

Document public

# Extension du modèle de la nappe des grès du Trias inférieur aux affleurements des grès dans les Vosges



Rapport final

BRGM/RP-68726-FR

Février 2019



# Extension du modèle de la nappe des grès du Trias inférieur aux affleurements des grès dans les Vosges

Rapport final

**BRGM/RP-68726-FR**  
Février 2019

Étude réalisée dans le cadre des opérations  
de Service public du BRGM AP16LOR018

**L. Vaute, Q. Guillemoto**

**Vérificateur :**

Nom : Géraldine Picot  
Fonction : Hydrogéologue  
Date : 26/03/2019

Signature :



**Approbateur :**

Nom : Dominique Midot  
Fonction : Directeur régional Grand  
Est  
Date : 10/04/2019

Signature :



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

**Mots clés :** BASSIN RHIN MEUSE, BASSIN RHONE MEDITERRANEE CORSE, LORRAINE, EAU SOUTERRAINE, MODELE, MODELE MARTHE, NAPPE GRES TRIAS INF.

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

**L. Vaute, Q. Guillemoto** (2019) – Extension du modèle de la nappe des grès du Trias inférieur aux affleurements des grès dans les Vosges. Rapport BRGM/RP-68726-FR, 41 p., 21 ill.

## Synthèse

Le modèle hydrogéologique de la nappe des Grès du Trias inférieur (GTI) est développé par le BRGM avec le logiciel MARTHE du BRGM (Thiéry, 2015). Le modèle concerne principalement la nappe sur toute sa partie captive et sur sa partie libre dans le bassin houiller.

A la suite de l'actualisation du modèle hydrogéologique de la nappe des GTI dans le département des Vosges effectuée en 2013 (Vaute *et al.*, 2013), il est apparu le besoin de pouvoir prévoir l'impact, sur les cours d'eau et sur la nappe libre des GTI, de la création de nouveaux forages en limite de la nappe captive des GTI, dans le périmètre du SAGE GTI.

En effet, dans la version 2013 du modèle, cette limite est modélisée sur la majorité de son linéaire comme une limite à niveau constant. Or, cette condition à la limite n'est pas adaptée si des prélèvements importants sont implantés à proximité immédiate des affleurements : le modèle ne peut pas donner d'indication sur l'impact de ces nouveaux forages sur le niveau de la nappe libre, ni sur le débit de la nappe drainé par les cours d'eau.

Par ailleurs, cette condition à la limite ne permet pas non plus de définir les volumes maximums prélevables dans le secteur Sud-Est du SAGE GTI.

Le modèle hydrogéologique régional de la nappe des grès du Trias a donc été étendu vers le sud-est du département des Vosges de manière à englober totalement les premiers bassins versants recoupant la limite entre la nappe sous couverture et la nappe libre des GTI. De nouveaux secteurs ont été définis dans le modèle étendu, et les nouvelles zones d'affleurement des grès prises en compte dans le modèle ont été calées sur les données existantes (niveaux piézométriques et débits de cours d'eau).

Les parties libres et sous couverture de la nappe dans le secteur Sud-Est du SAGE GTI ont fait l'objet d'une attention particulière lors des phases de recherche de données, de construction du modèle et de calage des paramètres hydrodynamiques. Le calage a montré que les failles jouent un rôle hydrogéologique prépondérant en raison de leur caractère souvent imperméable ou semi-perméable, que la présence d'une couche d'alluvions peu perméables voire imperméables dans les fonds de vallée peut limiter le drainage de la nappe dans certaines zones voire provoquer l'artésianisme de la nappe des GTI, et que la partie supérieure des grès à l'affleurement est souvent moins perméable que la partie profonde.

Les simulations réalisées avec le modèle hydrogéologique de la nappe des GTI étendu aux affleurements dans les Vosges ont permis d'estimer l'impact à long terme (39 ans) d'un nouveau prélèvement dans le secteur Sud-Est réparti sur un ou deux nouveaux forages :

- le débit moyen annuel d'étiage des zones de drainage de la nappe des GTI baisserait de 0,1 % à 9 % selon la zone de drainage et l'importance du prélèvement (125 000 m<sup>3</sup>/an à 1 million de m<sup>3</sup>/an) ;
- le niveau piézométrique de la nappe des GTI baisserait au maximum de 0 à 3,6 m au niveau des forages exploités les plus proches des points de pompage simulés, selon la distance au nouveau prélèvement et l'importance du prélèvement (125 000 m<sup>3</sup>/an à 1 million de m<sup>3</sup>/an).

Ces estimations ne tiennent pas compte de l'éventuelle modulation saisonnière du régime de pompage qui pourrait être mise en œuvre afin de diminuer l'impact sur les débits d'étiage des cours d'eau.

Pour préciser ces estimations d'impact par simulation prévisionnelle à l'aide du modèle hydrogéologique, l'acquisition de données visant l'amélioration des connaissances est nécessaire, notamment sur les points suivants :

- perméabilité des failles de Relanges et de Vittel à la limite des secteurs Sud-Est d'une part, et des secteurs Sud-Ouest et Nord d'autre part ;
- relations nappes-rivières (perméabilité des alluvions notamment) dans les secteurs potentiellement impactés par d'éventuels nouveaux pompages de substitution ;
- évolution temporelle des niveaux piézométriques dans le temps ;
- évolution temporelle des débits d'étiage dans chaque zone de drainage ;
- connaissance des débits biologiques des zones potentiellement impactées les plus fragiles.

Le volume prélevable dans le secteur Sud-Est ne pourra être calculé qu'à condition que les conséquences sur l'état des masses d'eau de surface impactées par ce prélèvement soient déterminées précisément, notamment en termes de débit biologique minimum à réserver dans les zones les plus fragiles.

## Sommaire

1. Introduction.....	9
2. Extension du périmètre du modèle régional au secteur Sud-Est du SAGE GTI.....	11
2.1. DEFINITION DE LA NOUVELLE LIMITE SUD-EST DU MODELE.....	11
2.2. CONVERSION DU MODELE DANS LE SYSTEME DE COORDONNEES LAMBERT 93.....	11
2.3. MODIFICATION DU NOMBRE DE COUCHES DU MODELE.....	11
2.4. MODIFICATION DU TOIT ET DU SUBSTRATUM DE L'AQUIFERE.....	11
2.5. MODIFICATION DE LA TAILLE DE MAILLE SUR LE TERRITOIRE DU SAGE GTI ET SUR LES NOUVEAUX AFFLEUREMENTS MODELISES.....	19
2.6. COLLECTE DE DONNEES.....	19
3. Calibration du modèle étendu sur les nouveaux secteurs Sud-Est du SAGE GTI.....	21
3.1. CALCUL DE L'INFILTRATION VERS LA NAPPE.....	21
3.1.1. Méthodologie.....	21
3.1.2. Résultats pour le secteur Sud-Est du SAGE GTI.....	21
3.2. CALCUL DU DEBIT DE DRAINAGE DE LA NAPPE LIBRE DES GTI.....	21
3.2.1. Méthodologie.....	21
3.2.2. Résultats pour le secteur Sud-Est du SAGE GTI.....	22
3.3. REPARTITION SPATIALE DU DRAINAGE DE LA NAPPE DES GTI DANS LE SECTEUR SUD-EST.....	24
3.4. ETABLISSEMENT D'UNE RELATION ENTRE LE DEBIT ANNUEL DE DRAINAGE ET LE DEBIT MINIMUM MENSUEL DE DRAINAGE POUR LA STATION DU MADON A BEGNECOURT.....	25
3.5. CALIBRATION DES NOUVEAUX SECTEURS DU MODELE ETENDU.....	26
3.5.1. Méthodologie.....	26
3.5.2. Résultats pour le secteur Sud-Est du SAGE GTI.....	27
3.5.3. Résultats pour les autres secteurs d'affleurements.....	28
4. Estimation de l'impact d'un nouveau prélèvement dans le secteur Sud-Est du SAGE GTI.....	33
4.1. CONDITIONS DES SIMULATIONS.....	33
4.2. RESULTATS DES SIMULATIONS.....	33

4.2.1. Estimation de l'impact sur les débits d'étiage des cours d'eau du secteur Sud-Est .....	33
4.2.2. Estimation de l'impact sur les niveaux piézométriques du secteur Sud-Est .....	34
5. Conclusion .....	41
6. Bibliographie .....	43

## Liste des illustrations

Illustration 1 : Périmètre initial du modèle régional de la nappe des GTI .....	12
Illustration 2 : Nouveau périmètre du modèle régional et situation des maillages gigognes....	13
Illustration 3 : Extension du modèle GTI aux affleurements dans les Vosges.....	14
Illustration 4 : Secteurs du SAGE GTI.....	15
Illustration 5 : Alluvions semi-perméables prises en compte dans le modèle étendu.....	16
Illustration 6 : Résultats de la campagne de jaugeages du 20/09/2016 dans le secteur Sud-Est.....	17
Illustration 7 : Moyenne interannuelle de l'infiltration calculée pour le secteur Sud-Est. ....	18
Illustration 8 : Liste des 6 stations hydrométriques existantes sur les affleurements des GTI dans le périmètre du modèle étendu.....	20
Illustration 9 : Calibration du modèle hydrologique GARDENIA du débit de la station hydrométrique du Madon A5230110 à Begnécourt sur la période 2010-2014. .	23
Illustration 10 : Mesures journalières du mois de septembre 2016 (source : banque Hydro) ....	24
Illustration 11 : Corrélation entre le débit de drainage mensuel minimal et le débit de drainage annuel.....	26
Illustration 12 : Calage des débits de drainage de la nappe des GTI du secteur Sud-Est du SAGE GTI.....	29
Illustration 13 : Calage des niveaux piézométriques du secteur Sud-Est du SAGE GTI.....	30
Illustration 14 : Calage des débits de drainage de la nappe des GTI du bassin versant de la Saône amont.....	31
Illustration 15 : Calage des niveaux piézométriques du bassin versant de la Saône amont. ....	32
Illustration 16 : Impact calculé sur les zones de drainage des secteurs Sud-Est et Saône amont.....	34

Illustration 17 : Impact calculé sur les forages d'exploitation les plus proches des nouveaux forages. ....	35
Illustration 18 : Impact sur les niveaux piézométriques d'un prélèvement total de 1 000 000 m <sup>3</sup> /an réparti sur 2 nouveaux forages implantés dans le secteur Sud-Est du SAGE GTI. ....	36
Illustration 19 : Impact sur les niveaux piézométriques d'un prélèvement total de 500 000 m <sup>3</sup> /an réparti sur 2 nouveaux forages implantés dans le secteur Sud-Est du SAGE GTI. ....	37
Illustration 20 : Impact sur les niveaux piézométriques d'un prélèvement de 250 000 m <sup>3</sup> /an sur 1 nouveau forage implanté dans le secteur Sud-Est du SAGE GTI. ....	38
Illustration 21 : Impact sur les niveaux piézométriques d'un prélèvement de 125 000 m <sup>3</sup> /an sur 1 nouveau forage implanté dans le secteur Sud-Est du SAGE GTI. ....	39



# 1. Introduction

Le modèle hydrogéologique de la nappe des Grès du Trias inférieur (GTI) est développé par le BRGM avec le logiciel MARTHE du BRGM (Thiéry, 2015). Le modèle concerne principalement la nappe sur toute sa partie captive et sur sa partie libre dans le bassin houiller.

