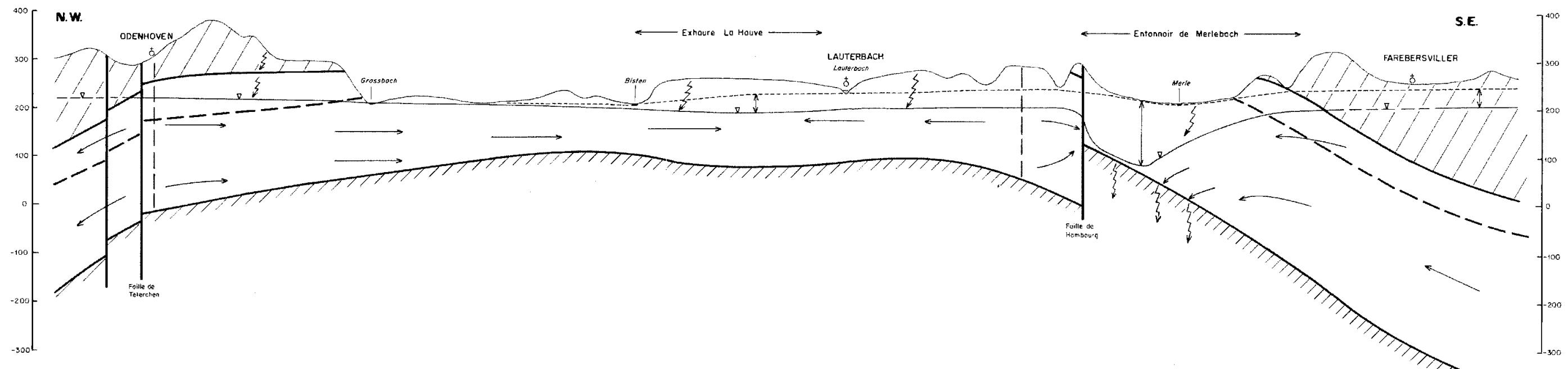
Carte hydrogéologique de la nappe des GTI et conditions aux limites du modèle régional – ZOOMS (Vaute et al., 2007).



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



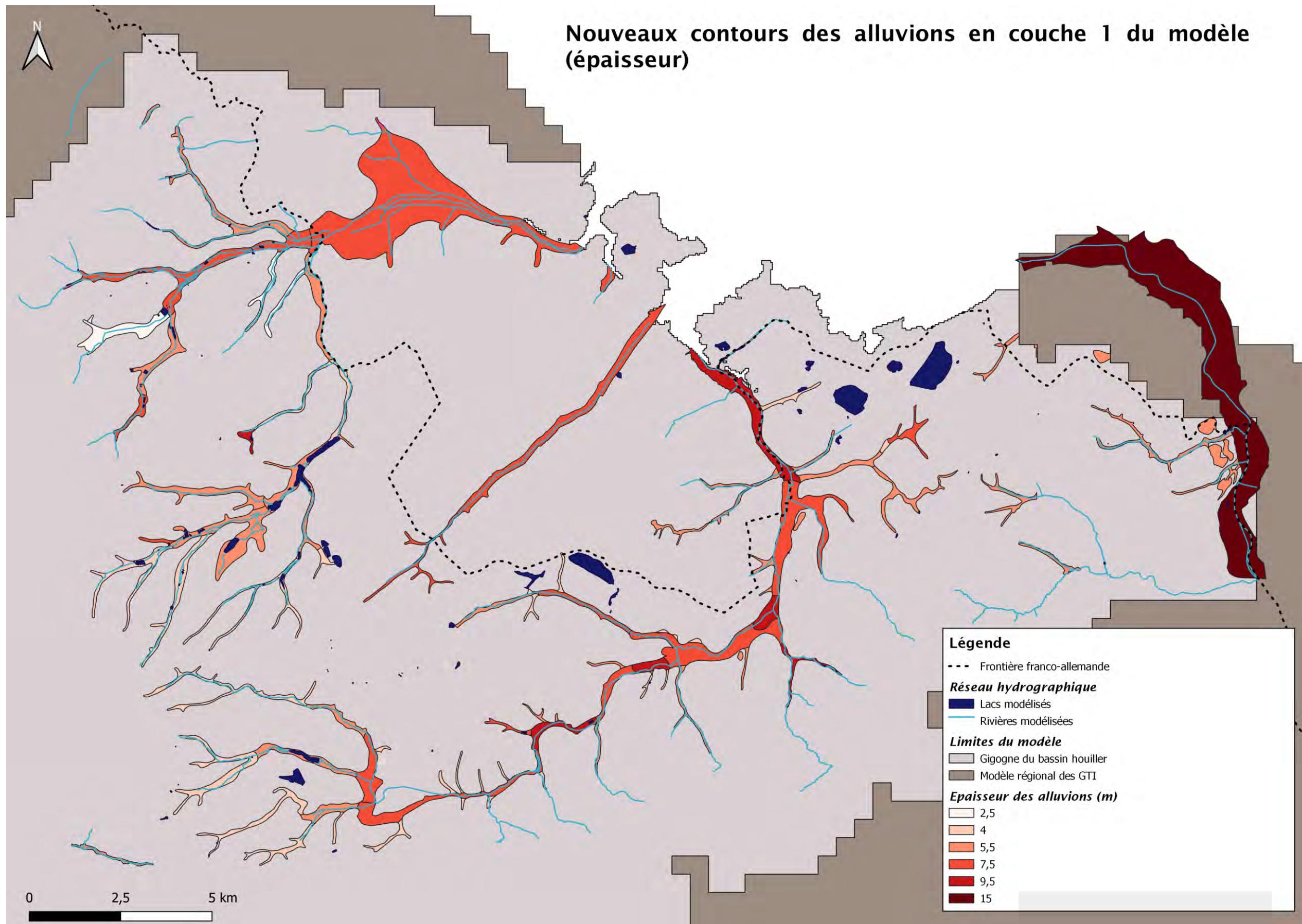
Coupe hydrogéologique à travers le secteur Ouest du bassin houiller lorrain (Babot et al., 1972).

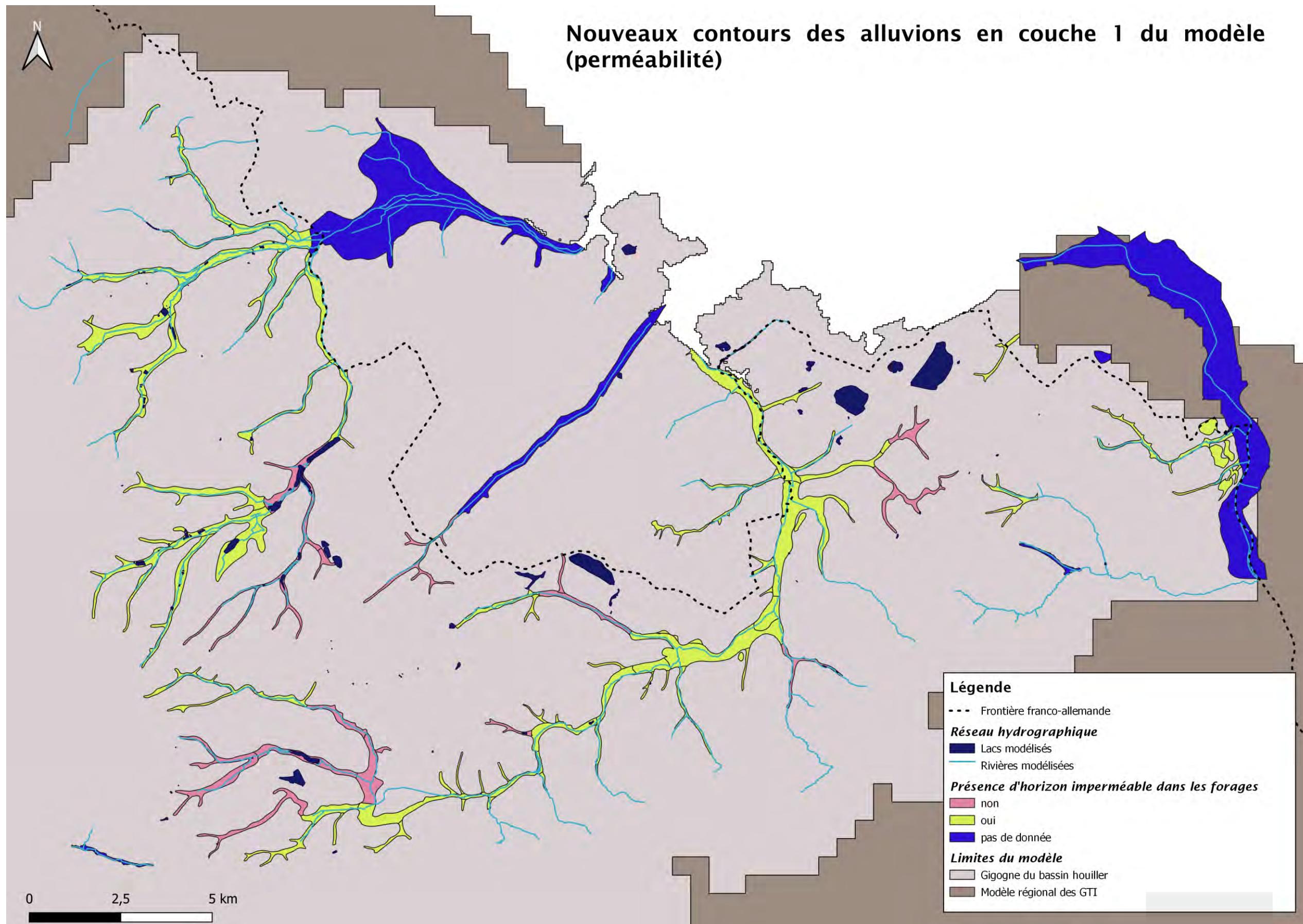


Annexe 2 : Données géologiques du modèle MARTHE dans le bassin houiller (version 2017)

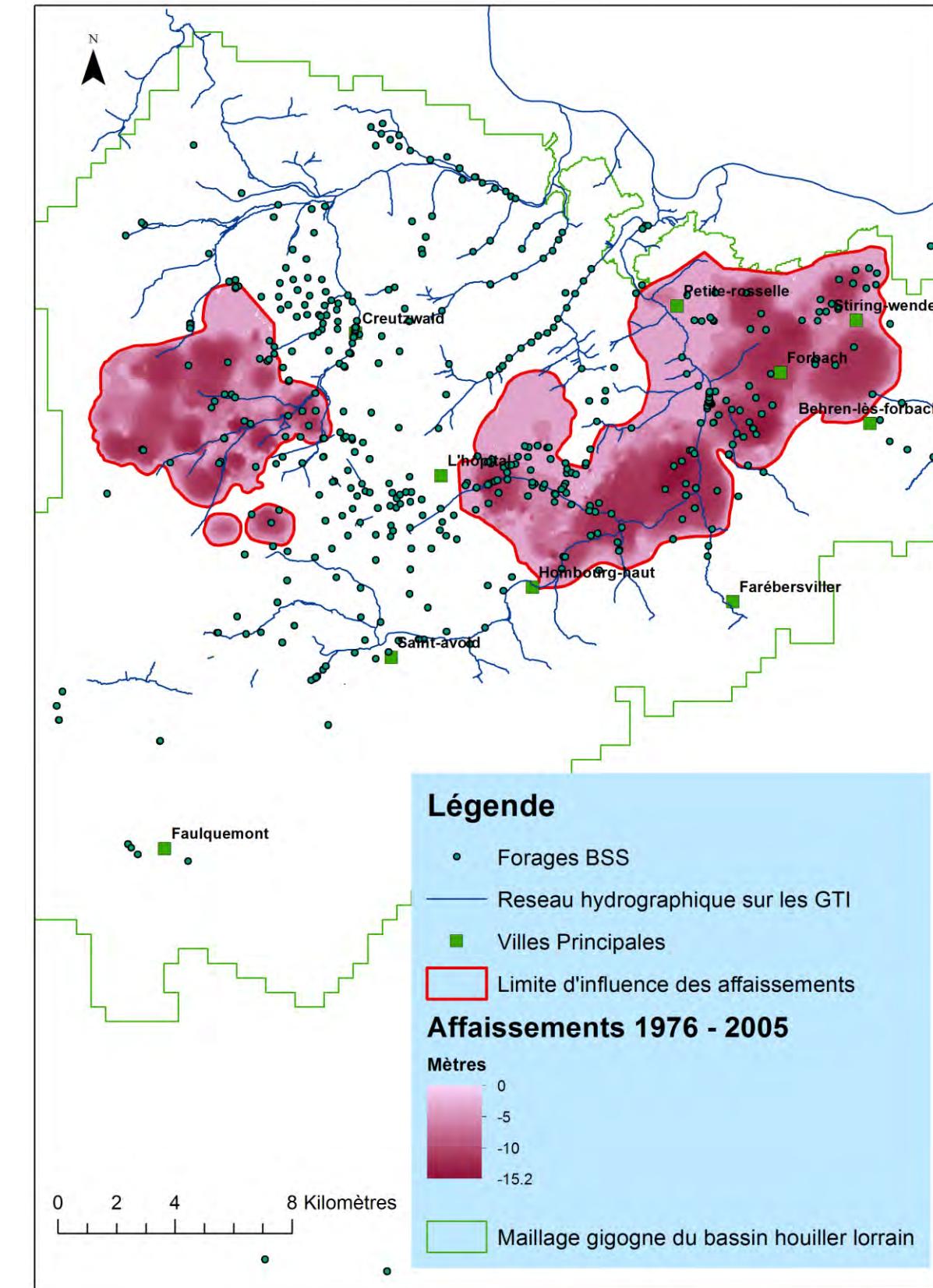
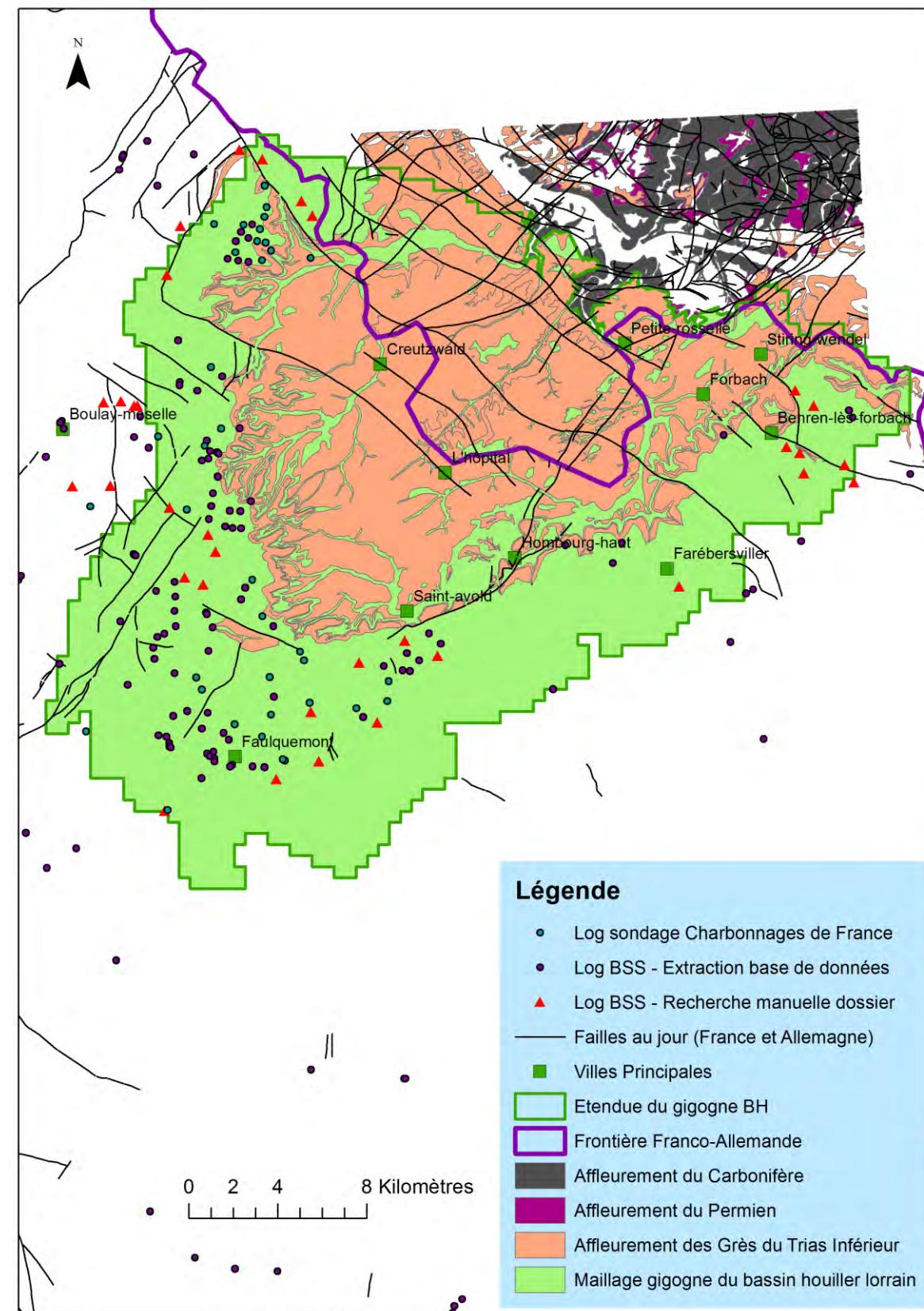
L'annexe 2 présente sur 7 pages A3 les cartes suivantes :

- **2 cartes des nouveaux contours géologiques des alluvions dans le bassin houiller considérés dans le modèle v2 - 2024**, montrant les classes d'épaisseur considérées dans le modèle et les zones estimées de présence d'un horizon imperméable selon les observations dans les sondages géologiques disponibles ;
- **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 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**.

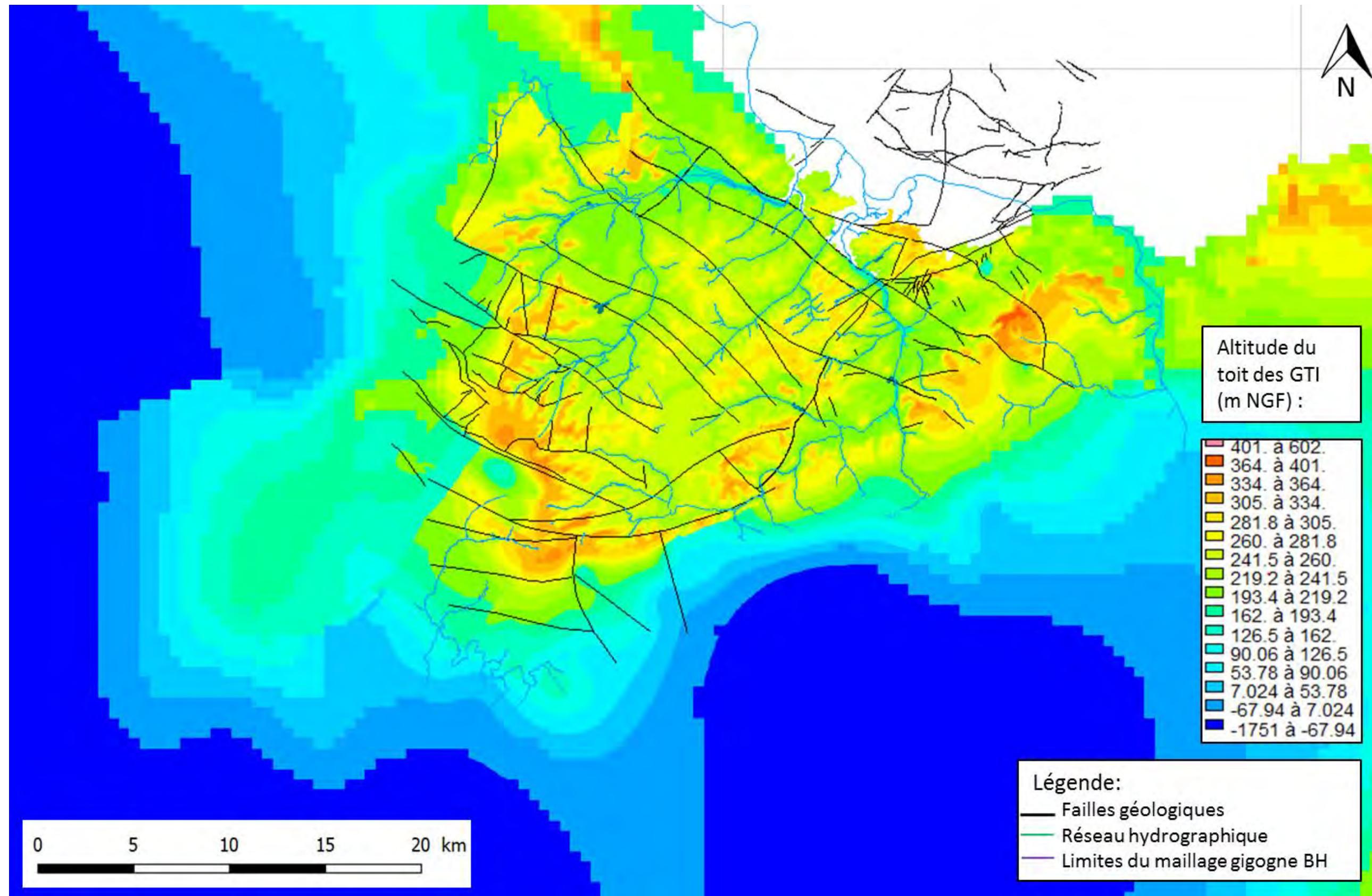




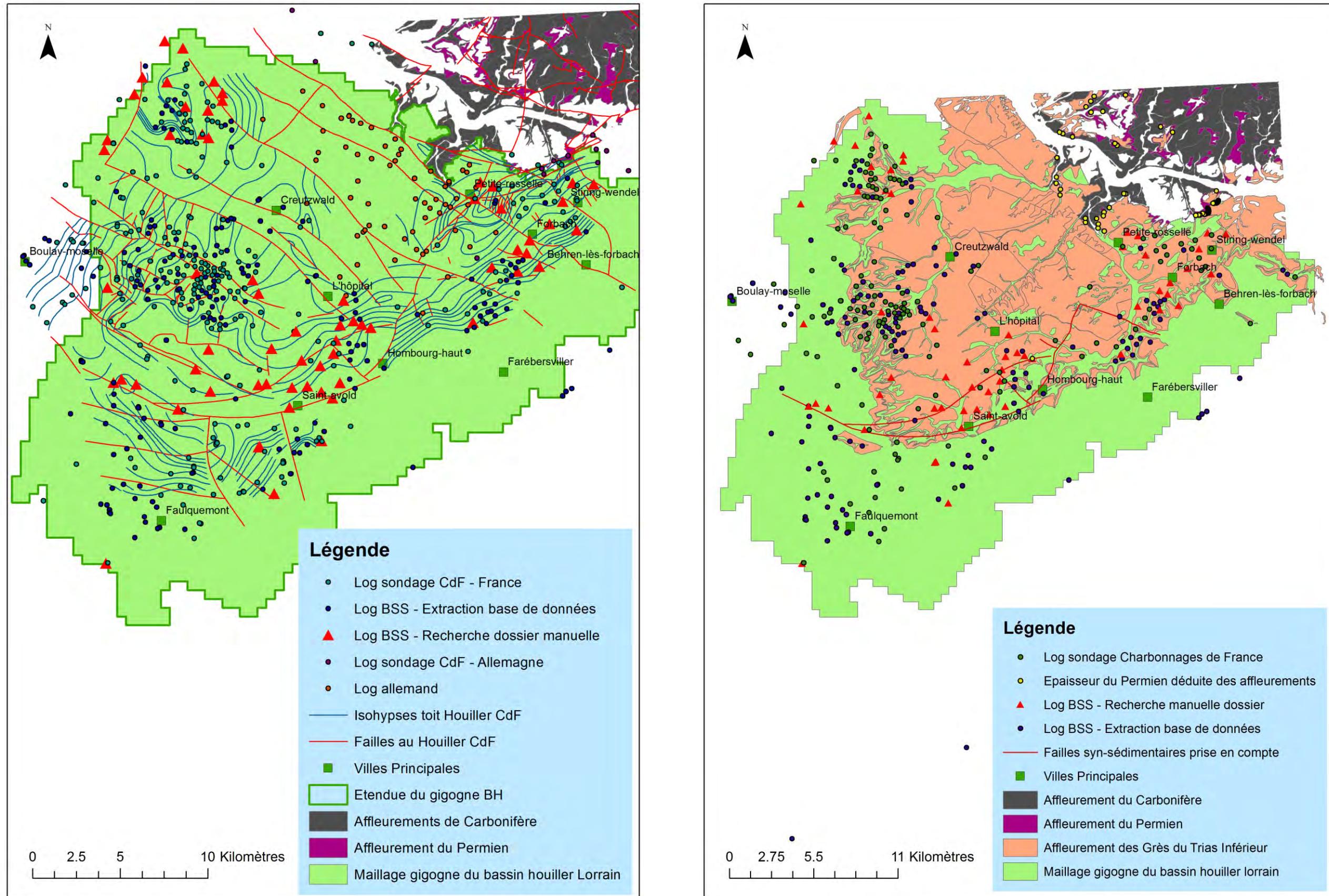
Données utilisées pour la modélisation géologique du toit des GTI



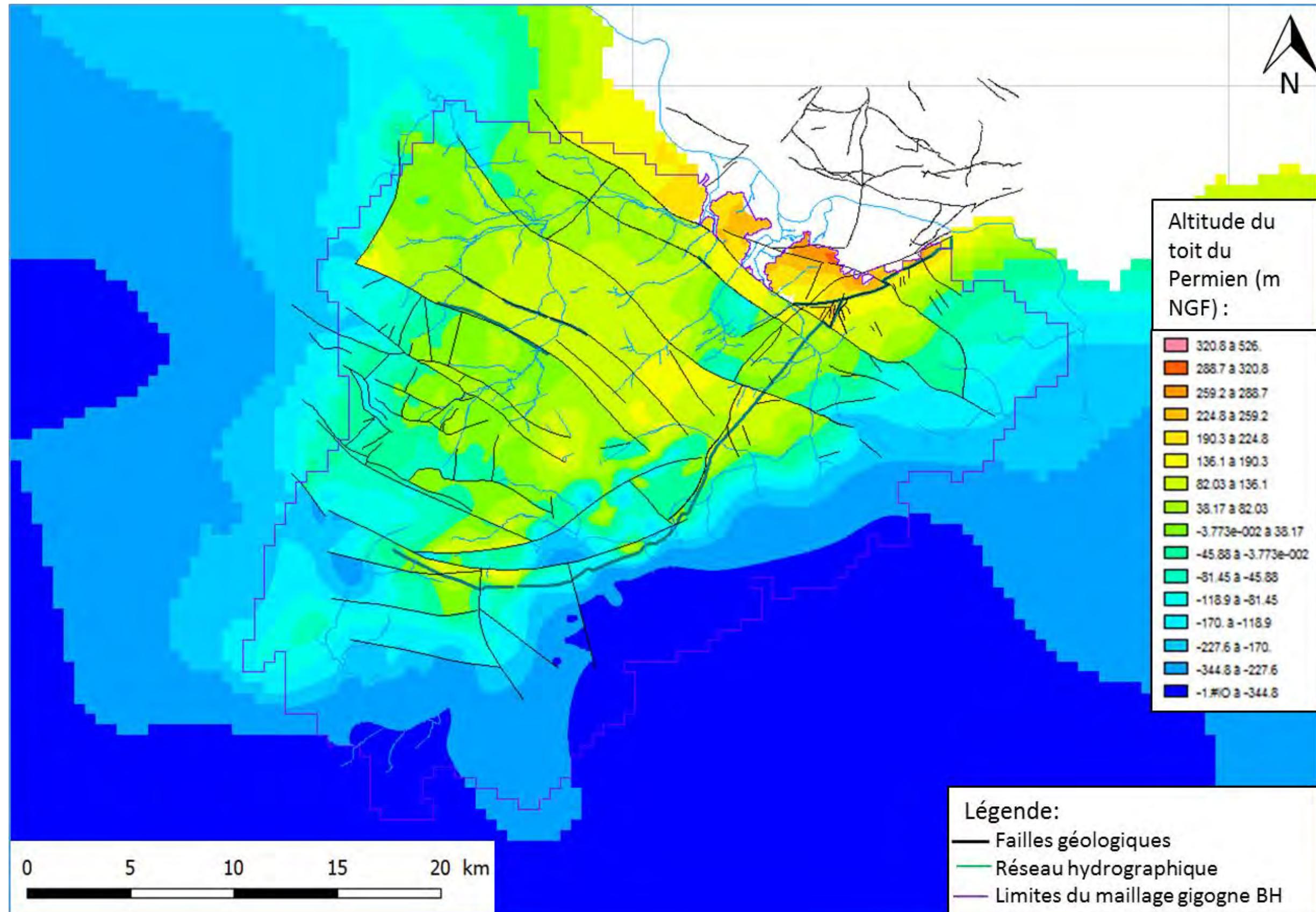
Résultat de l'intégration dans le modèle MARTHE du modèle géologique du toit du grès du Trias inférieur



