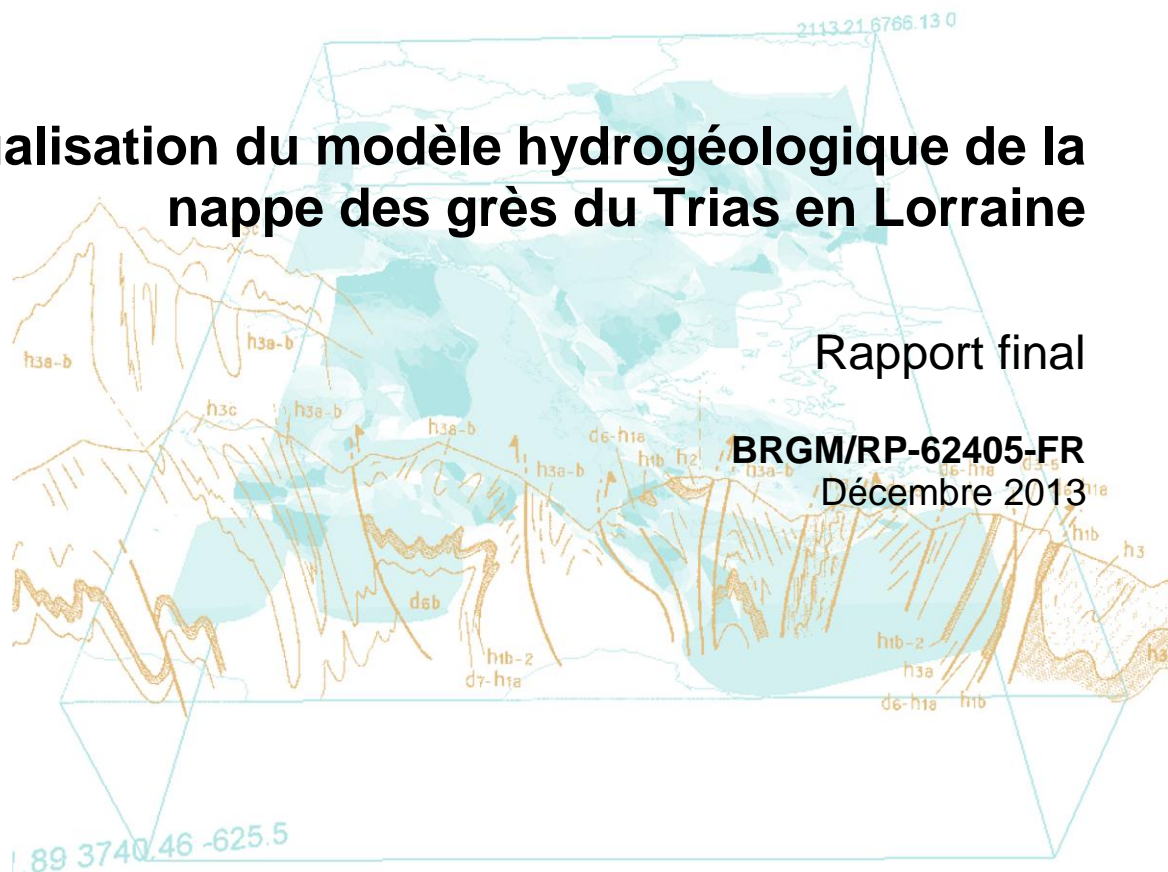




Actualisation du modèle hydrogéologique de la nappe des grès du Trias en Lorraine

Rapport final

BRGM/RP-62405-FR
Décembre 2013



Actualisation du modèle hydrogéologique de la nappe des grès du Trias en Lorraine

Rapport final

BRGM/RP-62405-FR
Décembre 2013

Étude réalisée dans le cadre des projets
de Service public du BRGM 12RSE1502

L. Vaute, C. Innocent, G. Fourniguet

Vérificateur :

Nom : S. Ollagnier

Date : 19/12/2013

Signature :

Original signé le 19/12/2013

Approbateur :

Nom : D. Midot

Date : 19/12/2013

Signature :

Original signé le 19/12/2013

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

Mots clés : eaux souterraine, ressource en eau, nappe captive, grès du Trias inférieur, modèle, gestion, actualisation, simulations, Vosges, 88, Lorraine.

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

Vaute L., Innocent C., Fourniguet G. (2013) – Actualisation du modèle hydrogéologique de la nappe des grès du Trias en Lorraine. Rapport BRGM/RP-62405-FR, 56 p., 20 fig, 4 tabl.

© BRGM, 2013, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

En 2011, la Commission Locale de l'Eau du Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux de la nappe des Grès du Trias Inférieur (SAGE GTI) a décidé d'entreprendre l'élaboration des premiers documents constitutifs du SAGE : « Etat initial et Diagnostic » et « Tendances et scénarios ». Pour ce faire, le modèle hydrogéologique de la nappe des GTI doit être utilisé pour quantifier les risques associés aux problèmes de gestion actuels reconnus sur la nappe des GTI dans ce secteur, et servir d'outil d'aide à la décision lors des études en cours et à venir. Préalablement à cette utilisation, les acteurs du SAGE ont jugé nécessaire que le modèle soit actualisé en 2012.

Le BRGM a donc procédé en 2012-2013 à une actualisation du modèle, en prenant en compte les nouvelles données disponibles jusqu'à la fin de l'année 2010, dans le but de valider le modèle sur la période 2000-2010, ou d'améliorer la version 2005. Pour contribuer à lever les principales incertitudes dans le périmètre du SAGE GTI (rôle de la faille de Vittel, recharge, drainance), l'étude d'actualisation s'est aussi appuyée sur les résultats d'une campagne de géochimie isotopique.

Les principaux résultats de la campagne de géochimie isotopique et de l'actualisation du modèle sont présentés dans ce rapport. L'actualisation du modèle a permis de mettre à jour le calcul du solde entrées/sorties de la nappe pour chaque secteur géographique du SAGE GTI : en 2010, le secteur Sud-Ouest situé au sud de la faille de Vittel (secteur Vittel-Contrexéville) restait déficitaire de 1,15 Mm³/an, tandis que les autres secteurs étaient légèrement excédentaires.

Des simulations d'évolution tendancielle selon différents scénarios d'évolution des prélèvements seront réalisées à l'aide du modèle actualisé dans les études menées par la CLE du SAGE GTI.

Sommaire

1. Objet de l'étude	9
2. Résultats de la campagne de géochimie isotopique	11
2.1. PROBLEMATIQUE SCIENTIFIQUE	11
2.1.1. Détermination des vitesses d'écoulement	11
2.1.2. Existence d'une drainance entre la nappe des GTI et la nappe des calcaires du Muschelkalk.....	12
2.1.3. Imperméabilité de la faille de Vittel	13
2.2. ECHANTILLONNAGE ET ANALYSE	13
2.3. FACIES GEOCHIMIQUES DES EAUX	16
2.4. L'ORIGINE DES EAUX DE LA NAPPE DES GTI	17
2.4.1. Eaux de recharge.....	17
2.4.2. Influence des saumures triasiques	19
2.4.3. Drainance des calcaires du Muschelkalk vers les GTI.....	21
2.5. ESTIMATION DES VITESSES D'ECOULEMENT	30
2.6. SYNTHESE DES RESULTATS ET PERSPECTIVES	33
2.6.1. L'origine des eaux	33
2.6.2. Essais de quantification de la drainance.....	34
2.6.3. Vitesse d'écoulement de la nappe des GTI	34
2.6.4. Imperméabilité de la faille de Vittel	34
2.6.5. Perspectives futures.....	35
3. Actualisation du modèle de la nappe des grès du Trias inférieur	37
3.1. LE RESERVOIR AQUIFERE DES GRES DU TRIAS INFERIEUR	37
3.2. REGIME NATUREL DE LA NAPPE CAPTIVE DES GRES DU TRIAS INFERIEUR	38
3.3. CONSEQUENCES DE L'EXPLOITATION DE LA NAPPE DES GTI	40
3.4. INTRODUCTION DANS LE MODELE DES NOUVELLES DONNEES ACQUISES SUR LA PERIODE 2000-2010	42
3.5. MODIFICATION DU MODELE CONCEPTUEL ET NOUVEAU CALAGE	43

3.6. EVOLUTION DES SOLDES ENTREE/SORTIE ET DES VOLUMES PRELEVES SUR LA PERIODE 1977-2010	44
4. Conclusion.....	53
5. Bibliographie	55

Liste des figures

Figure 1 : Localisation des points d'échantillonnage sur le territoire du SAGE GTI.	15
Figure 2 : Diagramme de Piper pour les 10 eaux échantillonnées.	16
Figure 3 : Diagramme δD vs. $\delta^{18}O$ pour les 10 eaux étudiées.	18
Figure 4 : Diagramme Log (Cl-/Br-) vs. Log (Cl-) pour les eaux de Norroy, Mirecourt et Valfroicourt.	19
Figure 5 : Diagramme reportant les teneurs en SO_4^{2-} en fonction de celles en Cl- pour les 10 eaux échantillonnées.	20
Figure 6 : Diagramme $^{87}Sr/^{86}Sr$ en fonction de Ca/Sr.	21
Figure 7 : Diagramme $^{87}Sr/^{86}Sr$ en fonction de δ^7Li .	22
Figure 8 : Estimation des contributions de chaque pôle dans le diagramme $^{87}Sr/^{86}Sr$ en fonction de δ^7Li .	24
Figure 9 : Diagramme de Piper pour les eaux du Muschelkalk.	25
Figure 10 : Concentrations mesurées en As en fonction de la date d'analyse pour les eaux des GTI et pour celles des calcaires du Muschelkalk (gîte B).	26
Figure 11 : Carte montrant les pourcentages de drainance calculés.	29
Figure 12 : Cadre géographique de l'étude.	39
Figure 13 : Evolution de 1968 à 2010 du total des prélèvements effectués dans la nappe captive des grès du Trias inférieur et dans la nappe libre du bassin houiller.	41
Figure 14 : Zones de perméabilité définies après calage sur le territoire du SAGE GTI et le département des Vosges (en $10^{-5} m.s^{-1}$).	44
Figure 15 : Evolution des soldes entrées/sorties annuels et des soldes entrées/sorties cumulés pour les périodes 1977-1993 et 1994-2010, par secteurs du SAGE GTI.	46
Figure 16 : Evolution des volumes prélevés annuels et des volumes prélevés cumulés pour les périodes 1977-1993 et 1994-2010, par secteurs du SAGE GTI.	47
Figure 17 : Carte des secteurs de la nappe captive dans le département des Vosges – Localisation des historiques piézométriques (triangles rouges).	48
Figure 18 : Niveaux mesurés et niveaux simulés de 1977 à 2010 – Secteur sud-ouest du SAGE (Vittel-Contrexéville).	49

Figure 19 : Niveaux mesurés et simulés de 1977 à 2010 – Secteur nord du SAGE (Norroy-Mirecourt-Floremont).	50
Figure 20 : Niveaux mesurés et simulés de 1977 à 2010 – Secteur sud-est du SAGE (Valfroicourt-Ville-sur-Ilfon).	51

Liste des tableaux

Tableau 1 : Liste des points d'échantillonnage, avec indication du secteur du SAGE GTI dans lequel ils sont situés, et de leur code couleur dans les graphiques du chapitre 2.	14
Tableau 2 : Activités 14C et âges calculés.	31
Tableau 3 : Vitesses d'écoulement estimées pour les eaux de la nappe des GTI (excepté Relanges et Norroy).	32
Tableau 4 : Répartition des prélèvements effectués dans la nappe captive et dans la nappe libre du bassin houiller en 2010.	40

1. Objet de l'étude

En 1995, confrontées au problème de baisse continue des niveaux piézométriques de certains secteurs de la nappe des grès du Trias inférieur, la Région Lorraine, la DIREN Lorraine et l'Agence de l'eau Rhin-Meuse ont confié au BRGM la réalisation d'un modèle hydrogéologique de la nappe des grès du Trias inférieur. Après plusieurs phases successives de développement et d'amélioration, un modèle opérationnel a vu le jour en 2005.

Le modèle hydrogéologique de la nappe des grès du Trias inférieur (GTI) a été développé par le BRGM avec le logiciel MARTHE, et concerne principalement la nappe sur toute sa partie captive et sur sa partie libre dans le bassin houiller. Dans sa version 2005, il était construit avec des données datant de 2000 pour la nappe dans son ensemble, et de 2004 pour le département des Vosges.

Les résultats des simulations effectuées avec le modèle montraient que, malgré l'arrêt des exhaures minières du bassin houiller entre 2005 et 2010, et en l'absence de mesures correctives supplémentaires, le secteur situé au sud de la faille de Vittel verrait la surexploitation de ses ressources se poursuivre, ce qui se traduirait par une chute importante des niveaux piézométriques dans ce secteur, de l'ordre d'une quinzaine de mètres au maximum en un siècle.

Cette situation particulière est due à l'effet conjugué de deux facteurs défavorables : la présence de la faille de Vittel, jouant le rôle de barrière hydraulique aux écoulements sur une partie de son linéaire, ainsi que la recharge limitée de l'aquifère dans ce secteur, en raison de la faible surface d'affleurements disponibles pour l'infiltration vers la nappe. Ce compartiment de la nappe se comporte ainsi comme un réservoir relativement isolé du reste de la nappe, vidé par pompage à un rythme supérieur à ses faibles possibilités d'alimentation.

En 2011, la Commission Locale de l'Eau du Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux de la nappe des Grès du Trias Inférieur (SAGE GTI) a décidé d'entreprendre l'élaboration des premiers documents constitutifs du SAGE : « Etat initial et Diagnostic » et « Tendances et scénarios ». Pour ce faire, le modèle hydrogéologique de la nappe des GTI doit être utilisé pour quantifier les risques associés aux problèmes de gestion actuels reconnus sur la nappe des GTI dans ce secteur, et servir d'outil d'aide à la décision lors des études en cours et à venir. Préalablement à cette utilisation, les acteurs du SAGE ont jugé nécessaire que le modèle soit actualisé.

Le BRGM a donc procédé en 2012-2013 à cette actualisation du modèle, en prenant en compte les nouvelles données disponibles jusqu'à la fin de l'année 2010, dans le but de valider le modèle sur la période 2000-2010, ou de d'améliorer la version 2005. Pour contribuer à lever les principales incertitudes dans le périmètre du SAGE GTI (rôle de la faille de Vittel, recharge, drainance), l'étude d'actualisation s'est aussi appuyée sur les résultats d'une campagne de géochimie isotopique. Lors des différentes étapes d'actualisation du modèle, une attention particulière a été portée au territoire du SAGE GTI, avec pour objectif principal d'y améliorer la précision des prévisions.

Le présent rapport présente l'ensemble des résultats de l'étude de géochimie isotopique et d'actualisation du modèle de la nappe des GTI.

2. Résultats de la campagne de géochimie isotopique

2.1. PROBLEMATIQUE SCIENTIFIQUE

Le modèle conceptuel sur lequel est construit le modèle de la nappe des GTI dans sa version 2005 comporte des incertitudes, qui ne peuvent être levées sans l'apport de connaissances nouvelles. Dans le périmètre du SAGE des GTI, ces incertitudes portent notamment sur l'existence et la quantification de la drainance entre la nappe des GTI et celle des calcaires du Muschelkalk, et sur l'imperméabilité de la faille de Vittel. La détermination des vitesses d'écoulement depuis les zones de recharge est aussi particulièrement intéressante à confronter aux résultats de la modélisation.

Des réponses claires à ces questions peuvent généralement être apportées par le recours à la géochimie isotopique. Parallèlement à l'actualisation du modèle, on a donc proposé de mener une campagne de géochimie isotopique ciblée sur la nappe captive et sa zone d'alimentation dans périmètre du SAGE des GTI.

2.1.1. Détermination des vitesses d'écoulement

Elles sont estimées à moins de 1 m/an en moyenne, d'après les modélisations hydrogéologiques et les études antérieures. Les isotopes stables de la molécule d'eau $\delta^{18}\text{O}$ et δD permettent une première estimation des temps de résidence des eaux depuis leur recharge. Les compositions isotopiques évoluant notamment en fonction de la température, les eaux de recharge anciennes du dernier épisode glaciaire auront des compositions plus négatives que les eaux météoriques actuelles.

Cependant, les compositions isotopiques actuelles des eaux météoriques ne sont pas identiques en tout point du territoire français. Ceci résulte d'autres effets menant à un fractionnement isotopique, tels que l'altitude, la continentalité, affectant la température de l'eau (ou même son état physique, liquide ou solide) au moment de la saison de recharge. Malheureusement, compte tenu des délais imposés, il n'était pas possible de mesurer les compositions des eaux météoriques en région Lorraine pour préciser les valeurs actuelles des compositions des eaux rechargeant actuellement la nappe des GTI. Une estimation peut être faite à partir des données historiques disponibles sur certaines stations, notamment celle de Thonon-les-Bains et d'Orléans. *

Une fois ce calage effectué, la détermination précise des temps de résidence à partir desquels pourront être déduites des vitesses d'écoulement se fait grâce à la mesure de l'activité du radiocarbone 14. Cet outil de datation reste de loin le plus utilisé dans le cas des eaux « anciennes ». Si sa mise en œuvre est parfois complexe en contexte carbonaté, pouvant amener à des résultats biaisés voire faux, des données chronométriques fiables sont logiquement attendues en contexte gréseux (donc silicaté), même si des corrections sont nécessaires, passant notamment par la mesure des deux isotopes stables du carbone (13 et 12, exprimés à l'image des isotopes de la molécule d'eau en tant que $\delta^{13}\text{C}$).