A la suite de l'actualisation du modèle hydrogéologique de la nappe des GTI dans le département des Vosges effectuée en 2013 (Vaute *et al.*, 2013), il est apparu le besoin de pouvoir prévoir l'impact, sur les cours d'eau et sur la nappe libre des GTI, de la création de nouveaux forages en limite de la nappe captive des GTI, dans le périmètre du SAGE GTI.

En effet, dans la version 2013 du modèle, cette limite est modélisée sur la majorité de son linéaire comme une limite à niveau constant. Or, cette condition à la limite n'est pas adaptée si des prélèvements importants sont implantés à proximité immédiate des affleurements : le modèle ne peut pas donner d'indication sur l'impact de ces nouveaux forages sur le niveau de la nappe libre, ni sur le débit de la nappe drainé par les cours d'eau.

Par ailleurs, cette condition à la limite ne permet pas non plus de définir les volumes maximums prélevables dans le secteur Sud-Est du SAGE GTI.

La modification du modèle actualisé en 2013 consiste donc à :

- étendre le modèle dans sa partie sud-est de manière à modéliser les premiers bassins versants en nappe libre recoupés par la limite des affleurements des grès ;
- inclure une modélisation simple des échanges nappe-rivière dans la partie de nappe libre nouvellement incluse dans le modèle, afin de calculer un indicateur de l'impact d'un nouveau prélèvement en nappe captive dans le secteur Sud-Est du SAGE GTI sur les débits d'étiage des cours d'eau.



## **2. Extension du périmètre du modèle régional au secteur Sud-Est du SAGE GTI**

### **2.1. DEFINITION DE LA NOUVELLE LIMITE SUD-EST DU MODELE**

Le modèle hydrogéologique régional a été initialement construit avec un maillage comportant des mailles carrées de 500 m de côté (Vaute *et al.*, 2007, cf. Illustration 1). Il a été par la suite raffiné sur le périmètre du SAGE du bassin houiller grâce à l'introduction dans le maillage principal d'un maillage gigogne à mailles de 50 m de côté (Guillemoto *et al.*, 2018, cf. Illustration 2). Le même procédé a été mis en œuvre dans le cadre de la présente étude : un maillage gigogne à mailles de 50 m de côté a été introduit dans le département des Vosges, de manière à couvrir le périmètre du SAGE GTI et à englober totalement les premiers bassins versants recoupant la limite entre la nappe sous couverture et la nappe libre des GTI. Le nouveau périmètre du modèle GTI inclut ainsi les bassins versants hydrographiques du Madon de sa source jusqu'à Bagnécourt, du Coney de sa source jusqu'à Fontenoy le Château et de la Saône de sa source jusqu'à sa confluence avec le Coney (Illustration 3). De nouveaux secteurs ont été définis dans le modèle étendu (Illustration 4).

### **2.2. CONVERSION DU MODELE DANS LE SYSTEME DE COORDONNEES LAMBERT 93**

Le modèle régional existant était construit dans le système de coordonnées Lambert 2 étendu (EPSG :27572). Il a été converti dans le système de coordonnées Lambert 93 en mètres (EPSG :2154), de manière à respecter la norme française actuelle et à faciliter les échanges de données avec les différents producteurs. Ce travail de grande ampleur a nécessité de reconstruire intégralement l'ensemble des fichiers numériques constituant le modèle régional des GTI.

### **2.3. MODIFICATION DU NOMBRE DE COUCHES DU MODELE**

Le nombre de couches du modèle régional a augmenté de 1 à 4 couches, afin d'assurer la cohérence avec les travaux de modélisation en cours sur le secteur du bassin houiller. Ces couches sont inactives en dehors du bassin houiller et du secteur Sud-Est du SAGE GTI. Dans ce dernier les tests de calibration et l'examen exhaustif des données géologiques et hydrogéologiques disponibles dans la Banque de données du Sous-Sol (BSS) du BRGM ont montré l'importance de considérer une couche d'alluvions semi-perméables dans les vallées amont du Madon et de l'Ilion et de leurs affluents, ainsi que dans les vallées de la Saône amont (Illustration 5). Ces couches pourront si nécessaire être activées plus largement dans une future version du modèle.

### **2.4. MODIFICATION DU TOIT ET DU SUBSTRATUM DE L'AQUIFERE**

Le toit et le substratum de l'aquifère des GTI ont été entièrement redéfinis par interpolation des données de la banque de données du sous-sol du BRGM. Cette phase a représenté une somme de travail importante en raison de la complexité de la structure géologique dans le secteur du SAGE GTI étendu aux affleurements.



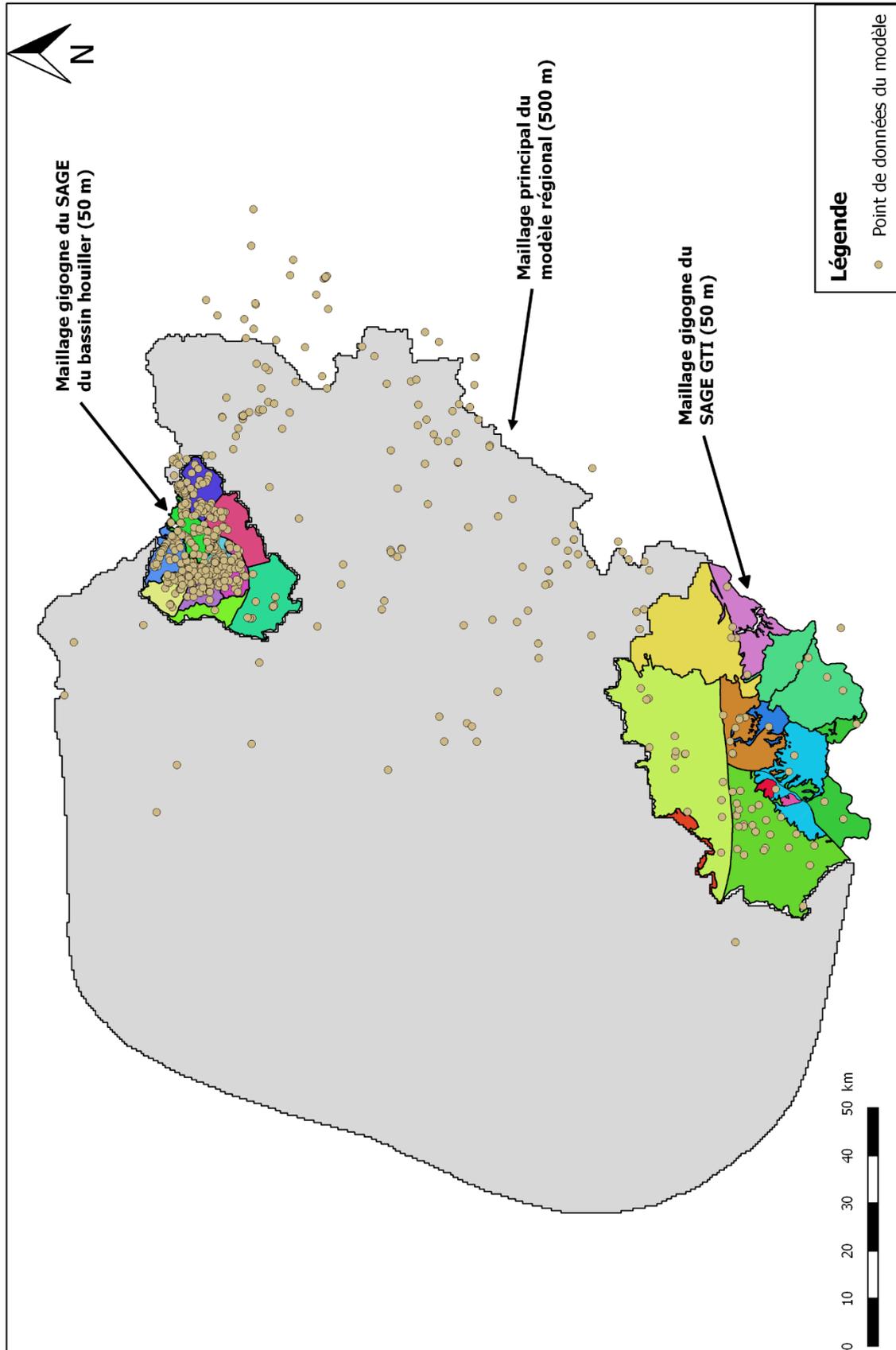


Illustration 2 : Nouveau périmètre du modèle régional et situation des maillages gigognes.