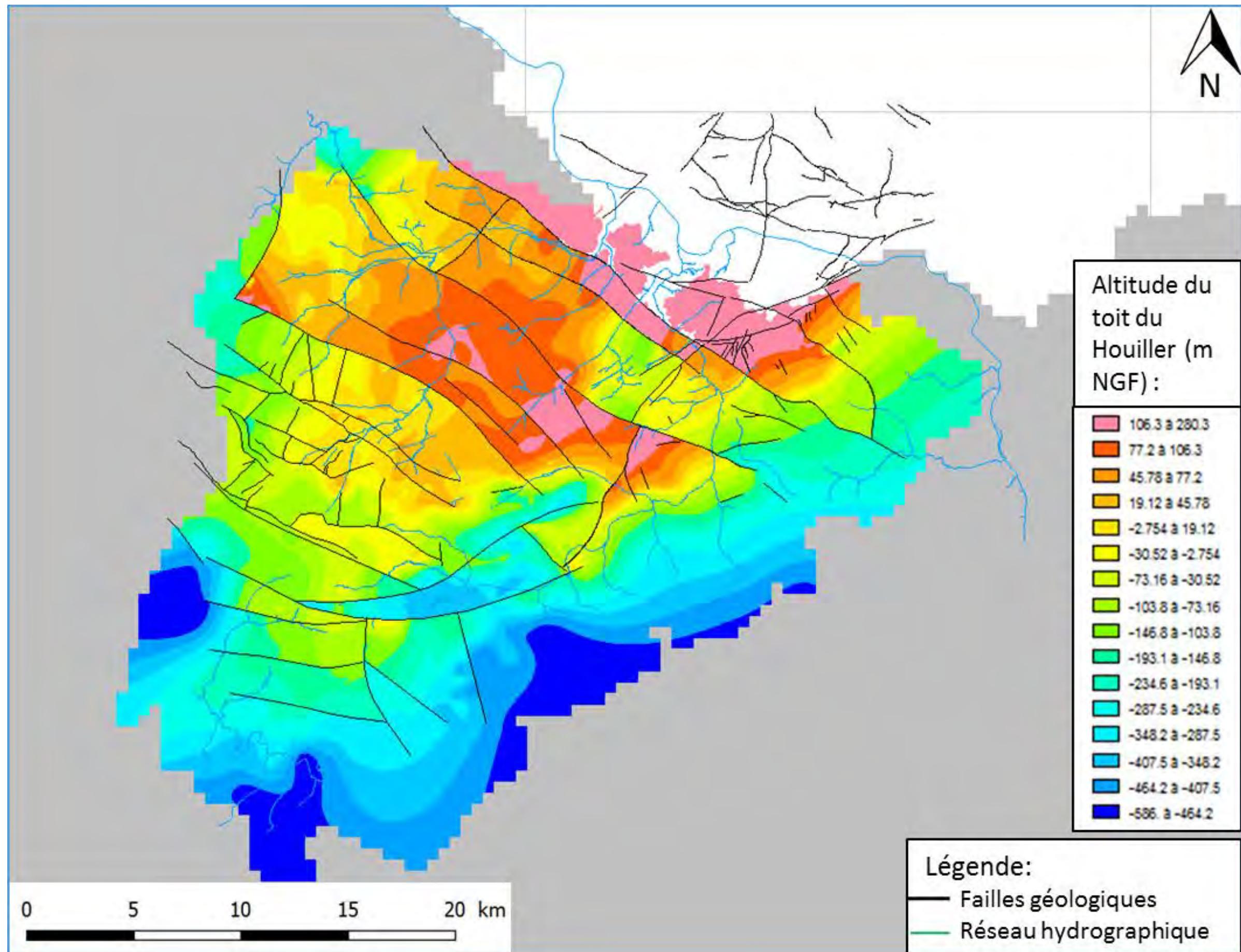
Données utilisées pour la modélisation géologique du toit du Houiller (carte de gauche) et de l'épaisseur du Permien (carte de droite)



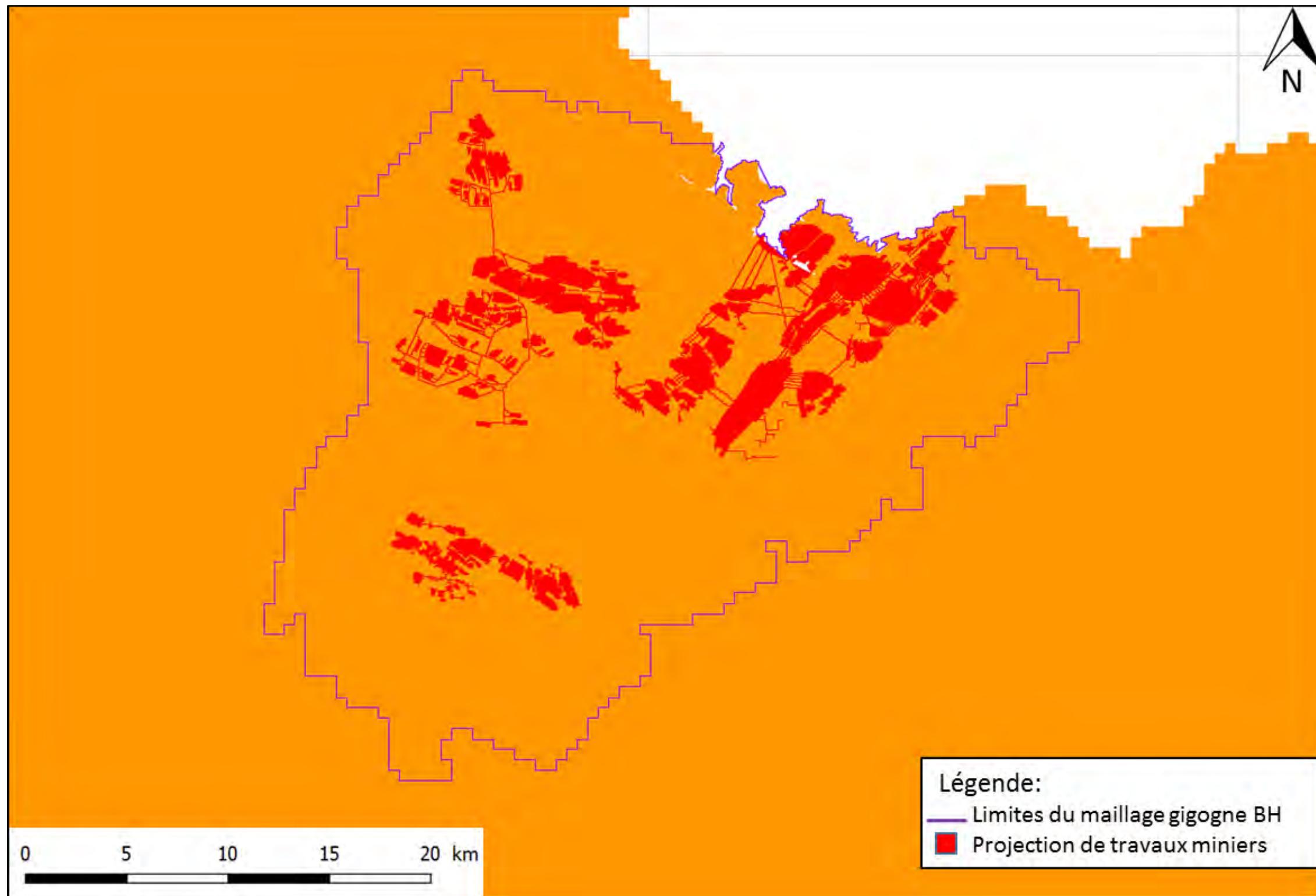
Résultat de l'intégration dans le modèle MARTHE du modèle géologique du toit du Permien (via le calcul de son épaisseur)



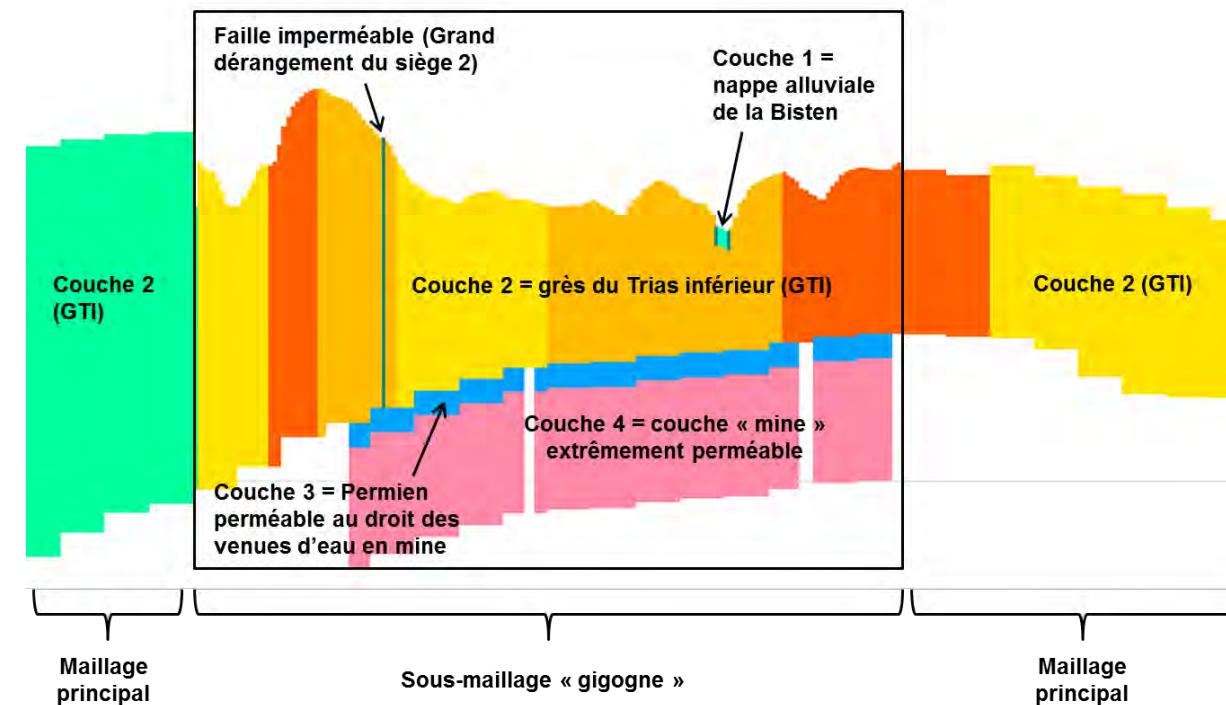
Résultat de l'intégration dans le modèle MARTHE du modèle géologique du toit du Houiller



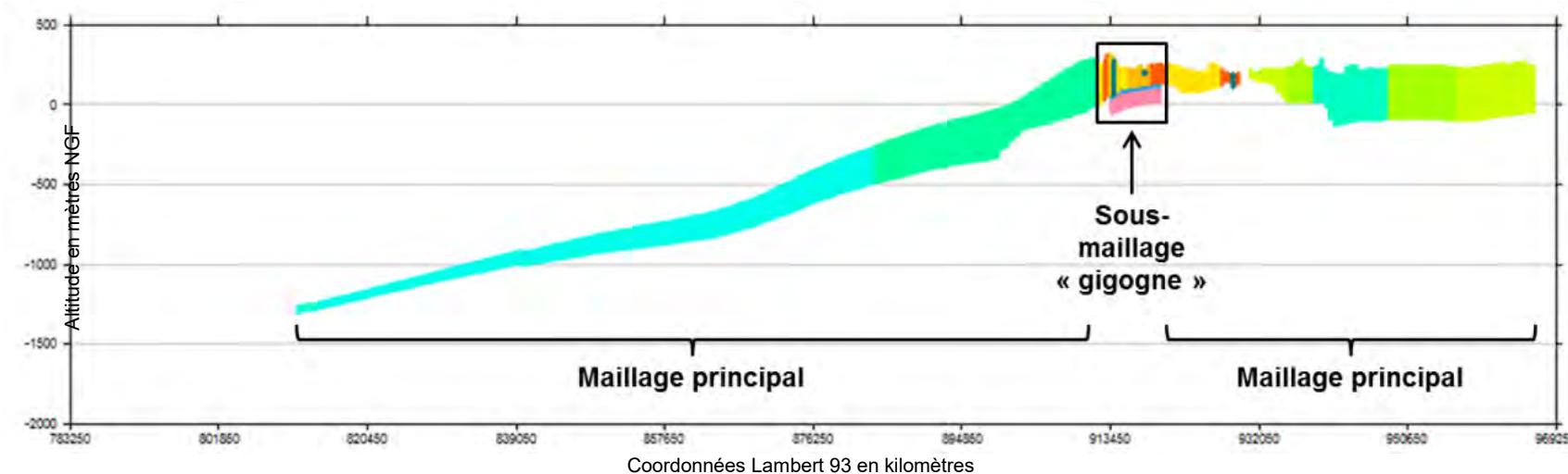
Résultat de l'intégration dans le modèle MARTHE de la projection en surface des travaux miniers



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



Annexe 3 : Données hydrogéologiques et hydrologiques du modèle MARTHE dans le bassin houiller (version v2 - 2024)

L'annexe 3 présente sur 1 page A4 et 6 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** : 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 stations hydrologiques et de leurs bassins versants associé, 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) ;
- **3 cartes des zones climatiques et des zones de sol utilisées pour le calcul du bilan hydroclimatique du modèle v2 (2024) ;**
- **1 Carte des pertes de rivières du secteur Centre-Est d'après les pertes estimées en 2004 par Charbonnages de France (2005i).**

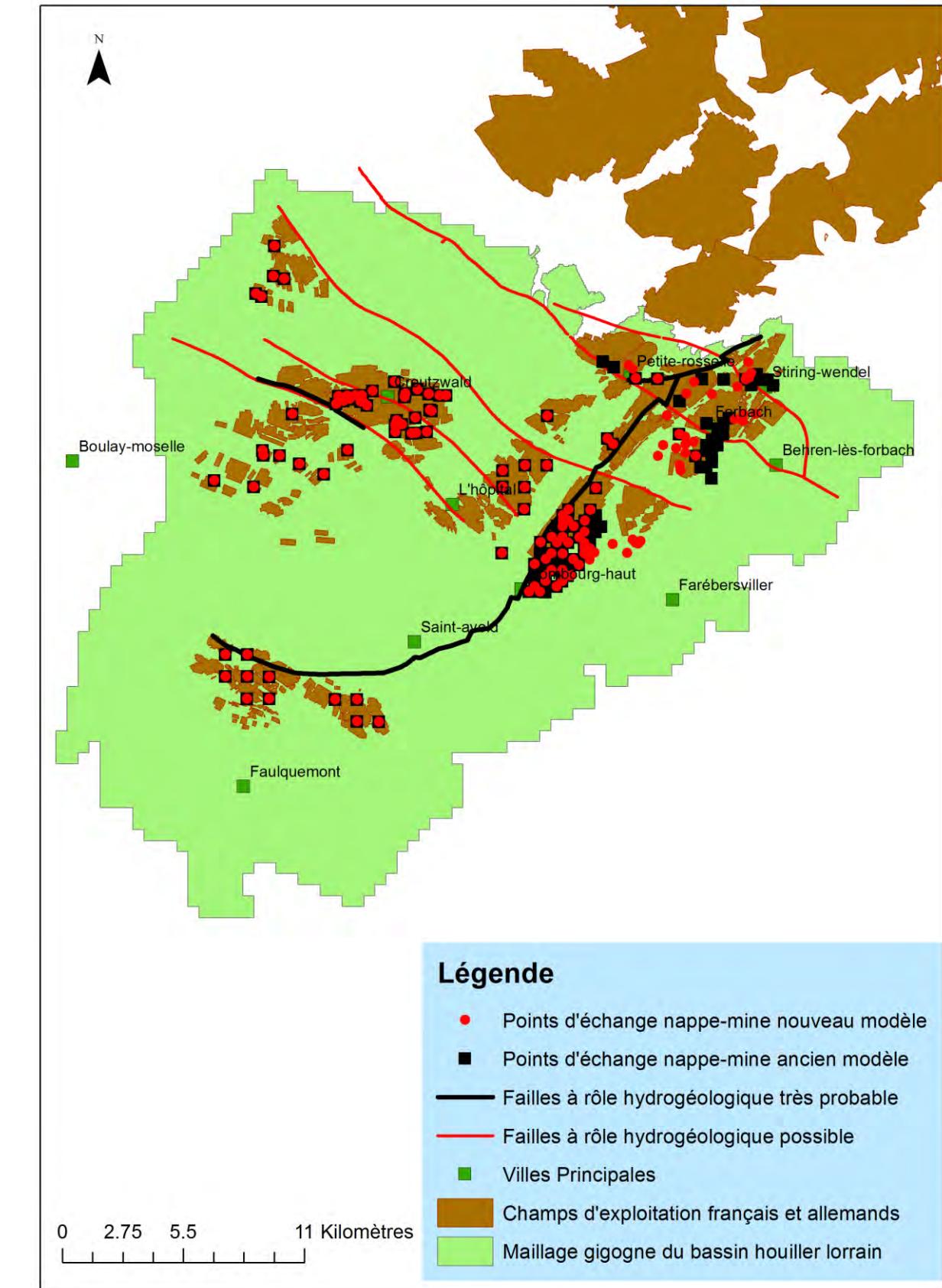
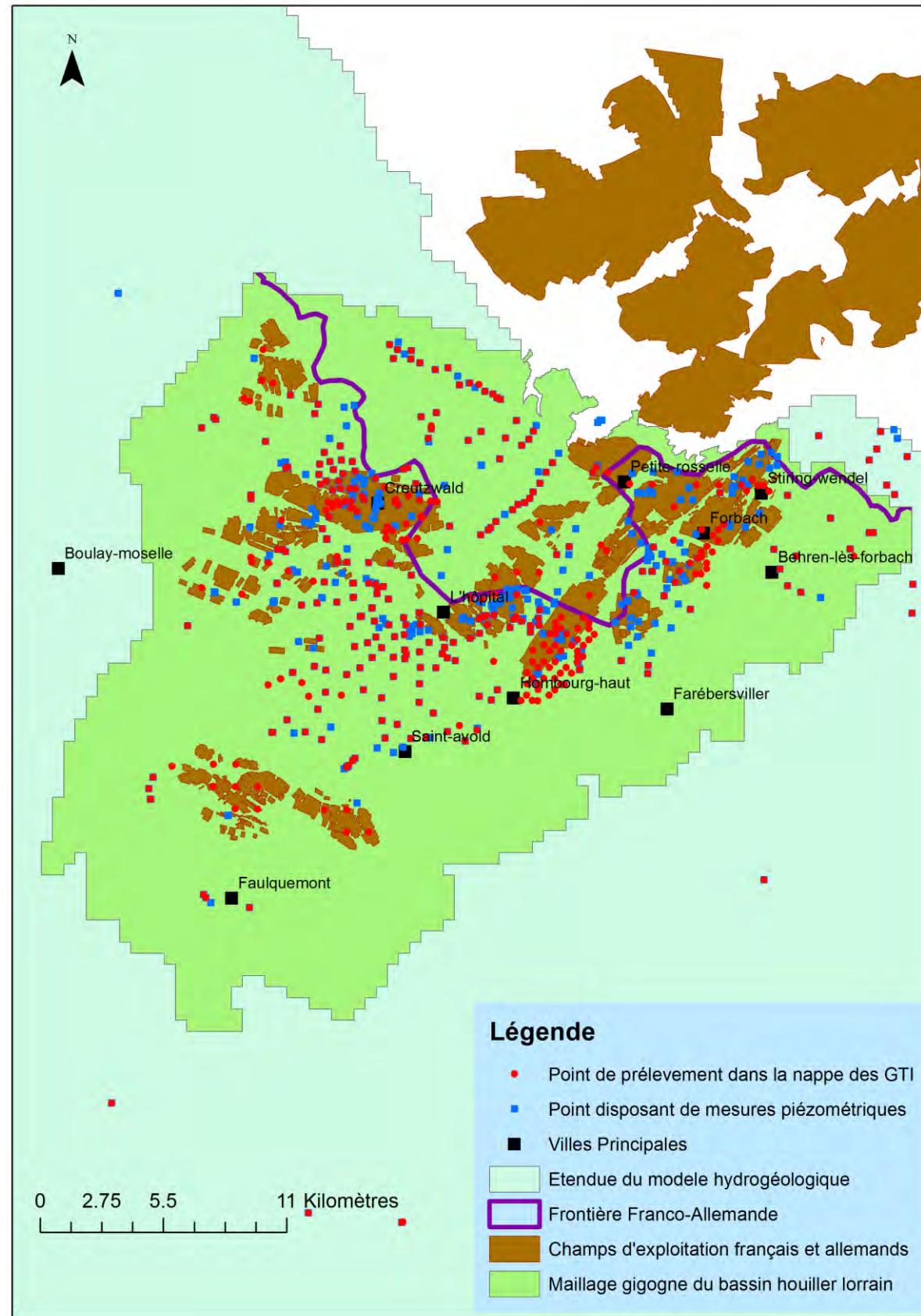
**Nombre de points de données hydrogéologiques
du bassin houiller en France**

Aquifère	Nombre total de points	Type de point	Nombre de points par type
Alluvions	41	Piézomètre	-
Grès du Trias inférieur	561	Piézomètre	400
		Pompage	197
Permien	131	Point d'échange nappe-mine	-
Réervoir minier	11	Piézomètre	9
		Pompage	3
GTI perché, Muschelkalk, inconnu, erreur	20	Point exclu	-

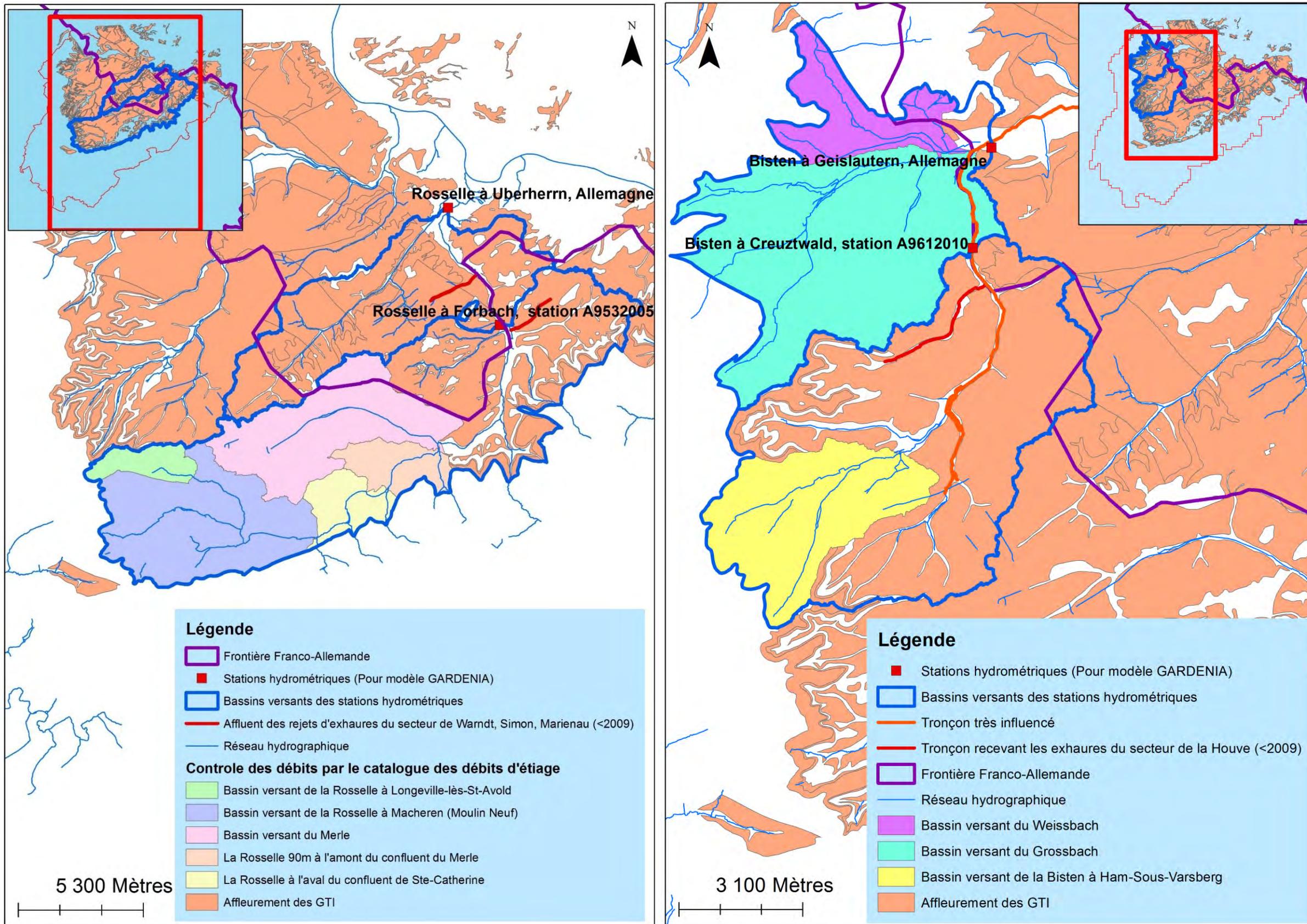
**Nombre de points de données hydrogéologiques
du bassin houiller en Sarre allemande**