2.1.2. Existence d'une drainance entre la nappe des GTI et la nappe des calcaires du Muschelkalk

Les mélanges d'eaux issues de différents réservoirs peuvent être quantifiés grâce au traçage isotopique, l'utilisation de n systèmes isotopiques distincts permettant en théorie de résoudre les mélanges impliquant n+1 pôles. Cependant, dans tous les cas, il est préférable de coupler les systèmes isotopiques, dans la mesure où ces traceurs sont beaucoup plus conservatifs que ne le seraient les teneurs ou même les rapports de concentrations. Ici, les processus de mélange entre des eaux influencées respectivement par les lithologies carbonatées et les faciès gréseux peuvent être appréhendés au mieux grâce à l'utilisation des isotopes du strontium et également du lithium. Même si l'utilisation de ce dernier est encore peu répandue, son utilisation se justifie par le fait que grès et carbonates présentent normalement des signatures tout à fait différentes, rendant Li tout à fait adapté au problème à résoudre.

Dans la mesure où la signature des eaux du Muschelkalk intègre non seulement celle des carbonates, mais aussi celle de faciès évaporitiques marins, les isotopes du soufre et de l'oxygène des sulfates peuvent également être mesurés ($\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^{34}\text{S}$ des sulfates). En effet, la composition isotopique actuelle en soufre et en oxygène de l'océan mondial est homogène, mais elle a varié au cours des temps géologiques. Ainsi, les sulfates des évaporites triasiques doivent avoir des signatures isotopiques en oxygène et en soufre bien particulières (le début du Trias est marqué par un $\delta^{34}\text{S}$ très bas, le plus bas de toute l'histoire de la Terre, et un $\delta^{18}\text{O}$ également très bas), et distinctes de celles des eaux des grès.

Enfin, les isotopes du bore permettent de caractériser au mieux les eaux plus salées à la terminaison Ouest de la faille de Vittel. D'une part, on peut s'attendre à des teneurs élevées en bore pour les eaux influencées par les évaporites. D'autre part, les saumures triasiques de l'Est du Bassin de Paris (Champagne), dont l'influence est probablement à l'origine des faciès plus salés à l'Ouest de la Lorraine, sont caractérisées par des signatures isotopiques en bore très particulières.

Ces quatre systèmes isotopiques doivent permettre de quantifier les éventuels processus de drainance en termes de contribution relative de chaque réservoir d'eau.

2.1.3. Imperméabilité de la faille de Vittel

Les isotopes mentionnés ci-dessus peuvent être utilisés pour vérifier l'hypothèse de l'imperméabilité de la faille de Vittel, entre des points judicieusement choisis de part et d'autre de l'accident, dans la mesure où les eaux respectives ont des signatures différentes. De nettes différences entre les temps de résidence de part et d'autre de la faille seraient également un bon indice (peut-être même le plus probant) de l'imperméabilité de la faille.

2.2. ECHANTILLONNAGE ET ANALYSE

Dix échantillons d'eau sélectionnés sur le territoire du SAGE GTI ont fait l'objet d'analyses géochimiques et multi-isotopiques (cf. le tableau 1 et la figure 1). Les paramètres physico-chimiques, évolutifs, (T°, pH, Eh, Conductivité, O₂ dissous) ont été mesurés directement aux sites d'échantillonnage. L'alcalinité a été déterminée en laboratoire dès le retour de mission.

Les eaux ont été filtrées à 0.45 µm et acidifiées pour l'analyse des cations majeurs et en traces, alors que les anions ont été mesurés sur des eaux non acidifiées. Les isotopes de la molécule d'eau ont été mesurés sur des eaux brutes. Pour les analyses isotopiques (soufre et oxygène) des sulfates dissous, les eaux ont été filtrées au laboratoire après stabilisation. Les isotopes du strontium et du lithium ont été mesurés sur des eaux préalablement filtrées et acidifiées de la même façon que précédemment, tandis que les isotopes du bore ont été mesurés, sur des eaux filtrées mais non acidifiées.

Toutes les analyses ont été faites au BRGM selon les méthodologies validées, sauf pour les analyses isotopiques du carbone et la mesure des activités en ¹⁴C, qui ont été sous-traitées à la société Beta Analytic inc., puis validées par le BRGM.

INDICE BSS		COMMUNE	NAPPE CAPTEE	NOM D'USAGE DU CAPTAGE	SECTEUR SAGE
03381X0008	●	BULGNEVILLE	GTI	Forage n°1	Sud-Ouest
03382X0018	●	CONTREXEVILLE	GTI	GV1	Sud-Ouest
03038X0036	■	MIRECOURT	GTI	Forage Ravenel 2b	Nord
03382X0081	●	NORROY	GTI	Source félicie (Norroy 2)	Nord
03387X0040	●	RELANGES	GTI	Piézomètre DCE de Relanges	Affleurements
03382X0109	●	SURIAUVILLE	GTI	Nouveau Forage de Contrexéville	Sud-Ouest
03384X0039	■	VALFROICOURT	GTI	Forage de Valfroicourt	Est
03383X0052	●	VITTEL	GTI	Forage III	Sud-Ouest
03382X0090	●	CONTREXEVILLE (GREAT SOURCE)	MUSCHELKALK	Great Source	Sud-Ouest
03382X0009	●	SURIAUVILLE (LE BON PRE)	MUSCHELKALK	Suriauville 2 (Le Bon Pré)	Sud-Ouest

↳ Code couleur des graphiques du chapitre 2

Tableau 1 : Liste des points d'échantillonnage, avec indication du secteur du SAGE GTI dans lequel ils sont situés, et de leur code couleur dans les graphiques du chapitre 2.

Nota bene : dans le texte et les figures de l'ensemble du chapitre 2, par commodité de lecture, les 8 points d'échantillonnage dans la nappe des GTI sont généralement désignés par le nom de la commune dans laquelle ils sont situés, plus rarement par leur identifiant unique « indice BSS ». Les 2 points d'échantillonnage dans la nappe du Muschelkalk (Gîte B) sont généralement désignés par leur nom d'usage (Great Source et Le Bon Pré). La correspondance entre les différents noms et l'indice BSS se trouve dans le tableau 1 ci-dessus.

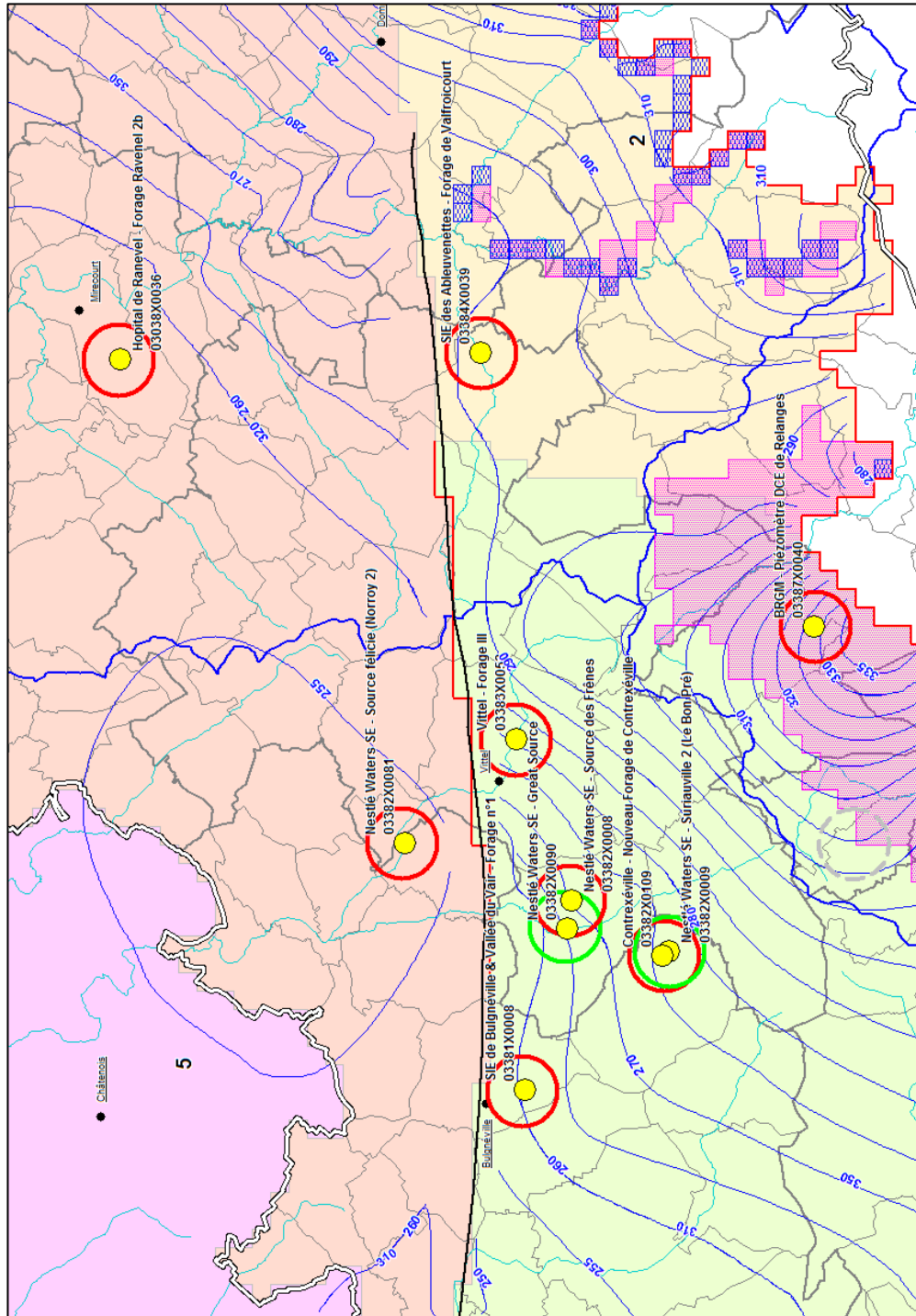


Figure 1 : Localisation des points d'échantillonnage sur le territoire du SAGE GTI (cf. aussi la carte des secteurs sur la Figure 17) : 7 points sont situés dans le secteur Sud-Ouest (secteur en vert) ; 1 point dans le secteur Sud-Est (secteur en jaune) ; 2 points dans le secteur Nord (secteur en saumon). Les cercles rouges signalent les points captant la nappe des GTI, les cercles verts signalent les points captant la nappe du Muschelkalk (gîte B).

2.3. FACIES GEOCHIMIQUES DES EAUX

L'étude des éléments majeurs permet de déterminer les faciès géochimiques des différentes eaux échantillonnées. Ces différents faciès sont classiquement illustrés par les diagrammes de Piper (figure 2). L'eau du piézomètre de Relanges, collectée en contexte de nappe libre, est typiquement une eau bicarbonatée calcique. A l'Est du secteur étudié, les deux eaux de Valfroicourt et Mirecourt présentent des caractéristiques assez comparables, restant toutes deux bicarbonatées, plutôt calcique dans le cas de Valfroicourt, et calco-magnésien pour Mirecourt. L'évolution vers les faciès sulfatés / chlorurés sodiques / potassiques reste modérée, avec des TDS inférieurs à 1 g/l (893 mg/l pour Valfroicourt et 596 mg/l pour Mirecourt). L'eau de Norroy, beaucoup plus minéralisée (TDS de 6907 mg/l) représente, au vu du diagramme de Piper (figure 2), un stade d'évolution géochimique plus avancé, vers le pôle chloruré sodique, plus précisément vers les saumures des grès à *Voltzia* (Millot et al., 2011), représentées en rose sur les diagrammes.

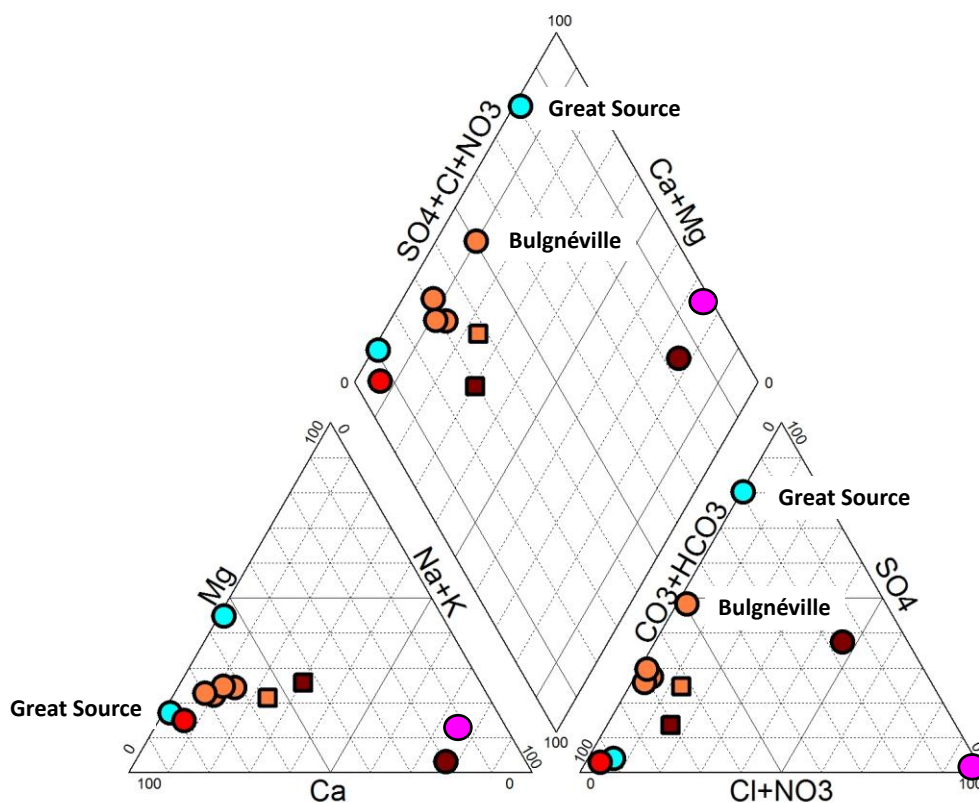


Figure 2 : Diagramme de Piper pour les 10 eaux échantillonnées. Cf. code couleur du tableau 1. Disques roses : saumures triasiques (Millot et al., 2011).

Les deux eaux associées aux calcaires du Muschelkalk ont des faciès bien distincts l'une de l'autre. L'eau thermale de Contrexéville (Great Source) est nettement sulfatée calcique, avec une forte minéralisation (TDS de 7264 mg/l). A l'inverse, l'eau du captage de Le Bon Pré, bi-carbonatée calcique, avec une légère tendance magnésienne (figure 2) présente une minéralisation beaucoup plus faible (TDS de 663 mg/l). Par bien des côtés l'eau de Le Bon Pré rappelle celle du piézomètre de Relanges. Il est également à noter que cette eau est la seule des 10 à être de façon significative polluée en nitrates, qui proviennent dans presque tous les cas des fertilisants agricoles.

La plupart des eaux analysées ont un faciès globalement bicarbonaté – calcique (Relanges, Le Bon Pré) à calco-magnésien, avec parfois une tendance sulfatée (Bulgnéville). Deux eaux, les plus minéralisées, se distinguent par leur géochimie : l'eau de la Great Source est nettement sulfatée, tandis que celle de Norroy a une tendance chlorurée-sodique.

2.4. L'ORIGINE DES EAUX DE LA NAPPE DES GTI

2.4.1. Eaux de recharge

Les isotopes de la molécule d'eau permettent de contraindre de façon assez fiable l'origine des eaux de la nappe des GTI, mais aussi l'époque à laquelle s'est produite la recharge. Si depuis la recharge, l'eau souterraine n'a pas subi de processus d'échanges à haute température ni d'évaporation, alors les compositions isotopiques, couplées dans un diagramme δD vs. $\delta^{18}O$ doivent se situer au voisinage de la droite des précipitations océaniques mondiales définie par Craig (1961). En contexte froid (glaciaire), les eaux sont plus pauvres en isotopes lourds et les compositions plus négatives qu'en période interglaciaire.

Les données reportées sur la figure 3 montrent que les points analytiques suivent une tendance linéaire, et se situent au voisinage de la droite météoritique de Craig. On peut remarquer que la plupart des eaux se groupent autour d'une valeur moyenne de $\delta^{18}O$ de -8.5 ‰ avec un δD proche de -60 ‰. Ceci qui indique que les eaux des GTI sont majoritairement d'origine météoritique. L'eau du piézomètre de Relanges figure dans ce groupe, indiquant que de telles valeurs sont probablement caractéristiques de la recharge actuelle en climat interglaciaire.

On notera également que les deux eaux du Muschelkalk, si elles restent globalement proches de celles de la nappe des GTI, sont légèrement moins appauvries en isotopes lourds. Par contre, les eaux de Norroy et Mirecourt ont des compositions nettement plus appauvries, suggérant une recharge plus ancienne de la nappe, peut-être pendant la dernière glaciation, ce qui serait en bon accord avec les paramètres hydrologiques.

De surcroît, l'eau de Norroy s'éloigne quelque peu de la droite de Craig (figure 3), marquant ainsi l'influence (minoritaire) des saumures triasiques. Ces dernières ont été mesurées à -2.11 ‰ pour $\delta^{18}\text{O}$ et -17.8 ‰ pour δD (Rebeix et al., 2011). L'intersection de la droite joignant les points des saumures et celle de l'eau de Norroy (en rose sur la figure 3) avec la droite de Craig indique donne un $\delta^{18}\text{O}$ de -10.7 ‰ et un δD de -75.7 ‰. Ceci suggère que les compositions isotopiques en oxygène et hydrogène mesurées sur l'eau de Norroy sont supérieures à ce qu'elles devraient être si elles n'enregistraient que l'effet des alternances climatiques.