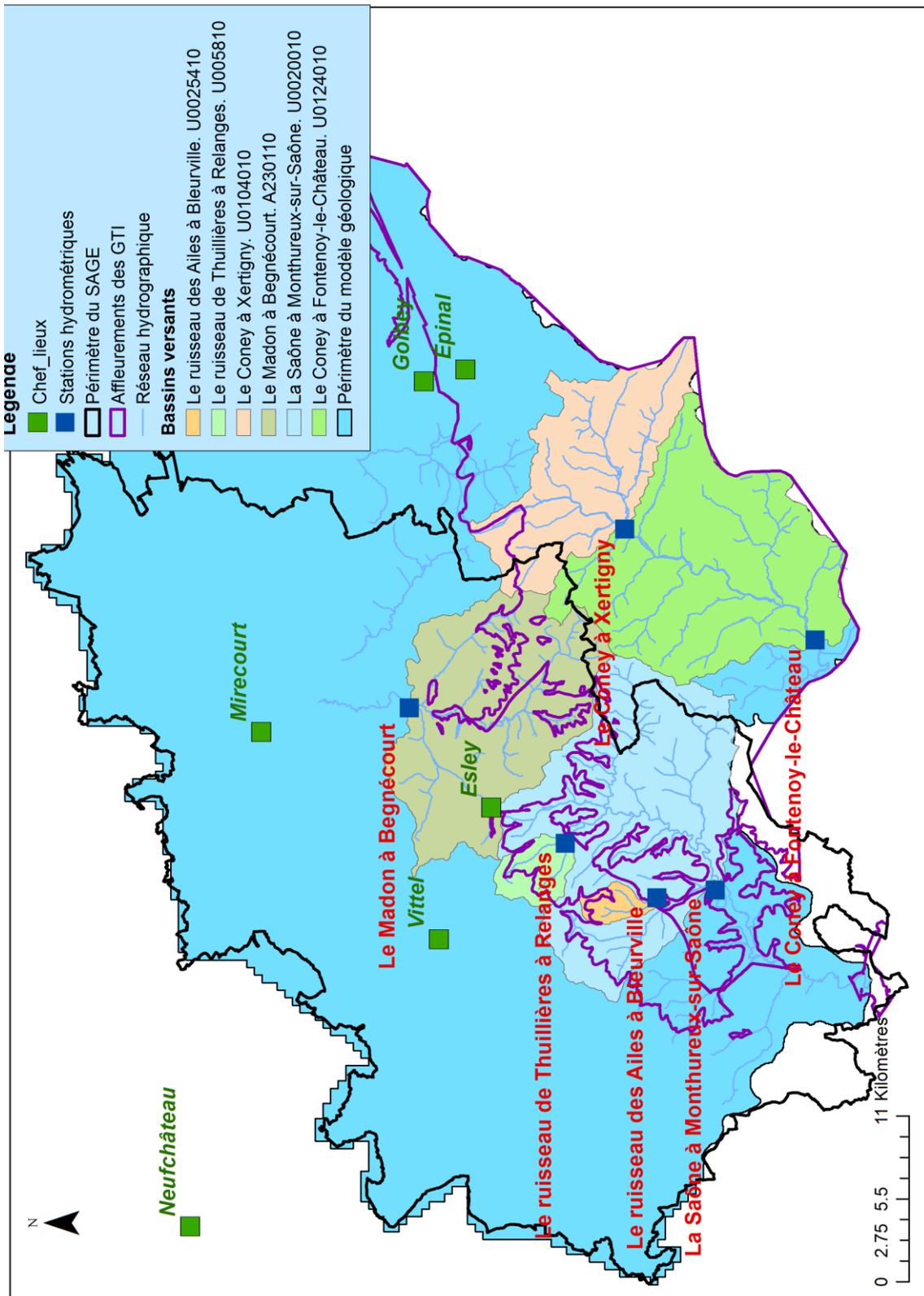


Illustration 3 : Extension du modèle GTI aux affleurements dans les Vosges.

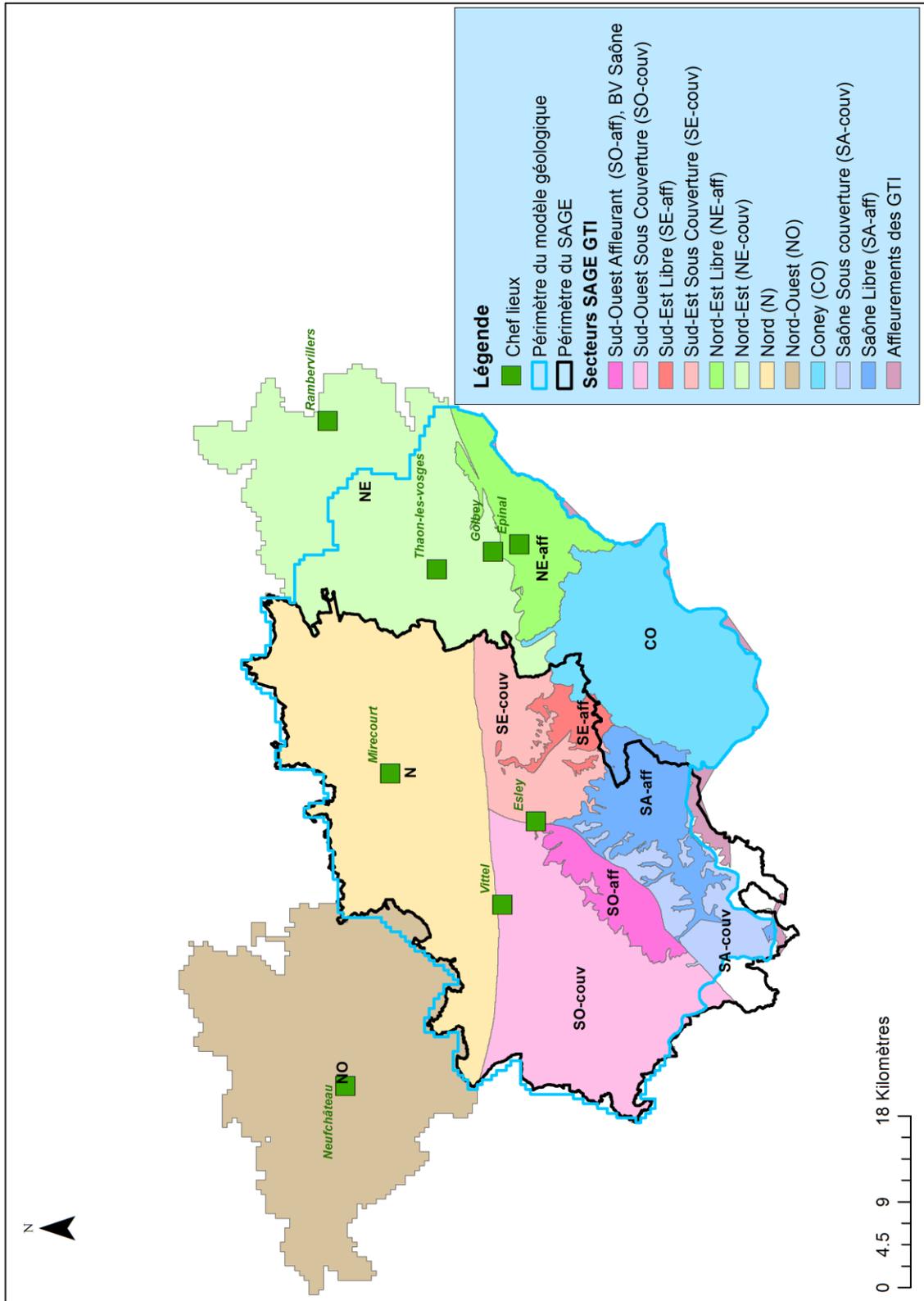


Illustration 4 : Secteurs du SAGE GTI.

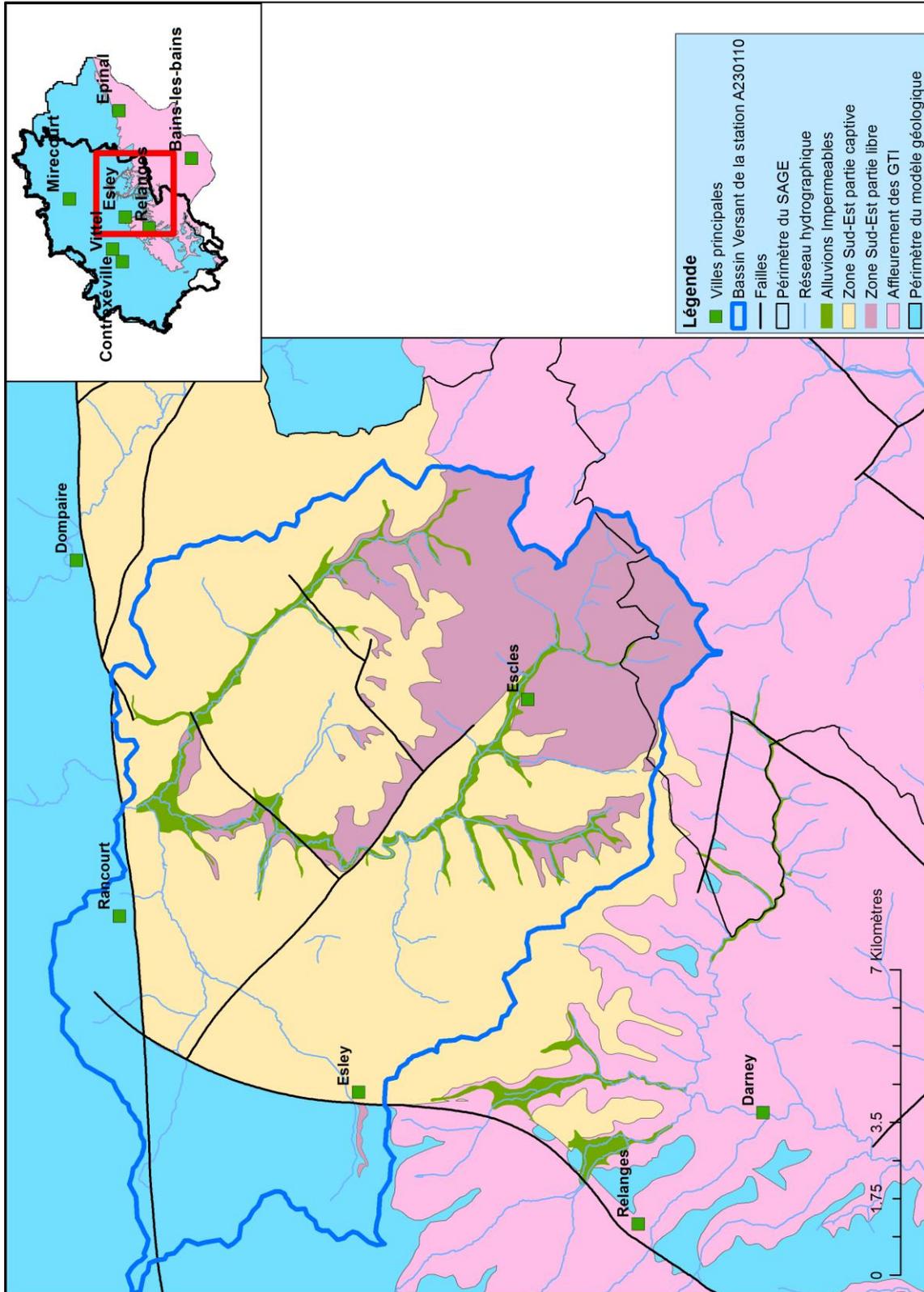


Illustration 5 : Alluvions semi-perméables prises en compte dans le modèle étendu.