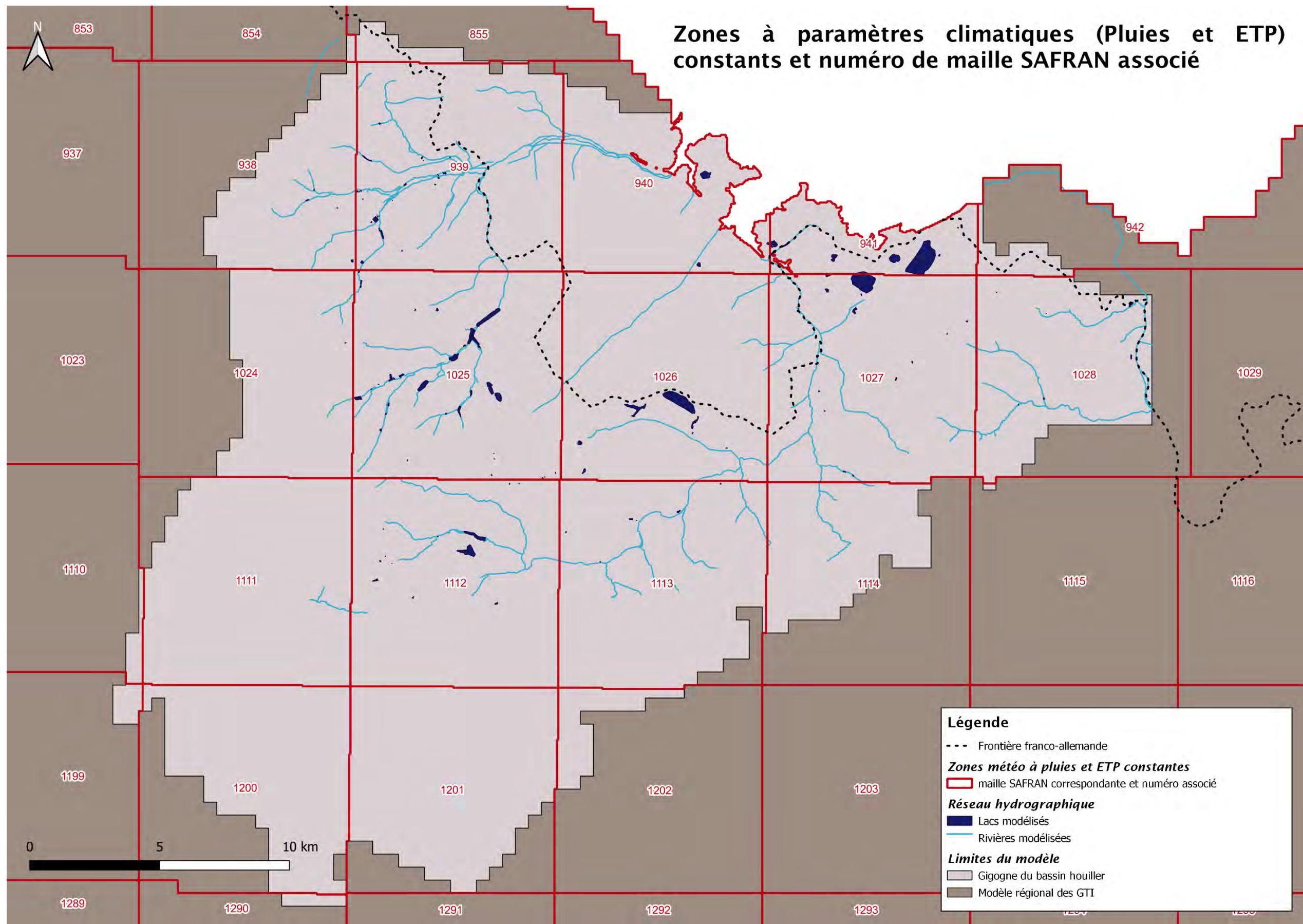
Aquifère	Nombre total de points	Type de point	Nombre de points par type
Alluvions	0	Piézomètre	-
Grès du Trias inférieur	77	Piézomètre	69
		Pompage	44
Permien	12	Point d'échange nappe-mine	-
Réervoir minier	2	Piézomètre	2
		Pompage	0
GTI perché, Muschelkalk, inconnu, erreur	5	Point exclu	-

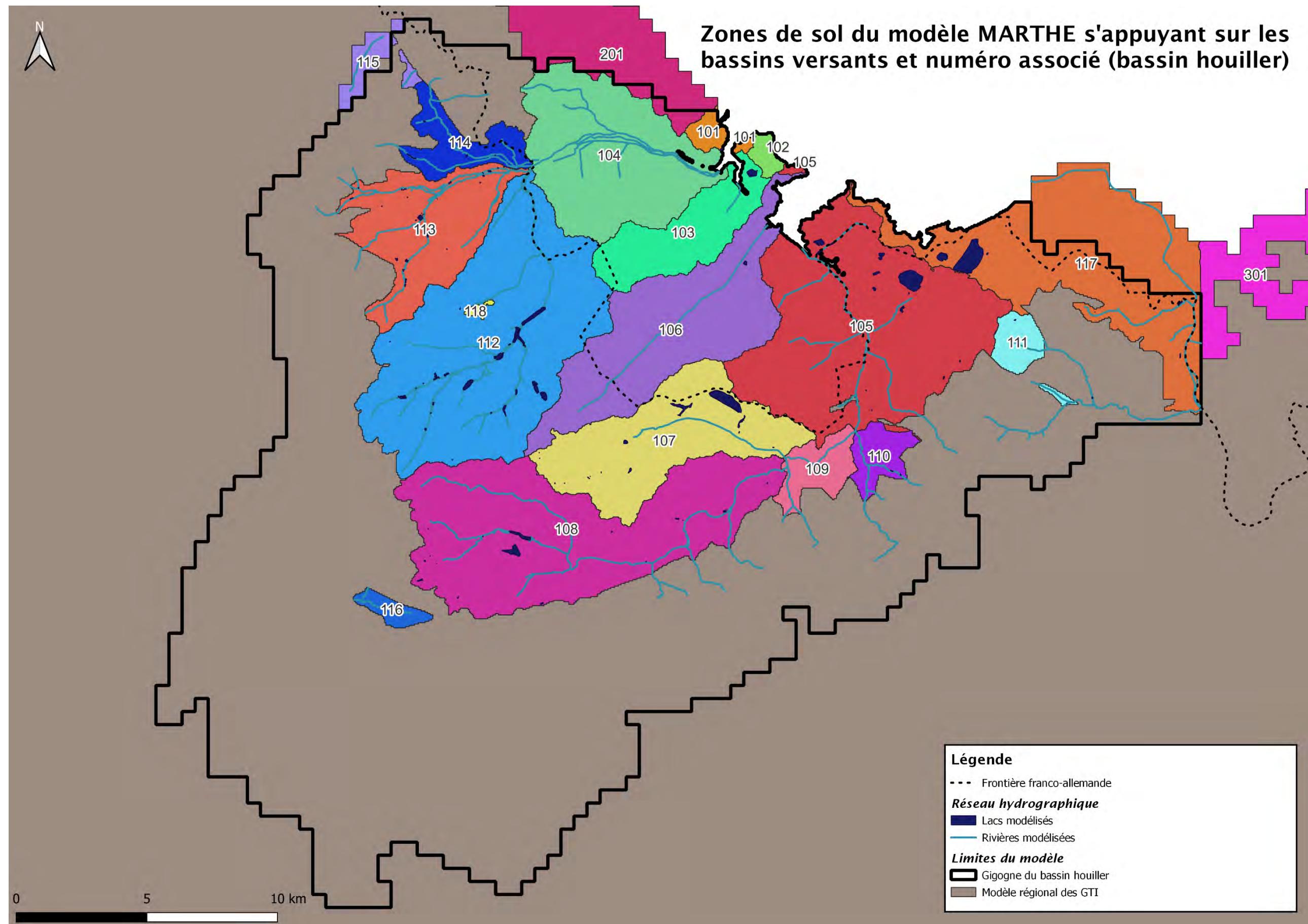
Données hydrogéologiques prises en compte dans le modèle MARTHE du bassin houiller (version v2 - 2024)

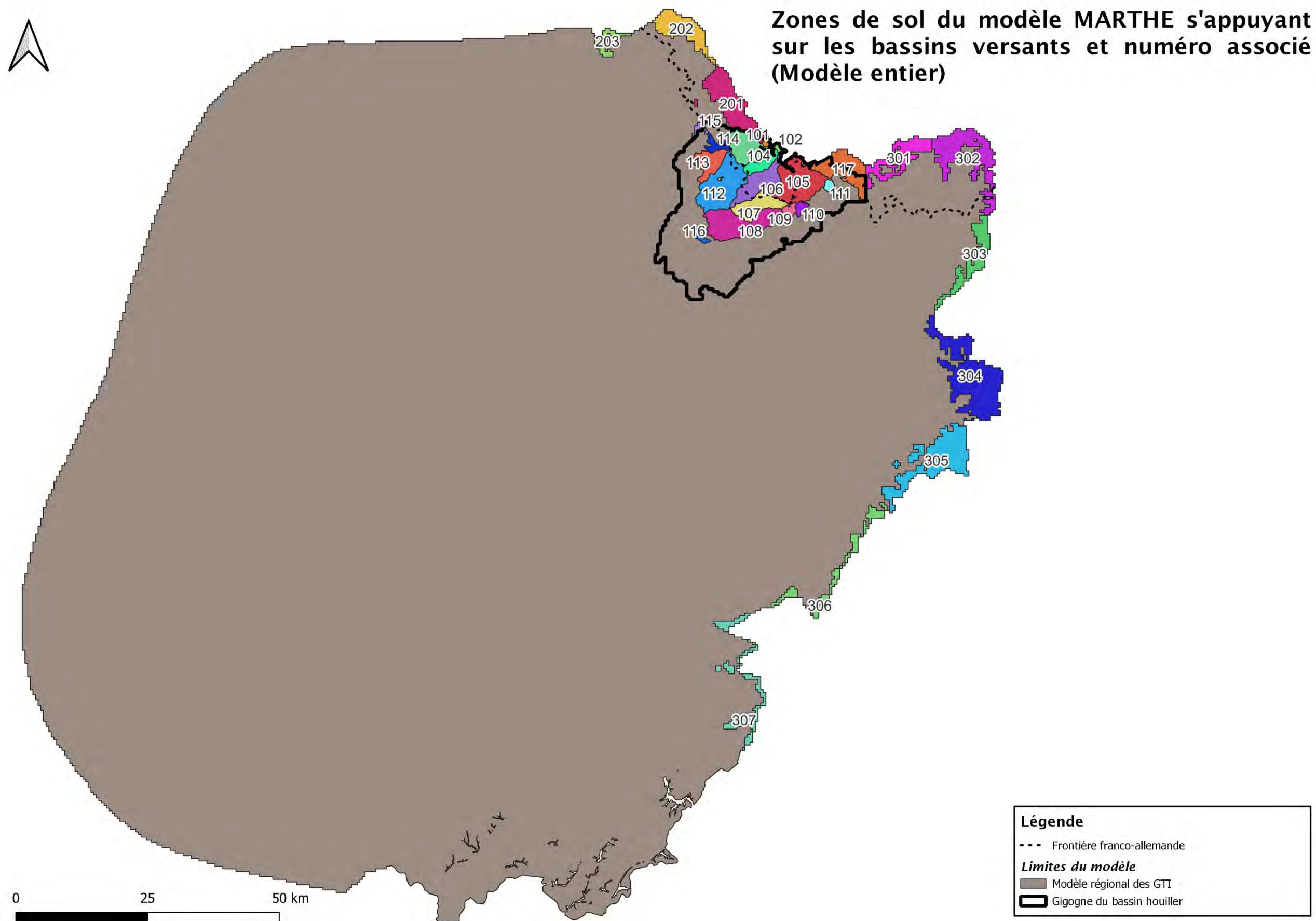


Données hydrologiques prises en compte dans le modèle MARTHE du bassin houiller (version v2 -2024)

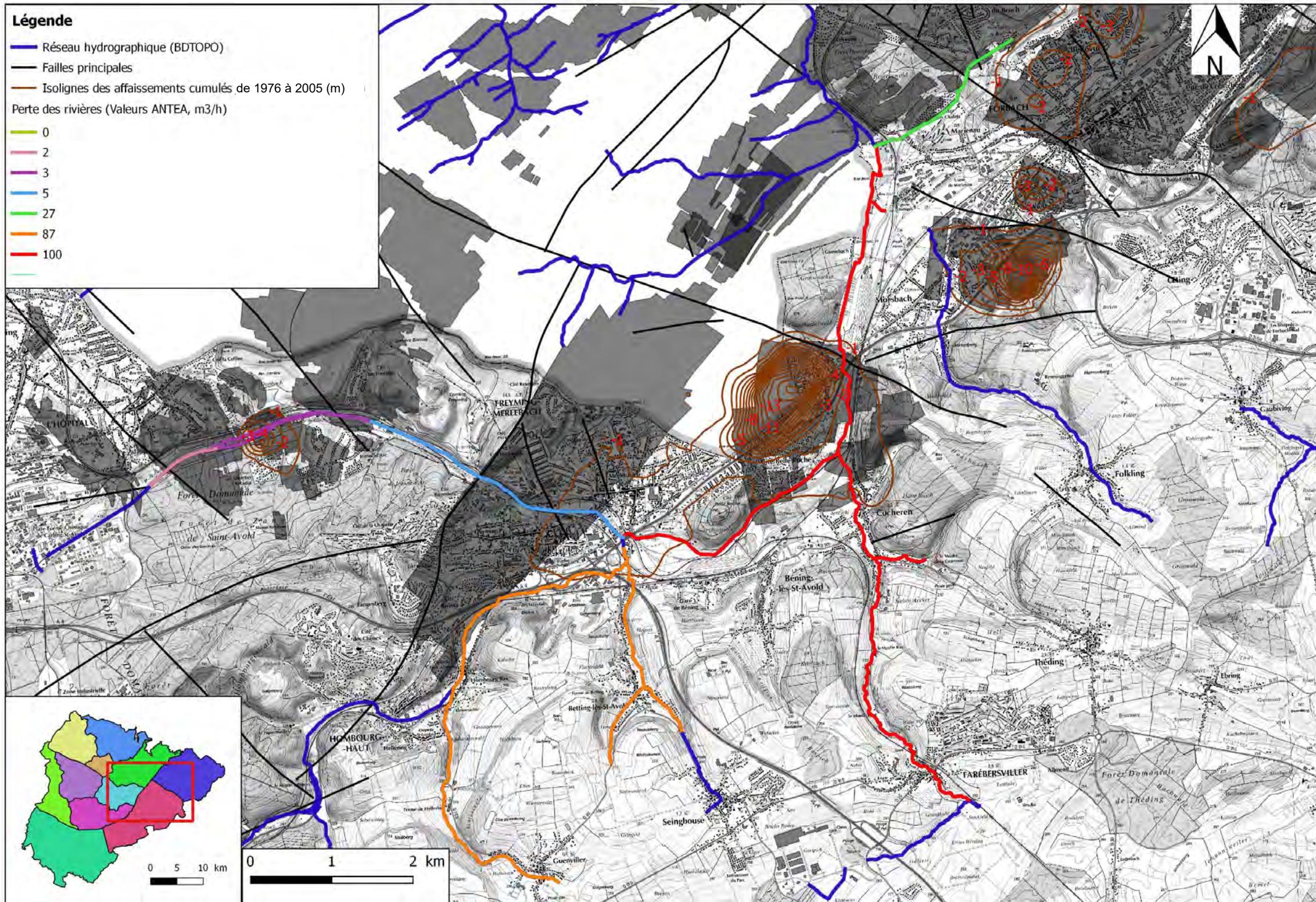








Carte des pertes de rivières du secteur Centre-Est d'après les pertes estimées en 2004 par Charbonnages de France (2005i)



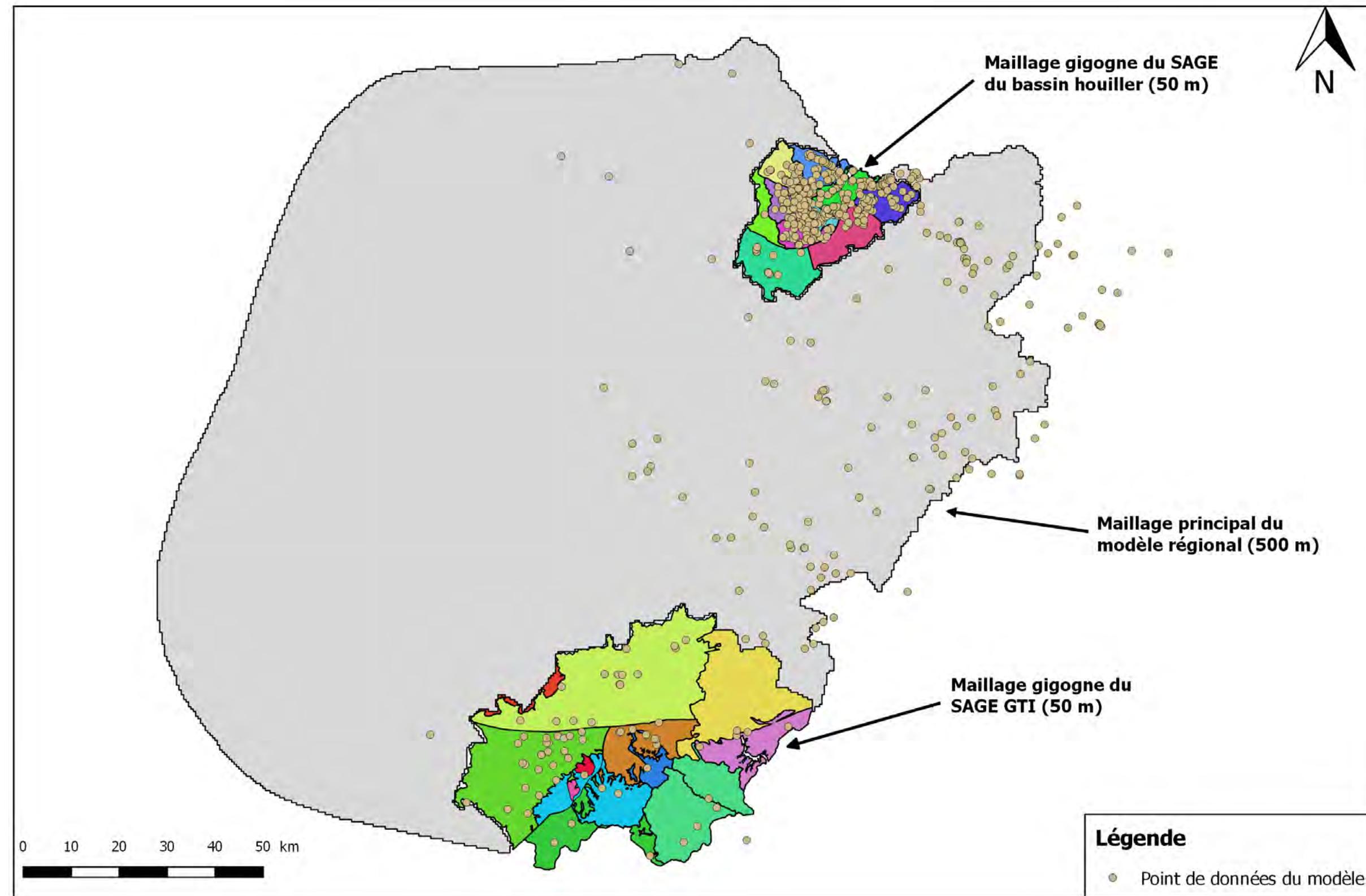
Annexe 4 : Résultats de calibration du modèle MARTHE dans le bassin houiller et sa périphérie

L'annexe 4 présente sur 31 pages A3 les cartes suivantes :

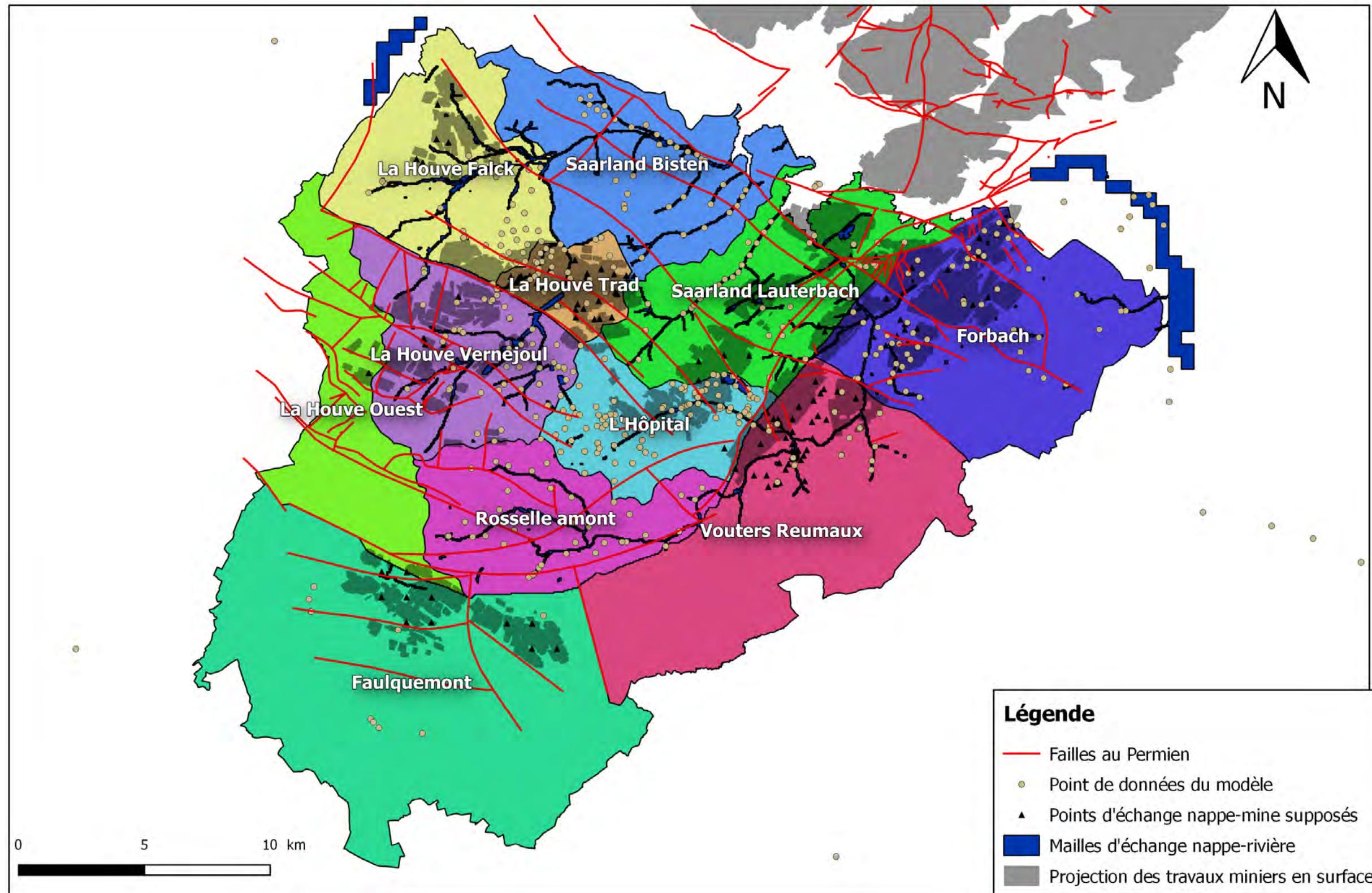
- **1 carte de situation du maillage gigogne du bassin houiller dans le maillage du modèle régional** : ce maillage gigogne a été défini de manière être hydrogéologiquement cohérent, il inclut tous les travaux miniers en zone d'affleurement des GTI et en zone sous-couverture ; il correspond de plus au 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 1977-2022 (courbe bleue, niveau piézométrique en mètre NGF) et la chronique calculée par le modèle (courbe rouge, niveaux piézométrique en mètre NGF), et le cas échéant les graphiques montrent aussi la courbe de débit de pompage sur le point (courbe verte se rapportant à l'axe vertical secondaire à droite du graphique, en milliers de m³ pompés par an) ;
- **1 carte de présentation des résultats de calibration pour les réservoirs miniers Ouest (graphiques entourés de violet) et Centre-Est (graphiques entourés de jaune)** : 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), et le cas échéant les graphiques montrent aussi la courbe de débit de pompage sur le point (courbe verte se rapportant à l'axe vertical secondaire à droite du graphique, en milliers de m³ pompés par an) ;
- **2 cartes de présentation des résultats de calibration pour les 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) ;
- **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 de la perméabilité de la nappe des GTI attribuée à chaque maille du modèle à l'issue de la calibration, pour l'ensemble du modèle et pour le bassin houiller (zoom)** ;
- **2 cartes de la localisation et de la perméabilité des failles considérées dans le modèle, pour l'ensemble du modèle et pour le bassin houiller (zoom)** ;

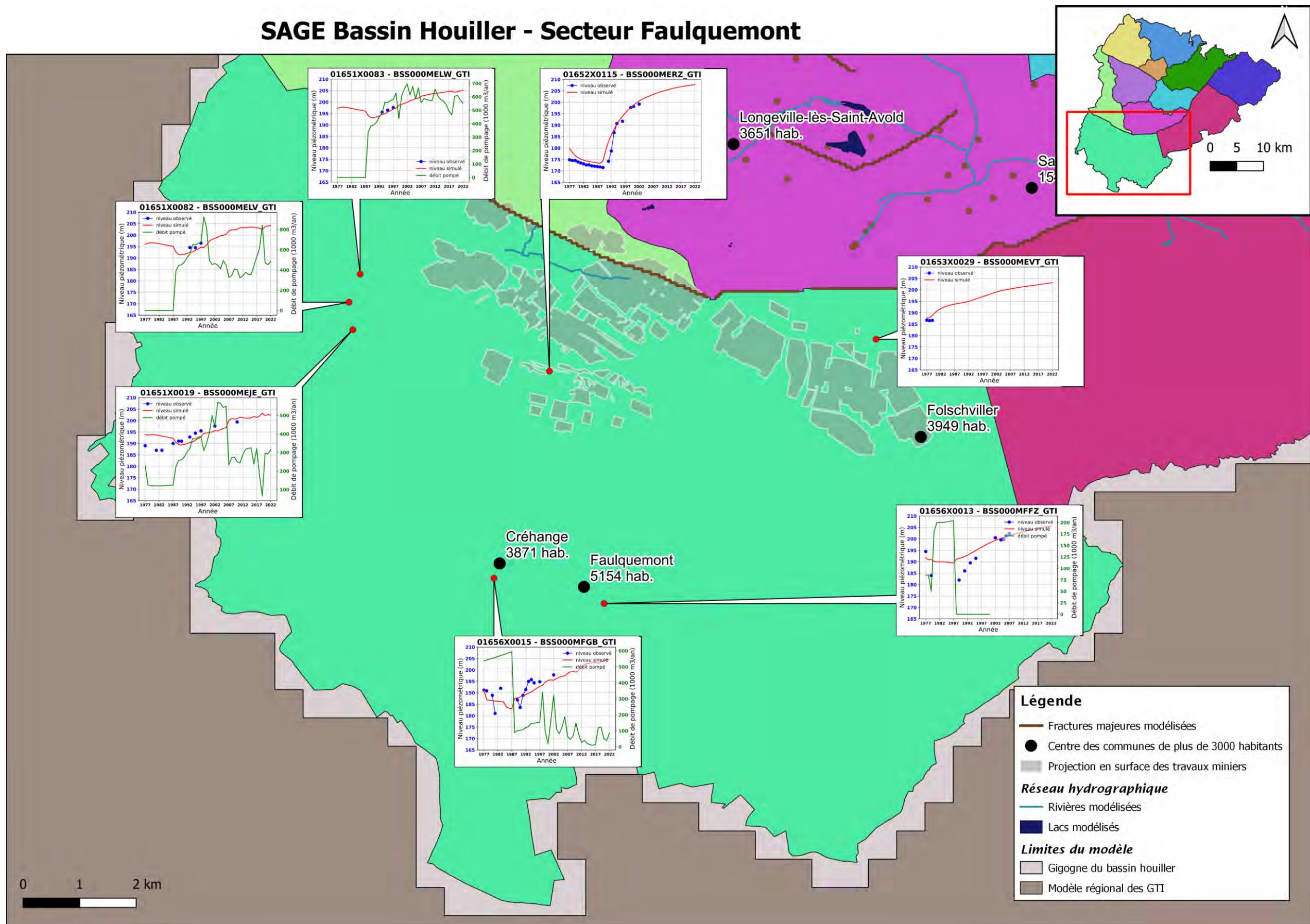
- **1 tableau récapitulatif du caractère imperméable ou semi-perméable des principales failles** prises en compte dans le modèle MARTHE : positions, noms et incertitudes sur le rôle des failles ;
- **2 cartes et 2 graphiques démontrant l'existence de failles imperméables** : faille du grand dérangement du siège 2 et faille de Longeville ;
- **3 cartes piézométriques calculées pour la nappe des GTI pour les années 1977, 2010 et 2022, pour l'ensemble du modèle** : les années 1977 et 2022 correspondent respectivement au début et à la fin de la période de calibration du modèle v2 - 2024, l'année 2010 est située dans la période d'impact maximal des infiltrations de la nappe des GTI vers les réservoirs miniers pour l'ensemble du bassin houiller ;
- **3 cartes piézométriques calculées pour la nappe des GTI pour les années 1977, 2010 et 2022, pour le bassin houiller (zoom)** : les années 1977 et 2022 correspondent respectivement au début et à la fin de la période de calibration du modèle v2 - 2024, l'année 2010 est située dans la période d'impact maximal des infiltrations de la nappe des GTI vers les réservoirs miniers pour l'ensemble du bassin houiller ;