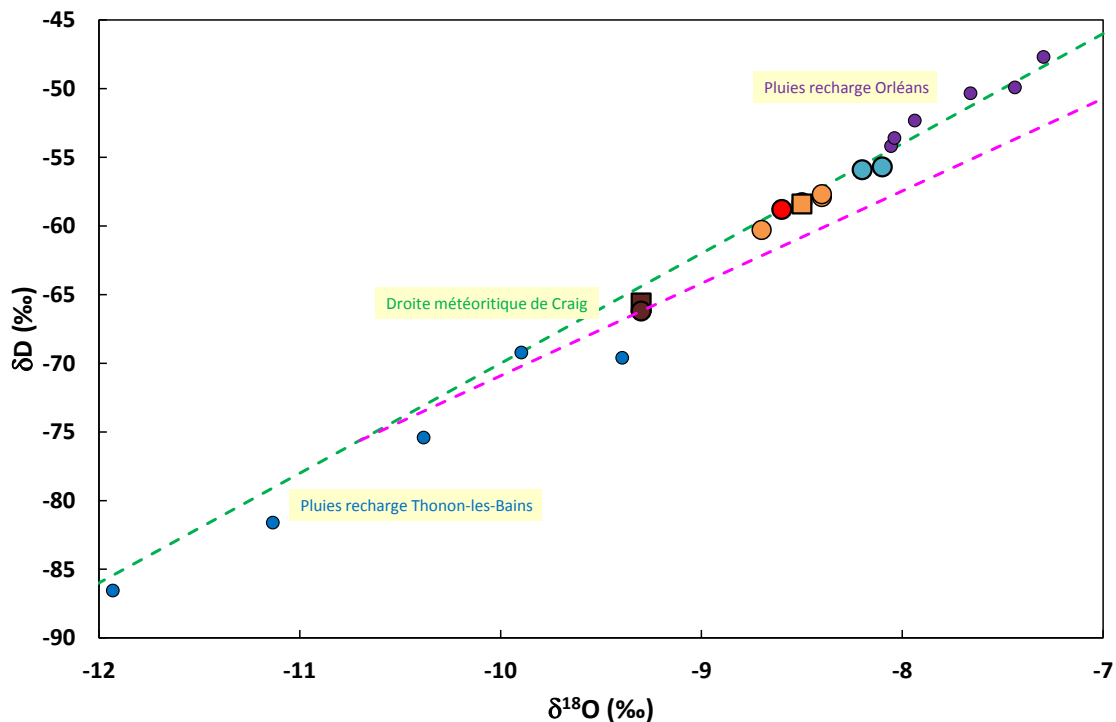


Figure 3 : Diagramme δD vs. $\delta^{18}\text{O}$ pour les 10 eaux étudiées. Cf. code couleur du tableau 1. La droite rose figure l'influence des saumures des grès. Les données obtenues sur les pluies participant à la recharge des nappes aux sites d'Orléans (violet) et de Thonon-les-Bains (bleu foncé), sur des périodes respectives de 6 et 5 ans, ont été également reportées (aucune donnée n'est disponible pour le NE de la France).

Les isotopes de la molécule d'eau (O, H) montrent que l'origine des eaux est principalement météorique. Dans la plupart des cas, la recharge a lieu sous un climat tempéré, et est postérieure à la dernière glaciation. Seules les eaux de Norroy et Mirecourt indiquent une recharge sous un climat plus froid, probablement lors de la dernière glaciation.

2.4.2. Influence des saumures triasiques

L'influence des saumures peut être mise en évidence pour l'eau de Norroy, mais aussi celles de Mirecourt et Valfroicourt, ainsi que l'indique le diagramme couplant les données des anions chlorure et bromure (Matray et al., 1989) (figure 4). Le rapport moyen Cl/Sr marin est estimé à 289. Dans le diagramme portant ce rapport en fonction de la concentration en chlorure (en échelle logarithmique), on constate que ces trois eaux s'éloignent de la droite de dilution de l'eau de mer.

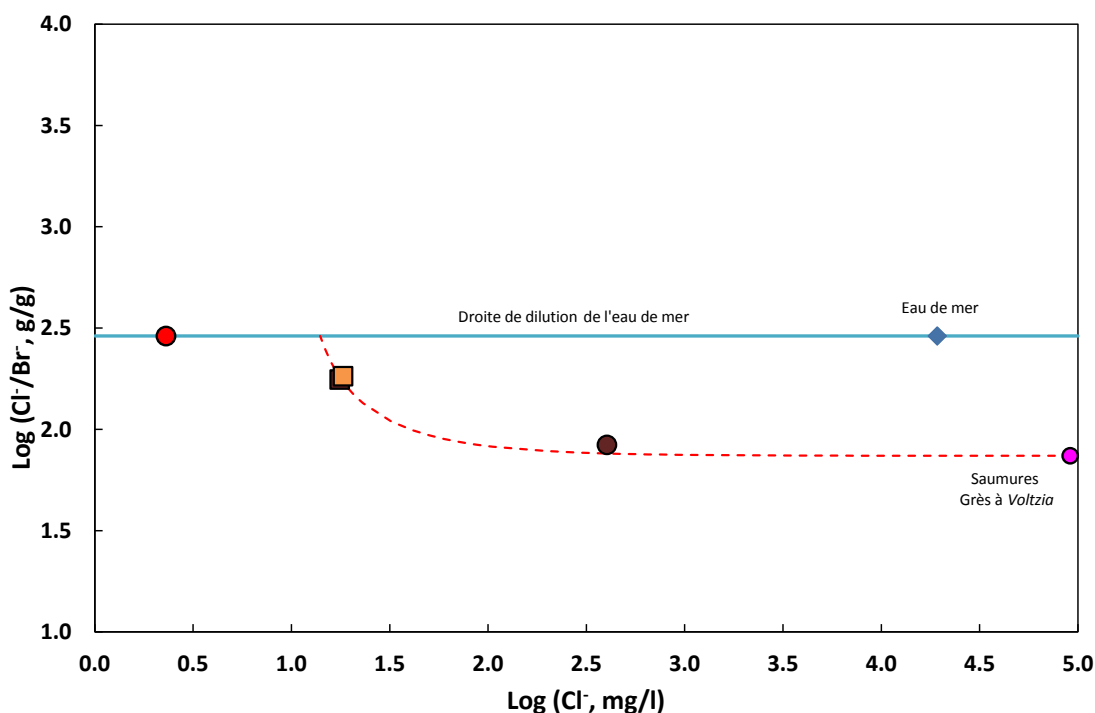


Figure 4 : Diagramme $\text{Log}(\text{Cl}^-/\text{Br}^-)$ vs. $\text{Log}(\text{Cl}^-)$ pour les eaux de Norroy, Mirecourt et Valfroicourt. La courbe théorique de mélange masse à masse passant par les eaux de Norroy, Mirecourt, Valfroicourt a été reportée en rouge. Cf. code couleur du tableau 1. Les données des saumures triasiques sont tirées de Rebeix et al. (2011). Le point de Relanges a été reporté en prenant la teneur mesurée en Cl^- et le rapport Cl^-/Br^- de l'eau de mer.

La courbe rouge sur la figure 4 représente un mélange simple masse à masse entre cette saumure et une eau beaucoup plus diluée ayant un rapport Cl/Br identique à celui de l'eau de mer (en considérant que les aérosols marins sont la seule source de Cl et Br dans les eaux météoriques et les eaux de recharge des nappes). La concurrence avec la droite de dilution de l'eau de mer s'établit pour une concentration en ion chlorure de 14 mg/l, ce qui est en bon accord avec les données, aucune des eaux restantes de la nappe des GTI n'ayant des teneurs en chlorures supérieures à 10 mg/l.

Ainsi, dans cette hypothèse, Norroy apparaît comme l'eau la plus contaminée par des saumures sans doute identiques à celles situées plus à l'Ouest du Bassin de Paris.

Par ailleurs, la figure 5 montre que la forte minéralisation de certaines eaux des calcaires du Muschelkalk provient bien de la dissolution de roches/minéraux évaporitiques (gypse, anhydrite) à partir d'une eau météorique, et peut être nettement différenciée de la signature propre à la contamination par les saumures triasiques.

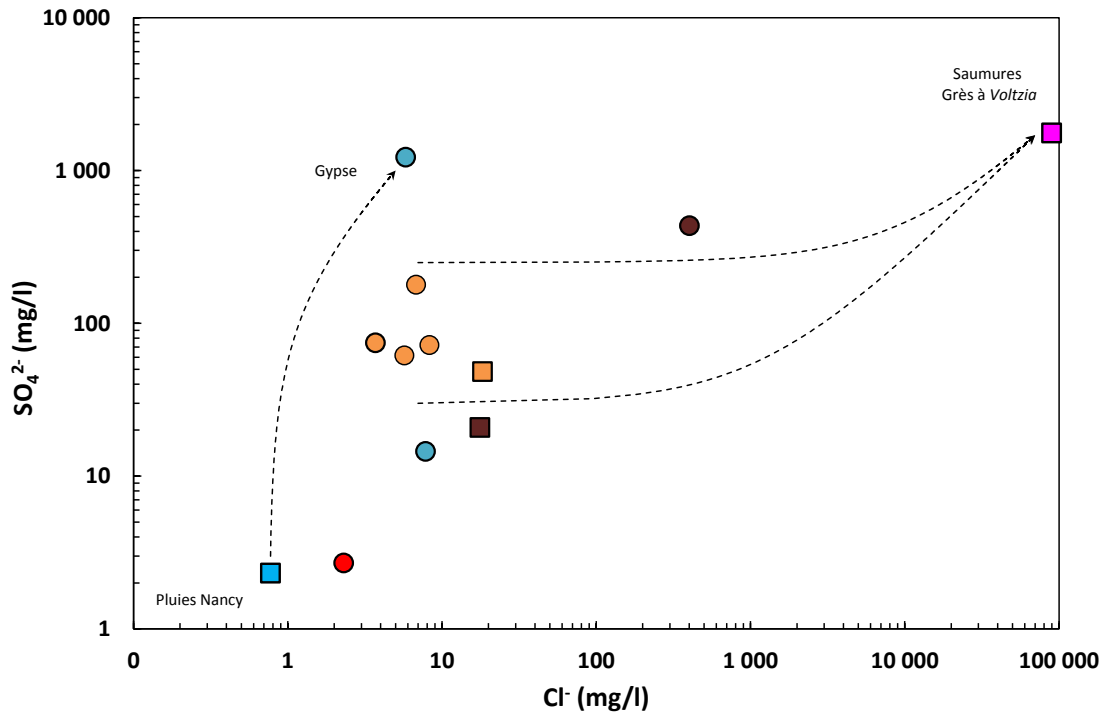


Figure 5 : Diagramme reportant les teneurs en SO_4^{2-} en fonction de celles en Cl^- pour les 10 eaux échantillonnées. Cf. code couleur du tableau 1. Les données sur les saumures des grès à Voltzia sont de Millot et al. (2011) et celles des eaux de pluie de la région de Nancy de Brenot et al. (2007).

L'eau de Le Bon Pré pourrait de prime abord être considérée comme un stade moins minéralisée, mais obéissant au même processus que la Great Source de Contrexéville. Or, ceci est contredit par la figure 5 : il ne semble pas que Le Bon Pré s'inscrive dans le même type d'évolution. Pour autant, il ne semble pas que cette signature soit due (au moins de façon univoque) à la contamination par des eaux de surface et/ou sub-surface mise en évidence par la présence de nitrates.

La minéralisation de l'eau de Norroy s'explique par une contamination par des saumures du même type que celles du centre du Bassin de Paris. Cet effet est visible également de façon plus limitée dans les eaux de Mirecourt et Valfroicourt. La minéralisation de l'eau de la Great Source a une origine différente, et provient de la dissolution de faciès évaporitiques (sulfates) présents dans les calcaires du Muschelkalk.

2.4.3. Drainance des calcaires du Muschelkalk vers les GTI

a) Les systèmes isotopiques Sr-Li

Les caractéristiques géochimiques des certaines eaux des GTI ne peuvent cependant pas s'expliquer uniquement comme résultant d'une contamination par les saumures triasiques d'eaux d'origine météorique ayant acquis, au moins en partie, lors de leur parcours la signature de leur aquifère (GTI), typique de celle de la croûte supérieure sédimentaire. Le diagramme de mélange portant les rapports isotopiques du strontium en fonction du rapport des teneurs Sr/Ca (figure 6) montre nettement l'existence pour 4 d'entre elles (Suriauville, Bulgnéville, Frênes, Vittel) d'une tendance linéaire vers un troisième pôle caractérisé par des rapports isotopiques en Sr plus bas que ceux des deux autres pôles déjà définis.

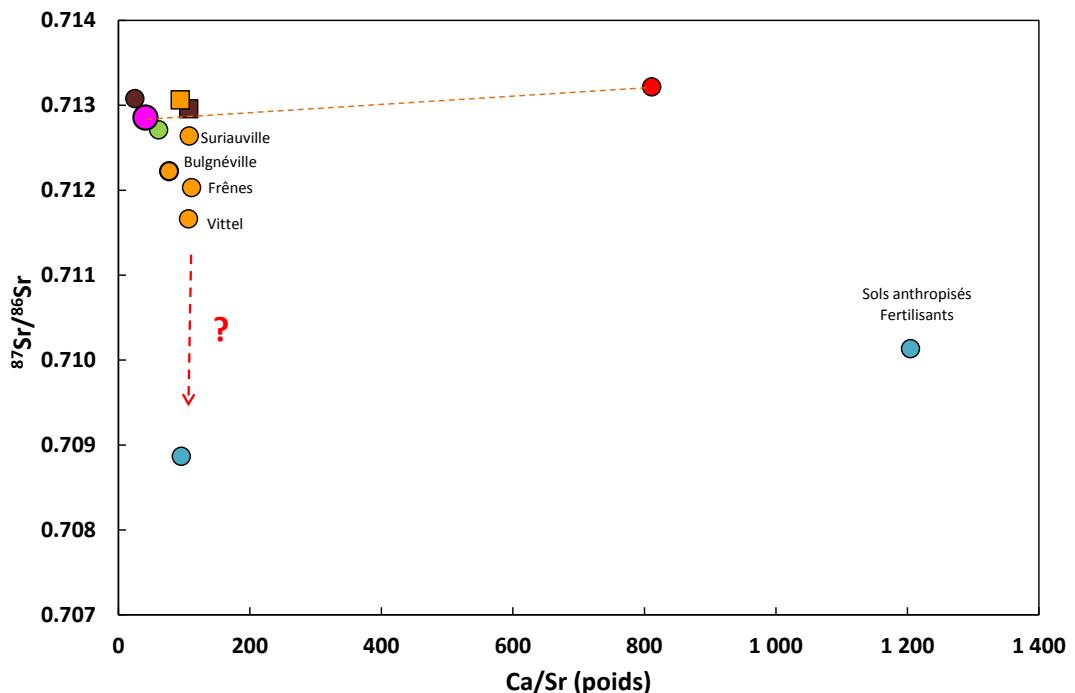


Figure 6 : Diagramme $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ en fonction de Ca/Sr . Cf. code couleur du tableau 1. Le point vert correspond à une eau des GTI prélevée non loin de celle de Mirecourt (Poussay), et analysée dans le cadre d'un projet antérieur.

La figure 6 montre que ce pôle de mélange pourrait être une eau issue des calcaires du Muschelkalk de type « Great Source », ce que contredit néanmoins le diagramme de mélange (figure 7) portant les compositions isotopiques de Sr en fonction de celles de Li (reportées sous forme d'unité δ). Sur ce diagramme, on retrouve la tendance d'évolution (quasi-linéaire, ici aussi, et encore mieux définie que sur la figure 6) vers des rapports isotopiques plus bas en Sr et plus légers en Li. En dépit des apparences, cette tendance ne peut résulter d'une influence d'eaux contaminées par des processus anthropiques tels que ceux qui influencent la signature de l'eau de Le Bon Pré : outre la figure 6, les isotopes du soufre et de l'oxygène des sulfates, notamment, ne supportent pas cette hypothèse.

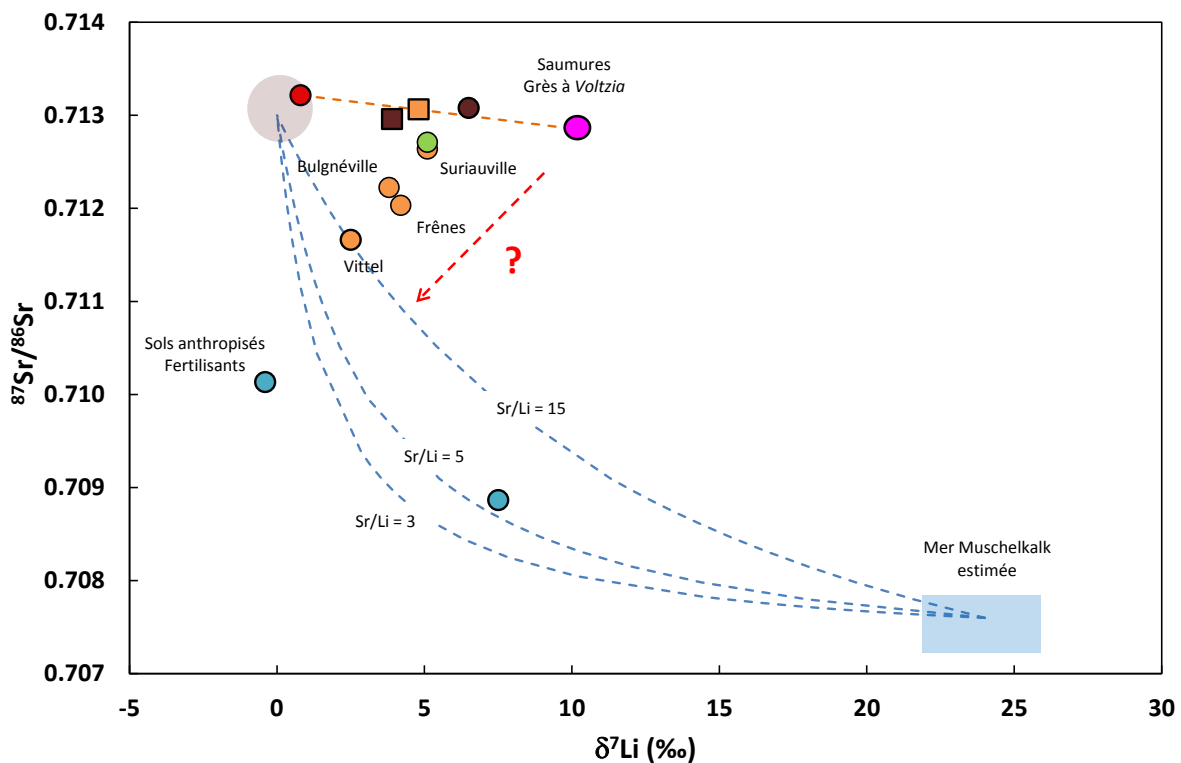


Figure 7 : Diagramme $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ en fonction de $\delta^7\text{Li}$. Cf. code couleur du tableau 1. Même légende que pour la figure 6. Le rapport Sr/Li de 15 correspond à la valeur moyenne de la croûte continentale (Wedepohl, 1995 ; Taylor et Mc Lennan, 1995) ; le rapport Sr/Li = 3 correspond à celui de l'eau de Relanges. La concentration et la composition isotopique en Sr des saumures sont tirées de Rebeix et al. (2011), celles en Li de Millot et al. (2011). Les caractéristiques isotopiques (Sr, Li) de l'eau de mer au Muschelkalk sont tirées de Koepnick et al. (1990), Misra et Froelich (2012), et les teneurs actuelles de l'océan mondial en ces deux éléments ont été utilisées.