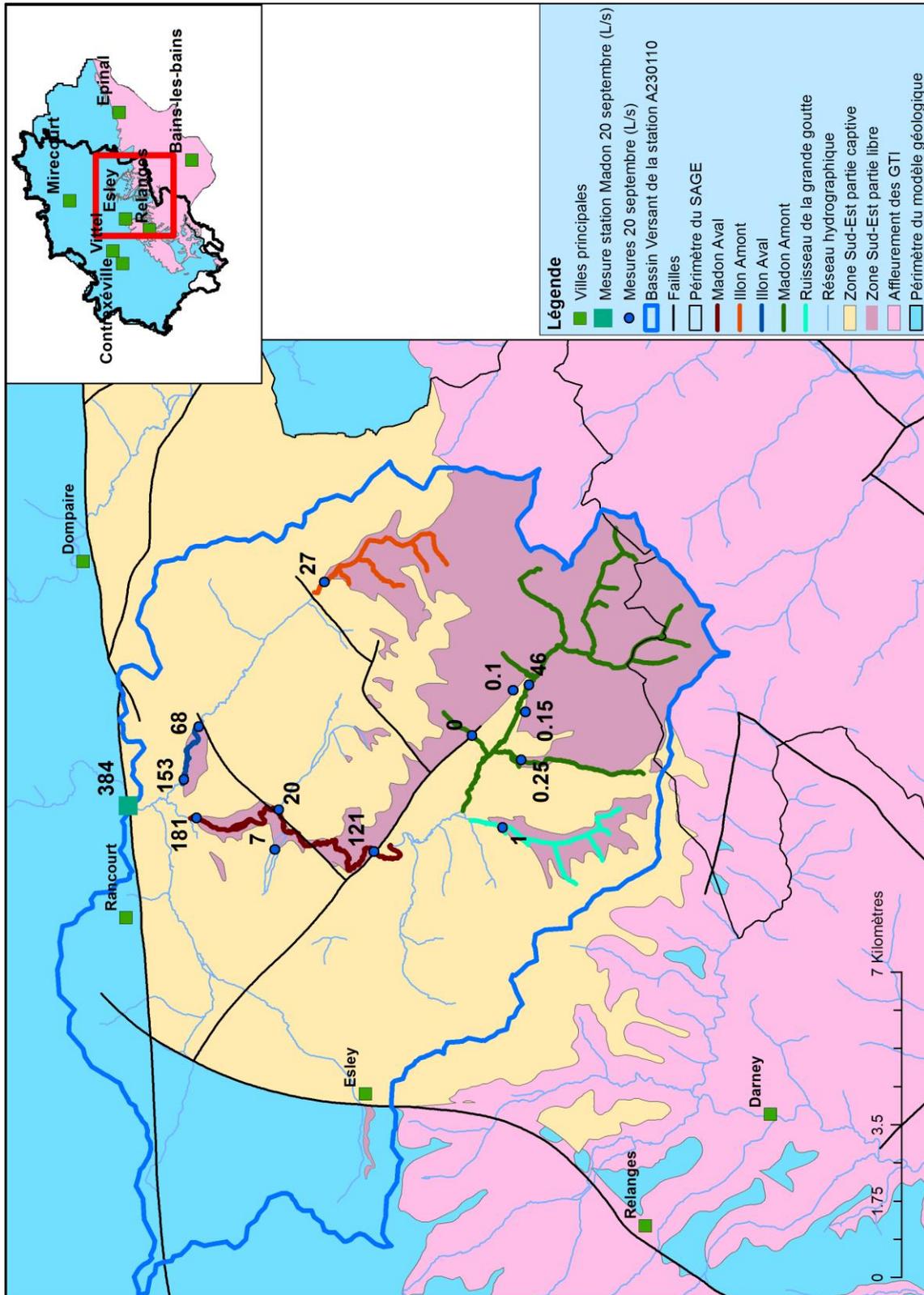


Illustration 6 : Résultats de la campagne de jaugeages du 20/09/2016 dans le secteur Sud-Est.

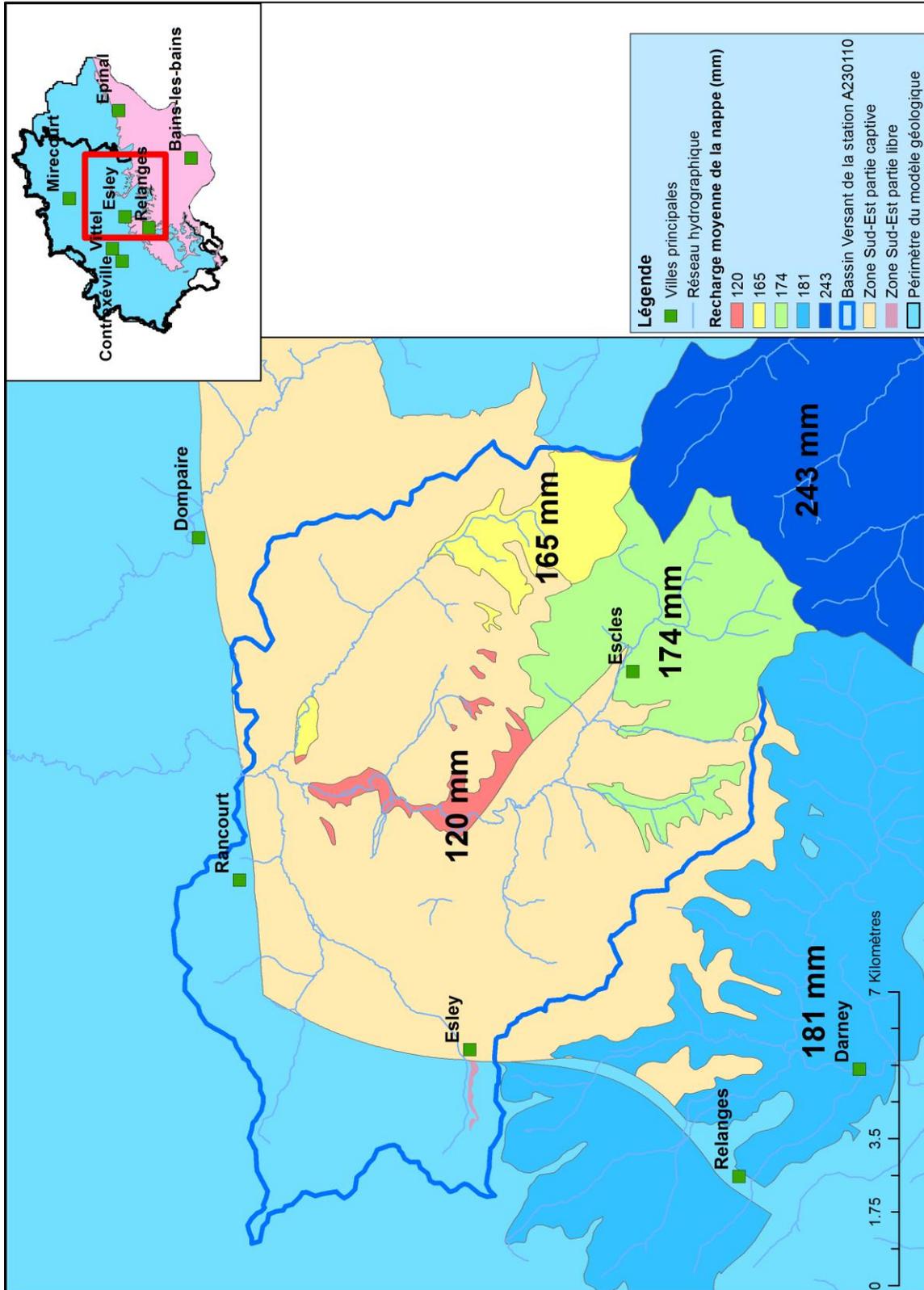


Illustration 7 : Moyenne interannuelle de l'infiltration calculée pour le secteur Sud-Est.

## **2.5. MODIFICATION DE LA TAILLE DE MAILLE SUR LE TERRITOIRE DU SAGE GTI ET SUR LES NOUVEAUX AFFLEUREMENTS MODELISES**

La taille de maille du modèle initialement de 500 m sur le territoire du SAGE GTI et sur les nouveaux affleurements modélisés a été diminuée à 50 m afin d'améliorer la précision des rendus sur le territoire du SAGE GTI.

## **2.6. COLLECTE DE DONNEES**

Le modèle initial était actualisé avec des données datant de 2010.

Les nouvelles données nécessaires à la modélisation ont été recherchées sur le nouveau périmètre du modèle se situant dans le département des Vosges jusqu'à la fin de l'année 2013. Les données collectées sont les suivantes :

- données de suivi piézométrique des points de la nappe des GTI appartenant au réseau piézométrique de bassin Rhin-Meuse ;
- données des campagnes piézométriques de la nappe des GTI de 2010 et 2012 ;
- autres données piézométriques ponctuelles présentes dans la BSS ou présentes dans les rapports d'exploitations des producteurs d'eau potable ou industrielle ;
- données de volumes annuels prélevés (jusqu'à fin 2013) compilés par les Agences de l'eau Rhin-Meuse et Rhône-Méditerranée-Corse ;
- données de pluie, évapotranspiration potentielle et température Météo-France ;
- données des 6 stations hydrométriques existantes sur les bassins versants hydrographiques à modéliser (cf. situation géographique des stations sur l'illustration 3 et liste des stations sur l'illustration 8) ;
- débits d'étiage mesurés le 20 septembre 2016 sur les bassins versants du Madon et de l'Ilon à l'amont de leur confluence (Illustration 6) ;
- données du catalogue des débits d'étiage permettant d'obtenir un ordre de grandeur du débit de drainage en d'autres points du réseau hydrographique.