Situation du maillage gigogne du bassin houiller (version v2 - 2024) dans le maillage du modèle régional

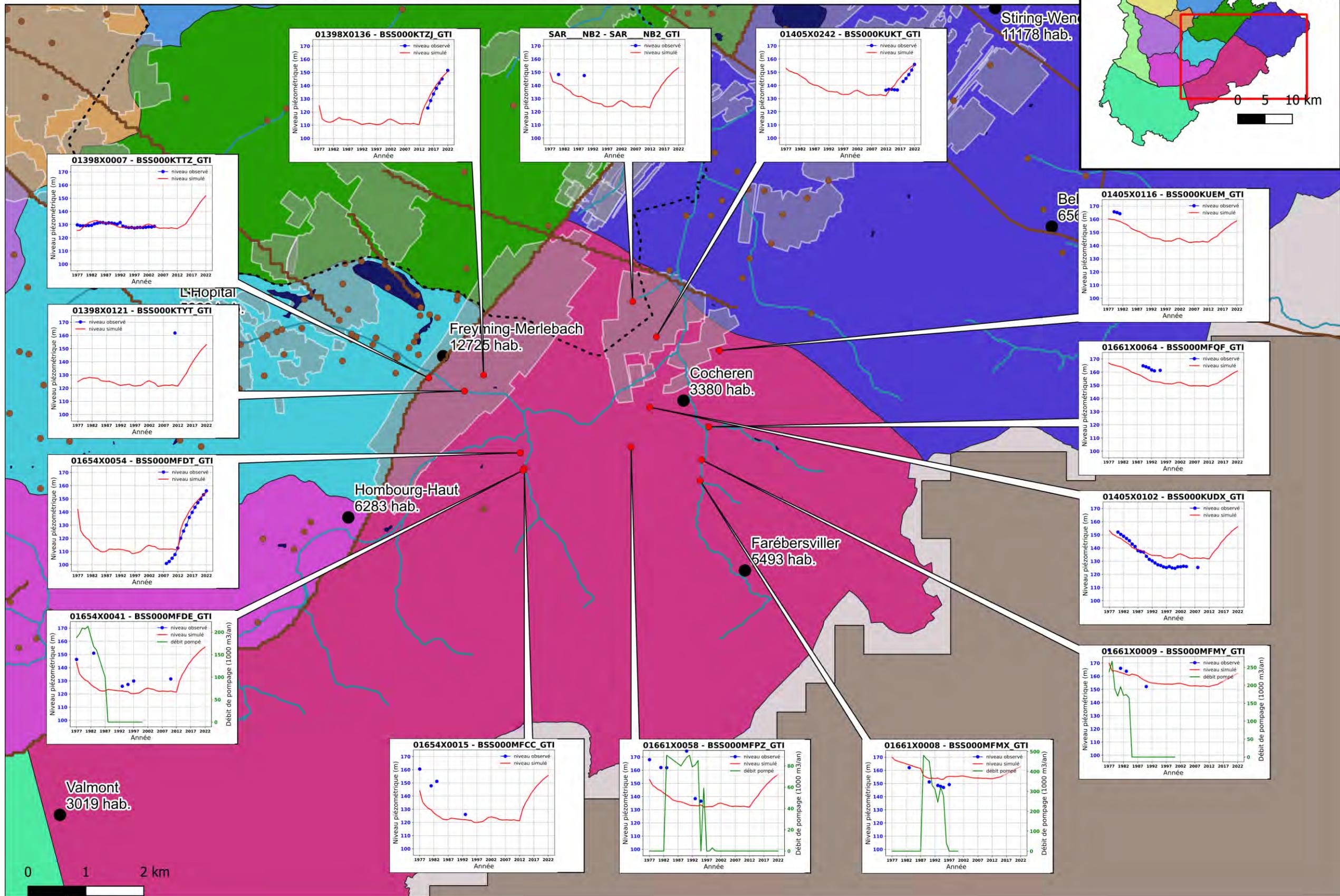


Situation des 11 secteurs définis dans le maillage gigogne du bassin houiller

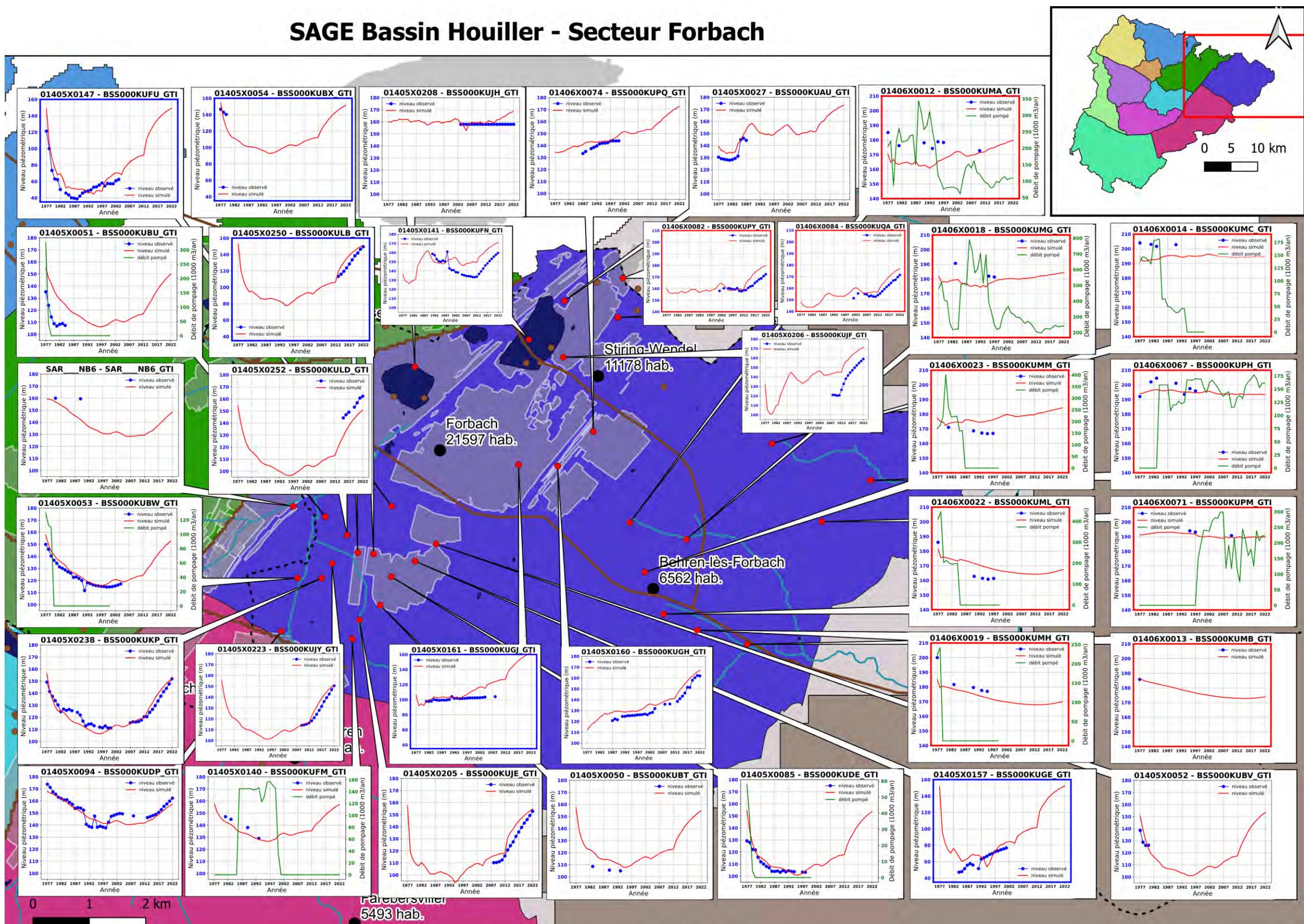




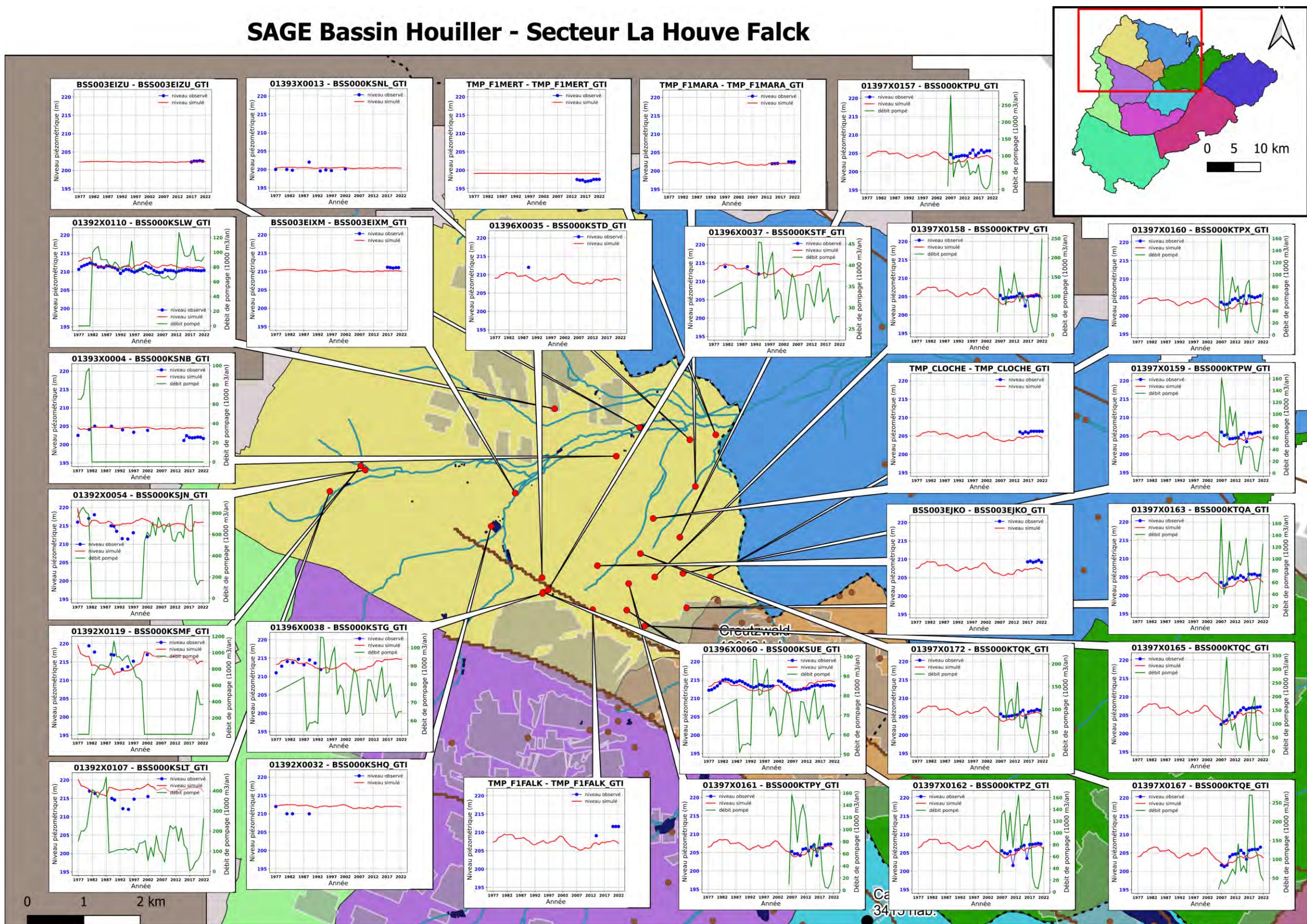
SAGE Bassin Houiller - Secteur Vouteurs Reumaux



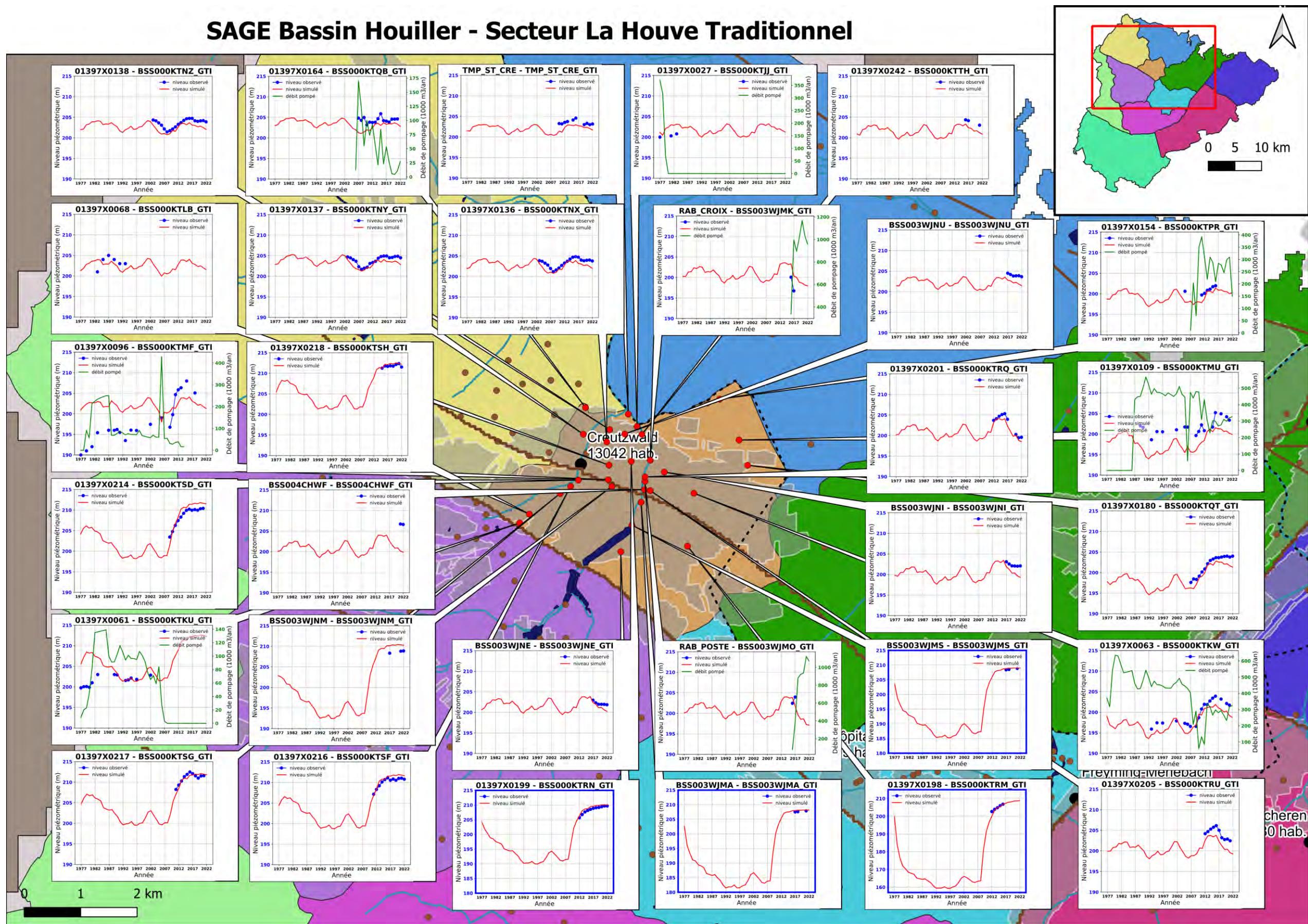
SAGE Bassin Houiller - Secteur Forbach

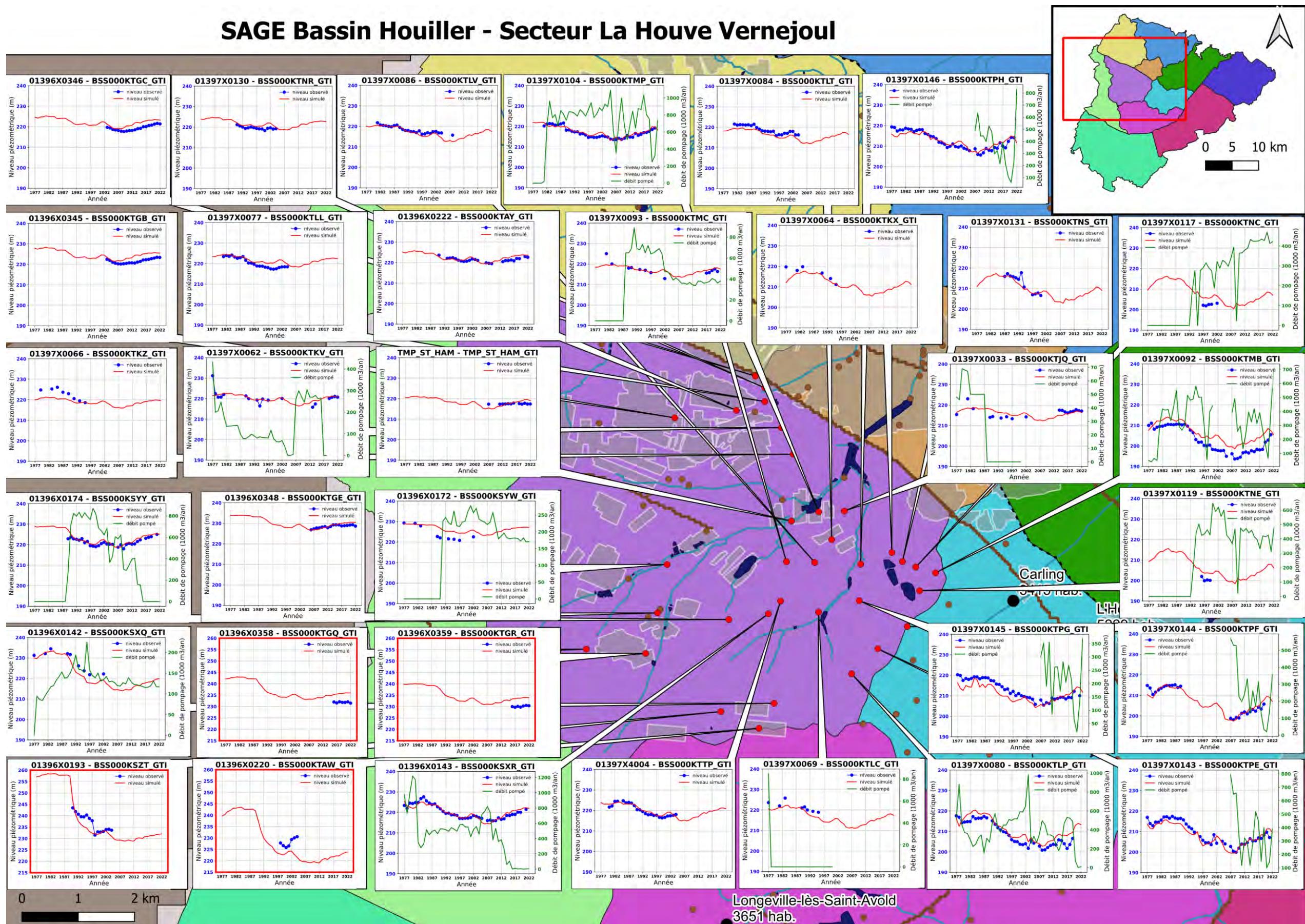


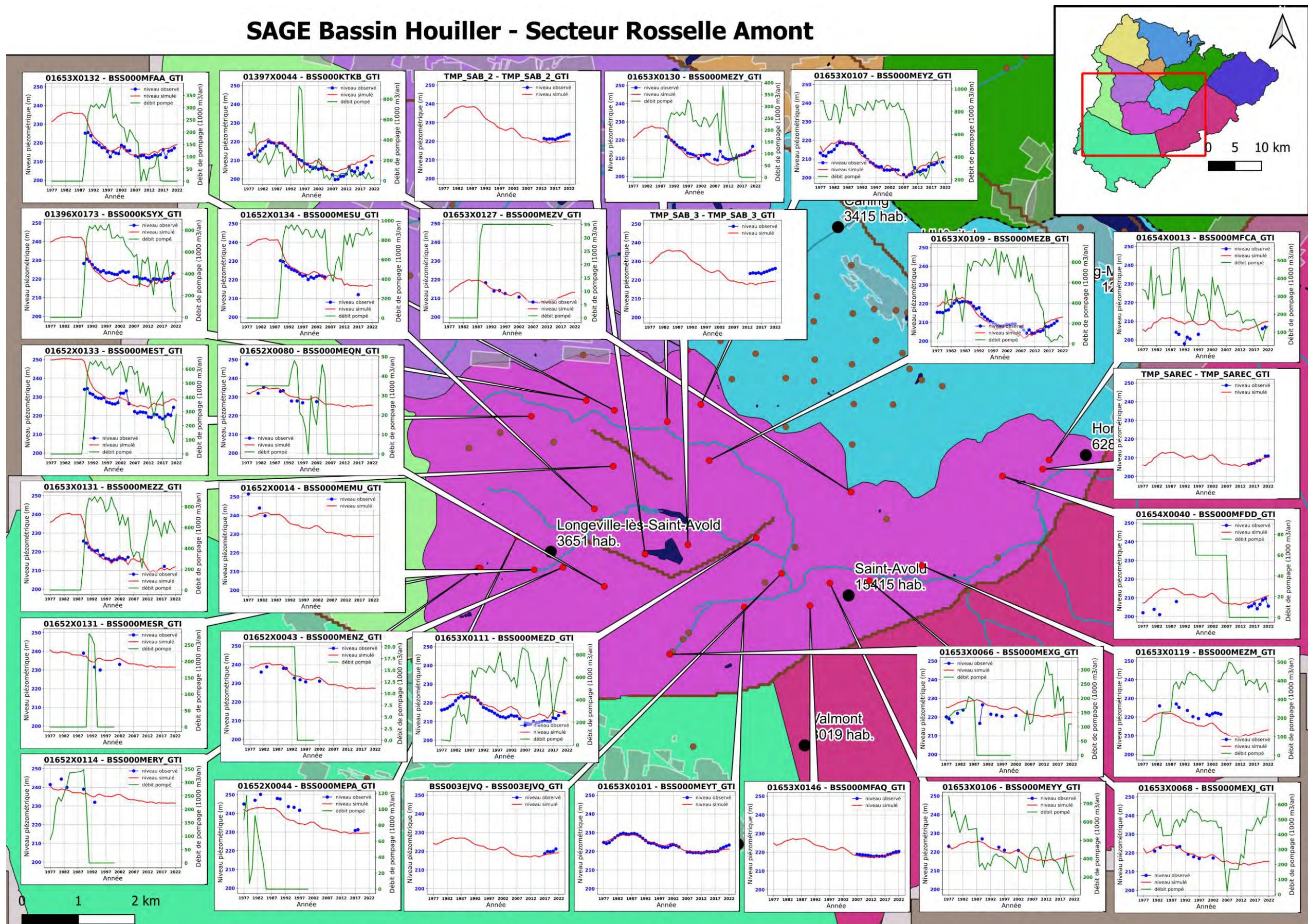
SAGE Bassin Houiller - Secteur La Houve Falck



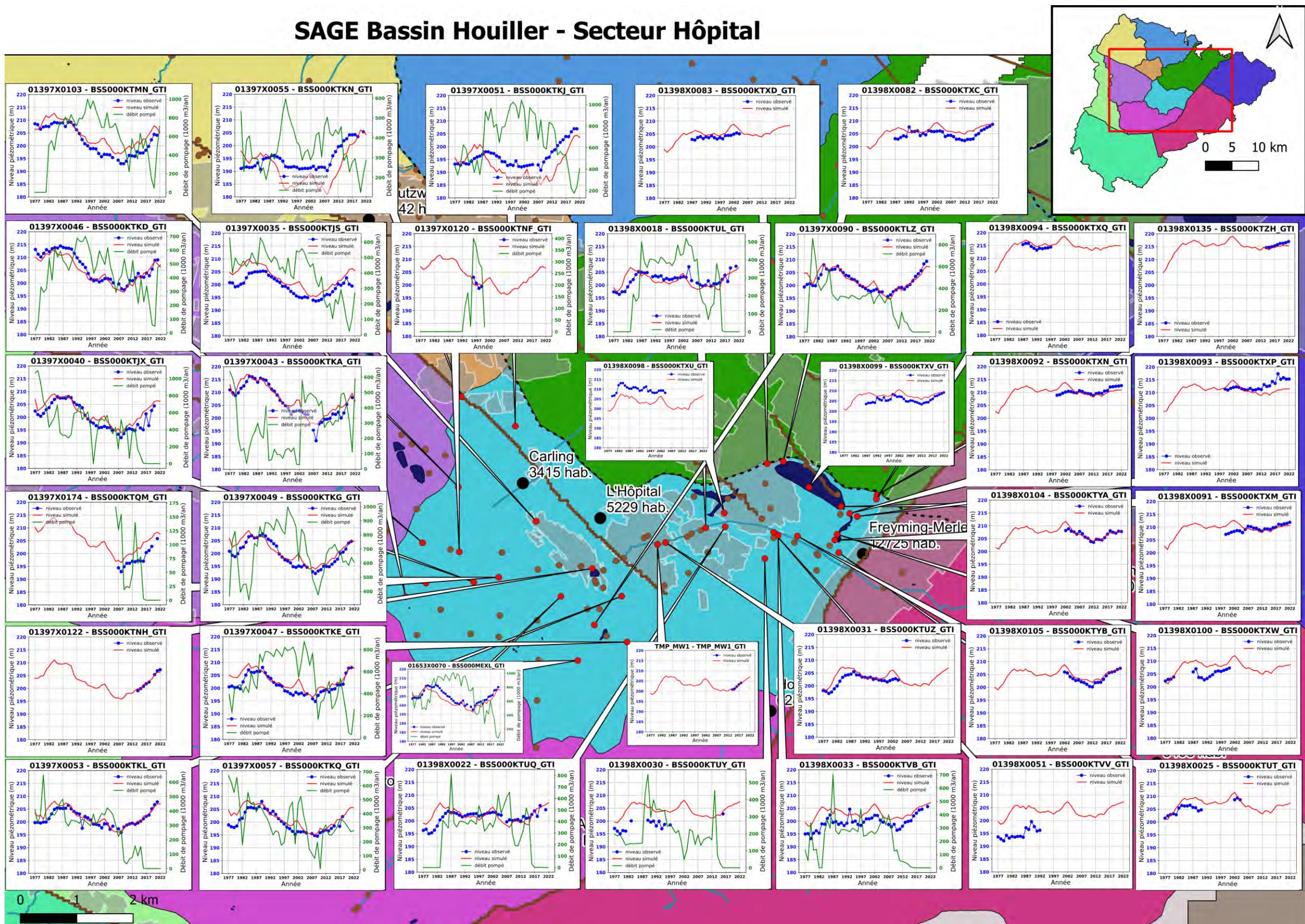
SAGE Bassin Houiller - Secteur La Houve Traditionnel