En dépit du fait qu'aucune des deux eaux du Muschelkalk analysées dans cette étude ne peut être considérée comme le troisième pôle expliquant la signature des eaux des GTI, ce dernier correspond sans doute à ce type d'eau. Trois courbes de mélange ont été calculées (figure 7) entre un pôle représentant l'eau de mer au Muschelkalk et un autre correspondant à la croûte continentale moyenne (d'ailleurs très proche des valeurs de l'eau de Relanges). Ces deux pôles correspondent aux deux lithologies avec lesquelles les eaux du Muschelkalk sont en contact : les calcaires marins et les passées argileuses. La meilleure corrélation (pour l'eau de la Great Source) est obtenue avec $Sr/Li = 5$, ce qui est plus bas que la valeur moyenne de la croûte supérieure, mais finalement en bon accord avec le caractère argileux du pôle, les phyllosilicates étant souvent relativement plus riches en alcalins que la moyenne de la croûte. La mise en jeu de lithologies argileuses est du reste en bon accord avec les compositions isotopiques du bore très négatives mesurées sur les deux eaux du Muschelkalk, et particulièrement celle de la Great Source. Ainsi, il semble bien qu'il y ait des drainances entre les deux nappes, particulièrement pour le forage de Vittel, mais l'eau contaminante issue des calcaires du Muschelkalk ne correspondrait ni à celle de la Great Source, ni à celle de Le Bon Pré (contaminée ou non).

Des essais de quantification des trois pôles ont été effectués, en utilisant les isotopes de Sr et Li. Deux calculs ont été effectués. En dépit du fait que ni l'une ni l'autre de ces eaux ne peut représenter le pôle de mélange, le premier calcul a été fait en prenant comme pôle de mélange l'eau de la Great Source, et le second avec l'eau de Le Bon Pré, en considérant que les teneurs n'ont pas été altérées par l'empreinte « anthropique ». La finalité de ces calculs était de tester l'impact que peut avoir la minéralisation du pôle « Muschelkalk » (donc en d'autres termes les teneurs en ces deux éléments) sur l'importance des contributions calculées. Pour l'eau de Le Bon Pré, il est en outre nécessaire de contraindre a priori les paramètres isotopiques. On a choisi $^{87}Sr/^{86}Sr = 0.709$ et $\delta^7Li = 5$, qui semblent être des valeurs raisonnables (figure 7). Enfin, dans la mesure où il s'agit de déterminer les contributions dans les GTI, on a choisi comme pôle de mélange typique du composant « crustal » l'eau de Relanges.

Les diagrammes de mélange (figure 8) montrent que l'impact des eaux des calcaires du Muschelkalk serait très faible pour ne pas dire nul si ces dites eaux avaient les concentrations de celle de la Great Source (diagramme du haut), ce qui est peut-être problématique (au moins intuitivement), compte tenu de l'existence d'une tendance de mélange claire et bien définie (figure 6, figure 7). Pour ce qui concerne le diagramme du bas, qui restitue les résultats des calculs effectués avec les teneurs de l'eau de Le Bon Pré, les contributions des eaux du Muschelkalk sont beaucoup plus élevées, atteignant 25 % pour l'eau de Vittel.

Les mêmes calculs de mélange effectués en prenant cette fois les caractéristiques isotopiques de la mer au Muschelkalk (figure 7) aboutissent pratiquement aux mêmes pourcentages de contribution. Ainsi, les deux paramètres les plus importants (et pratiquement les seuls) semblent être les teneurs en ces deux éléments pour ce pôle. En conséquence, pour connaître l'importance des contributions des eaux des calcaires du Muschelkalk, il faut et il suffit pratiquement de savoir si l'eau des calcaires du Muschelkalk impactant celles des GTI est fortement minéralisée ou non.

Indépendamment, ces calculs permettent aussi de déterminer la contribution relative du pôle « saumure ». Cette dernière est quasiment invariable quel que soit le type de calcul, et donne une bonne contrainte du taux de contamination pour chaque eau des GTI (figure 8).

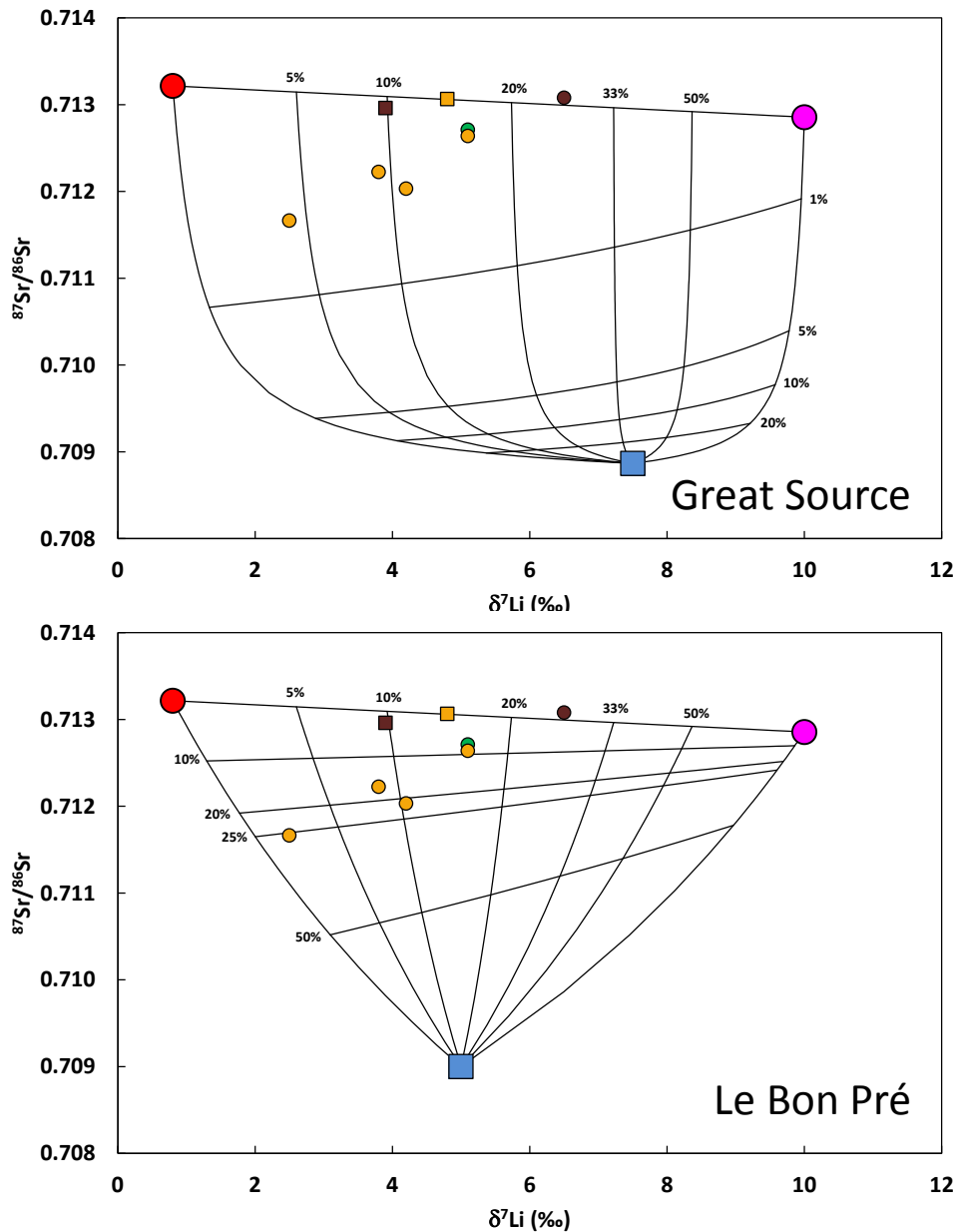


Figure 8 : Estimation des contributions de chaque pôle dans le diagramme $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ en fonction de $\delta^7\text{Li}$ en prenant les eaux du Muschelkalk mesurées comme pôle de mélange (carré bleu). L'eau de référence de la nappe du Muschelkalk (teneurs en Sr et Li avec lesquelles ont été faits les calculs) est notée sur chaque diagramme. Cf. code couleur du tableau 1. Même légende que pour l'illustration 5. Des explications sont données dans le texte.

Une base de données qualité très complète est disponible pour les eaux des calcaires du Muschelkalk (ainsi d'ailleurs que pour la nappe des GTI). Les données disponibles reportées dans le diagramme de Piper (figure 9) montrent que les eaux des calcaires du Muschelkalk sont très diverses d'un point de vue géochimique. Par ailleurs, il semble que le faciès de l'eau de Le Bon Pré ne dépend pas de la contamination anthropique (elle semble d'ailleurs être l'une des seules contaminée !) : certaines eaux ne contenant pas de nitrates ont des faciès géochimiques très proches.

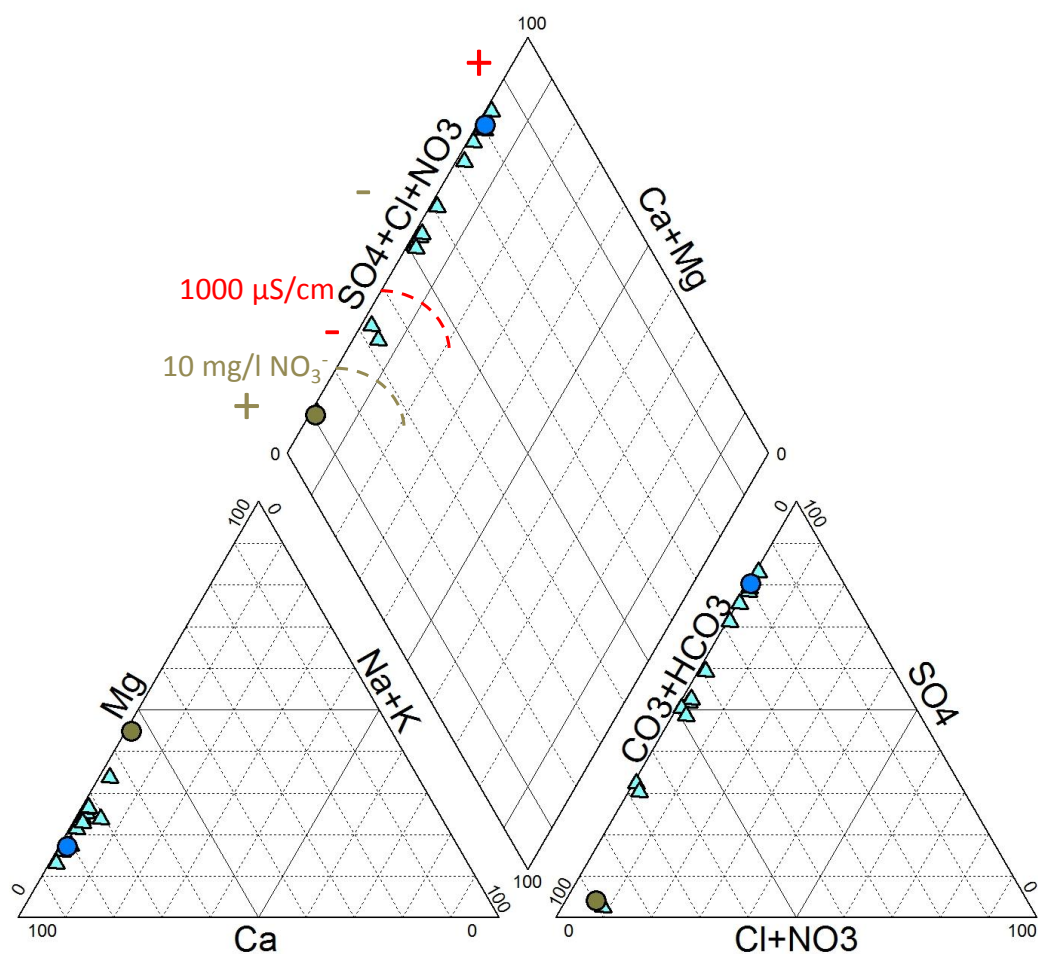


Figure 9 : Diagramme de Piper pour les eaux du Muschelkalk (moyenne des analyses disponibles pour chaque point de la base de données). Triangles bleus : eaux de la base de données qualité ; disque bleu foncé : eau de la Great Source (cette étude) ; disque brun : eau de Le Bon Pré. Deux courbes d'isovaleurs (concentrations en nitrates, conductivité) ont été également reportées.

Les isotopes de Sr et Li mettent en évidence des processus de drainances des eaux de la nappe du Muschelkalk vers celle des GTI. Le pôle contaminant issu du Muschelkalk est, d'un point de vue géochimique et isotopique, bien contraint et probablement unique. Cependant, il ne correspond à aucune des deux eaux du Muschelkalk analysées dans cette étude, les eaux du Muschelkalk étant de toute façon très diverses d'un point de vue géochimique, comme le montrent les analyses disponibles dans la base de données qualité des eaux de la région.

b) Quantification de la drainage avec les teneurs en As

Il est également possible, afin de quantifier la contribution des eaux issues des calcaires du Muschelkalk, de se baser sur les teneurs en As. Les teneurs mesurées dans les eaux des GTI constituent une préoccupation importante, alors qu'il est quasiment absent dans les eaux du Muschelkalk. D'autre part, les mesures en As dans les eaux des GTI sont très nombreuses dans la base de données qualité des eaux souterraines du secteur étudié et des environs proches. La différence entre les teneurs dans les deux types d'eaux est visible sur la figure 10.

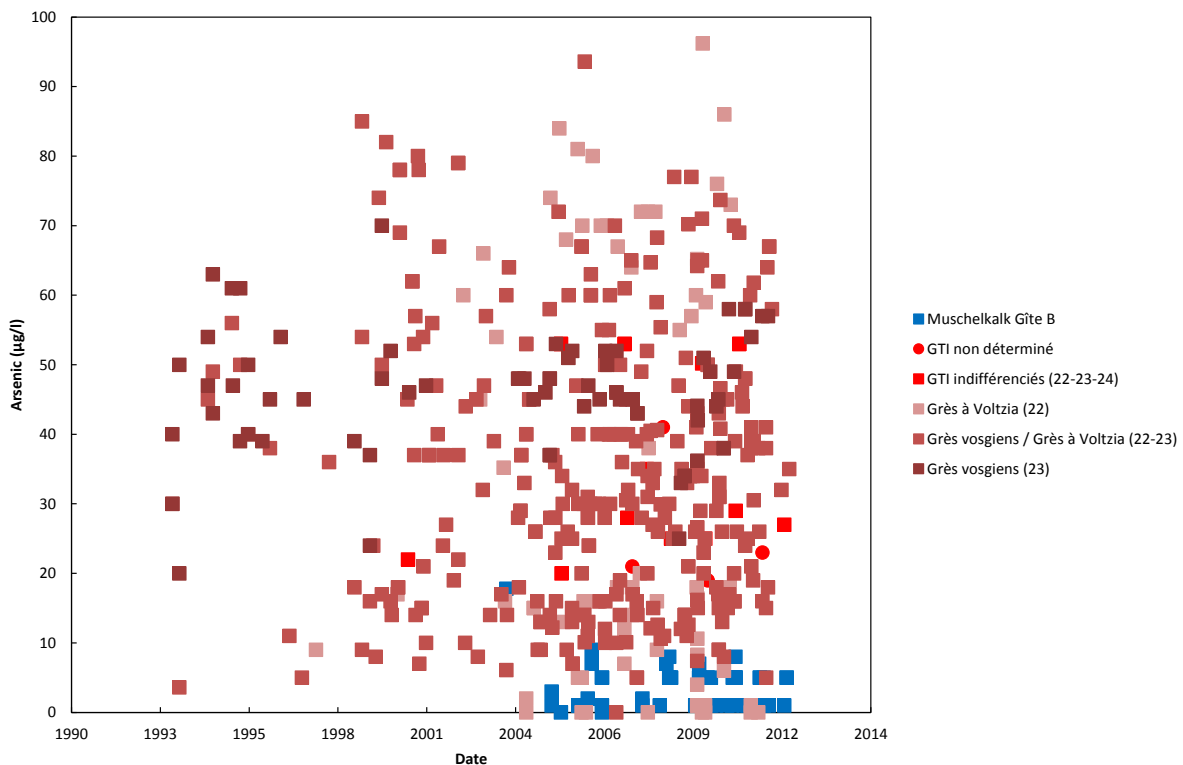


Figure 10 : Concentrations mesurées en As en fonction de la date d'analyse pour les eaux des GTI et pour celles des calcaires du Muschelkalk (gîte B).

Les données des éléments en traces mettent en lumière la présence de quantités importantes d'As (de 23 à 40 µg/l) dans la partie captive de la nappe des GTI, ainsi qu'à un moindre degré dans l'eau de Relanges, située dans la partie libre de la nappe (15 µg/l). Par ailleurs, donc, 473 données de concentrations en As sont disponibles dans la base de données qualité. La région de Mirecourt – Vittel est celle où les teneurs en As dans les eaux des grès est maximale (Rapport ANTEA, 2001), avec des teneurs approchant parfois 100 mg/l, entre Crainvilliers et Monthureux-sur-Saône, au Sud-Ouest, de la zone d'étude. A l'inverse, des minima locaux de concentrations (< 20 mg/l) existent vers Lignéville (dans la partie Sud, à l'intérieur de la zone d'étude), et aux alentours à Ville-sur-Illon (SE) et Charmes (NE). La moyenne de toutes ces données s'établit à 38 µg/l, la médiane à 37 µg/l et le mode à 40 µg/l. Cependant, la distribution n'est pas unimodale, et un pic de fréquence apparaît aussi autour de 15-20 µg/l.