Ces données ont été traitées et mises en forme sous la forme de fichiers numériques pouvant être intégrés dans le modèle étendu.

<b>Code de la station</b>	<b>Libellé de la station</b>	<b>Localisation de la station</b>	<b>Hauteurs : données disponibles</b>	<b>Débits : données disponibles</b>
<b>U0005810</b>	<b>Le ruisseau de Thuillières à Relanges</b>	Vosges (88)	1968 - 1999	1968 - 1999
<b>U0020010</b>	<b>La Saône à Monthureux-sur-Saône</b>	Vosges (88)	1986 - 2017	1987 - 2017
<b>U0025410</b>	<b>Le ruisseau des Ailes à Bleurville</b>	Vosges (88)	1968 - 1989	1968 - 1989
<b>U0104010</b>	<b>Le Coney à Xertigny</b>	Vosges (88)	1976 - 2017	1973 - 2017
<b>U0124010</b>	<b>Le Coney à Fontenoy-le-Château</b>	Vosges (88)	1986 - 2017	1987 - 2017
<b>A5230110</b>	<b>Le Madon à Begnécourt [Heucheloup]</b>	Vosges (88)	2010 - 2017	2010 - 2017

*Illustration 8 : Liste des 6 stations hydrométriques existantes sur les affleurements des GTI dans le périmètre du modèle étendu.*

### **3. Calibration du modèle étendu sur les nouveaux secteurs Sud-Est du SAGE GTI**

L'ensemble du secteur Sud-Est du SAGE GTI (nappe libre et nappe sous couverture) ainsi que tous autres secteurs d'affleurements des grès nouvellement pris en compte dans le modèle étendu ont été calibrés avec la meilleure précision possible compte tenu des données disponibles : la démarche adoptée pour calibrer l'ensemble des nouveaux secteurs est présentée dans ce chapitre, avec une attention particulière portée sur les résultats obtenus pour le secteur Sud-Est.

#### **3.1. CALCUL DE L'INFILTRATION VERS LA NAPPE**

##### **3.1.1. Méthodologie**

L'infiltration d'eau de pluie sur la totalité des affleurements des grès du modèle étendu a été calculée par une méthode de bilan hydrologique prenant en compte l'évapotranspiration potentielle calculée par l'équation de Thornthwaite pour des mailles carrées de 8 km x 8 km au pas de temps journalier. L'infiltration est ensuite recalculée par bassin versant en calculant la moyenne des valeurs d'infiltration de chacune des mailles carrées de 8 km x 8 km qui intersectent le bassin versant, la moyenne étant pondérée par la proportion de surface de chaque maille carrée se trouvant dans le bassin versant.

L'infiltration calculée atteint la nappe et s'applique uniquement aux affleurements des niveaux géologiques gréseux compris entre le Muschelkalk inférieur (grès Coquiller) et le grès Vosgien inclus (les GTI incluent tous ces niveaux ; il peut y avoir des variations de perméabilité verticale au sein de l'ensemble de la formation des GTI).

##### **3.1.2. Résultats pour le secteur Sud-Est du SAGE GTI**

Pour le secteur Sud-Est du SAGE GTI, la moyenne interannuelle d'infiltration en mm/m<sup>2</sup> pour chaque zone d'affleurement est présentée sur la carte de l'illustration 7. Les valeurs indiquées sur la carte représentent la quantité d'eau de pluie moyenne qui s'infiltré chaque année dans les grès (recharge de la nappe) après déduction de l'évapotranspiration et du ruissellement qui rejoint directement les cours d'eau.

#### **3.2. CALCUL DU DEBIT DE DRAINAGE DE LA NAPPE LIBRE DES GTI**

##### **3.2.1. Méthodologie**

Dans le nouveau modèle étendu, les relations nappe-rivière ont tout d'abord été modélisées pour la totalité des affleurements des grès sous la forme de « tronçons de cours d'eau », au pas de temps annuel (pas de temps du modèle régional). Cette fonctionnalité du code de calcul MARTHE permet de calculer les débits d'échange nappe-rivière en tout point du réseau hydrographique, dès lors qu'il est défini dans le modèle. Les débits échangés peuvent l'être dans les deux sens, de la nappe vers la rivière (cas général) ou de la rivière vers la nappe (cas d'une rivière perchée ou d'une baisse importante de la nappe sous la rivière).

Toutefois, après les premiers tests de calibration, il est apparu que la mise en œuvre de cette fonctionnalité est pénalisante en termes de temps de calcul, tout en n'apportant pas d'informations suffisamment utiles à la résolution du problème posé. Il a ainsi été préféré de modéliser les relations nappe-rivières uniquement dans le sens nappe → rivière, sous la forme de « mailles de drainage » : ainsi, lorsque le niveau piézométrique dans une maille affleurante dépasse la cote du toit de la maille (qui en nappe libre représente le sol), le débit nécessaire pour ramener le niveau à la cote du toit de la maille est calculé et comptabilisé par le modèle comme débit de drainage qui alimente le cours d'eau.

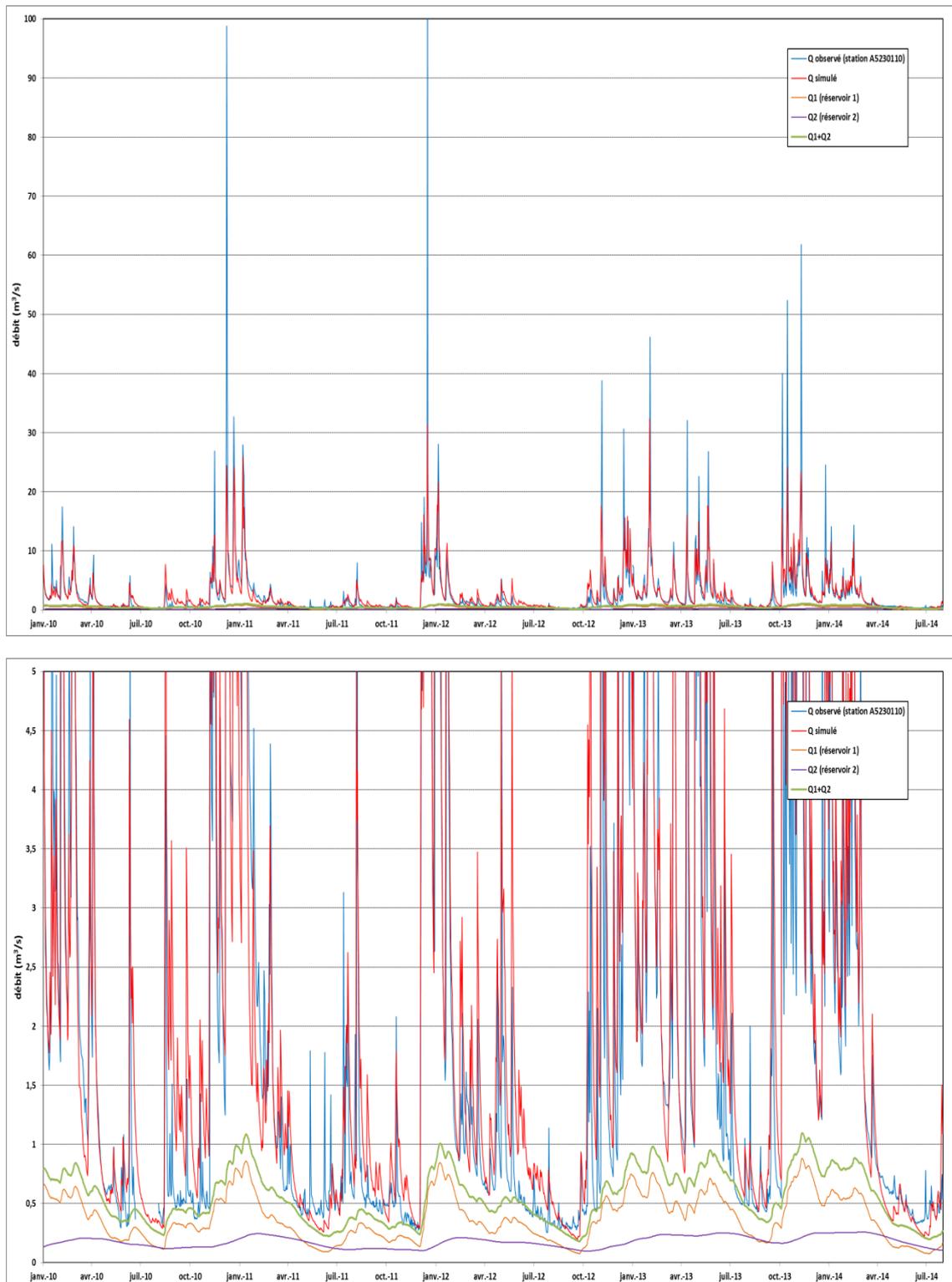
Avec cette approche simplifiée, le débit total s'écoulant dans une rivière (débit de ruissellement + débit de drainage de la nappe) n'est pas calculé par le modèle. Pour comparer les débits drainés calculés par le modèle aux données des stations hydrométriques il est nécessaire de calculer par une autre méthode le débit drainé (débit de base) s'écoulant aux 6 stations hydrométriques disposant de chroniques de débit mesuré dans la rivière. Le logiciel GARDENIA (modélisation globale de bassin versant) a été mis en œuvre à cet effet. Le débit enregistré aux 6 stations a été décomposé en un débit de ruissellement d'une part, et deux débits de drainage souterrain de la nappe d'autre part. Le calcul de décomposition a été effectué au pas de temps journalier. Le volume annuel drainé aux 6 stations a ensuite été calculé, et comparé aux résultats fournis par le modèle de la nappe des GTI, lors de la phase de calage du modèle. Ceci revient à comparer les chroniques de débits drainés par la nappe des GTI calculées par deux types de modèles différents : le modèle maillé MARTHE et les 6 modèles globaux à réservoirs GARDENIA correspondant aux bassins versants des 6 stations hydrométriques.