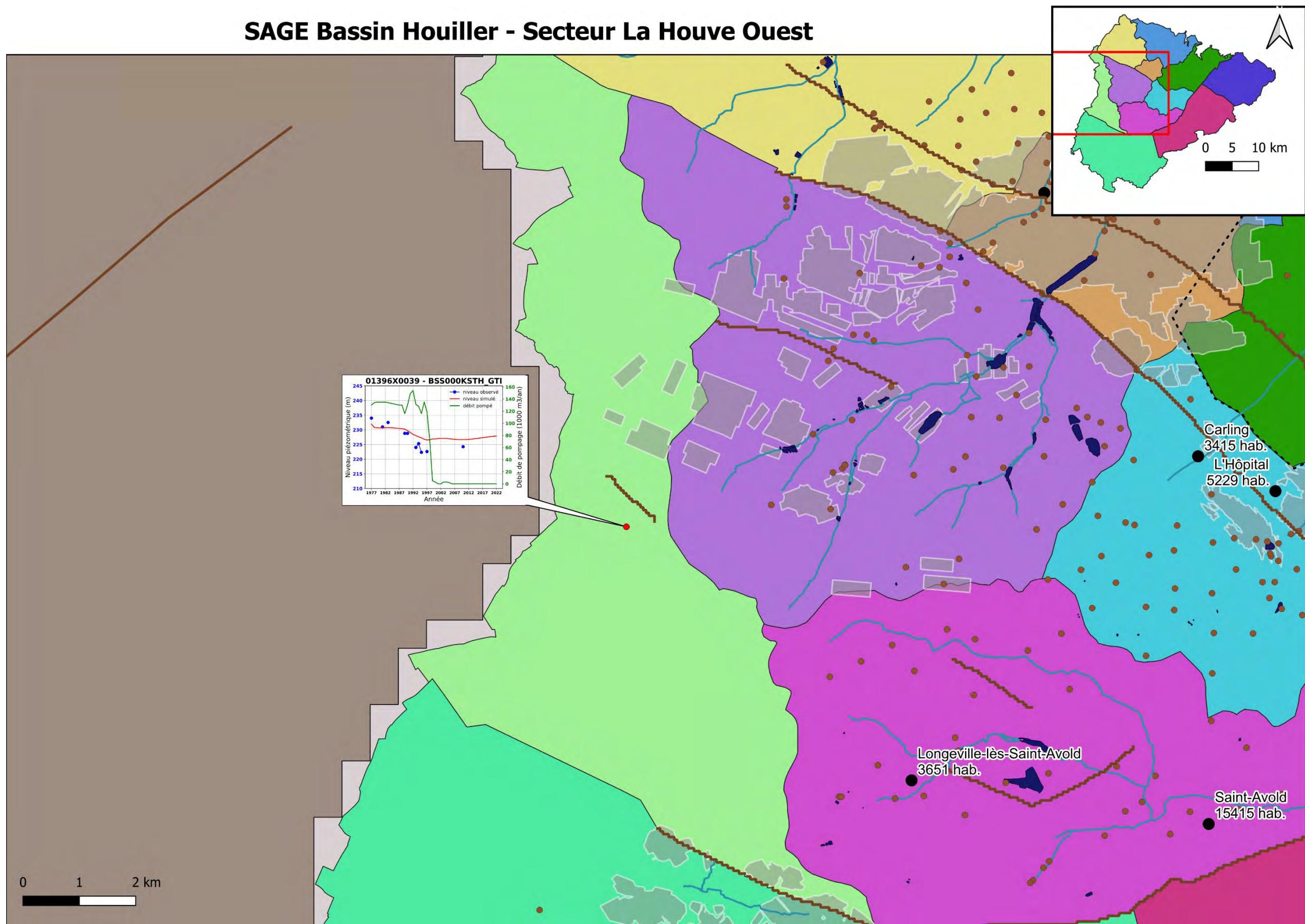




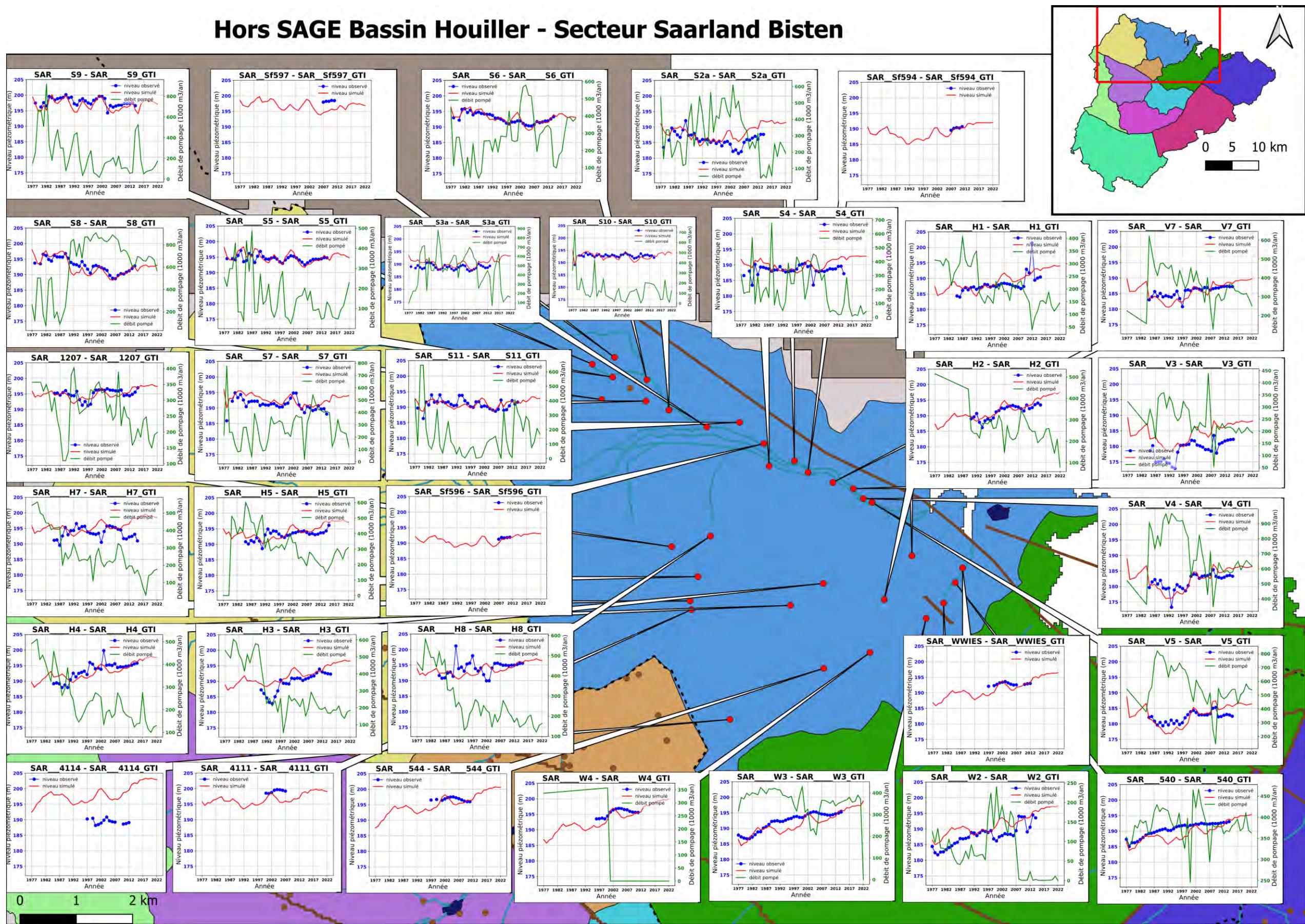


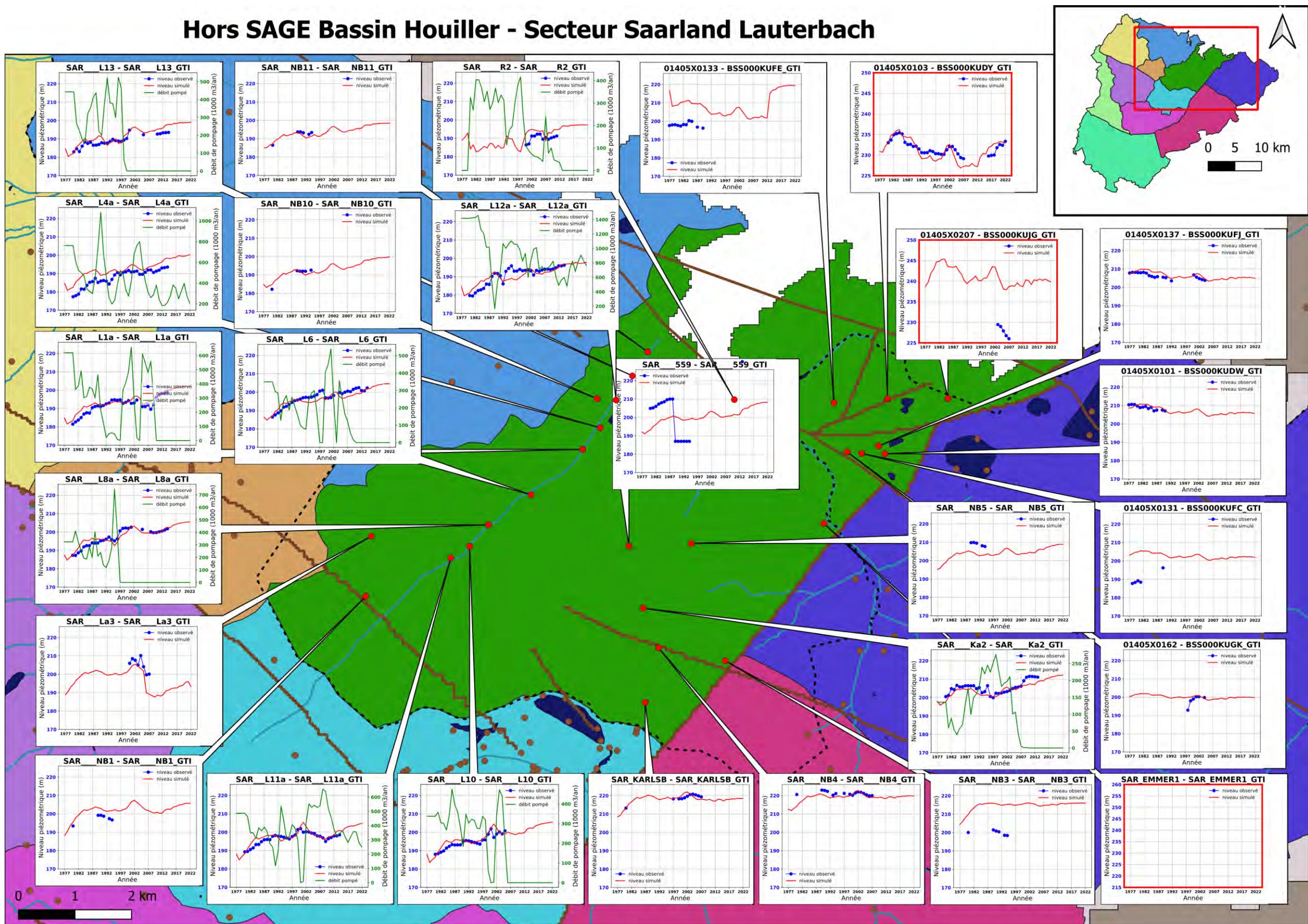
SAGE Bassin Houiller - Secteur Hôpital

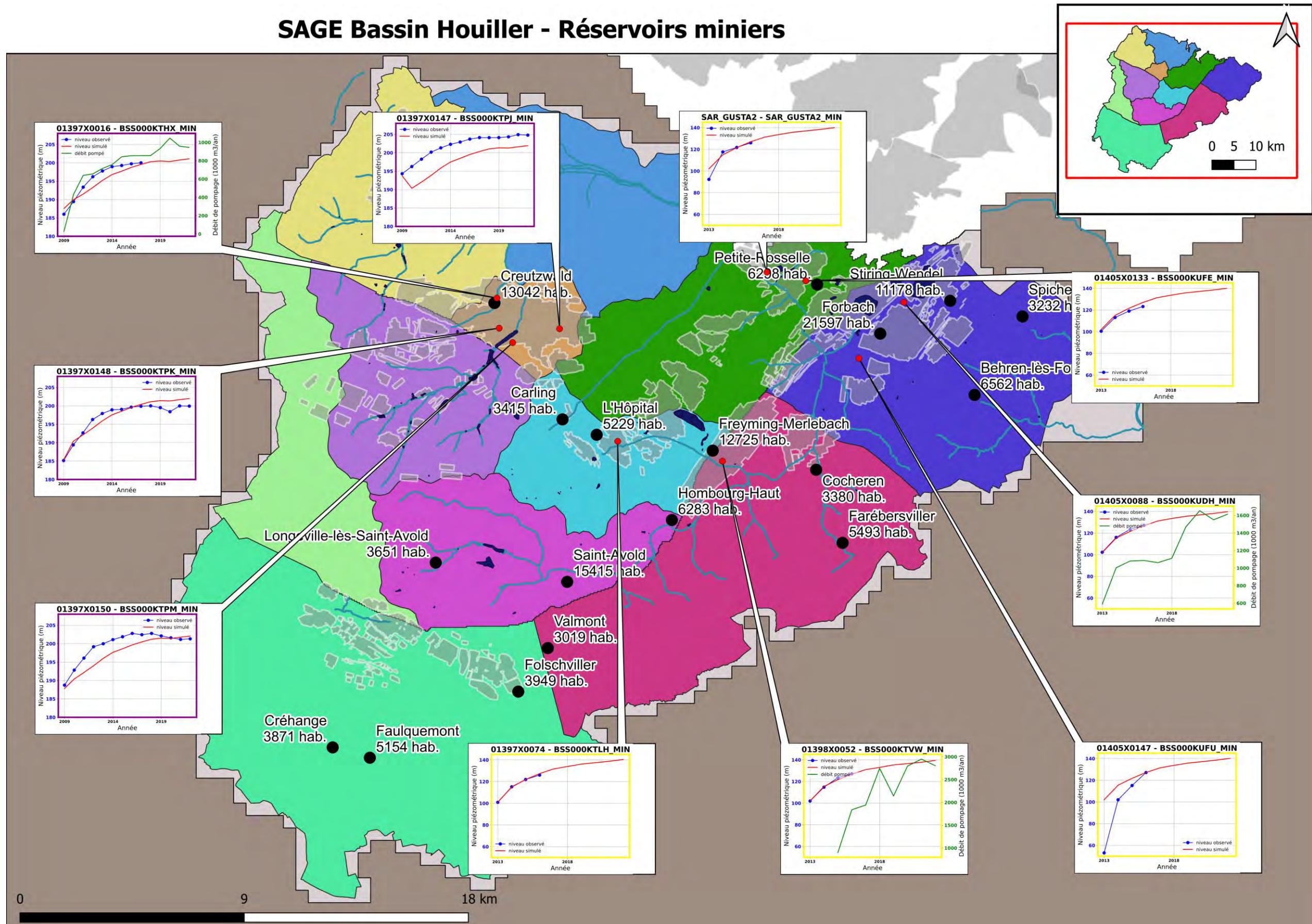




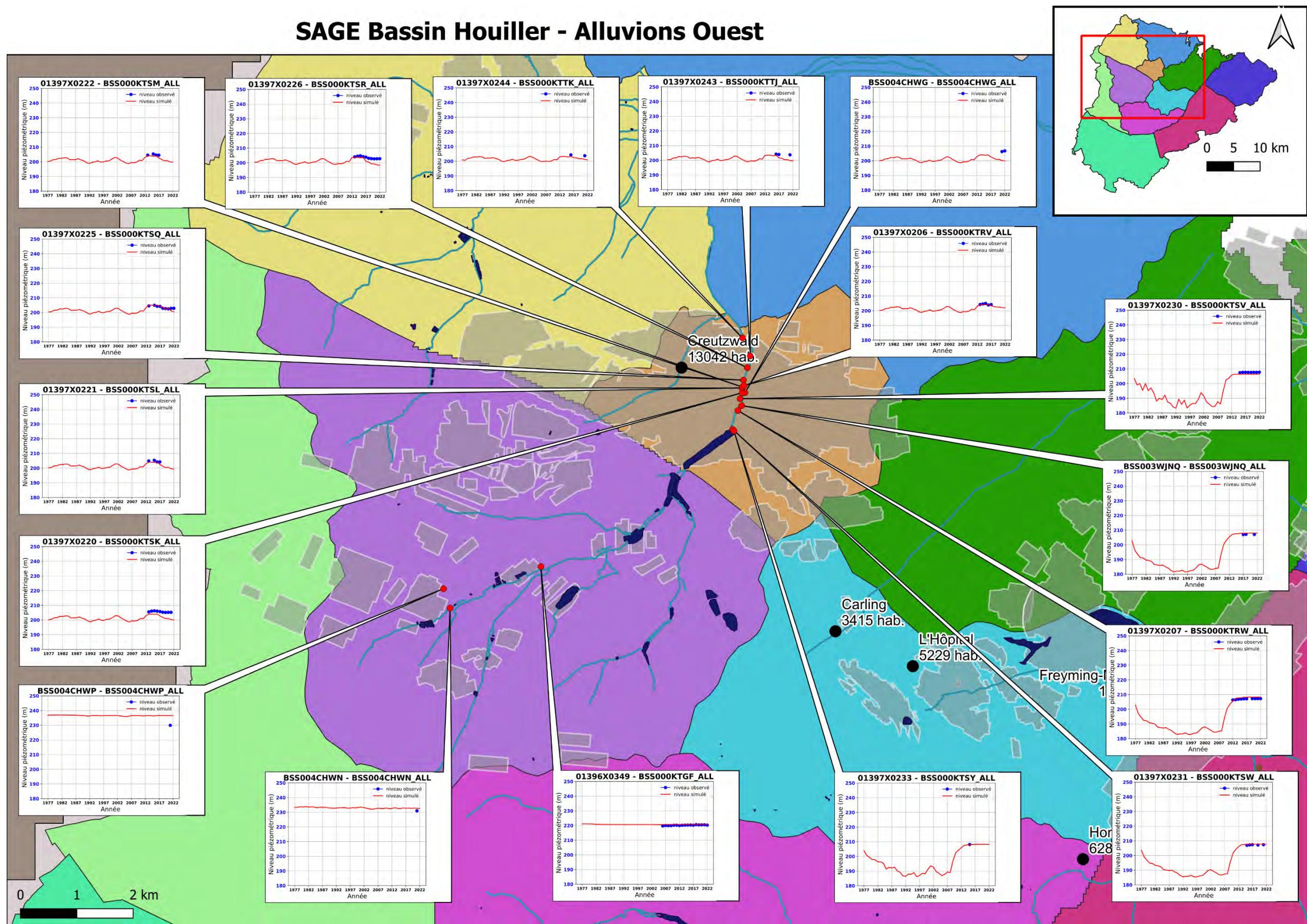
Hors SAGE Bassin Houiller - Secteur Saarland Bisten