D'une façon générale, les points situés au Nord de la faille de Vittel présentent des teneurs assez stables : la moyenne sur 8 eaux, incluant les moyennes sur 7 points de la base de données qualité dont Norroy et Valfroicourt (situé au Sud de la faille, mais présentant l'évidence d'absence de drainance), ainsi que l'analyse unique du point de Mirecourt, s'établit à 40 mg/l. Cette valeur est celle du mode principal et peut au moins à titre d'hypothèse être considérée comme la valeur moyenne du fonds géochimique pour la zone d'étude. Les moyennes des points de la base sont reportées ci-dessous :

03045X0020/F (Poussay)	41 ± 4 µg/l
03045X0062/F3	52 ± 7 µg/l
03038X0019/F2	38 ± 5 µg/l
03038X0037/F	48 ± 2 µg/l
03383X0094	31 ± 8 µg/l
03382X0081/F2 (Norroy)	37 ± 6 µg/l
03384X0039/F (Valfroicourt)	37 ± 2 µg/l
03038X0036/F2 (Mirecourt)	36 µg/l

Au Sud de la faille de Vittel, là où les drainances peuvent se manifester, 10 points d'analyse sont disponibles. Les teneurs mesurées sont plus dispersées, de 18 à 42 µg/l. Il est très important de noter que les valeurs les plus hautes au Sud de la faille coïncident parfaitement avec la valeur moyenne des points non affectés par les drainances. Dans cette hypothèse, la faille de Vittel jouerait d'un point de vue géométrique un rôle majeur pour l'existence et l'importance des processus de drainance. Les moyennes des points au Sud de la faille sont :

03383X0042/VII	18 ± 3 µg/l
03382X0069/F2	29 ± 2 µg/l
03383X0051	33 ± 18 µg/l
03383X0052/III (Vittel)	27 ± 3 µg/l
03382X0018/F2	27 ± 2 µg/l
03382X0008/3 (Frênes)	25 ± 2 µg/l
03382X0043/F2	34 ± 2 µg/l
03382X0109/F4 (Suriauville)	37 ± 2 µg/l
03381X0008/F (Bulgnéville)	32 ± 3 µg/l
03381X0062/F2	41 ± 21 µg/l

Ceci posé, afin maintenant de calculer les taux de drainance, il faut encore déterminer les teneurs en As des eaux des calcaires du Muschelkalk (Gîte B) qui, pour faibles qu'elles soient, ne sont pas toujours nulles. C'est le cas de toutes les teneurs (13 eaux) reportées dans la base de données, à l'exception du point 03383X0202/SCE (17.8 mg/l). Les mesures effectuées sur les eaux de la phase pilote, avec d'autres méthodes analytiques plus précises, donnent des teneurs très faibles, mais sur un petit nombre de points (2). Ainsi trois moyennes différentes ont été calculées :

Moyenne (13 points)	4 ± 3 µg/l
Moyenne (12 points, 03383X0202/SCE exclu)	3 ± 3 µg/l
Moyenne (2 points, phase pilote)	0.44 ± 0.23 µg/l

Différents calculs de drainance ont été effectués, en prenant chacune des trois moyennes du Muschelkalk avec les écarts-types associés, et en tenant aussi compte à chaque fois des écarts-types sur les teneurs moyennes en As des eaux des GTI au Sud de la faille. L'incertitude sur la valeur du fond géochimique d'As dans les eaux des GTI est très difficile à déterminer, et n'a pas été prise en compte. Les résultats ci-dessous donnent les pourcentages des eaux du Muschelkalk :

03383X0042/VII	59 ± 8 %
03382X0069/F2	29 ± 5 %
03383X0051	29 ± 29 %
03383X0052/III (Vittel)	35 ± 7 %
03382X0018/F2	35 ± 5 %
03382X0008/3 (Frênes)	40 ± 5 %
03382X0043/F2	16 ± 5 %
03382X0109/F4 (Suriauville)	1 ± 1 %
03381X0008/F (Bulgnéville)	21 ± 7 %
03381X0062/F2	18 ± 26 %

Deux points portent une incertitude très importante. Dans les deux cas, celle-ci est due à l'incertitude importante sur les concentrations des eaux des GTI (l'effet de l'incertitude sur le pôle Muschelkalk est très secondaire). Les pourcentages de drainance sont reportés sur la carte ci-dessous (figure 11).

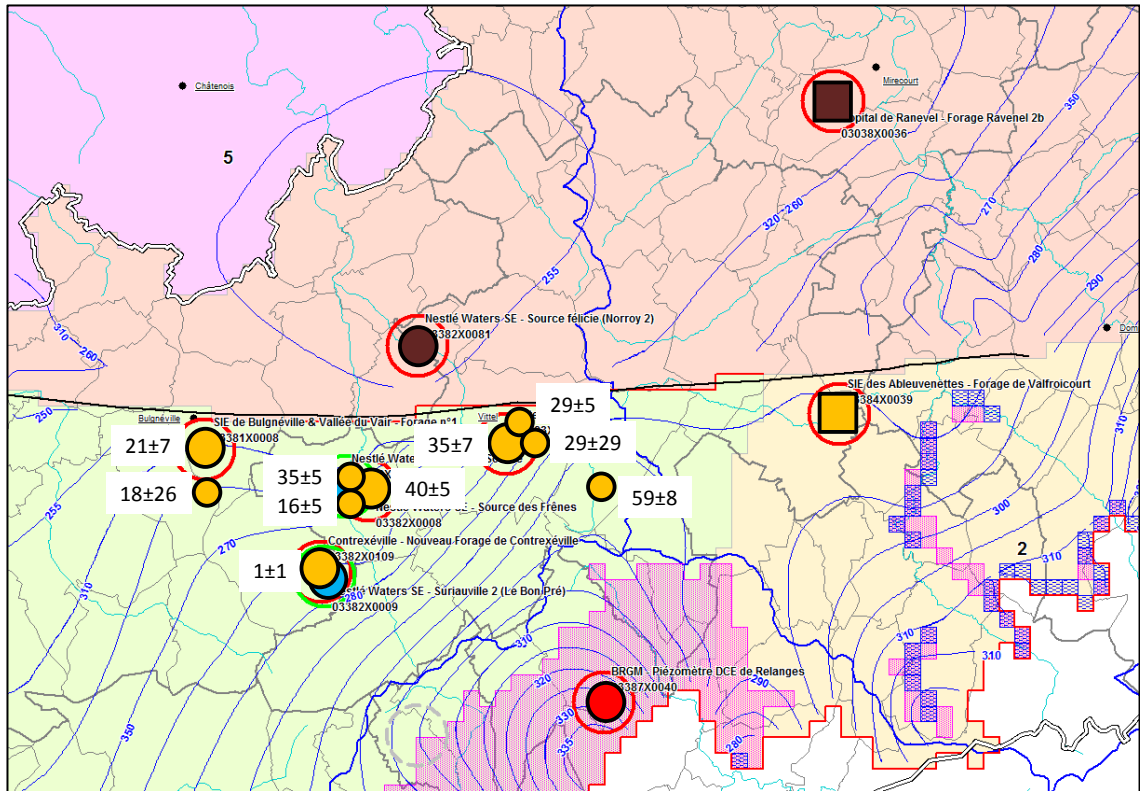


Figure 11 : Carte montrant les pourcentages de drainance calculés pour les points de cette étude et ceux de la base de données (petits disques orange) situés au Sud de la faille de Vitte. Cf. code couleur du tableau 1.

Les taux de drainances les plus élevés se retrouvent près de la faille de Vittel, le maximum étant calculé pour l'eau de Valleroy-le-Sec (BSS 03383X0042/VII), qui est celle située la plus à l'Est du groupe d'eaux situées juste au Sud de la faille (figure 11). Il est intéressant de noter qu'une eau du gîte B du Muschelkalk, géographiquement très proche de Valleroy-le-Sec figure dans la base de données : il s'agit du point 03383X0129/F à Haréville. Cette eau présente des caractéristiques chimiques intermédiaires entre les deux eaux du Muschelkalk analysées dans cette étude. En tous cas, cette eau est beaucoup moins minéralisée que la Great Source, ce qui pourrait conforter l'hypothèse de drainances importantes. Les concentrations moyennes des éléments majeurs de l'eau d'Haréville sont reportées ci-dessous :

Ca :	204±12 mg/l (13 mesures)
Mg :	46±1 mg/l (13 mesures)
Na :	4.3±0.2 mg/l (22 mesures)
K :	1.6±0.2 mg/l (13 mesures)
HCO ₃ :	405±38 mg/l (25 mesures)
SO ₄ :	337±27 (25 mesures)
Cl :	5.2±1 mg/l (25 mesures)
Br :	0.08±0.04 mg/l (2 mesures)
F :	0.17±0.04 mg/l (14 mesures)

De plus, cette eau ne contient pas significativement de nitrates (25 mesures). Par contre, on y retrouverait un peu d'As (4 mesures), ce point restant peut-être à confirmer.

Les eaux de la nappe des GTI contiennent des quantités significatives d'As, alors que celles de la nappe du Muschelkalk en sont exemptes. En se basant sur les teneurs en As, des calculs d'estimation des taux de drainances ont été effectués. Ces derniers peuvent être importants près de la faille de Vittel, et même dépasser 50 %. La valeur maximale se situe au niveau de Valleroy-le-sec (Indice BSS 03383X0042). Il est possible que l'eau du Muschelkalk de Haréville (Indice BSS 03383X0129) puisse correspondre au pôle recherché. Cette hypothèse et ces calculs sont préliminaires et doivent être étayés (ou non) par des analyses complémentaires.

2.5. ESTIMATION DES VITESSES D'ÉCOULEMENT

Les compositions isotopiques du carbone, ainsi que les activités en ¹⁴C et les âges calculés sont reportées dans le tableau 2. Les âges conventionnels déduits des activités en ¹⁴C ne sont généralement pas utilisables tels quels et nécessitent des corrections. Plusieurs modèles existent en fonction du contexte géologique et géochimique. Les quatre modèles de correction choisis (Pearson and Handshaw, 1970 ; Fontes and Garnier, 1979 ; Evans et al., 1979 ; Eichinger, 1983) sont ceux qui apparaissent le mieux adaptés à l'aquifère des GTI (Celle-Jeanton et al., 2009).

Echantillon	Act. ^{14}C pCM	Age ^{14}C BP conv.	Pearson	Fontes / Garnier	Evans	Eichinger
Mirecourt	10.7	17950	15299	16649	15165	14367
Bulgnéville	24.7	11240	8942	10419	8811	7824
Suriauville	33.3	8830	6580	8372	6518	5002
Frênes	37.3	7920	5642	7402	5573	4106
Norroy	1.1	36490	31630	31678	31266	32249
Great Source	56.5	4580	431	1434	358	0
Le Bon Pré	83.1	1490	0	0	0	0
Vittel	38.8	7600	5369	7176	5307	3769
Valfroicourt	34.3	8590	6802	8781	6753	4937
Relanges	71.1	2740	1949	4551	1940	0

Tableau 2 : Activités ^{14}C et âges calculés.

Les activités mesurées en ^{14}C les plus faibles (ce qui correspond aux âges les plus anciens) se corrélient avec les compositions isotopiques de l'oxygène les plus négatives (figure 3), témoins d'une recharge en climat plus froid, au cours du dernier épisode glaciaire. C'est notamment le cas des eaux de Mirecourt et Norroy. Les âges corrigés calculés (tableau 2), représentant les temps de résidence des eaux dans l'aquifère, se situent autour de 15 000 ans pour Mirecourt, et 32 000 ans pour Norroy. Il est à noter en ce qui concerne Mirecourt que la datation ^{14}C des eaux, voisines, de Poussay, effectuée dans le cadre d'un projet antérieur (voir plus haut), donne des âges beaucoup plus anciens : les données corrigées à partir des 4 modèles retenus (tableau 2) se groupent entre 26514 et 27722 ans.

A l'inverse, les eaux de la nappe des GTI au Sud de la faille de Vittel ont des compositions isotopiques de l'oxygène plus lourdes, correspondant à des activités ^{14}C plus élevées. Les âges corrigés sont holocène, ce qui dénote une recharge postérieure à la fin du dernier épisode glaciaire. L'eau du piézomètre de Relanges, en contexte de nappe libre, fournit des temps de résidence allant de quelques milliers d'années jusqu'à l'actuel, c'est-à-dire un temps de résidence nul (tableau 2). Enfin, les deux eaux des calcaires du Muschelkalk sont actuelles ou sub-actuelles, notamment si on suit le modèle de Pearson et Handshaw (1970), qui est censé être adapté aux aquifères carbonatés. Ces conclusions rejoignent celle de Blavoux et Olive (1981), qui ont travaillé sur un nombre important d'eaux souterraines de la nappe des GTI, dont quelques-unes se situent dans ou à côté de la zone d'étude.

A partir des âges ^{14}C corrigés, il est possible d'estimer les vitesses d'écoulement de la nappe des GTI, en fonction de la distance à la zone de recharge. Encore faut-il au préalable, lorsque c'est nécessaire, corriger les effets de la drainances des eaux des calcaires du Muschelkalk et de la contamination par les saumures triasiques du Centre du Bassin de Paris. Les eaux prélevées sont en effet des mélanges entre ces trois pôles. Les diagrammes Li-Sr (figure 8) permettent une estimation assez précise de la contribution du pôle « saumure ». On peut ainsi considérer que cette influence est maximale dans le cas de l'eau de Norroy (25 %), alors qu'elle semble proche de 15 % dans le cas de Mirecourt et Suriauville, de 10 % pour Valfroicourt, Bulgnéville et Frênes, et enfin de 5 % pour Vittel (figure 8). Connaissant les caractéristiques de la saumure, on peut retrouver celles de l'eau de recharge évoluée. De la même façon, l'existence de drainances provenant des eaux de la nappe sus-jacente des calcaires du Muschelkalk va affecter le temps de résidence. Connaissant les taux de drainances (estimés d'après les calculs faits avec As, figure 11) de ces eau actuelles, on peut retrouver les temps de résidence propres à la composante purement GTI. Les résultats sont reportés dans le tableau 3.

Echantillon	Moyenne des âges ^{14}C (a)	Moyenne corrigée des drainances (a)	Distance zone de recharge (km)	Vitesse d'écoulement sans correction (m/a)	Vitesse d'écoulement avec correction (m/a)
Mirecourt	14654		20	1.37	
Bulgnéville	8537	10806	16.7	1.95	1.54
Suriauville	5953	6013	10.6	1.79	1.77
Frênes	5263	9468	11.8	2.24	1.34
Norroy	30045		n.a.		
Vittel	5190	8316	10.3	1.99	1.29
Valfroicourt	6414		14.6	2.28	
Relanges	2110				

Echantillon	Temps de transit vs. Relanges (a)	Vitesse d'écoulement sans correction (m/a)	Vitesse d'écoulement avec correction (m/a)
Mirecourt	12544	1.59	
Bulgnéville	6427	2.59	1.91
Suriauville	3843	2.77	2.73
Frênes	3153	3.73	1.77
Norroy			
Vittel	3080	3.35	1.76
Valfroicourt	4304	3.40	
Relanges			

Tableau 3 : Vitesses d'écoulement estimées pour les eaux de la nappe des GTI (excepté Relanges et Norroy). Les moyennes des âges correspondent aux moyennes des 4 âges corrigés selon les différents modèles (figure 11). Le tableau du haut donne les vitesses corrigées et non corrigées des drainances pour une eau de recharge d'âge ^{14}C égal à 0. Le tableau du bas donne ces mêmes calculs en tenant compte de l'âge ^{14}C de l'eau de Relanges (considérée comme l'eau de recharge).

Les corrections de drainances font notablement évoluer les vitesses d'écoulement calculées lorsque la contribution des eaux du Muschelkalk est importante (figure 11). En ce qui concerne les eaux de la nappe des GTI situées au Sud de la faille de Vittel (Suriauville, Bulgnéville, Frênes, Vittel), les corrections de drainances effectuées permettent de calculer des vitesses d'écoulement très convergentes, avec une moyenne de 1.49 ± 0.22 m/an. Ces calculs ont été faits en prenant un âge de 0 au niveau de la recharge. Maintenant, il est possible que l'eau de recharge ait un âge non nul. C'est pourquoi le calcul a été également fait en considérant l'âge de l'eau du piézomètre de Relanges. Il en résulte des vitesses d'écoulement plus élevées et moins homogènes, à 2.04 ± 0.46 m/an.

Les eaux de Mirecourt ont des vitesses d'écoulement calculées (1.37 et 1.59 m/an, respectivement, si l'on tient compte ou non de l'« âge » de l'eau de Relanges) identiques à la marge d'erreur près tandis que celles de Valfroicourt sont plus élevées (2.28 et 3.40 m/an). Il faut noter que si la correction avec l'eau du piézomètre de Relanges a été effectuée pour ces deux points, il n'est pas certain que l'eau de recharge dans cette zone (secteur Est) ait des caractéristiques comparables, si tant est que l'eau de Relanges soit significative de l'eau de recharge dans la zone Sud de la faille de Vittel (secteur Ouest). Enfin, pour l'eau de Norroy, en estimant grossièrement la distance à la zone de recharge à 40 km, on obtient une vitesse d'écoulement de l'ordre de 1.33 m/an, assez cohérente avec celles reportées dans la figure 11.