Après la calibration, chaque modèle hydrologique GARDENIA permet de calculer le débit de drainage de la nappe des GTI à une station hydrologique pour toute période où l'on dispose des données d'entrées qui ont servi à le construire : la pluie, la hauteur de neige, l'ETP et la température. Les débits de drainage ont ainsi été calculés sur toute la période de calibration du modèle hydrogéologique MARTHE (1977-2014), pour les 6 stations hydrologiques disponibles.

### **3.2.2. Résultats pour le secteur Sud-Est du SAGE GTI**

Pour le secteur Sud-Est du SAGE GTI, la carte de l'illustration 9 montre le résultat de calibration GARDENIA obtenu pour la station hydrométrique du Madon A5230110 à Begnécourt. Le meilleur résultat de calibration est obtenu en considérant 3 types d'écoulements : ruissellement, écoulement souterrain lent, écoulement souterrain très lent.

Compte tenu des caractéristiques hydrodynamiques habituelles des deux types d'aquifères constituant le bassin versant du haut Madon (grès poreux et calcaires marneux plus ou moins fracturé et/ou localement karstique), on fait l'hypothèse que le débit souterrain très lent représente essentiellement le drainage de la nappe des GTI, tandis que l'écoulement lent représente le drainage des calcaires du Muschelkalk et ne concerne pas le modèle MARTHE.



*Illustration 9 : Calibration du modèle hydrologique GARDENIA du débit de la station hydrométrique du Madon A5230110 à Begnécourt sur la période 2010-2014 (en bleu le débit mesuré à la station, en rouge le débit total calculé, en orange le débit de drainage souterrain lent, en violet le débit de drainage souterrain très lent, en vert la somme des deux débits de drainage souterrain).*

### 3.3. REPARTITION SPATIALE DU DRAINAGE DE LA NAPPE DES GTI DANS LE SECTEUR SUD-EST

L'objectif est de calculer, pour chaque zone de drainage du secteur Sud-Est du SAGE GTI, une chronique de débit de drainage dérivée de celle de la station de Begnécourt pouvant être utilisée comme chronique de référence et comparée à la chronique de débit de drainage calculée par le modèle hydrogéologique MARTHE.

Pour améliorer la représentativité spatiale du modèle MARTHE dans le secteur Sud-Est, il a été jugé nécessaire d'affiner le calcul pour chaque zone de drainage en utilisant les données d'une nouvelle campagne de jaugeage réalisée par le BRGM le 20 septembre 2016. La carte de l'illustration 7 montre les 5 zones de drainage définies ainsi que les résultats de la campagne de jaugeage. L'illustration 10 montre la chronique des données de débit journalier enregistrée à la station de Begnécourt au mois de septembre 2016.

*Nota bene : après les premiers essais de calibration, la zone du ruisseau de la Grande Goutte n'a plus été considérée comme une zone de drainage, car les alluvions y sont considérées comme imperméables et il ne peut donc pas exister de relations nappe-rivière dans cette zone.*

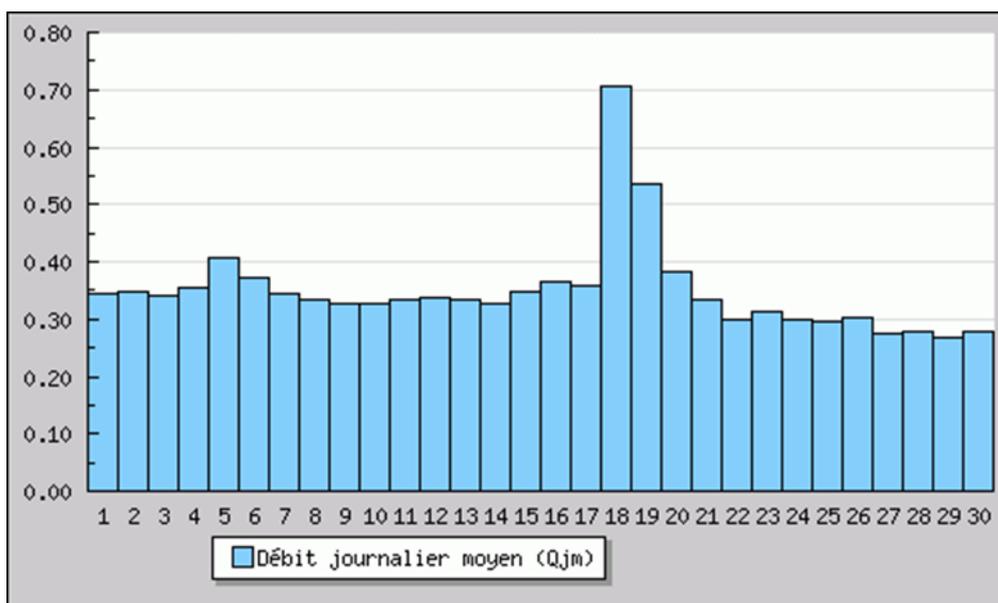


Illustration 10 : Mesures journalières du mois de septembre 2016 (unité de débit en m³/s - source : banque Hydro).

La méthode de calcul spécifique au secteur Sud-Est du SAGE GTI est la suivante :

- Le débit drainé par chaque zone de drainage du secteur Sud-Est est calculé par différence des débits mesurés : « débit aval » moins « débit amont » moins « débit affluents » pour le 20/09/2016 (les points de mesure ont été placés de manière à permettre ce calcul) ;

- La somme de ces débits de drainage par zone donne le débit total « drainage GTI » à la station hydrométrique de Begnécourt : le calcul montre que ce débit représente 50 % du débit d'étiage mesuré à la station ce jour-là ;
- On fait l'hypothèse que ce ratio est représentatif des étiages : chaque année à l'étiage, le débit total provenant des GTI vaudrait alors 50 % de la valeur mesurée à la station ;
- Le modèle Gardenia pour la station de Begnécourt est calibré de manière à ce que ce ratio soit respecté sur les années de calibration (2010-2014) : le débit souterrain très lent représente alors le débit drainé par les GTI à la station, c'est la chronique de référence ;
- Il faut ensuite répartir le débit de cette chronique de référence sur les 4 zones de drainage : on se sert donc du ratio « débit de drainage GTI d'une zone » / « somme des débits de drainage GTI » pour calculer les % à appliquer à la chronique de référence, puis ces % sont appliqués pour calculer les chroniques de référence de chacune des zones de drainage.

- 

#### **3.4. ETABLISSEMENT D'UNE RELATION ENTRE LE DEBIT ANNUEL DE DRAINAGE ET LE DEBIT MINIMUM MENSUEL DE DRAINAGE POUR LA STATION DU MADON A BEGNECOURT**

*Nota bene : la relation discutée dans ce paragraphe n'a pas été appliquée dans le cadre de la présente étude, elle est cependant présentée de manière à orienter les campagnes de mesures et les modélisations qui pourraient être réalisées dans le futur.*

Le pas de calcul du modèle hydrogéologique de la nappe des GTI (modèle MARTHE) est de 1 an, donc le débit de drainage calculé par ce modèle MARTHE est une moyenne annuelle du débit de drainage. Or l'impact d'un pompage sur le débit d'étiage des rivières sera maximal à l'étiage. Il est donc nécessaire d'établir une relation entre le débit moyen annuel de drainage obtenu avec MARTHE et un débit minimum de drainage défini sur une période pertinente pour estimer l'impact de nouveaux prélèvements : *dans une première approche il est proposé de retenir le mois comme période de temps pour calculer ce débit minimum*, compte tenu notamment des contraintes de calcul avec le modèle hydrogéologique, dont certaines simulations pourraient être réalisées avec ce pas de temps.

Il est possible d'établir une telle relation pour le débit de drainage de la nappe des GTI dans le Madon à Begnécourt en utilisant la composante souterraine très lente calculée avec GARDENIA et assimilée au débit de drainage de la nappe des GTI. Pour chaque année de la période de calage du modèle GARDENIA (2010 – 2013), le minimum des débits moyens mensuels est calculé et comparé au débit moyen annuel (Illustration 11).

On obtient donc la relation suivante qui devrait permettre de transformer l'impact annuel calculé par le modèle hydrogéologique MARTHE en un impact mensuel :

$$\text{Débit mensuel minimal drainage GTI Madon} = 0,83 \times (\text{Débit moyen annuel drainage GTI Madon})$$

Toutefois, il faut noter que cette corrélation n'est calculée que sur un très faible nombre d'années, et qu'à ce titre sa signification statistique est faible. C'est pourquoi dans le cadre de cette étude, elle ne sera pas appliquée aux résultats d'impact présentés ci-après, ce qui entraîne de ce point de vue une sous-estimation de l'impact de pompages sur les débits d'étiage des cours d'eau.