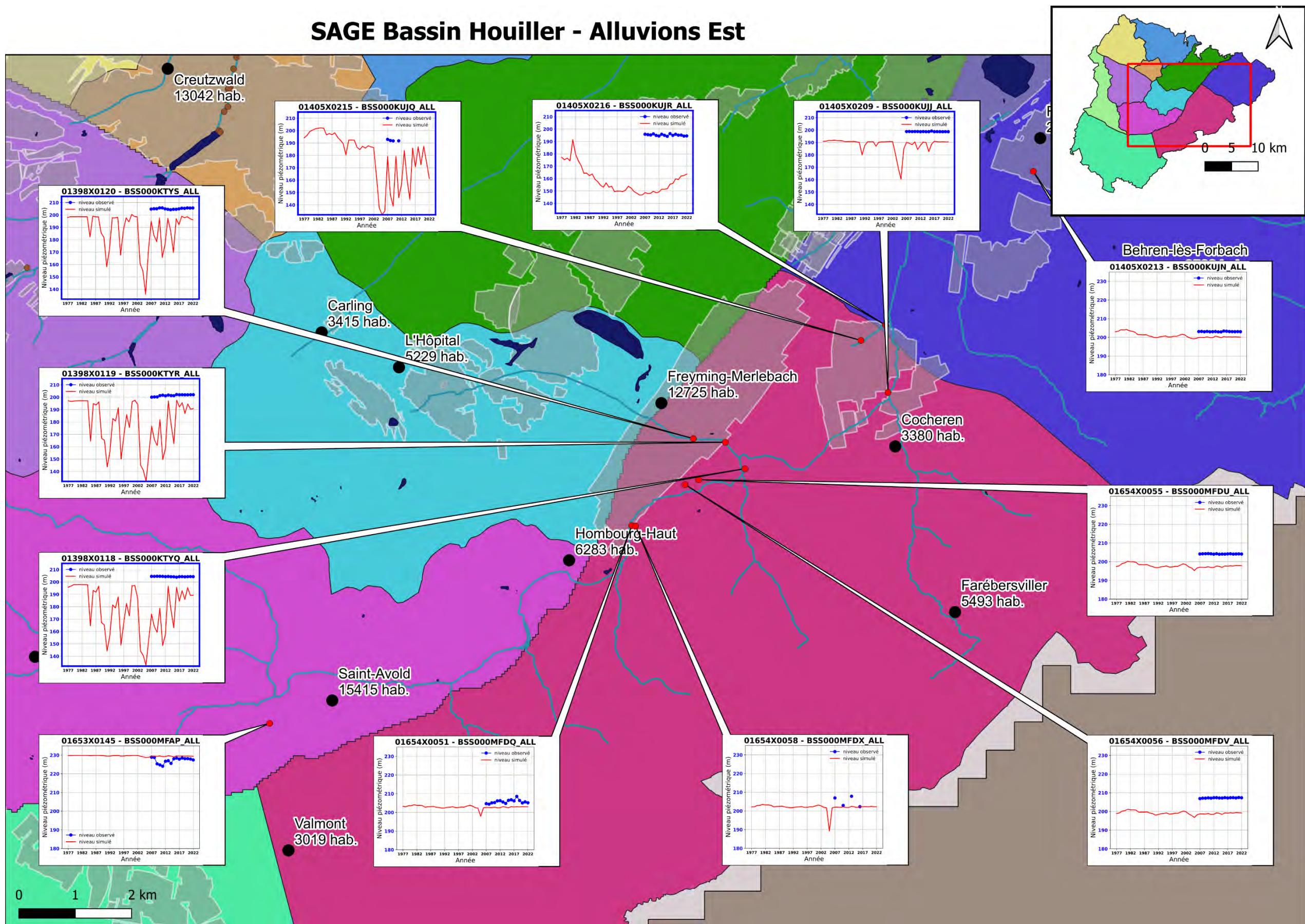


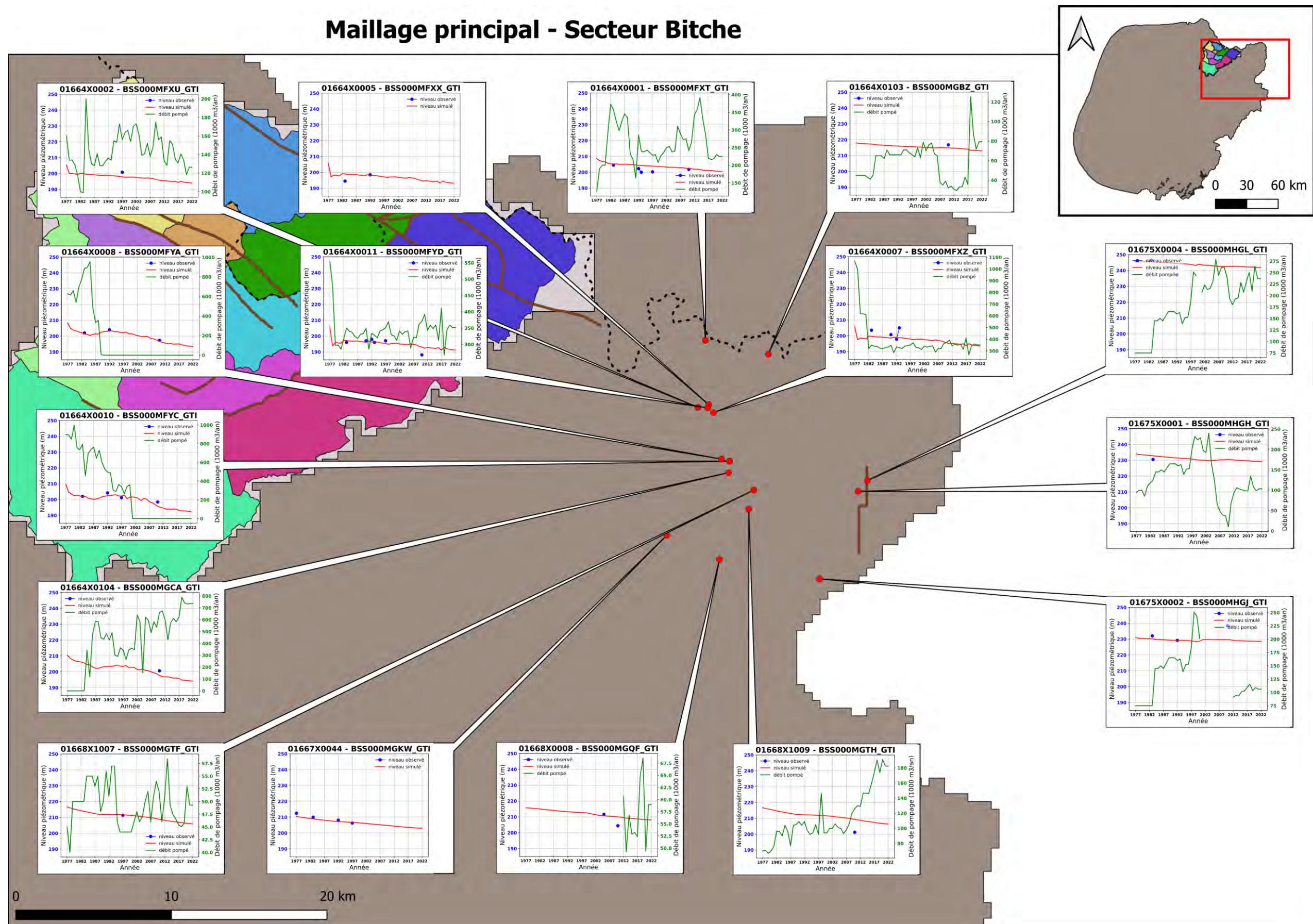


SAGE Bassin Houiller - Alluvions Ouest

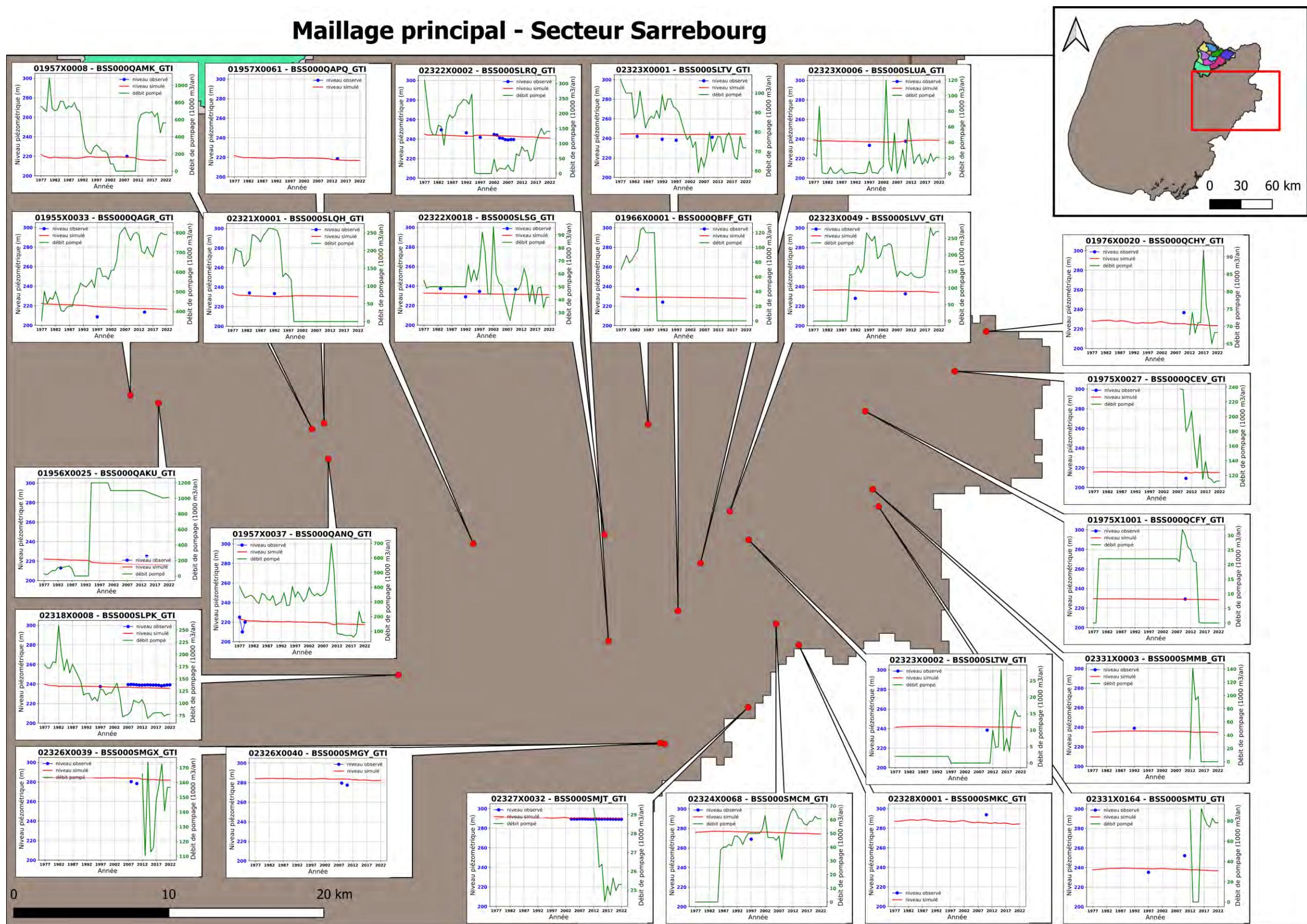


SAGE Bassin Houiller - Alluvions Est

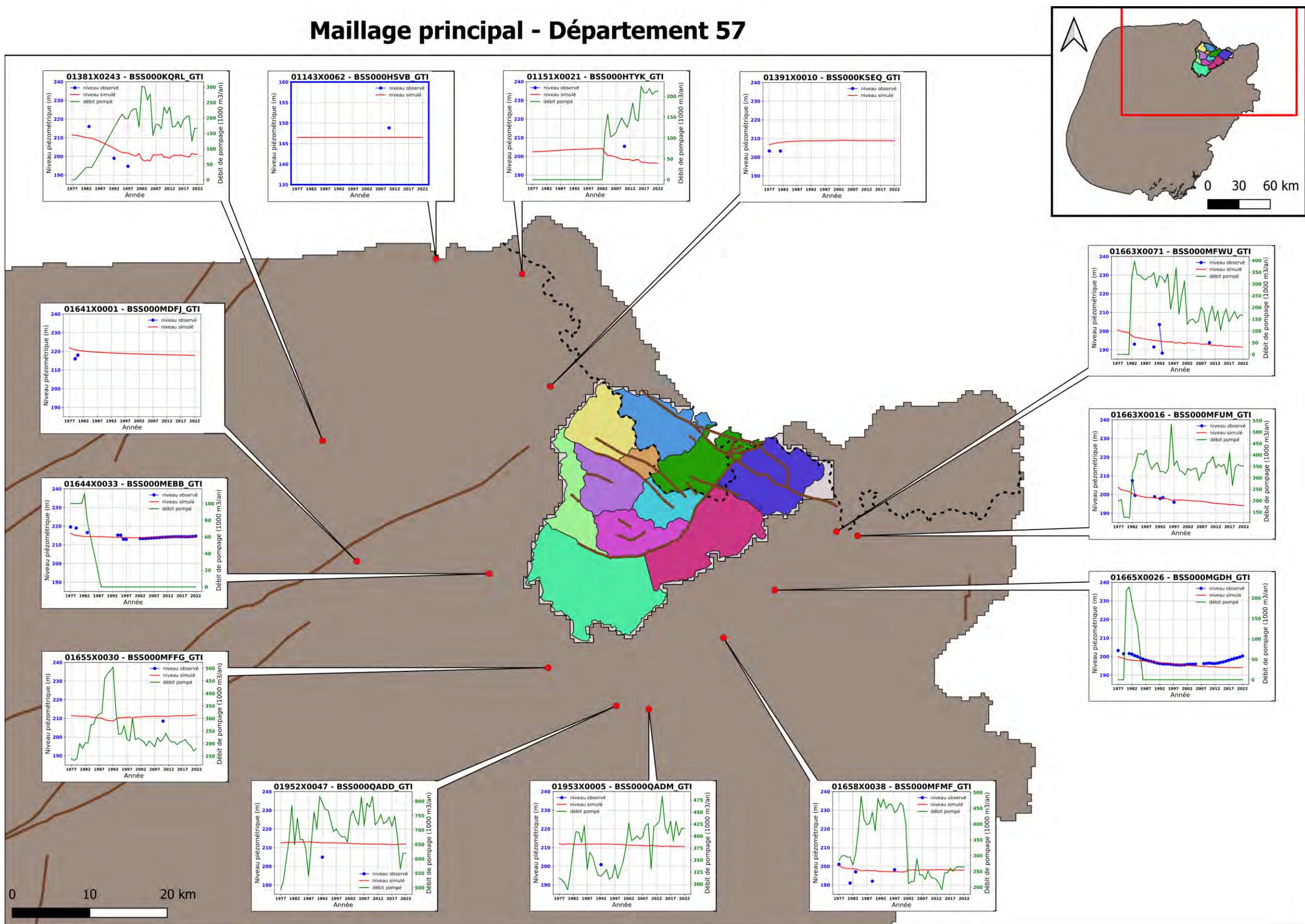


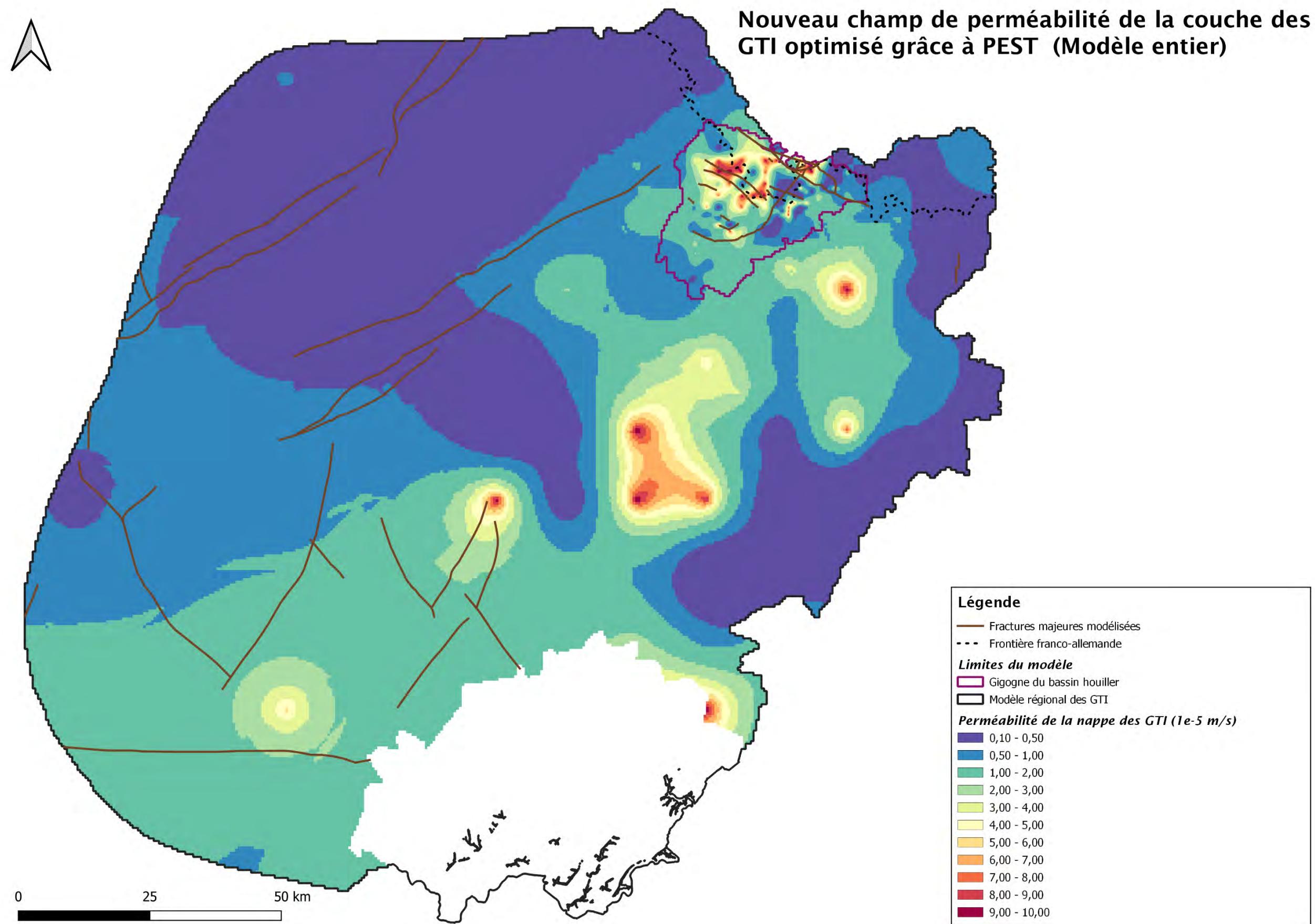


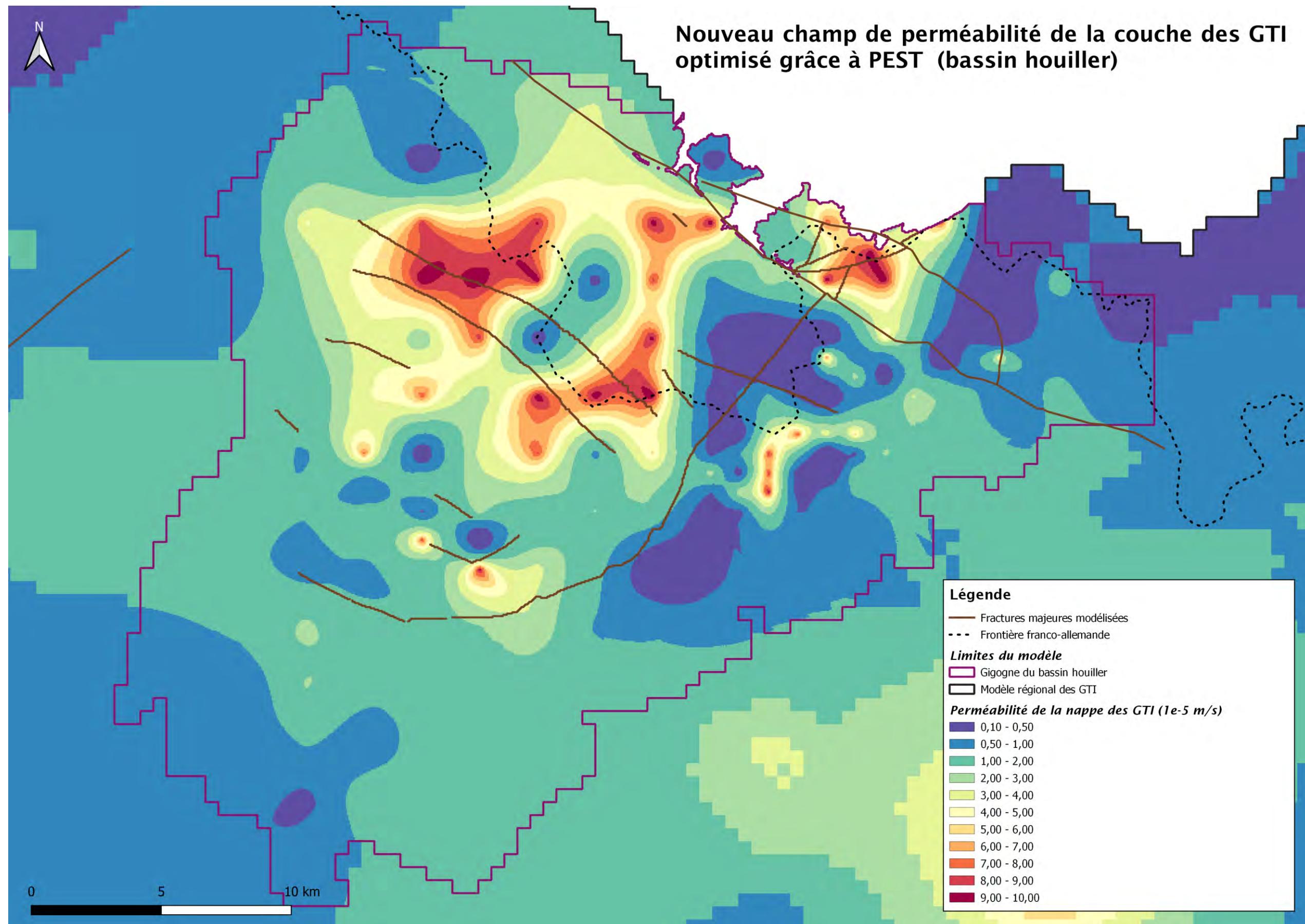
Maillage principal - Secteur Sarrebourg

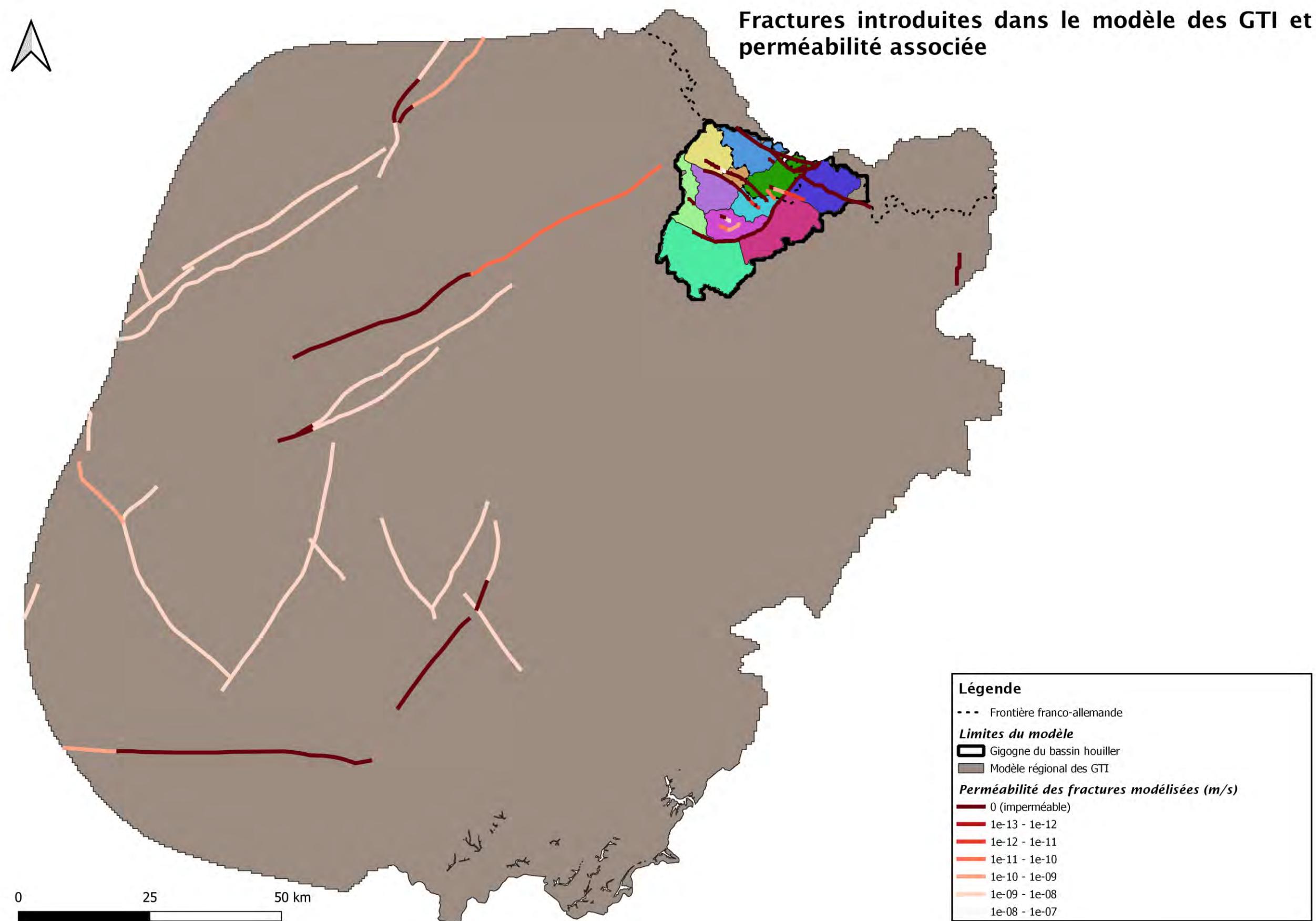


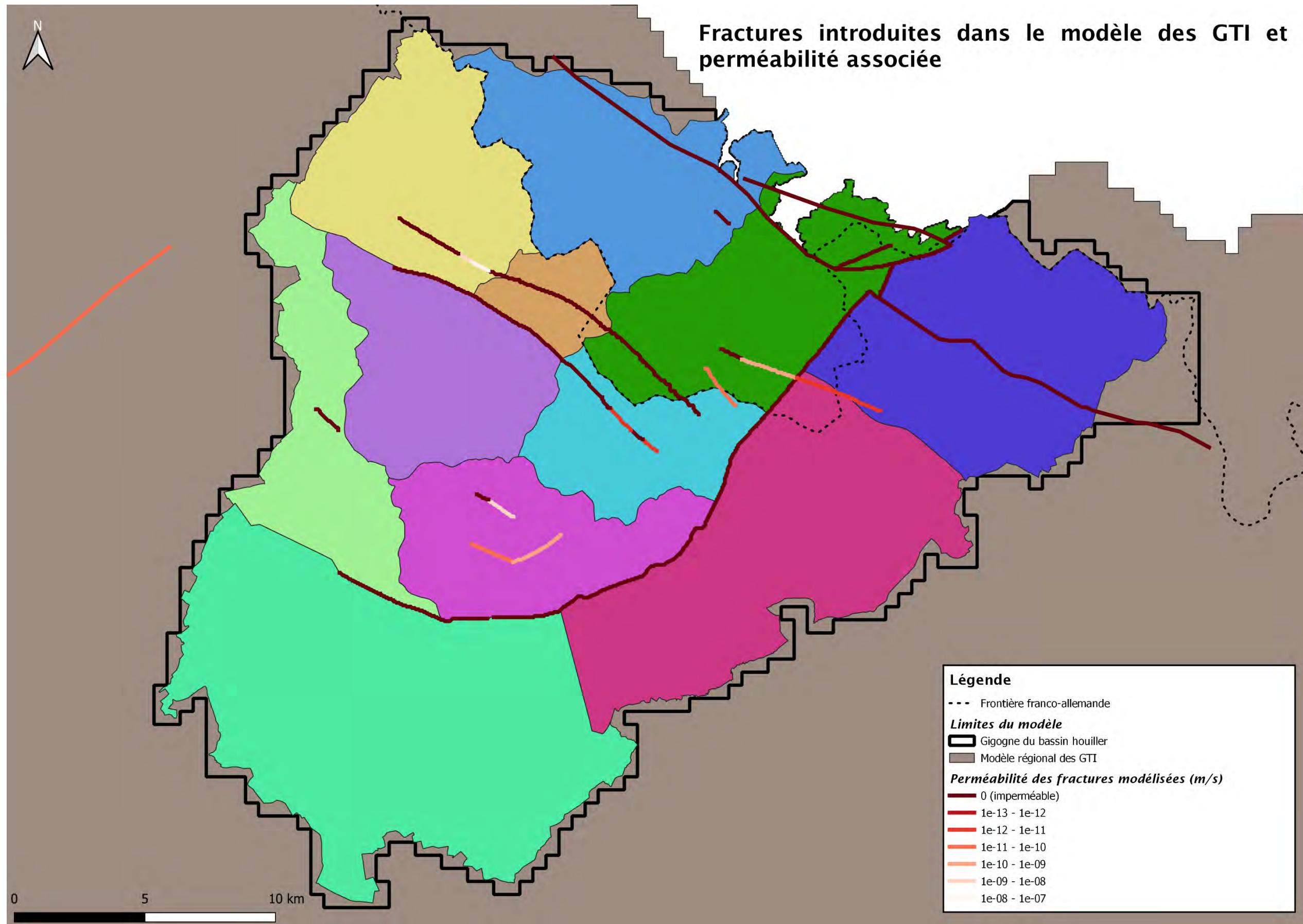
Maillage principal - Département 57









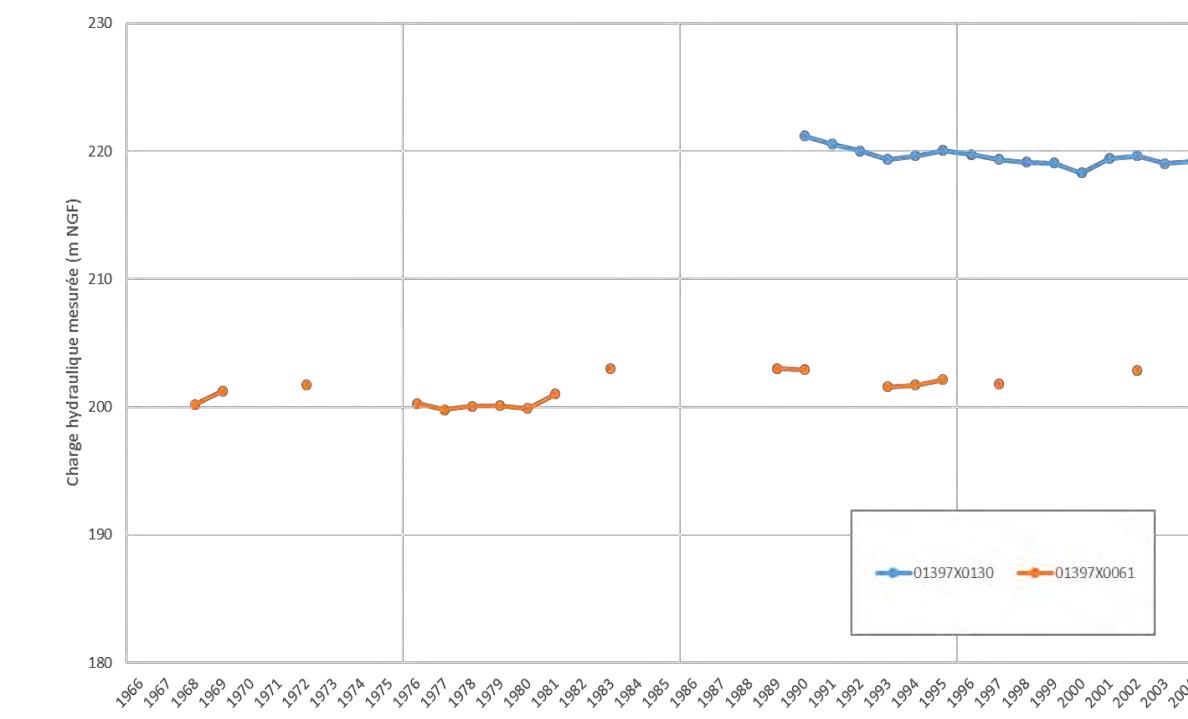
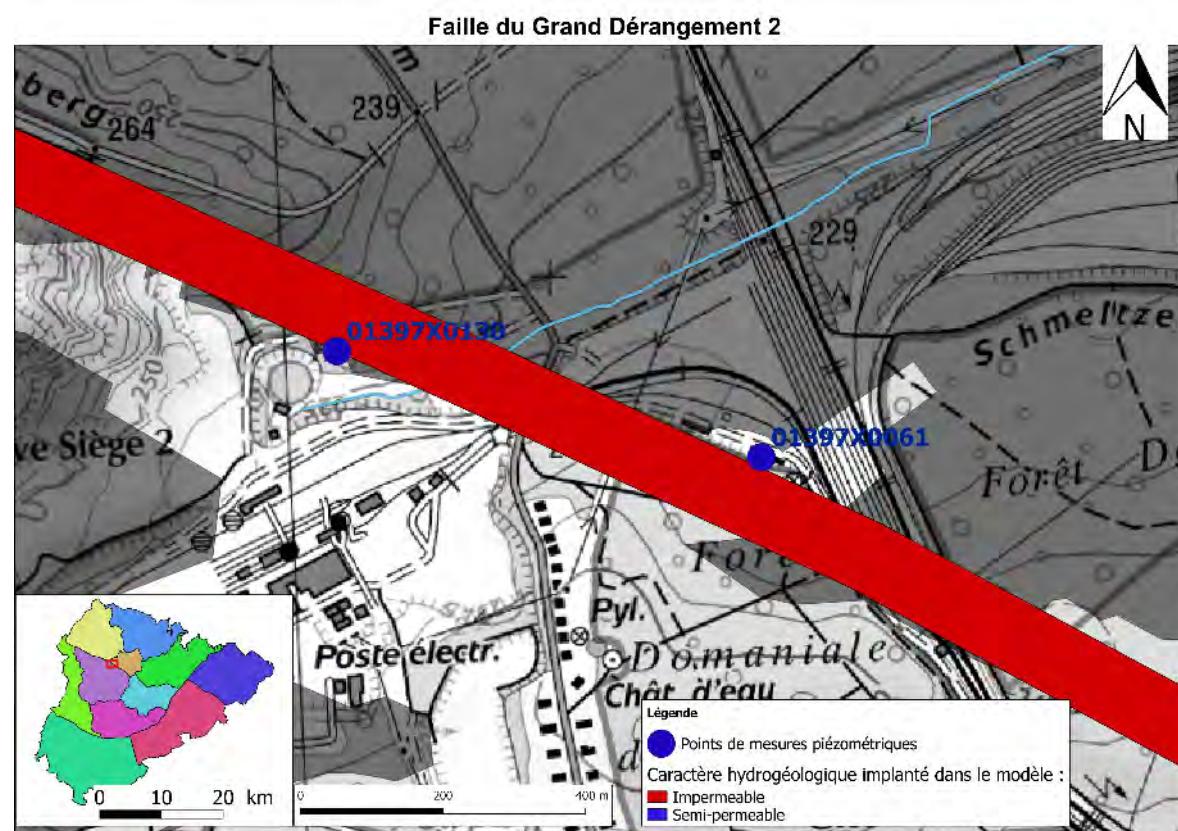
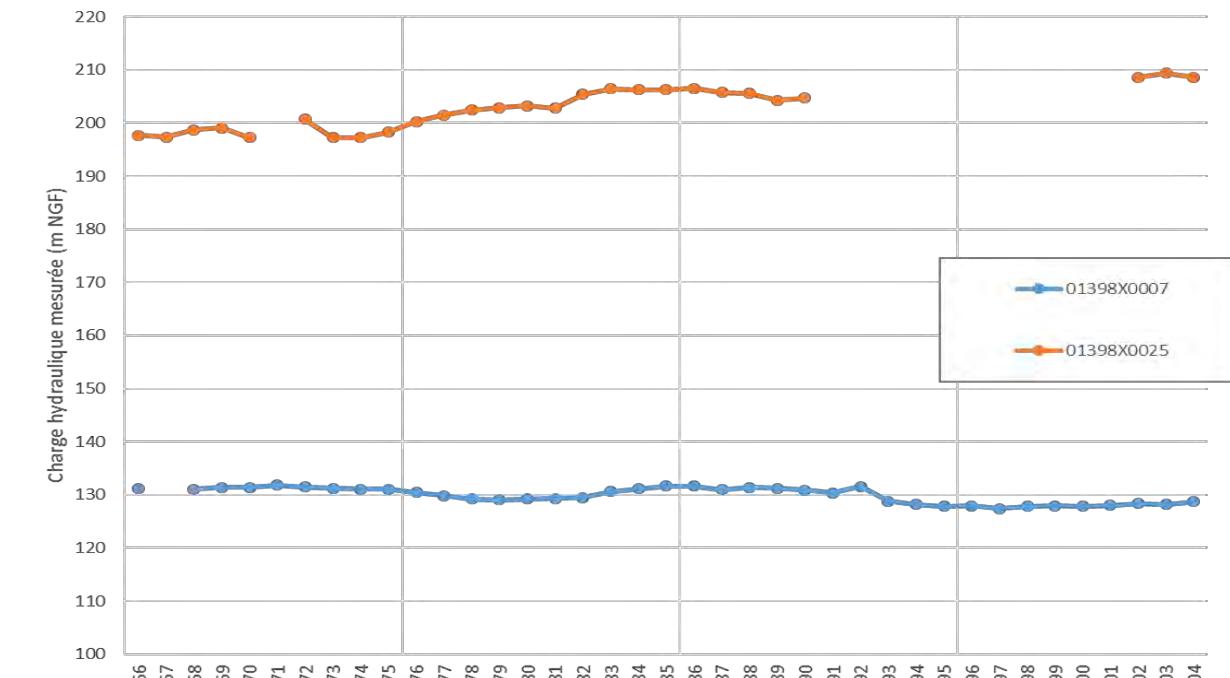
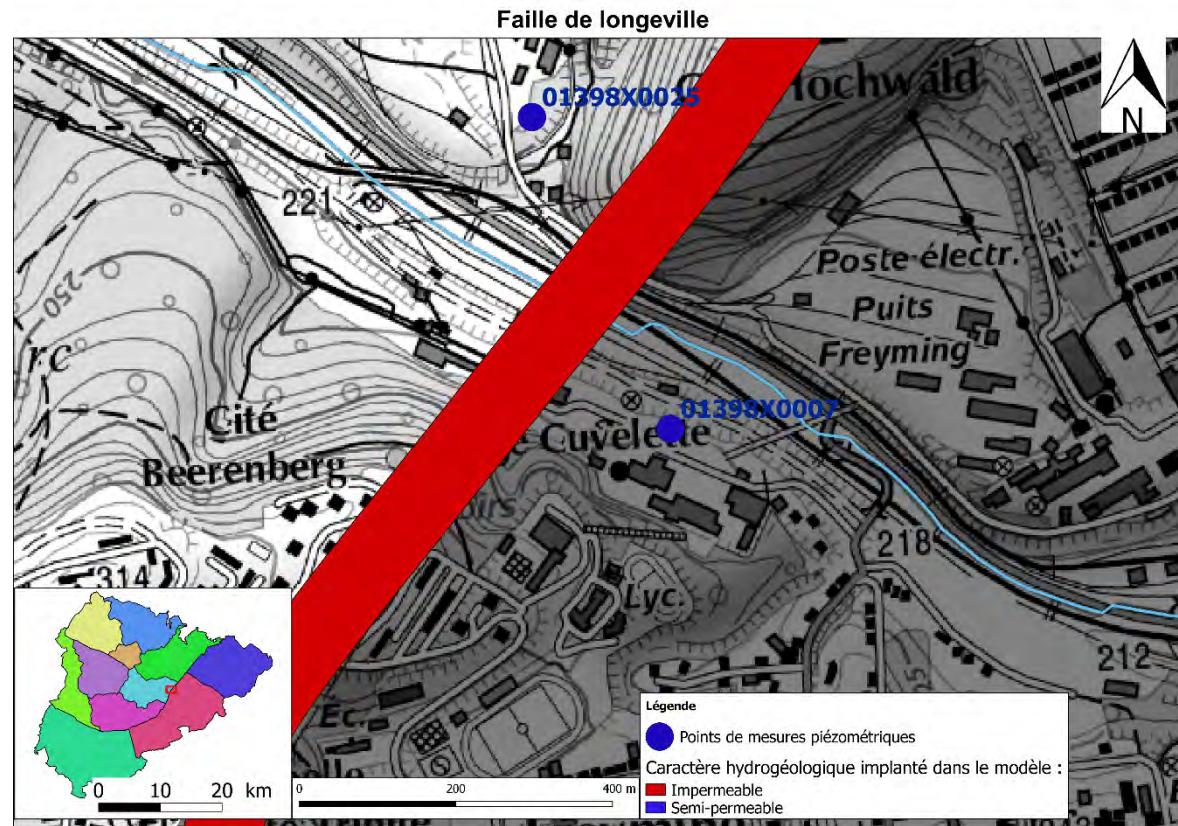


Choix des caractéristiques hydrogéologiques des principales failles considérées dans le bassin houiller

Noms	Caractéristique et étendue géographique	Incertitudes
Grand dérangement du Siège 1 *	Totallement imperméables avec des passages perméables/peu perméables sur toute l'étendue Nord-ouest de la faille	Rôle imperméable introduit mais non démontré à ce jour (pas de décalage visible au niveau des mesures piézométriques)
Grand dérangement du Siège 2	Totallement imperméable sur sa partie Ouest, peu perméable sur sa partie Est	Rôle imperméable visible par un décalage piézométrique d'environ 20 m sur sa partie Ouest (cf. annexe 4 : rôles imperméables des failles de Longeville et du Grand Dérangement du Siège 2) Rôle imperméable introduit mais non démontré à ce jour sur la partie Est