Les temps de résidence calculés d'après les analyses 14C confirment les données des isotopes de la molécule d'eau : les eaux des GTI ont des temps de résidence inférieurs ou égaux à 10 000 ans, donc postérieurs à la fin de la dernière glaciation, à l'exception de celles de Mirecourt (15 000 ans environ) et Norroy (autour de 30 000 ans). Les vitesses d'écoulement déduites se situent en moyenne entre 1.5 et 2 m/an au Sud de la faille de Vittel, sauf à sa terminaison Est (Valfroicourt) où les vitesses sont un peu plus élevées (entre 2.3 et 3.4 m/an). Au Nord de la faille, les vitesses estimées sont de 1.5 m/an environ pour Mirecourt, et de l'ordre de 1.3 m/an pour Norroy.

2.6. SYNTHÈSE DES RESULTATS ET PERSPECTIVES

2.6.1. L'origine des eaux

L'étude géochimique et isotopique effectuée sur les 10 échantillons d'eau sélectionnés dans la zone du SAGE GTI (région de Vittel – Mirecourt) a montré que les eaux de la nappe des GTI sont majoritairement d'origine météorique, les caractéristiques géochimiques ayant plus ou moins évolué en fonction de leur parcours souterrain. L'influence des saumures triasiques du Centre du Bassin Parisien est bien visible, notamment dans l'eau de Norroy et à un moindre degré dans celles de Mirecourt et Valfroicourt. Enfin, certaines eaux des GTI montrent l'impact des eaux de la nappe sus-jacente des calcaires du Muschelkalk (gîte B), marquant ainsi l'existence de drainances, notamment dans le cas de l'eau de Vittel.

Cependant, les données obtenues sur les deux eaux des calcaires du Muschelkalk étudiées ici ne permettent pas de contraindre sans ambiguïté les caractéristiques géochimiques et isotopiques de ce troisième pôle et ce pour deux raisons : (i) l'existence de pollutions d'origine anthropique via les eaux de sub-surface pour l'une des deux eaux (Le Bon Pré), pouvant oblitérer au moins partiellement la signature originelle de cette eau, et (ii) les caractéristiques géochimiques et isotopiques très différentes entre ces deux eaux (Great Source et Le Bon Pré), différence qui ne peut refléter uniquement l'impact des pollutions.

2.6.2. Essais de quantification de la drainance

L'existence de drainances entre la nappe des GTI et celles des calcaires du Muschelkalk n'a pu être mise en évidence que par l'apport des données isotopiques, la géochimie des majeurs et des éléments en traces n'ayant pas permis seule de mettre en évidence ces phénomènes. L'utilisation des isotopes de Li et Sr démontre clairement que les eaux du Muschelkalk se mélangent à celles de la nappe des GTI. Des essais de quantification ont été effectués en se basant sur les teneurs en As. L'importance de ces drainances est maximale au Sud de la faille de Vittel, et dépasse même 50 % au Sud-Est du forage de Vittel (Valleroy-le-Sec). L'effet semble s'estomper quand on s'éloigne de la faille, témoin l'eau du forage de Suriauville.

2.6.3. Vitesse d'écoulement de la nappe des GTI

Les temps de résidence calculés à l'aide de ^{14}C ont permis de déduire des vitesses estimées d'écoulement des eaux de la nappe des GTI. A l'Ouest du secteur étudié, au Sud de la faille de Vittel, elles sont de l'ordre de à 1.5 m/an en supposant que l'eau de recharge a un âge nul. Ces vitesses estimées augmentent (2 m/an) si l'on tient compte de l'âge ^{14}C de l'eau du piézomètre de Relanges. A l'Est du secteur et au Nord de la faille, les vitesses semblent varier entre 1.3 et 1.6 m/an, sauf pour l'eau de Valfroicourt qui donne des vitesses plus élevées (dans ce cas, l'impact de l'âge de l'eau de Relanges sur la vitesse calculée devient très important.

2.6.4. Imperméabilité de la faille de Vittel

Bien qu'il n'existe pas de marqueur géochimique direct de l'existence ou non de circulations d'eaux entre le Nord et le Sud de la faille, les données géochimiques et isotopiques ne montrent aucune évidence d'écoulement des eaux à travers la faille. Les caractéristiques chimiques des eaux, les phénomènes de drainance et les vitesses d'écoulement semblent au contraire indiquer que la faille de Vittel constitue bien une barrière à l'écoulement des eaux, ainsi que l'avaient pressenti Blavoux et Olive (1981).

2.6.5. Perspectives futures

Les essais de quantification, reposant uniquement sur les teneurs en As, souffrent d'une contrainte insuffisante et ne peuvent être compris que comme une première approche du problème, même si les résultats obtenus de façon totalement indépendante sont parfaitement compatibles avec les données isotopiques. Le principal obstacle réside dans la contrainte du pôle Muschelkalk, ce qui implique d'étudier toutes ou au moins une bonne partie des eaux de cette nappe (une douzaine seraient disponibles au vu de la base de données qualité), afin de caractériser au mieux d'un point de vue géochimique et isotopique le pôle contaminant. Dans la mesure où les diagrammes de mélange montrent des droites bien définies, ce pôle est sans doute bien contraint et identique pour toutes ou au moins une bonne partie des eaux de la nappe des GTI. L'utilisation d'As pour les calculs impliquerait de normaliser cet élément à un autre dont le comportement géochimique est a priori semblable : le meilleur candidat serait Se, ce qui implique la mesure des teneurs en Se. Mais on peut aussi envisager d'utiliser les isotopes de Sr en fonction du rapport Ca/Sr, ce qui revient à mesurer les teneurs en ces deux éléments et les compositions isotopiques en Sr. Enfin, on peut aussi envisager la mesure des isotopes et des teneurs en Li, solution apportant des contraintes maximales, mais aussi plus « lourde ».

La détermination précise de ces drainances peut permettre, grâce à l'analyse ^{14}C , de déterminer les vitesses d'écoulement propres à n'importe quelle eau de la nappe des GTI. Cependant, une contrainte maximale sur les vitesses ne pourra être obtenue que si le temps de résidence apparent (et non pas le temps de résidence réel) de la composante « recharge » est parfaitement connu, ce qui pourrait être obtenu par l'étude des eaux météoriques et/ou liées aux sols dans le secteur d'étude, ainsi que par la mise en œuvre d'autres chronomètres caractéristiques des temps de résidence très courts (par exemple ^3H), afin de tester la validité et la cohérence de l'un ou l'autre modèle de correction ^{14}C utilisé.

3. Actualisation du modèle de la nappe des grès du Trias inférieur

On ne reprend dans le texte des paragraphes 3.1 à 3.3 que les principales caractéristiques du réservoir et du modèle de la nappe des GTI. Pour plus d'informations le lecteur est renvoyé vers le rapport « 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 *et al.*, 2007).

3.1. LE RESERVOIR AQUIFERE DES GRES DU TRIAS INFERIEUR

Le réservoir des grès du Trias inférieur (GTI) en Lorraine et dans les Vosges du Nord est constitué de grès plus ou moins fins, avec quelques passées argileuses dans la partie supérieure et quelques passées conglomératiques au centre et à la base.

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

Sur la majeure partie du territoire lorrain, le réservoir est recouvert par des terrains imperméables. Cette couverture est constituée par les marnes du Muschelkalk moyen et inférieur. La plus grande partie de la nappe sous couverture présente un fonctionnement hydrodynamique captif, mais elle peut aussi sur sa bordure en limite de couverture présenter un fonctionnement de nappe libre sous couverture : dans ces secteurs la nappe sous couverture possède une zone non saturée en eau.

Le long des Vosges et dans le bassin houiller, la nappe n'est pas sous couverture et est libre, elle reçoit directement les infiltrations d'eau de pluie car les grès affleurent (Figure 12).

Notons que le réservoir s'étend aussi largement dans le 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 les Vosges du Nord, elle est de 200 m vers Toul et Epinal et de 100 m vers Bar-le-Duc et Vittel. Son extension occidentale sous le Bassin parisien est mal connue, et a été limitée pour les besoins de la modélisation lorsque son épaisseur est réduite à quelques mètres.

En Lorraine, le réservoir des grès du Trias inférieur est donc constitué de deux compartiments distincts : un compartiment sous couverture au fonctionnement essentiellement captif avec une bordure pouvant fonctionner comme une nappe libre, et un compartiment affleurant au fonctionnement de nappe libre. Le modèle prend en compte essentiellement la partie sous couverture du réservoir, ainsi que 3 secteurs en partie affleurante ne pouvant pas être considérés séparément de la partie sous couverture du réservoir : il s'agit des affleurements dans le bassin houiller (région de Saint-Avold – Forbach), des affleurements de la région de Phalsbourg – Saverne, et d'une petite partie des affleurements situés au sud de la région de Vittel – Contrexéville.

3.2. REGIME NATUREL DE LA NAPPE CAPTIVE DES GRES DU TRIAS INFERIEUR

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

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

La nappe sous couverture des GTI est drainée naturellement par les cours d'eau sur ses limites nord et nord-est (dont la Moselle à Sierck-les-Bains et 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 début du 20^{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 des Vosges vers la Sarre) et du Sud-Ouest vers le Nord-Est (soit de la Meuse vers le nord de la Moselle). Le gradient piézométrique 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.

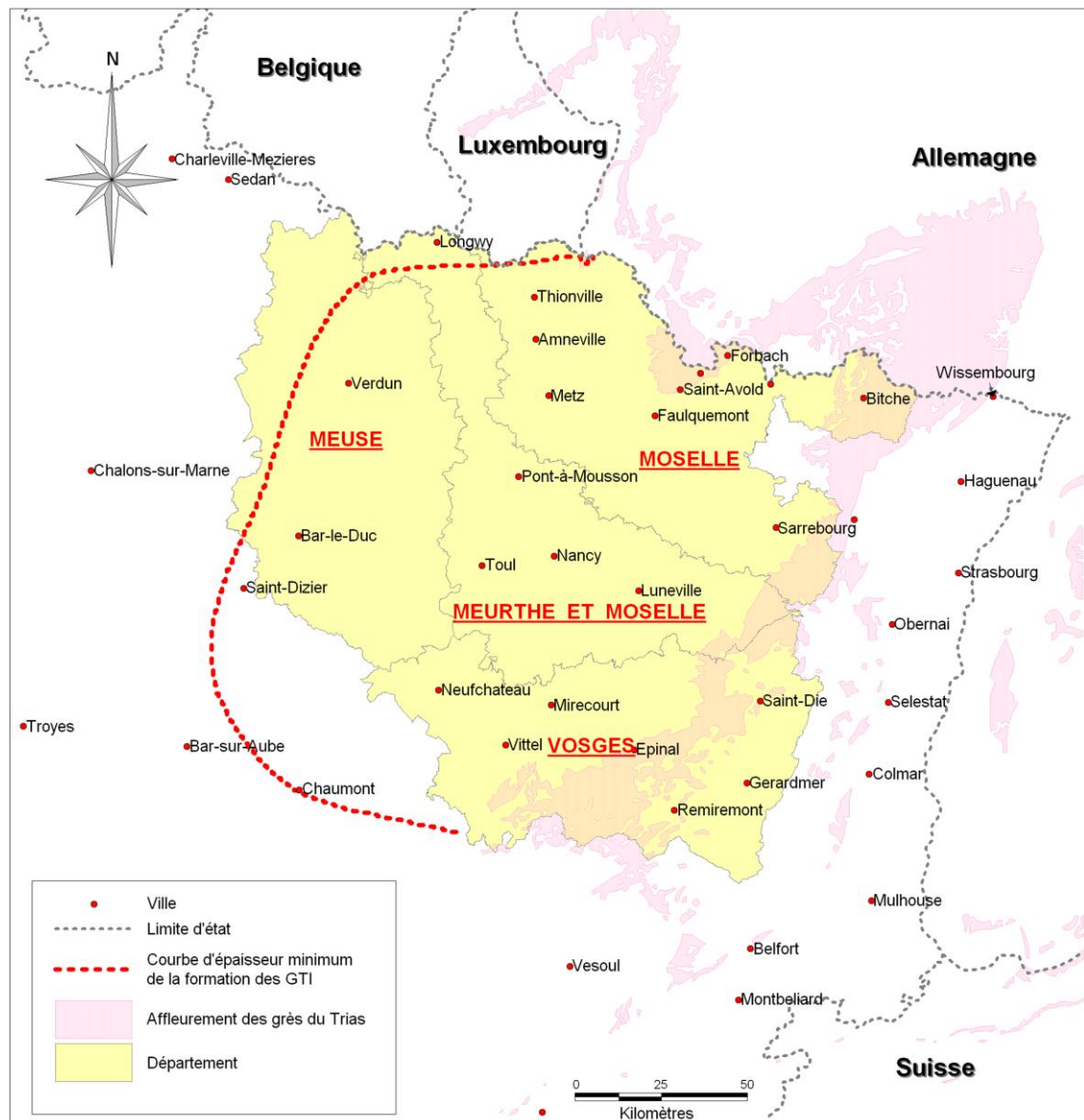


Figure 12 : Cadre géographique de l'étude.

Dans les secteurs faillés, certains auteurs ont fait l'hypothèse que la communication entre les GTI et les calcaires du Muschelkalk sus-jacents est possible. Dans ce cas, il pourrait se développer, selon les secteurs, des phénomènes de drainance (échanges d'eau limités entre deux nappes superposées) descendante ou ascendante.

En l'absence de données, le phénomène hypothétique de drainance ascendante (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, la drainance pourrait théoriquement être descendante, avec le risque 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 la présente étude d'actualisation du modèle de la nappe des grès du Trias inférieur en Lorraine, cette hypothèse de drainance descendante a été étudiée pour la partie de la nappe captive située au sud de la faille de Vittel. Les résultats obtenus sont présentés au paragraphe 2.4.3.

Deux failles importantes sur le plan hydrogéologique doivent être signalées : la faille de Longeville-Hombourg (dite aussi faille de Faulquemont) dans le bassin houiller, et la faille de Vittel au nord de Vittel – Contrexéville. Ces deux 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 de ces deux failles.

La minéralisation de l'eau augmente à mesure que l'on s'éloigne des affleurements et que l'on s'enfonce en profondeur. A 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 teneurs 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 « tâche » salée est aussi connue en Moselle, sous le bassin de la Sarre en aval de Sarrebourg et à l'interfluve Sarre-Sânon.

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

La répartition des prélèvements par département dans la nappe captive des grès et dans la nappe libre du bassin houiller pour l'année 2010 est résumée dans le Tableau 4, et l'évolution des volumes prélevés sur la période 1968-2010 est illustrée par la Figure 13.

Nature des prélèvements	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

Tableau 4 : Répartition des prélèvements effectués dans la nappe captive et dans la nappe libre du bassin houiller en 2010.

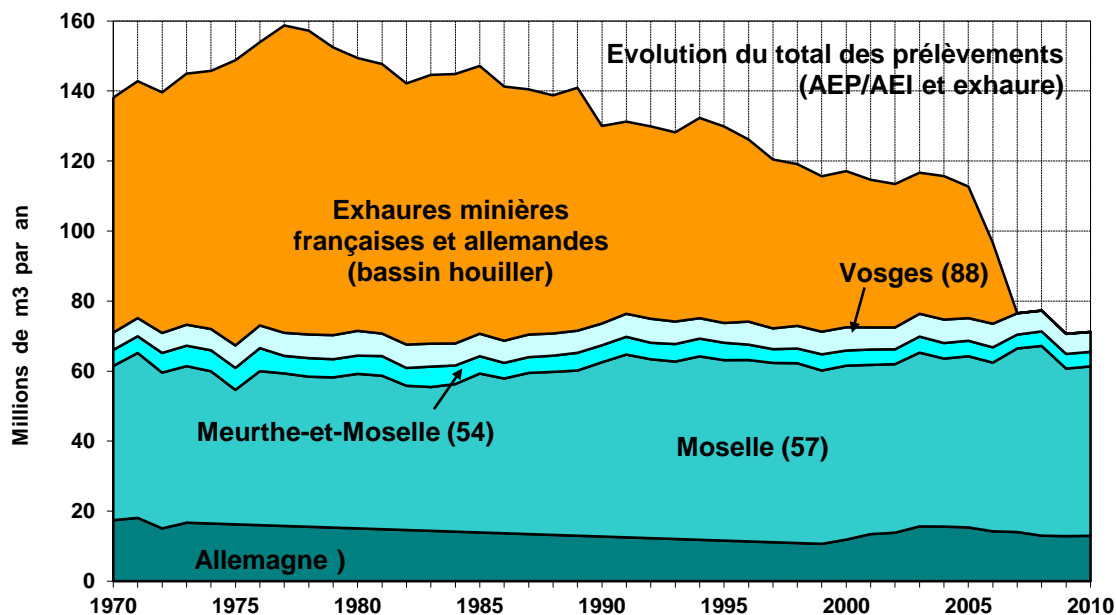


Figure 13 : Evolution de 1968 à 2010 du total des prélèvements effectués dans la nappe captive des grès du Trias inférieur et dans la nappe libre du bassin houiller.

Le volume total des prélèvements destinés à l'alimentation en eau potable ou industrielle, et des prélèvements nécessités par l'activité extractive des bassins miniers, a atteint en 1977 un maximum de près de 160 millions de m³, dont 86 millions de m³ correspondaient à l'exhaure minière. A partir de cette date, tandis que les prélèvements destinés à l'alimentation en eau potable et industrielle restaient stables en moyenne, la part des exhaures minières a diminué régulièrement, jusqu'à s'annuler après l'arrêt des exhaures en 2006. Le volume total prélevé dans la nappe des grès du Trias inférieur était de 71,2 millions de m³ en 2010.

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 grès du Trias inférieur, ce qui avait pour conséquence que le bilan de la nappe était déséquilibré.

Le modèle dans sa version 2005 avait permis de calculer ce déficit pour l'ensemble de la nappe captive, ainsi que par secteur géographique. Compte tenu de l'arrêt des exhaures minières intervenu depuis, ainsi que des nouvelles évolutions des prélèvements, il convenait de mettre à jour les données du modèle et de vérifier les prévisions réalisées.