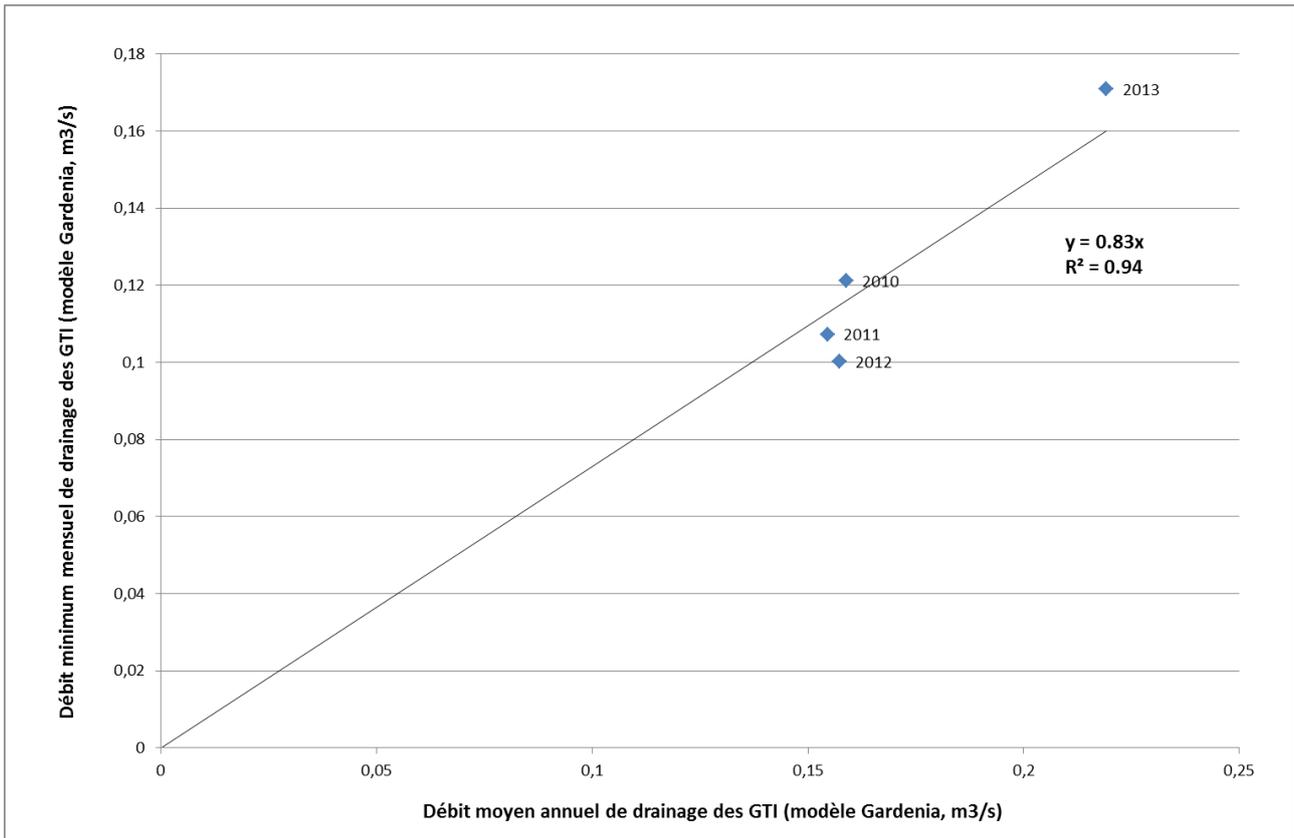


Illustration 11 : Corrélation entre le débit de drainage mensuel minimal et le débit de drainage annuel calculés à l'aide de la composante très lente du modèle Gardenia pour la station hydrométrique du Madon à Begnécourt.

### 3.5. CALIBRATION DES NOUVEAUX SECTEURS DU MODELE ETENDU

#### 3.5.1. Méthodologie

La calibration des paramètres hydrodynamiques concerne pour chaque maille ou zone de mailles :

- la perméabilité (détermine la facilité avec laquelle l'eau peut circuler dans la roche) ;
- le coefficient d'emmagasinement (détermine la quantité d'eau pouvant être stockée dans la nappe lorsqu'elle est captive et sous pression) ;
- la porosité (détermine la quantité d'eau pouvant être stockée dans la nappe lorsqu'elle est libre).

*Nota bene : la recharge (quantité d'eau de pluie qui s'infiltré et alimente la nappe annuellement) pourrait faire aussi l'objet d'un ajustement compte tenu du fait que sa valeur réelle n'est pas connue. Toutefois cette possibilité n'a pas été utilisée jusqu'ici, car on préfère rechercher une calibration satisfaisante en ajustant le minimum possible de paramètres (principe de parcimonie).*

Le travail de calibration a été effectué par essai et erreur, en modifiant par zone les valeurs des paramètres hydrodynamique de manière à ajuster au mieux les chroniques calculées par le modèle MARTHE et les chroniques mesurées (ou calculées par d'autres moyens).

### 3.5.2. Résultats pour le secteur Sud-Est du SAGE GTI

Les cartes de l'illustration 12 et de l'illustration 13 permettent de comparer les chroniques de débit de drainage et de niveau piézométrique calculées par le modèle MARTHE avec les données calculées par des moyens externes (débits de drainage calculés par les modèles GARDENIA, cf. Illustration 12) ou mesurées (niveaux piézométriques, cf. Illustration 13). Sur ces deux cartes les mailles de drainage du modèle MARTHE sont figurées en bleu foncé.

Malgré la recherche la plus exhaustive possible des données existantes, la qualité du calage du secteur Sud-Est ne peut pas être significativement améliorée sans l'apport de nouvelles mesures fiables. On peut notamment constater sur l'illustration 13 qu'il existe une seule chronique piézométrique de référence pour le secteur Sud-Est.

Les principaux enseignements du calage effectué pour le secteur Sud-Est sont résumés ci-après :

- les failles jouent un rôle hydrogéologique prépondérant dans les écoulements du secteur Sud-Est : pour permettre la reproduction simultanée des niveaux piézométriques et des débits de drainage, certaines failles dont celle de Vittel ont dû être considérées comme imperméables ou peu perméables sur tout ou partie de leur linéaire ;
- il est nécessaire de considérer dans les fonds de vallée la présence d'une couche d'alluvions peu perméable voire imperméables pour limiter le débordement des cours d'eau et maintenir les niveaux des points hauts piézométriques : cette couche d'alluvions est modélisée explicitement par l'introduction d'une couche n°1 dans toutes les zones de drainage du secteur Sud-Est et dans certaines zones de drainage du secteur Saône amont ;
- la partie supérieure des grès à l'affleurement semble généralement moins perméable que la partie profonde, au point qu'il existe des piézomètres dont le niveau piézométrique se situe parfois plusieurs dizaines de mètres au-dessus du niveau de la nappe profonde : les piézomètres non représentatifs de la partie profonde sont cerclés de rouge sur la carte de l'illustration 13 ;
- les paramètres hydrodynamiques d'emménagement libre et captifs doivent être ajustés dans le secteur Sud-Est de manière à reproduire à la fois le comportement apparemment peu perméable et peu capacitif de la couche supérieure des grès, qui pourrait déterminer le débit de drainage vers les cours d'eau, et le comportement perméable et capacitif des couches inférieures, qui détermine la réaction de la nappe aux pompages. Dans le modèle actuel, la valeur de l'emménagement libre pour ce secteur est fixée à 4 %, et celle de l'emménagement captif à  $1.10^{-4}$ .
- le calage des débits de drainages est basé sur les chroniques de référence issues de la modélisation hydrologique avec Gardenia (cf. § 1.2.3). On constate sur les graphiques de l'illustration 12 que les débits calculés par Marthe sont supérieurs ou égaux aux débits de référence de chacune des zones de drainage : l'impact des pompages qui pourra être calculé avec ce modèle sera donc surestimé de ce point de vue.

Malgré le manque de données à disposition sur le secteur d'étude, les calculs de tendances prévisionnelles permettent d'obtenir un ordre de grandeur de l'impact de la mise en place de pompages dans le secteur Sud-Est. Il est à noter que l'impact ne peut être estimé au mieux qu'à l'échelle des zones de drainage du secteur Sud-Est.

### **3.5.3. Résultats pour les autres secteurs d'affleurements**

Les cartes de l'illustration 14 et de l'illustration 15 permettent de comparer, pour le bassin versant de la Saône amont, les chroniques de débit de drainage et de niveau piézométrique calculées par le modèle MARTHE avec les données calculées par des moyens externes (débits de drainage calculés par les modèles GARDENIA ou valeurs issues du catalogue des débits d'étiage du bassin Rhin-Meuse) ou les données mesurées (niveaux piézométriques).

Les résultats du calage pour le bassin versant du Coney ne sont pas présentés car d'une part le calage a été réalisé uniquement à partir du débit d'une unique station hydrométrique, et d'autre part ce bassin versant est indépendant du secteur Sud-Est et du bassin versant de la Saône amont, du point de vue des écoulements souterrains et de surface.