Faille de Varsberg	Peu perméable sur sa partie Ouest	Rôle peu perméable introduit mais non démontré à ce jour (pas de décalage visible au niveau des mesures piézométriques)
Faille de Longeville *	Totallement 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 piézométrique de plus de 50 m sur certains points (cf. annexe 4 : rôles imperméables des failles de Longeville et du Grand Dérangement du Siège 2)
Faille Saint-Nicolas	Peu perméable proche de la faille de Longeville	Rôle peu perméable introduit mais non démontré à ce jour (pas de décalage visible au niveau des mesures piézométriques)

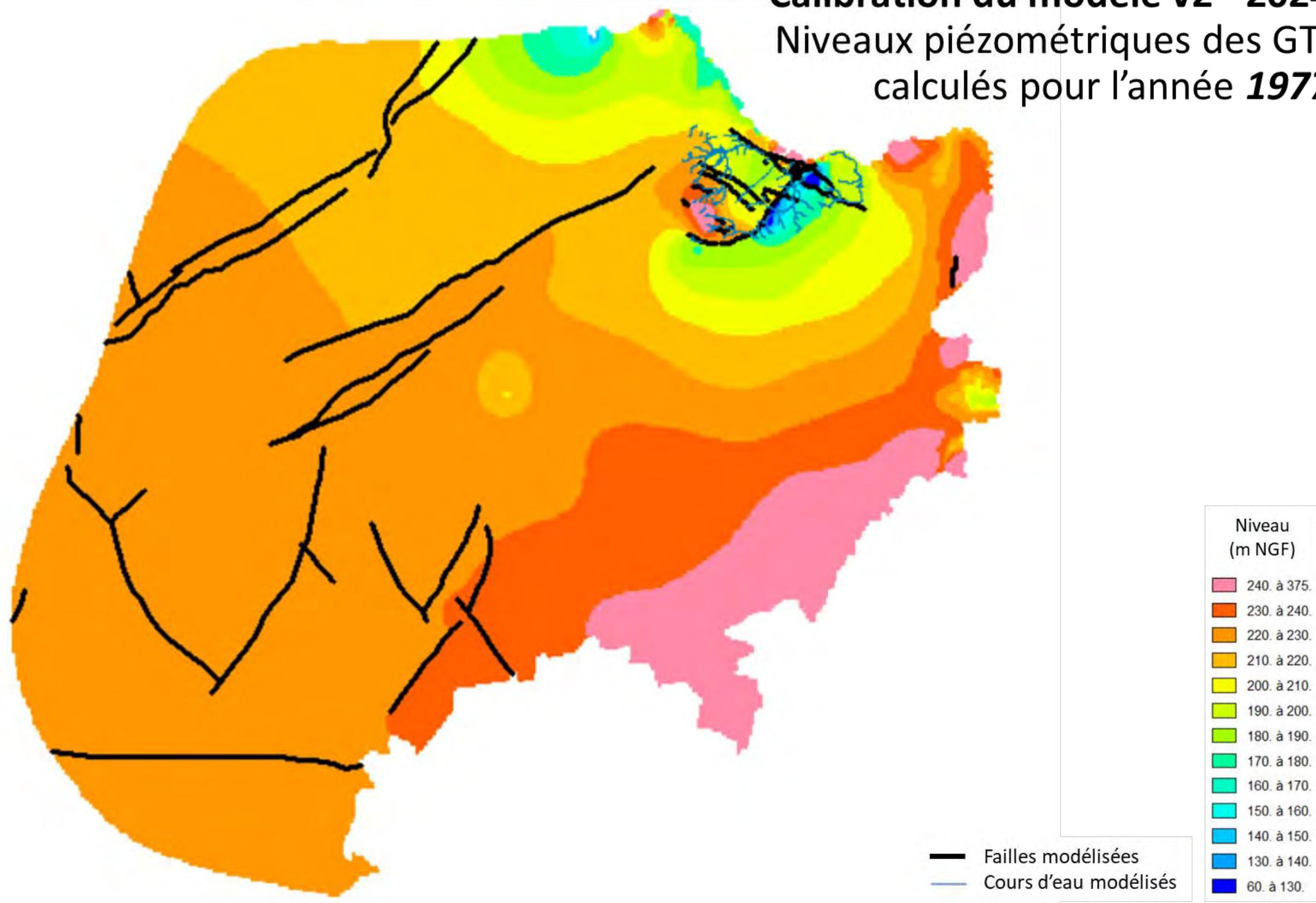
* Les décrochements piézométriques indiquent le rôle hydraulique imperméable de la faille.

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



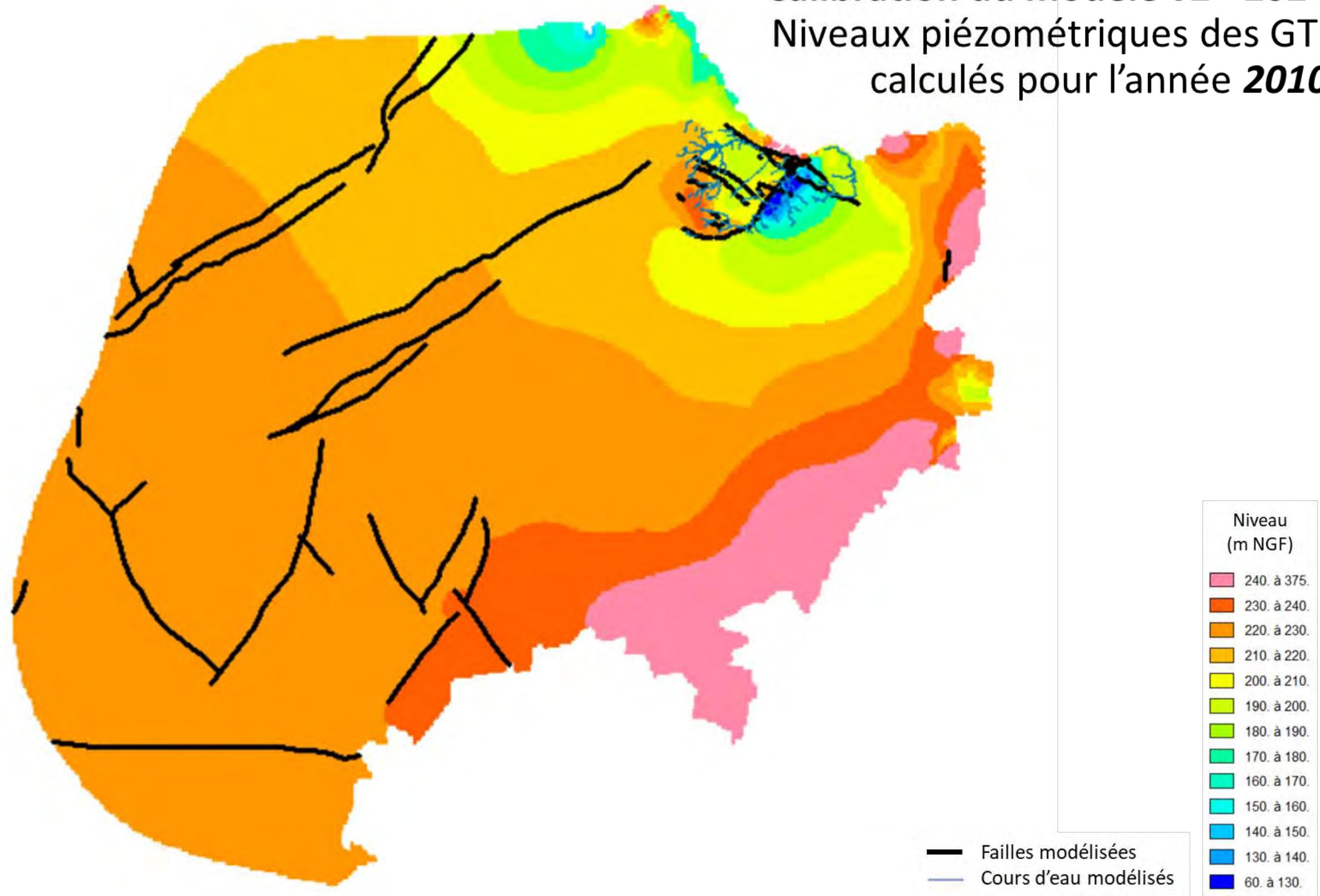
Calibration du modèle v2 - 2024

Niveaux piézométriques des GTI calculés pour l'année 1977



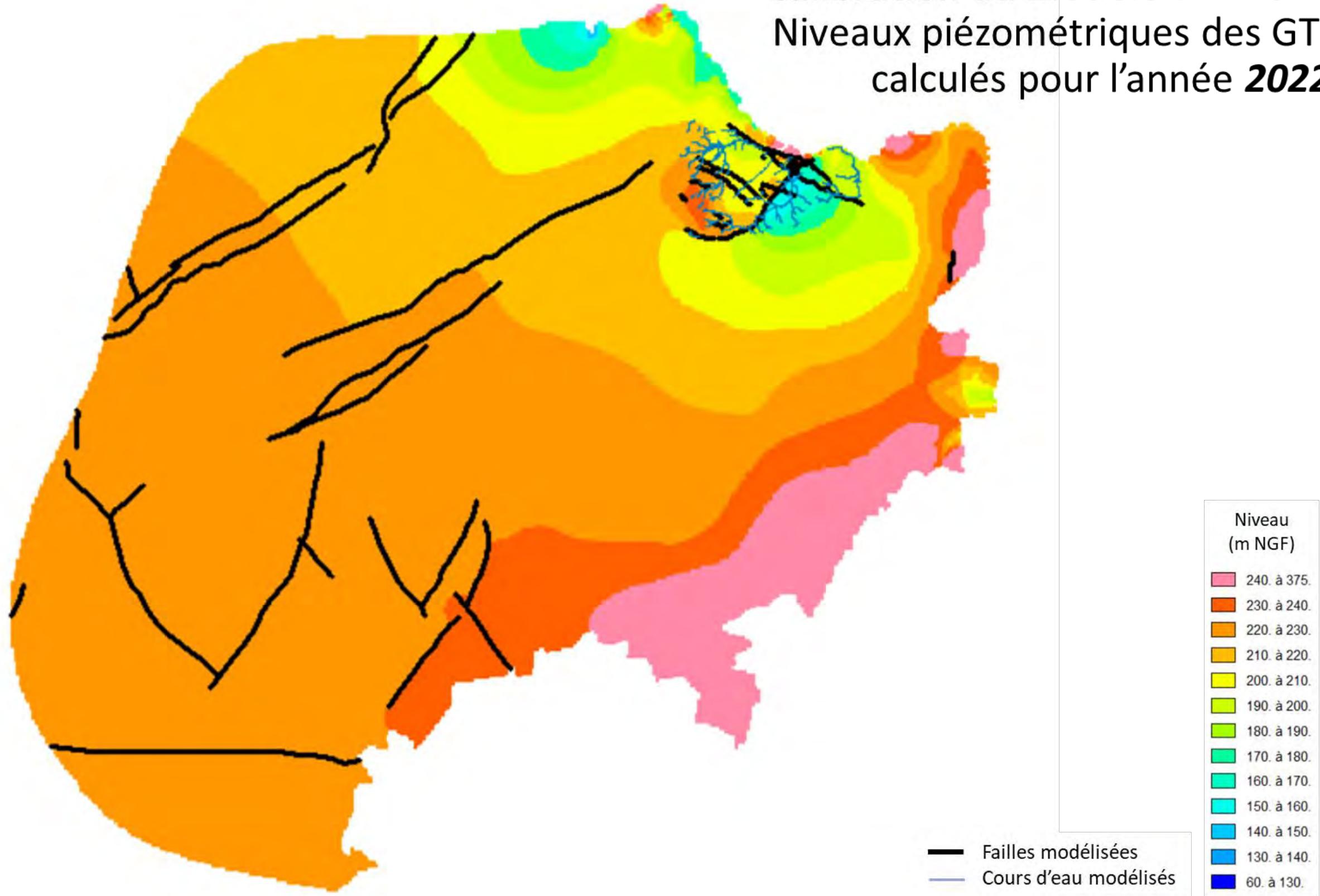
Calibration du modèle v2 - 2024

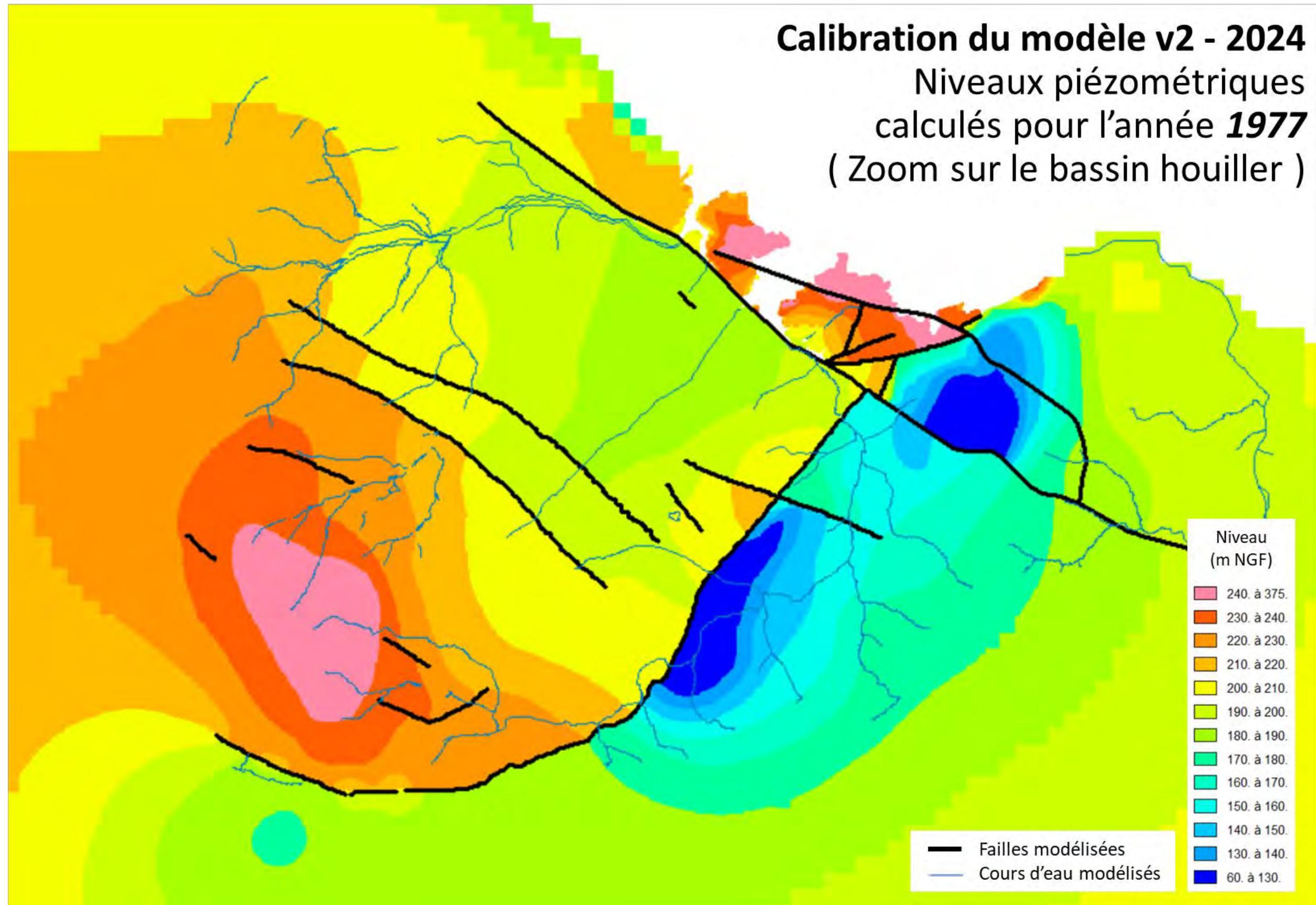
Niveaux piézométriques des GTI calculés pour l'année **2010**