3.4. INTRODUCTION DANS LE MODELE DES NOUVELLES DONNEES ACQUISES SUR LA PERIODE 2000-2010

Le modèle hydrogéologique de la nappe des grès du Trias inférieur concerne, rappelons-le, le réservoir des GTI sur toute sa partie sous couverture et sur sa partie affleurante dans le bassin houiller, ainsi que quelques très petits secteurs affleurants indispensables à la modélisation. Avant l'actualisation, le modèle était dans sa version 2005, avec des données datant de 2000 pour la nappe dans son ensemble, et de 2004 pour le département des Vosges (Vaute *et al.*, 2007). Les données nécessaires à la modélisation ont été actualisées sur l'ensemble du périmètre du modèle sur la période 2000-2010. Les données introduites dans le modèle sont les suivantes :

- les données piézométriques de la campagne effectuée en 2010 par le BRGM sur la nappe des GTI, sur sa partie captive et sa partie libre dans le bassin houiller (Nguyen-Thé, 2012) ;
- les données de suivi piézométrique des points de la nappe des GTI appartenant au réseau piézométrique suivi par le BRGM Lorraine ;
- les données de volumes annuels prélevés sur la période 2004-2010 sur le territoire du SAGE, collectées par l'association La Vigie de l'Eau dans le cadre de l'inventaire des prélèvements et des usages sur le secteur du SAGE GTI ;
- les données de volumes annuels prélevés sur la période 2000-2010, compilées par l'Agence de l'eau Rhin-Meuse à partir des données de sa base « redevances » ;
- les données de volumes annuels prélevés pour l'exhaure minière (avant l'arrêt de l'exploitation minière) ou le soutien d'étiage des cours d'eau (après l'arrêt), collectées par le Département Prévention et Sécurité Minière du BRGM ;
- pour la partie allemande du bassin houiller (Sarre), les données de volumes annuels prélevés et les niveaux piézométriques transmis par l'Administration sarroise à la DREAL (Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement) de Lorraine ;
- Les données de pluie annuelle sur 3 stations de Météo-France.

3.5. MODIFICATION DU MODELE CONCEPTUEL ET NOUVEAU CALAGE

Après l'intégration des données compilées sur la période 2000-2010, certains aspects du modèle conceptuel ainsi que le calage des paramètres hydrodynamiques ont été revus sur le territoire du SAGE GTI. En s'appuyant notamment sur les résultats de la campagne de géochimie isotopique réalisée lors de l'étude d'actualisation du modèle, et pour assurer un meilleur calage, le modèle a été modifié sur le territoire du SAGE sur les points suivants :

- Un flux de drainance descendante entre l'aquifère des calcaires du Muschelkalk et la nappe des grès du Trias inférieur a été introduit sur une bande de 2 à 3,5 km en limite sud de la faille de Vittel, entre Bulgnéville et Haréville. Ce flux a été fixé à 25 mm/an, ce qui représente pour l'ensemble du secteur une infiltration de 1,0 Mm³/an et 43 % du flux total d'infiltration vers la nappe dans ce secteur : malgré des incertitudes qui devront être levées, deux calculs distincts de géochimie conduisent en effet à estimer un ordre de grandeur de la proportion d'eau provenant du Muschelkalk à 15 à 60 % selon les secteurs. Notons qu'une étude de modélisation précédente (Babot et Chevalier, 1993) avait pris en compte une drainance de 4 mm/an sur l'ensemble des affleurements du Muschelkalk, ce qui représentait une infiltration de 1,6 Mm³/an.
- Les affleurements qui participent à l'alimentation de la nappe au sud de la faille de Vittel ont été limités à une frange de 500 m de large recevant une infiltration constante de 120 mm/an. Le choix de cette configuration résulte de l'impossibilité de simuler autrement la baisse linéaire des niveaux piézométriques dans les 4 piézomètres situés à l'aval de cette zone d'alimentation. Il apparaît donc que la ligne de partage des eaux souterraines doit correspondre approximativement à la limite des affleurements dans ce secteur.
- Enfin, le rôle de barrière étanche de la faille de Vittel a été confirmé par l'étude isotopique, et son linéaire étanche a été étendu depuis l'ouest de Bulgnéville jusqu'au nord de Valfroicourt pour assurer un meilleur calage.
- Sur le territoire du SAGE GTI, la valeur du coefficient d'emménagement captif a été fixée à $3 \cdot 10^{-4}$, et celle de l'emménagement libre (porosité efficace) à $8 \cdot 10^{-2}$.
- Les valeurs de zones de perméabilité ont été fixées à des valeurs comprises entre 0.1 et 2.75 m.s⁻¹ sur le territoire du SAGE GTI (cf. Figure 14).

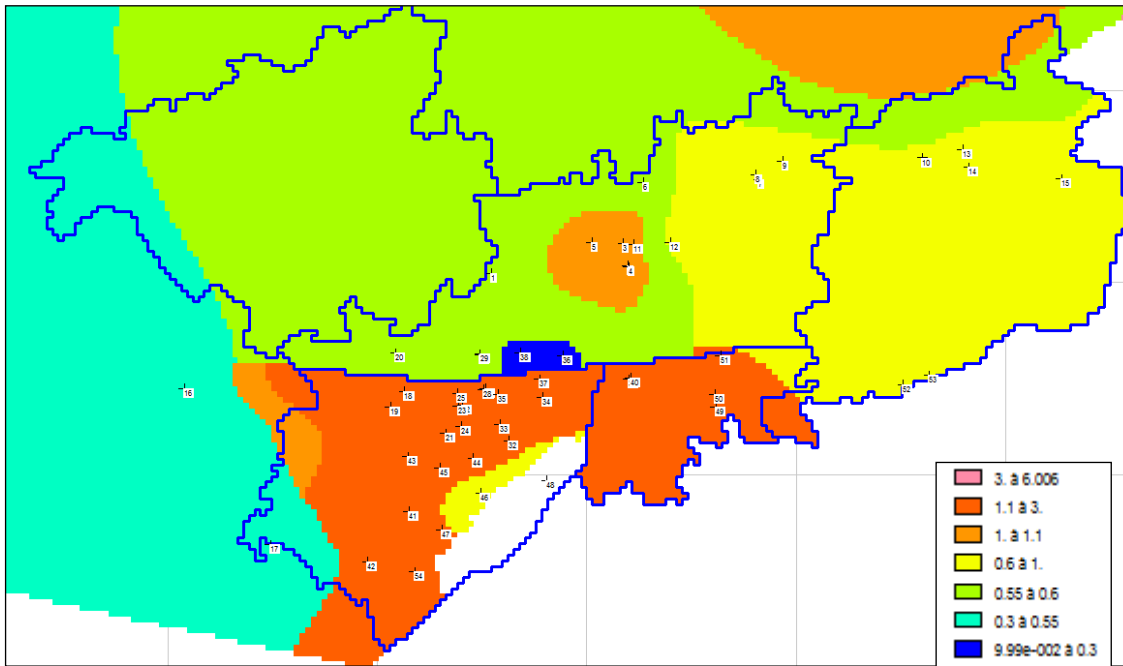


Figure 14 : Zones de perméabilité définies après calage sur le territoire du SAGE GTI et le département des Vosges (en $10^{-5} m.s^{-1}$).

On pourra juger de la qualité satisfaisante du calage du modèle sur le territoire du SAGE en comparant les tendances d'évolution mesurées en certains points de mesure disposant de mesures piézométriques (cf. localisation des points sur la Figure 17) aux tendances calculées par le modèle sur les 33 années de la période de calage 1977-2010 (Figure 18 à Figure 20).

On constatera sur les graphiques que le nombre de mesures piézométriques est parfois faible sur la période de calage. Par ailleurs, ces données sont fréquemment affectées d'une forte incertitude lorsque les ouvrages sont pompés (mesure d'un niveau « dynamique » influencé par le pompage au lieu du niveau « statique » représentatif de la nappe après arrêt du pompage pendant plusieurs heures au minimum).

3.6. EVOLUTION DES SOLDES ENTREE/SORTIE ET DES VOLUMES PRELEVES SUR LA PERIODE 1977-2010

Le modèle actualisé et recalé dans sur le territoire du SAGE GTI permet de calculer l'évolution du solde entrées/sorties dans les différents secteurs du SAGE (Figure 17) pour la période 1977-2010. Les résultats sont présentés sur la Figure 15.

En 2010, le secteur Sud-Ouest situé au sud de la faille de Vittel (secteur Vittel-Contrexéville) restait déficitaire de 1,15 Mm³/an, tandis que les autres secteurs étaient légèrement excédentaires

L'évolution du solde entrées/sorties est à rapprocher de l'évolution des volumes prélevés dans la nappe sous couverture dans les différents secteurs (Figure 16). On remarque que malgré la réduction importante des prélèvements dans le secteur Sud-Ouest à partir de 1994, ce secteur reste déficitaire.

Des simulations d'évolution tendancielle selon différents scénarios d'évolution des prélèvements seront réalisées à l'aide du modèle actualisé dans les études menées par la CLE du SAGE GTI.

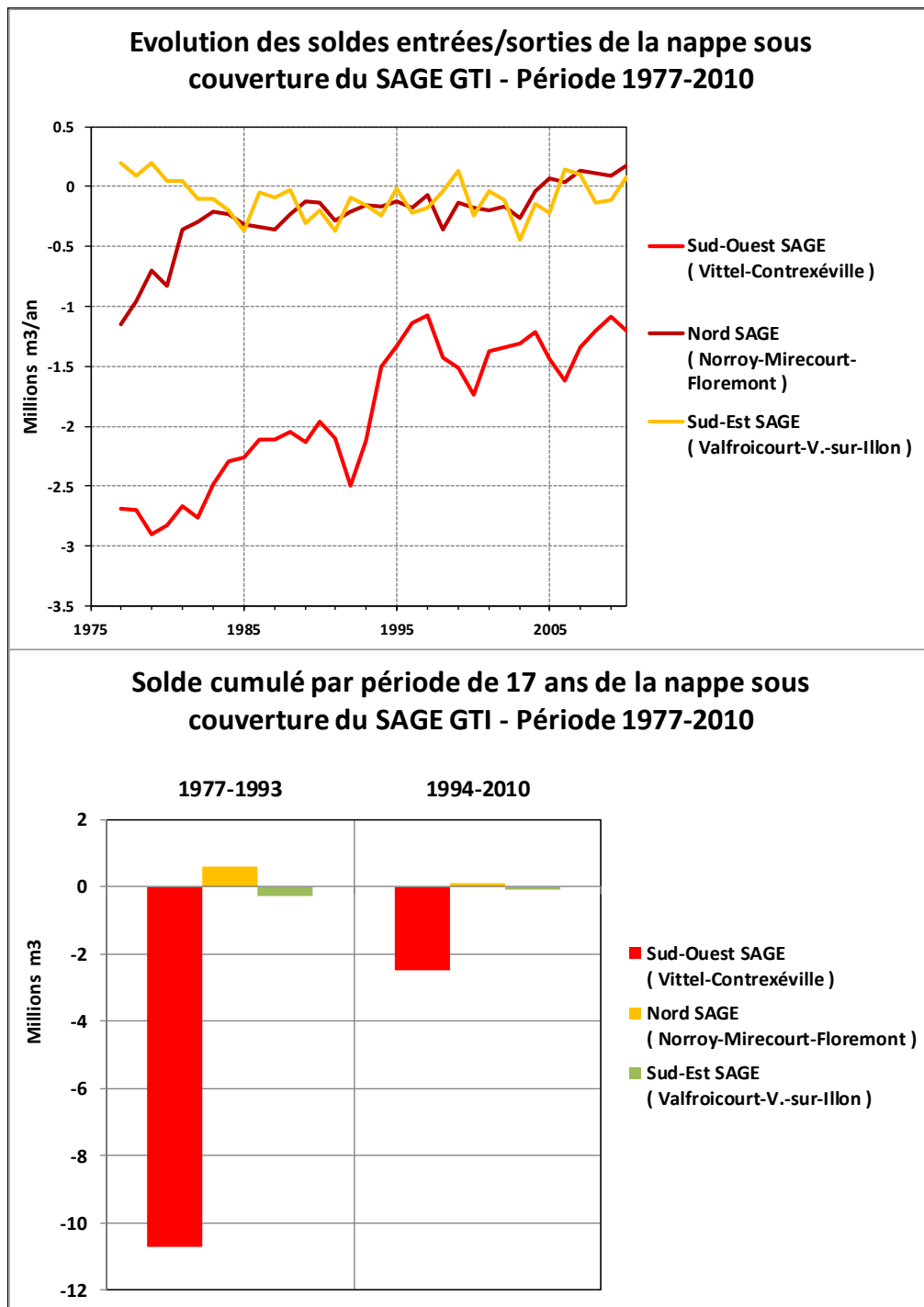


Figure 15 : Evolution des soldes entrées/sorties annuels et des soldes entrées/sorties cumulés pour les périodes 1977-1993 et 1994-2010, par secteurs du SAGE GTI.

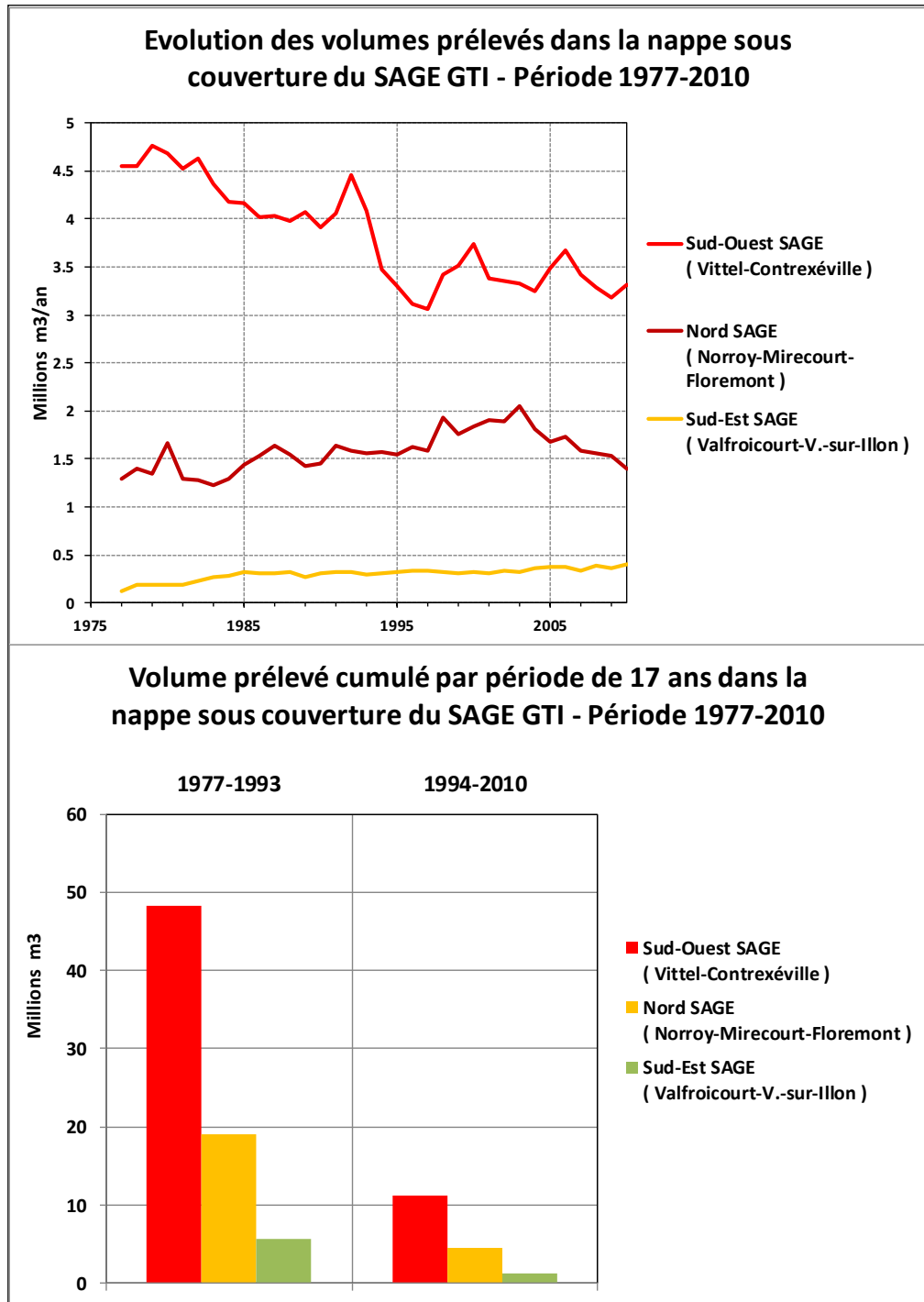


Figure 16 : Evolution des volumes prélevés annuels et des volumes prélevés cumulés pour les périodes 1977-1993 et 1994-2010, par secteurs du SAGE GTI.

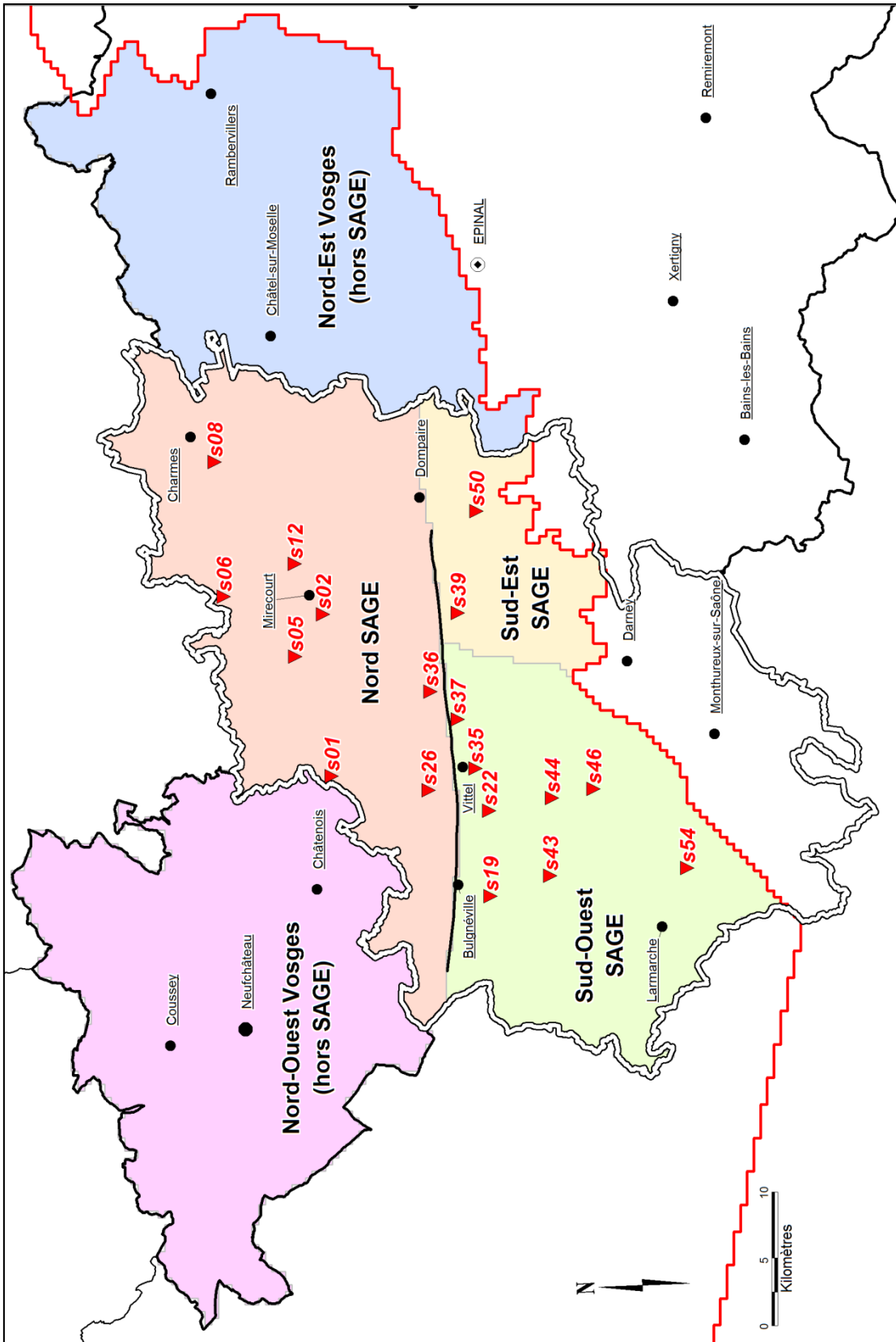


Figure 17 : Carte des secteurs de la nappe captive dans le département des Vosges – Localisation des historiques piézométriques (triangles rouges).

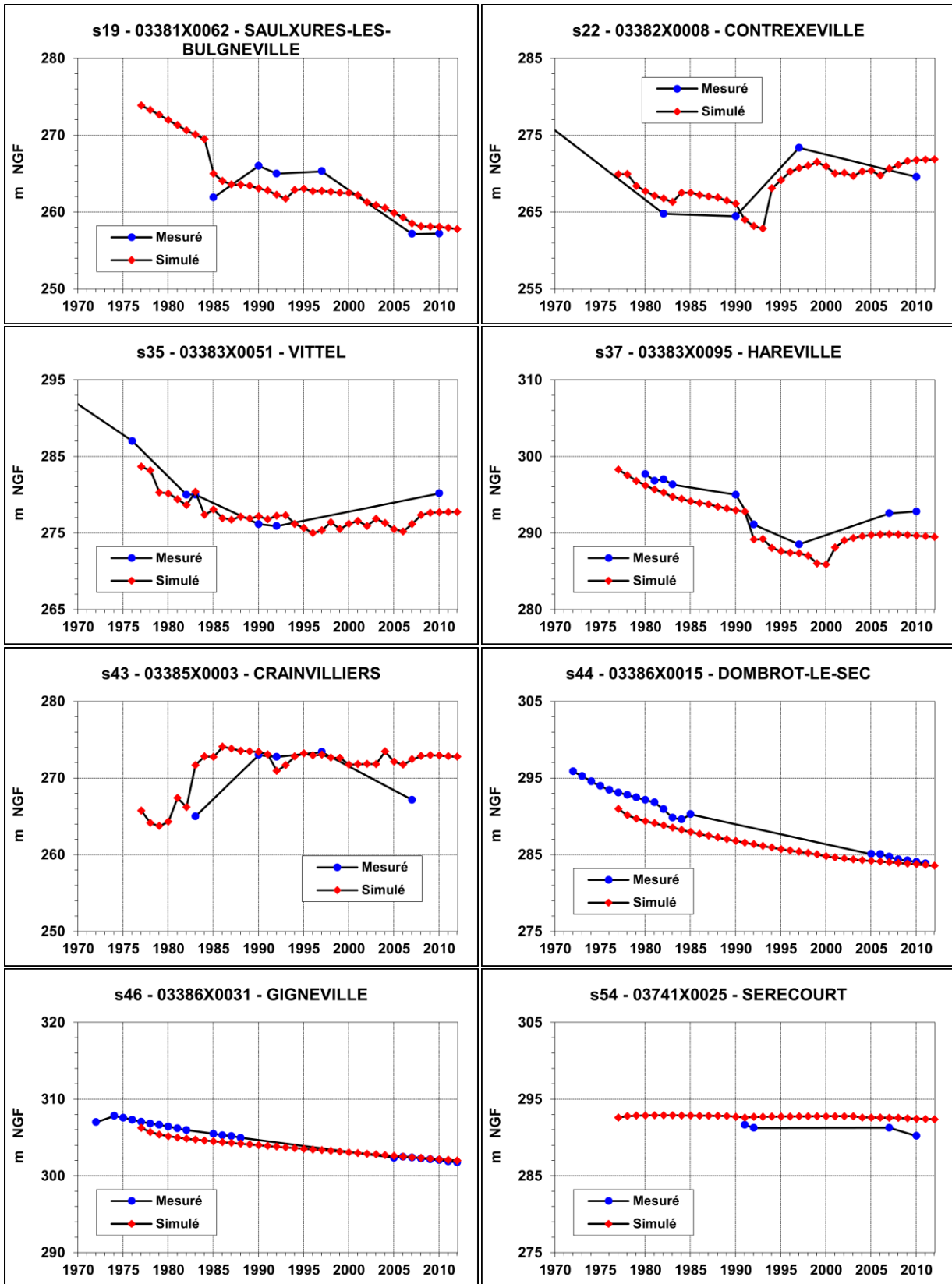


Figure 18 : Niveaux mesurés et niveaux simulés de 1977 à 2010 – Secteur sud-ouest du SAGE (Vittel-Contrexéville).

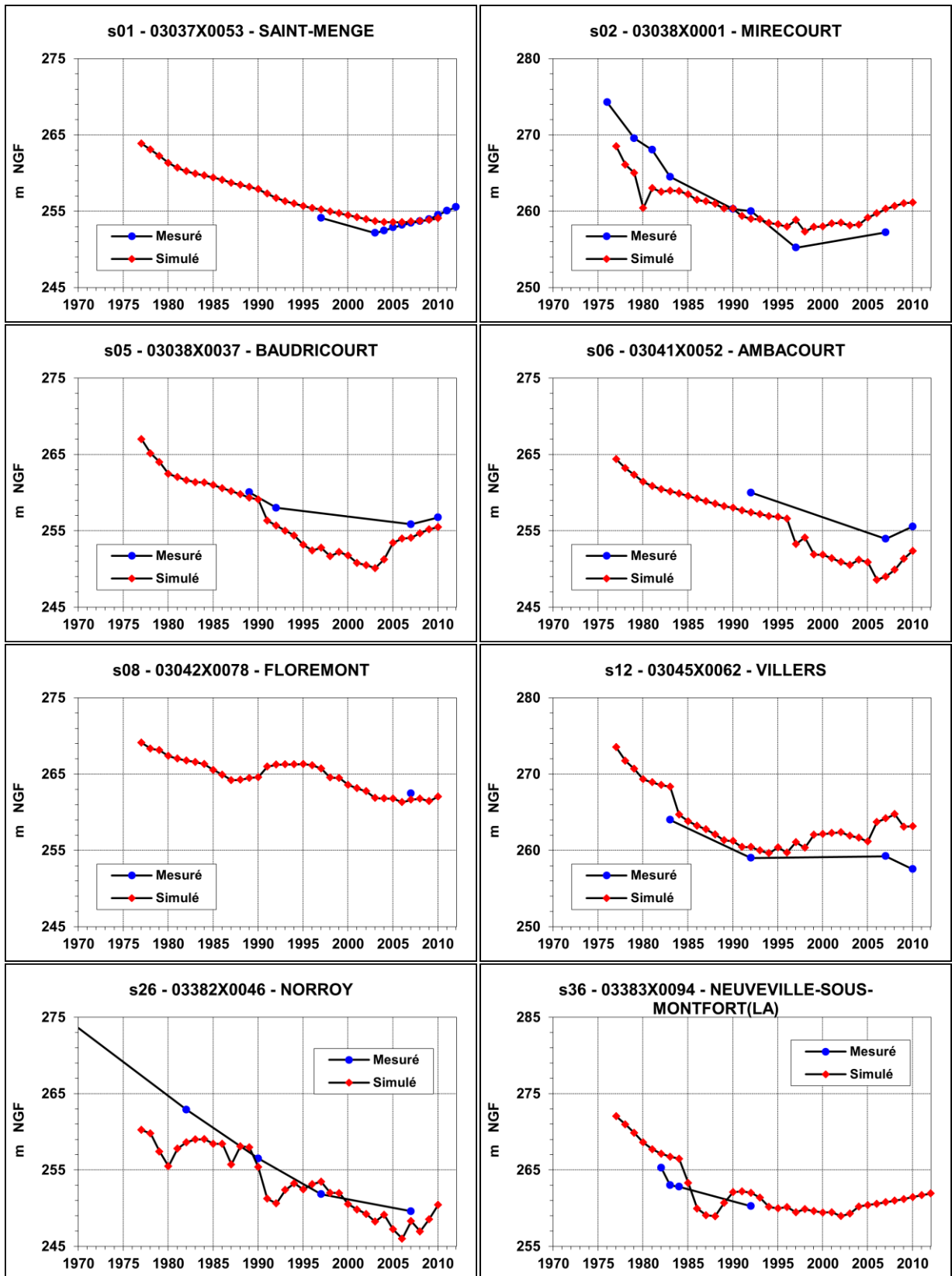


Figure 19 : Niveaux mesurés et simulés de 1977 à 2010
 – Secteur nord du SAGE (Norroy-Mirecourt-Floremont).

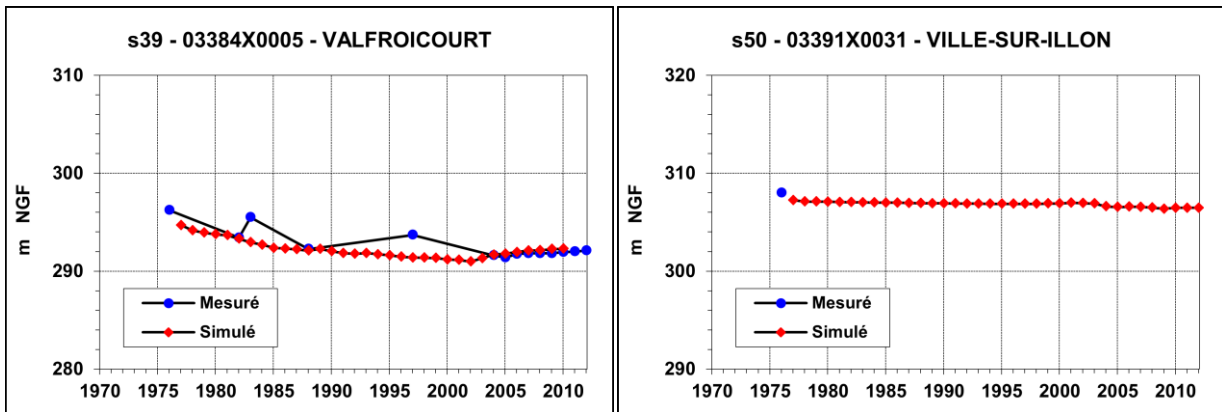


Figure 20 : Niveaux mesurés et simulés de 1977 à 2010 – Secteur sud-est du SAGE (Valfroicourt-Ville-sur-Illon).

4. Conclusion

Dans le but de fournir des éléments quantitatifs de réflexion à la Commission Locale de l'Eau du SAGE de la nappe des grès du Trias inférieur, le présent rapport présente une synthèse des principaux résultats de l'actualisation du modèle sur le territoire du SAGE GTI.

Pour contribuer à lever les principales incertitudes dans le périmètre du SAGE GTI (rôle de la faille de Vittel, recharge, drainance), l'étude d'actualisation s'est appuyée sur les résultats d'une campagne de géochimie isotopique, dont les résultats ont été présentés.

L'actualisation du modèle a permis de mettre à jour le calcul du solde entrées/sorties de la nappe pour chaque secteur géographique du SAGE GTI : en 2010, le secteur Sud-Ouest situé au sud de la faille de Vittel (secteur Vittel-Contrexéville) restait déficitaire de 1,15 Mm³/an, tandis que les autres secteurs étaient légèrement excédentaires.

Des simulations d'évolution tendancielle selon différents scénarios d'évolution des prélèvements seront réalisées à l'aide du modèle actualisé dans les études menées par la CLE du SAGE GTI.

5. Bibliographie

ANTEA (2001) – Extension de la contamination en arsenic dans la nappe des Grès du Trias Inférieur sous couverture. Rapport ANTEA A023427/A, 11 p.

Babot Y., Chevalier J. (1993) – Gestion de la nappe des Grès du Trias inférieur, secteur de Vittel Contrexéville Mirecourt, Caractéristiques du modèle hydrodynamique, Présentation de l'étalonnage et des simulations réalisées, Hydrochimie des chlorures au droit de la faille de Vittel. Rapport BRGM R47741 NAC 4S 93, 30 p.

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.

Blavoux B., Olive P. (1981) - Radiocarbon dating of groundwater of the aquifer confined in the lower Triassic sandstones of the Lorraine region, France. *Journal of Hydrology* 54, p. 167-183.

Brenot A., Carignan J., France-Lanord C., Benoit M. (2007) - Geological and land use control on $\delta^{34}\text{S}$ and $\delta^{18}\text{O}$ of river dissolved sulfate : The Moselle river basin, France. *Chemical Geology* 244, p. 25-41.

Celle-Jeanton H., Huneau F., Travi Y., Edmunds W.M. (2009) - Twenty years of groundwater evolution in the Triassic sandstone aquifer of Lorraine: Impacts on baseline water quality. *Applied Geochemistry* 24, p. 1198-1213.

Craig H. (1961) - Isotopic variations in meteoritic waters. *Science* 133, p. 1702-1703.

Eichinger L. (1983) - A contribution to the interpretation of ^{14}C groundwater ages considering the example of a partially confined sandstone aquifer. In Stuiver M., Kra R.S. (Eds.) *Proceedings of the 11th International ^{14}C Conference, Radiocarbon* 25, p. 347-356.

Evans G.V., Otlet R.L., Downing A., Monkhouse R.A., Rae G. (1979) - Some problems in the interpretation of isotope measurements in United Kingdom aquifers. In *Isotope Hydrology II, IAEA, Vienne*, p. 679-708.

Fontes J.C., Garnier J.M. (1979) - Determination of the initial activity of the total dissolved carbon. A review of the existing models and a new approach. *Water Resource Research* 12, p. 399-413.

Koepnick R.B., Denison R.E., Burke W.H., Hetherington E.A., Dahl D.A. (1990) - Construction of the Triassic and Jurassic portion of the Phanerozoic curve of seawater $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$. *Chemical Geology* 80, p. 327-349.

Matray J.-M., Meunier A., Thomas M., Fontes J.-C. (1989) – Les eaux de formation du Trias et du Dogger du Bassin Parisien : histoire et effets diagénétiques sur les réservoirs. *Bulletin Centre de Recherches, d'Exploration et de Production Elf-Aquitaine* 13, p. 483-504.

Millot R., Innocent C., Blanc P., Guerrot C. Gaucher E., Négrel P. (2011) – Apport de la géochimie isotopique B-U-Li-Th appliquée aux eaux des formations de l'Oxfordien et du Dogger. Rapport final. Rapport BRGM/RP-59480-FR, 57 p., 31 fig., 9 tabl., 1 ann.

Misra S., Froelich P.N. (2012) - Lithium Isotope History of Cenozoic Seawater : Changes in Silicate Weathering and Reverse Weathering. *Science* 335, p. 818-823.

Nguyen-Thé D. (2012) – Etat initial et diagnostic du SAGE de la nappe des GTI, Synthèse des données hydrogéologiques existantes. Rapport BRGM/RP-61377-FR, 30 p., 10 ill., 3 ann.

Pearson F.J., Hanshaw B.B. (1970) - Sources of dissolved carbonate species in groundwater and their effects on carbon-14 dating. In *Isotope Hydrology, IAEA, Vienne*, p. 271-286.

Rebeix R., Le Gal La Salle C., Michelot J.-L., Verdoux P., Noret A., Monvoisin G., Gianesinni S., Lancelot J., Simler R. (2011) – Tracing the origin of water and solute transfers in deep groundwater from Oxfordian, Dogger and Trias formations in the east of the Paris Basin – France. *Physics and Chemistry of the Earth* 36, p. 1496-1510.

Taylor S.R., Mc Lennan S.M. (1995) - The geochemical evolution of the continental crust. *Reviews in Geophysics* 33, p. 241-265.

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

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, 145 p., 62 fig., 9 tabl., 3 ann.

Wedepohl K.H. (1995) - The composition of the continental crust. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 59, p. 1217-1232.



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Centre scientifique et technique
3, avenue Claude-Guillemin – BP 6009
45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34

Direction régionale Lorraine
1, avenue du parc de Brabois
54500 – Vandœuvre-lès-Nancy – France
Tél. : 03.83.44.81.49