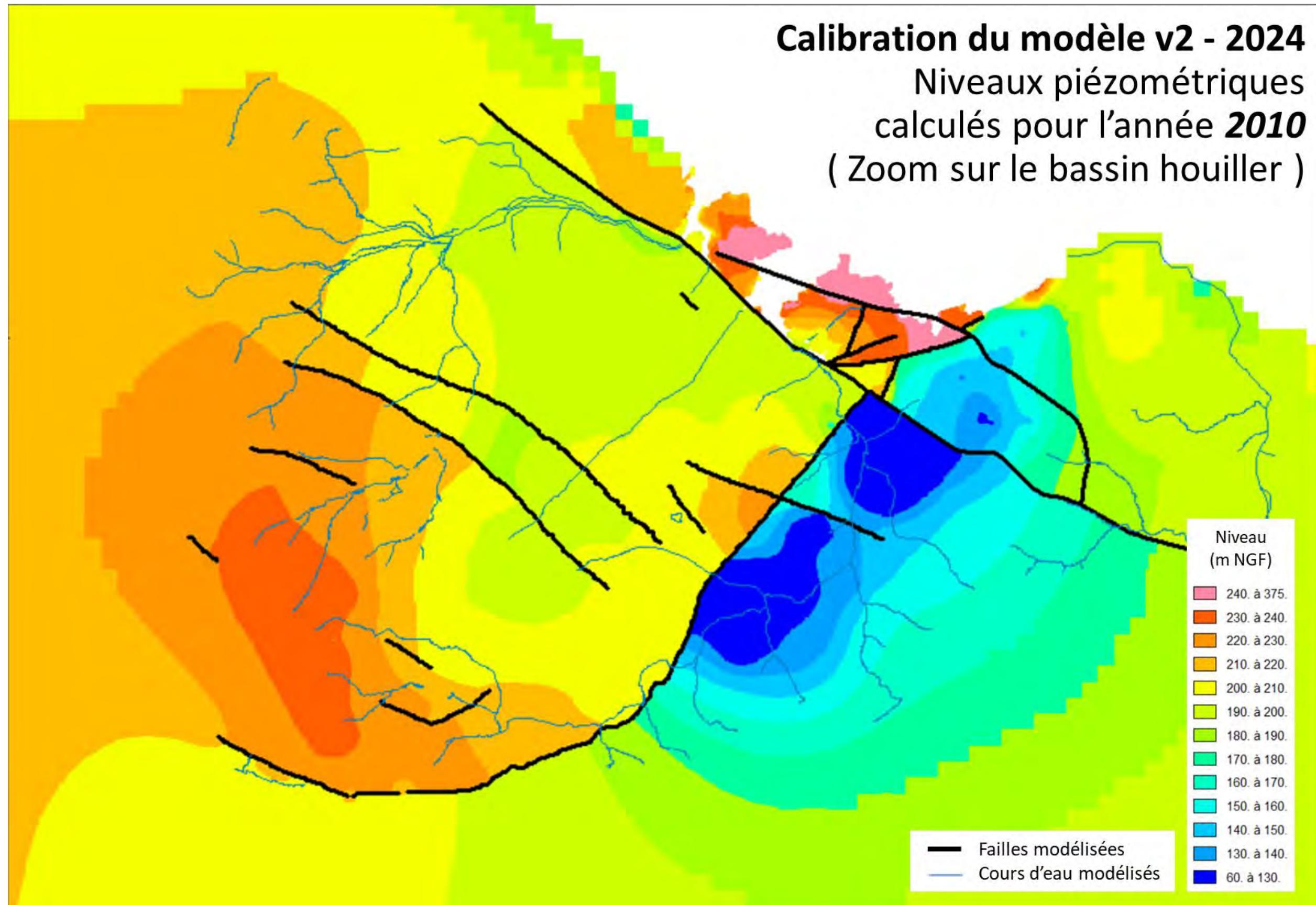


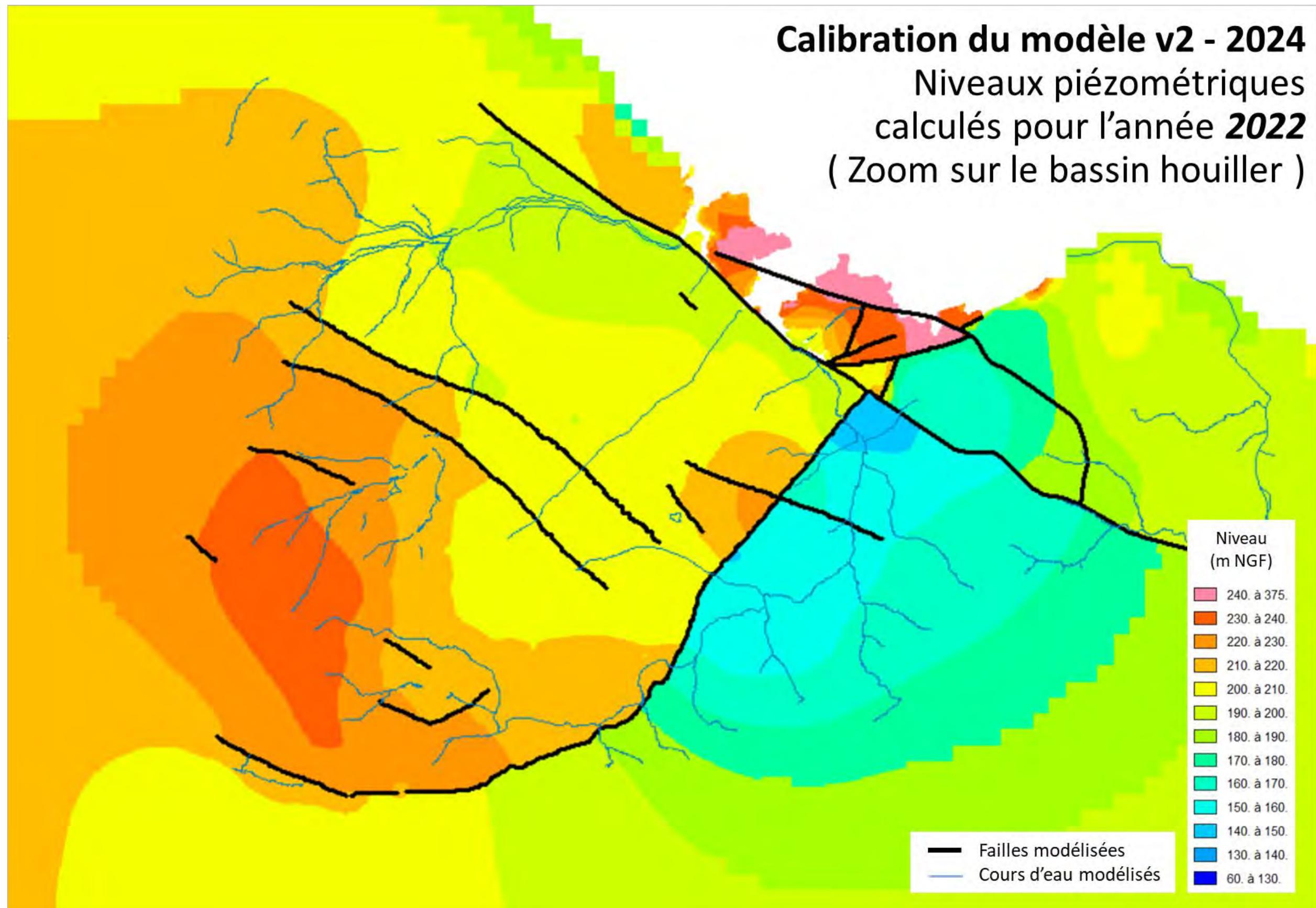
Calibration du modèle v2 - 2024

Niveaux piézométriques des GTI calculés pour l'année **2022**









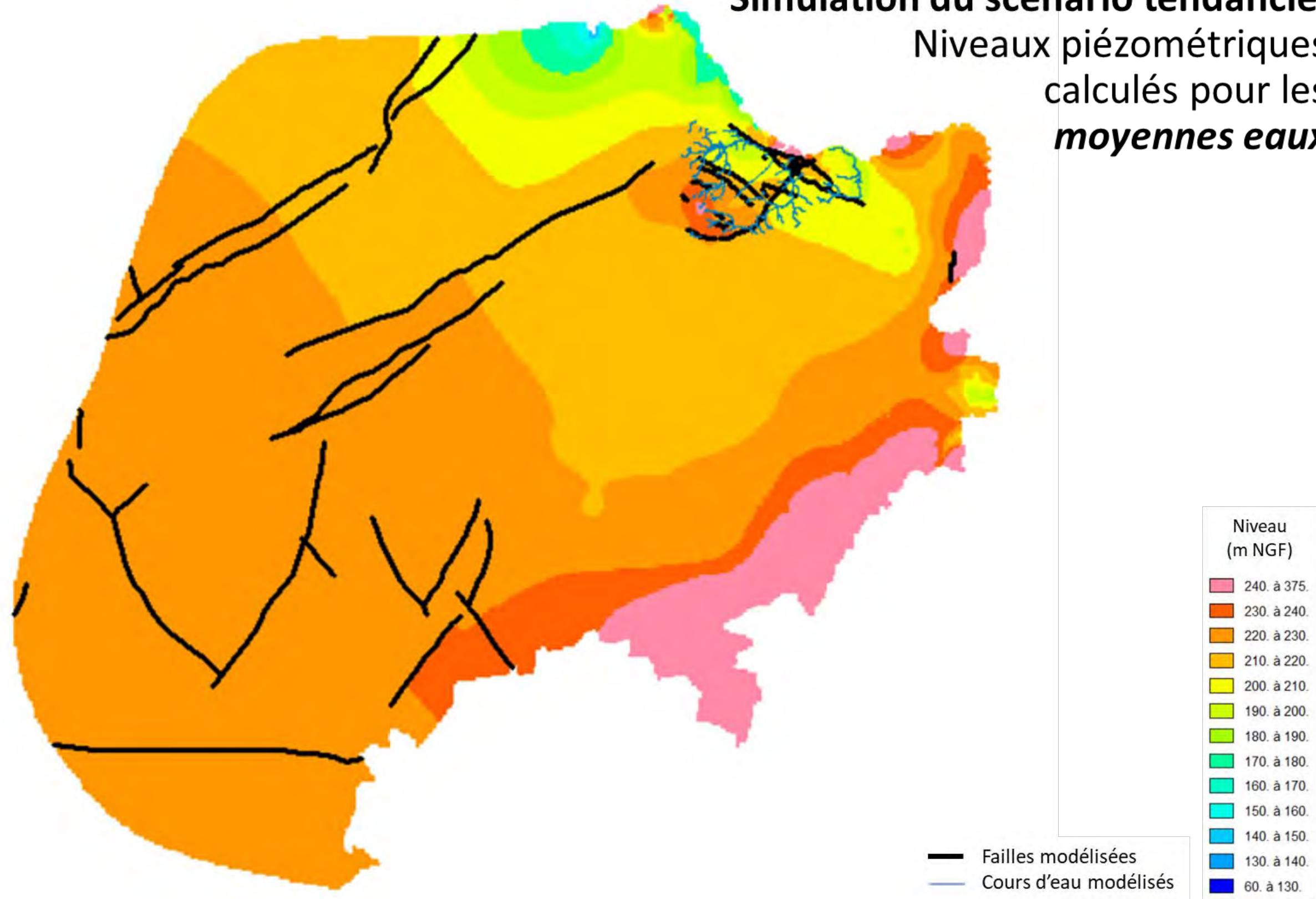
Annexe 5 : Résultats des simulations prévisionnelles

L'annexe 5 présente sur 4 pages A3 les 4 cartes suivantes :

- **2 cartes piézométriques calculées pour la nappe des GTI pour le scénario « tendanciel », pour l'ensemble du modèle ;**
- **2 cartes piézométriques calculées pour la nappe des GTI pour le scénario « tendanciel », pour le bassin houiller (zoom).**

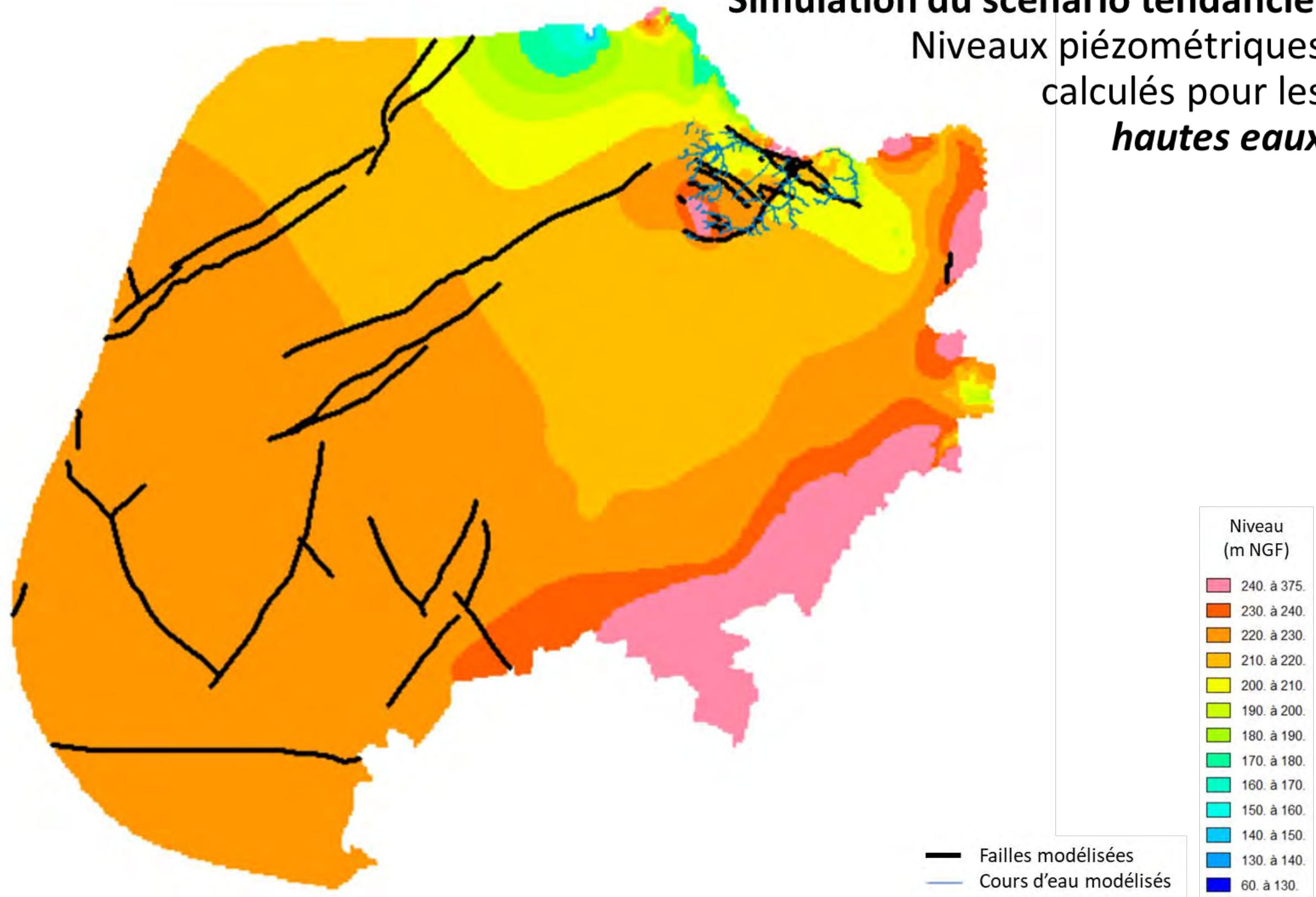
Simulation du scénario tendanciel

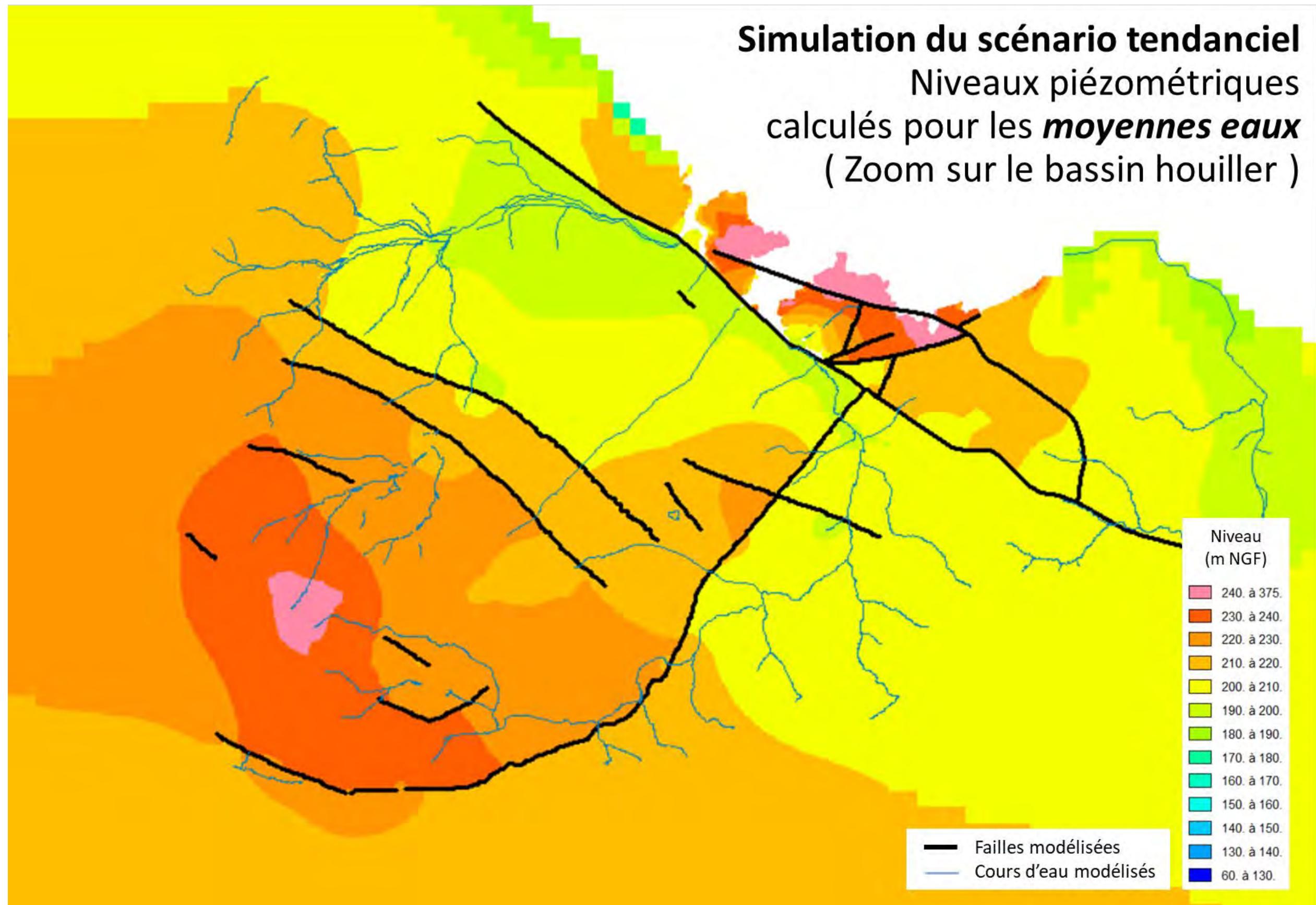
Niveaux piézométriques calculés pour les *moyennes eaux*

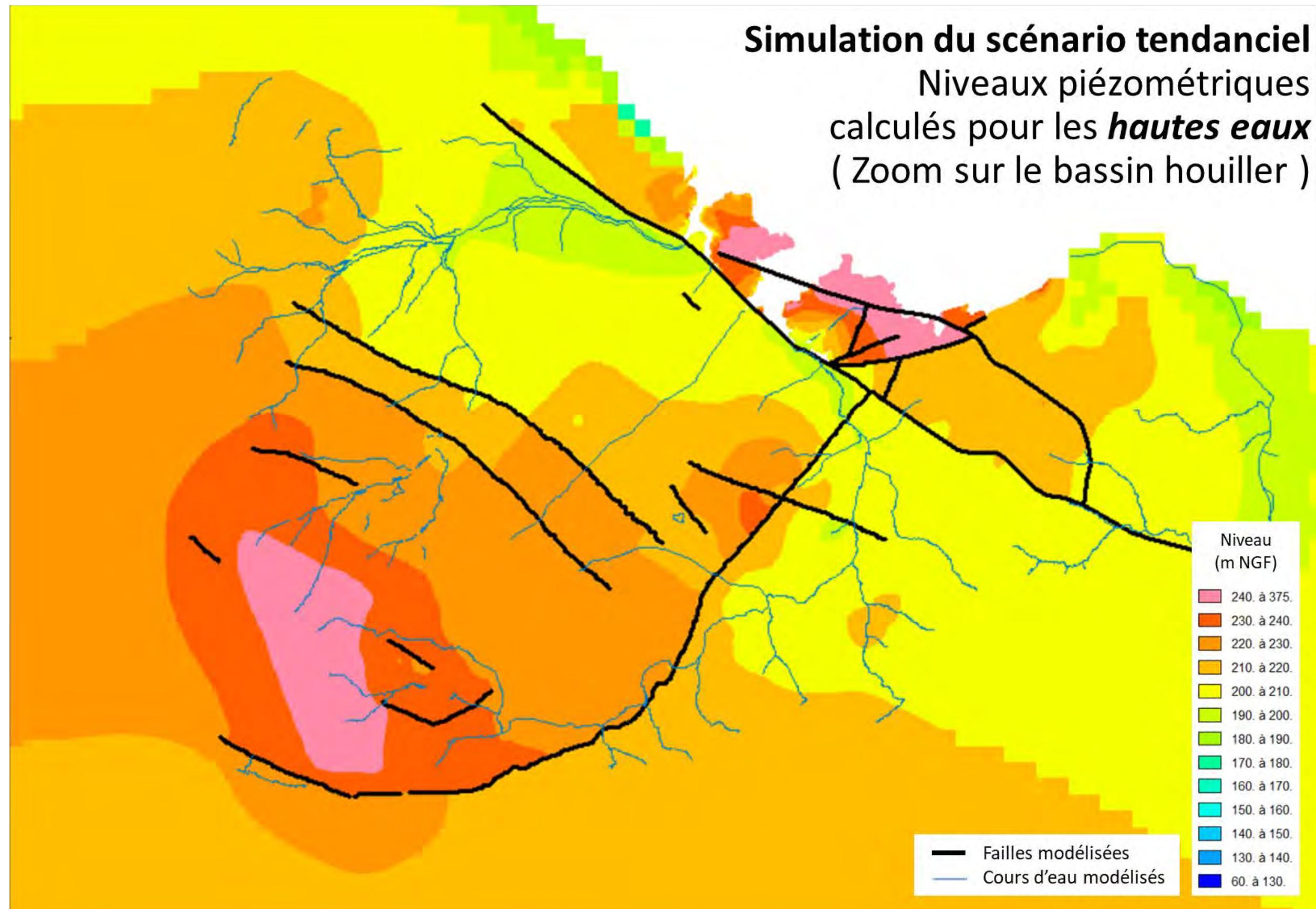


Simulation du scénario tendanciel

Niveaux piézométriques calculés pour les *hautes eaux*









*Liberté
Égalité
Fraternité*

Centre scientifique et technique

3, avenue Claude-Guillemain
BP 36009
45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34
Direction régionale Grand Est
1 rue Jean Zay
54500 – Vandoeuvre-lès-Nancy
Tél. : 03 83 44 81 49
www.brgm.fr



ANNEXE 4

Précisions des prévisions réalisées

1 PRECISION PLANIMETRIQUE 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. Elle demeure marginale eu égard à l'échelle des phénomènes considérés.

2 PRECISION ALTIMETRIQUE DES RESULTATS

Le calcul de la profondeur de nappe est obtenu par différence entre cote piézométrique et cote topographique. Ces deux variables sont concernées par des incertitudes à prendre à compte lors de la lecture des résultats.

2.1 Topographie

Dans la version 2018 des prévisions de remontée de nappe [8], 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 topographiques¹ sur la piézométrie et la profondeur de nappe calculées aux mailles de 50 m.

2.2 Piézométrie

La précision altimétrique des résultats de piézométrie calculée par le modèle hydrodynamique dépend des résultats de calibration. En effet, c'est la différence entre les données réelles de piézométrie mesurées et les piézométries calculées par le modèle qui donne des indications sur la fiabilité des résultats. Cette précision varie en fonction des secteurs.

Pour rappel, dans la première version du modèle présentée en 2018 [8], il avait été décidé de prendre en compte une précision de $\pm 1,5$ m NGF. Elle avait été estimée sur la base de la calibration dans les secteurs de « La Houve Falck » et de « La Houve Traditionnel ». Nous avions considéré 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. 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.

Le calcul de l'indicateur de qualité de calibration du modèle est présenté dans le paragraphe 4.4.c) du rapport du BRGM [12]. Par comparaison avec la première version du modèle, l'erreur calculée dans les secteurs de Falck et

¹ De l'ordre de ± 2 m auparavant, pour $\pm 0,5$ m aujourd'hui.

de La Houve Traditionnel est comprise entre $\pm 1,64$ et $\pm 2,12$ m. Elle est légèrement plus élevée dans la version 2024 du modèle. Cela est dû à la prise en compte de plus d'ouvrages dans le calcul de l'erreur pour la calibration. En effet, à des fins de calibration, certains ouvrages pour lesquels le modèle ne reproduisait pas les chroniques piézométriques mesurées n'avaient pas été pris en compte dans la version 1. Cependant, il a été décidé de prendre en compte tous les ouvrages dans le modèle actualisé. A l'échelle du modèle, la précision reste comparable.

On pourra pour plus de détails se reporter au tableau des indicateurs par secteur du paragraphe 4.4.c) du rapport BRGM disponible en annexe 4. La moyenne des médianes des écarts absolus pondérée par le nombre d'observations varie entre 1,68 m et 5,93 m selon les secteurs en France (les piézomètres dans les secteurs allemands présentent peu de chroniques qui sont alors anciennes et peu complètes).

2.3 Profondeurs de nappe

Compte tenu de la précision altimétrique minimum des données LIDAR qui est de 10 cm, les profondeurs de nappe de référence calculées pour chaque situation modélisée présentent une précision altimétrique variable selon les secteurs. Nous nous référerons au tableau du paragraphe 4.4.c) du rapport BRGM disponible en annexe 4 lors de l'interprétation des résultats.

3 INCERTITUDES RESIDUELLES

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 [10].

Le Tableau 1 reprend la synthèse de ces incertitudes réalisée dans le rapport 2018 de GEODERIS [8] et y associe les évolutions qui ont permis d'apporter des éléments de réponse ou les mesures qui seront prochainement prises dans ce but.

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) la réalité à venir s'avère conforme aux scénarios de simulation.

Tableau 1 – Incertitudes résiduelles de la modélisation, moyens envisagés en 2018 pour les réduire et situation actuelle

Objet	Incertitudes résiduelles associées	Impact estimé en 2018 sur les prévisions	Moyens envisagés pour réduire les incertitudes en 2018 [8]	Situation 2024
Failles géologiques	Localisation, géométrie, perméabilité	Majeur	Analyses de sensibilité numérique, pouvant guider le dimensionnement d'éventuelles investigations complémentaires (piézomètres, pompages d'essai, géophysique)	Etude de sensibilité en cours de réalisation. Résultats attendus pour fin 2024. Cette étude, permettra de pondérer le rôle de chaque faille sur le modèle et apportera des indications complémentaires pour adapter les investigations en cours lors de la rédaction de ce rapport et prévues dans le cadre de la réalisation du champ captant et du réseau piézométrique.
Crevasses minières	Pas de retour d'expérience sur le comportement	Potentiellement important (infiltration préférentielle ?)	Piézomètres, pompages d'essai, traçages	Détection d'anomalies au fil de l'eau, lors d'interprétations hydrogéologiques. Les données acquises ne pourront pas forcément être intégrées au modèle en tant que telles mais seront utiles à l'interprétation des niveaux d'eau dans des zones prédisposées à la présence de crevasses.
Réservoirs miniers	Lois d'échange nappe-mine considérées	Modéré	Suivi pompages miniers et tests de débits	Au fil de l'eau, amélioration des lois sur le long terme.
Alluvions	Localisation, géométrie, anisotropie de perméabilité (mises en charge possibles)	Modérée à l'échelle du bassin Majeur à l'échelle des fonds de vallée	Doublets de piézomètres Alluvions / GTI, pompages d'essai et sondages	Les doublets de piézomètres sont en cours de réalisation. Tout comme pour les crevasses minières, les données acquises seront à l'échelle locale et ne pourront pas être intégrées tel quel au modèle. Elles serviront cependant d'aide à l'interprétation des résultats du modèle.
Grès	Anisotropie de perméabilité (mises en charge possibles) selon variations sédimentologiques Monocouche dans le modèle	Potentiellement important	Piézomètres profonds multitungés avec reconnaissance géologique sur carotte	Les piézomètres sont en cours de réalisation. Tout comme pour les crevasses minières, les données acquises seront à l'échelle locale et ne pourront pas être intégrées tel quel au modèle. Elles serviront cependant d'aide à l'interprétation des résultats du modèle.
Cours d'eau	Echanges nappe – rivière	Majeur	Campagne de jaugeage régulières	Des campagnes de jaugeage semestrielles sont d'ores et déjà en place. Cependant, au vu de l'évolution observée des cours d'eau (certains sont secs pendant la saison de basses eaux), une optimisation de ces campagnes est à prévoir afin d'intégrer des résultats plus pertinents, notamment en revoyant la position des sites de mesures.
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.	Inventaire au fil de l'eau. Actuellement, le modèle est constitué d'une seule couche de GTI et ne peut donc pas prendre en compte les débordements souterrains. Cependant, il considère possible les débordements entre alluvions et GTI, avec la topographie (sources).
Modifications anthropiques	Remaniement (déconsolidation, imperméabilisation, ...) des terrains de surface / proche surface	Majeur	Inventaire et éventuelle modélisation au cas par cas.	Inventaire au fil de l'eau. Dans cette version du modèle, le contour des alluvions a été revu. Ils ne prennent plus en compte les zones de remaniement anthropiques.
Prélèvements futurs	Evolution des prélèvements	Majeur	Actualisation régulière du scénario de prélèvement à chaque nouvelle mise à jour du modèle	La version 2024 du modèle a été mise à jour avec les prévisions de prélèvement actuelles.
Recharge et ruissellement	Calcul de la recharge (conditionne débordements, comportement des rivières, ...)	Majeur	Autres approches à tester, accompagnées d'analyses de sensibilité. En lien très étroit avec la problématique des cours d'eau	Un bilan hydroclimatique a été réalisé sur le BHL selon les données climatiques (pluie et évapotranspiration) de Météo-France et en fonction des calculs d'infiltration faits par le modèle GARDENIA. L'optimisation de la campagne de jaugeage et la récolte de données adaptées permettront d'améliorer sensiblement les calculs réalisés par le modèle GARDENIA.
Changements climatiques	Evolution de la recharge, intensité des évènements exceptionnels	Potentiellement important	Actualisation des scénarios climatiques sur la base d'études scientifiques	La version 2024 du modèle prend en compte les scénarios climatiques simulés par la DRIAS permettant de modéliser à l'échelle du BHL une situation moyenne d'infiltration ainsi qu'une situation de pluie exceptionnelle.
Qualité de la calibration	Difficultés ponctuelles ou dans certaines zones	Majeur	Re-calibrations régulières sur la base des nouvelles données disponibles	La mise en place du réseau piézométrique et du champ capant ainsi que les investigations associées apporteront de nouvelles données utiles à la calibration du modèle.