SAGE GTI - Secteur Sud-Est

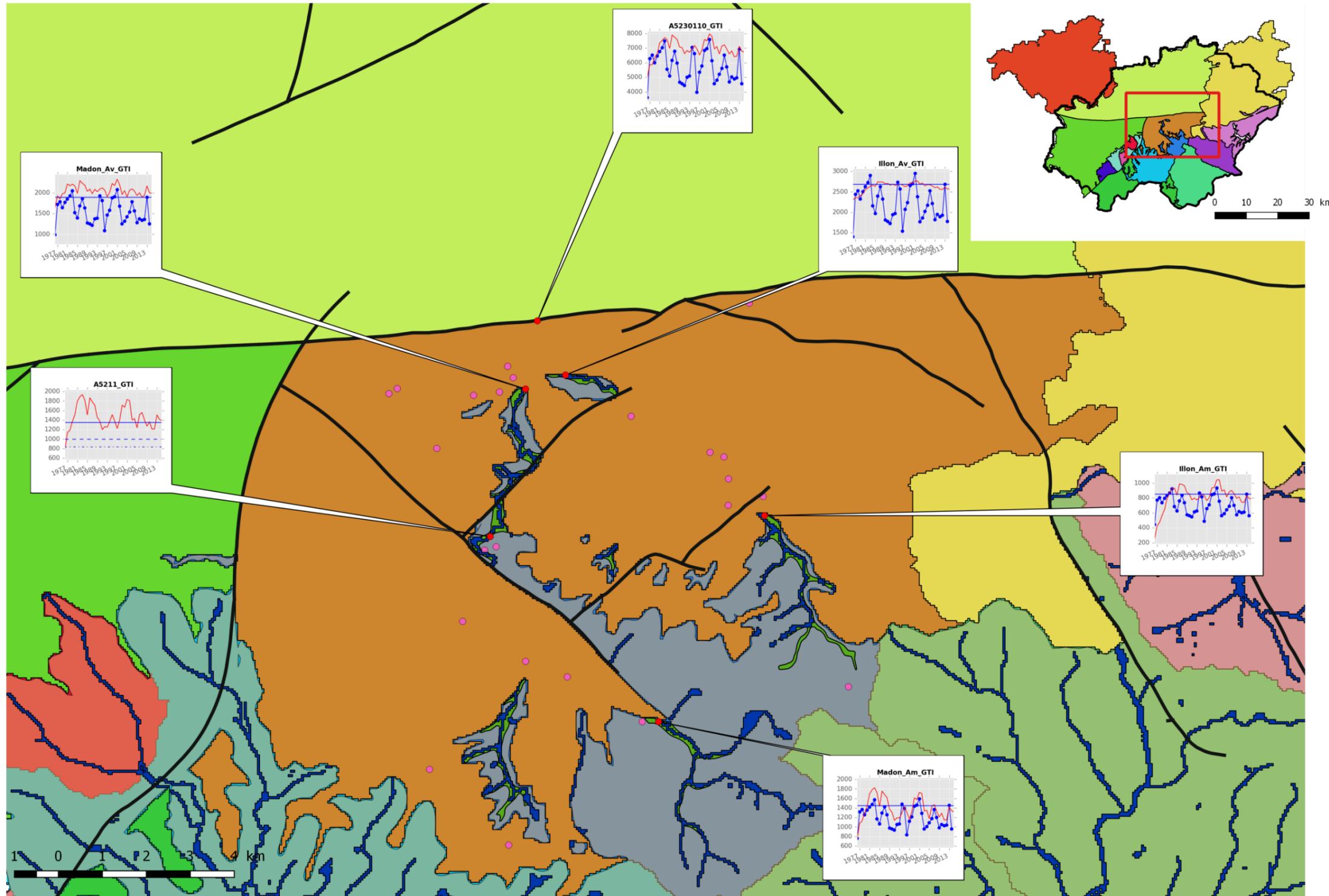


Illustration 12 : Calage des débits de drainage de la nappe des GTI du secteur Sud-Est du SAGE GTI (graphiques : unités de débit en m³/s, en bleu les débits de référence calculés à l'aide du modèle hydrologique GARDENIA, en rouge les débits calculés par le modèle hydrogéologique MARTHE).

SAGE GTI - Secteur Sud-Est

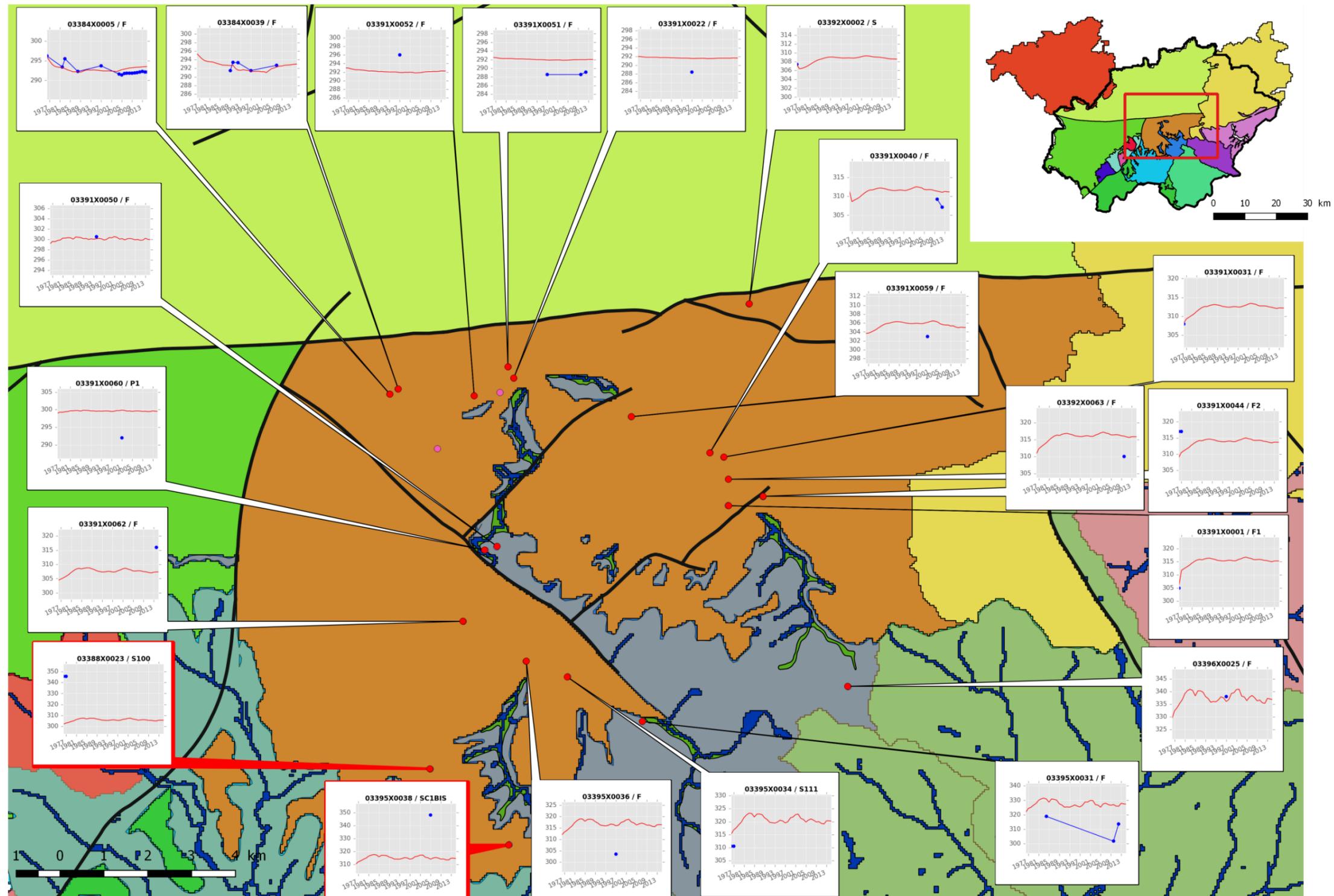


Illustration 13 : Calage des niveaux piézométriques du secteur Sud-Est du SAGE GTI  
(graphiques : niveaux en mètres, en bleu les niveaux mesurés, en rouge les niveaux calculés par le modèle, les graphiques des piézomètres non représentatifs sont cerclés de rouge).

SAGE GTI - Secteur Bassin Versant Saône

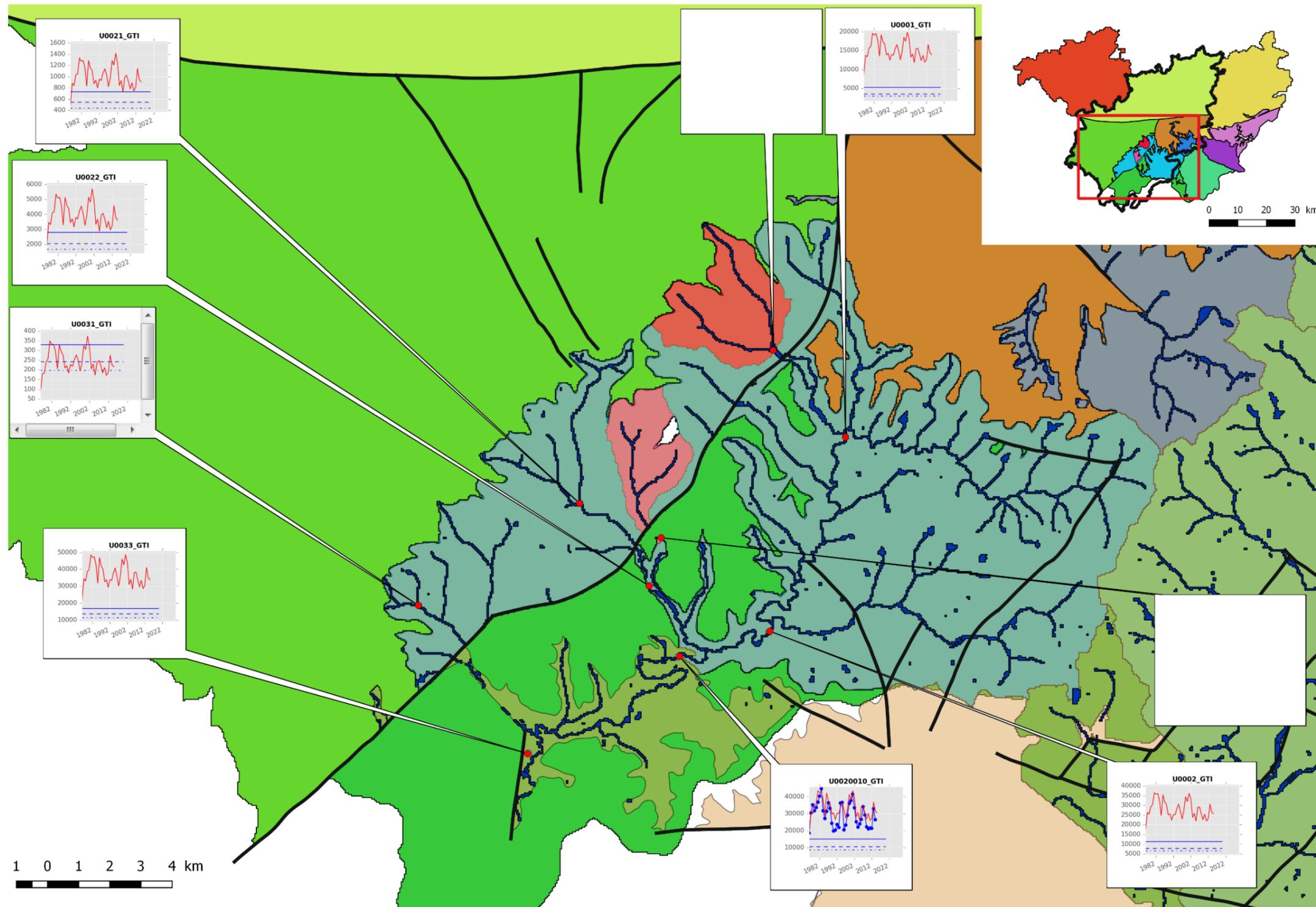


Illustration 14 : Calage des débits de drainage de la nappe des GTI du bassin versant de la Saône amont (graphiques : unités de débit en m³/s, en bleu les débits de référence calculés à l'aide du modèle hydrologique GARDENIA ou issus du catalogue des débits d'étiage du bassin Rhin-Meuse, en rouge les débits calculés par le modèle hydrogéologique MARTHE).

### SAGE GTI - Secteur Bassin Versant Saône

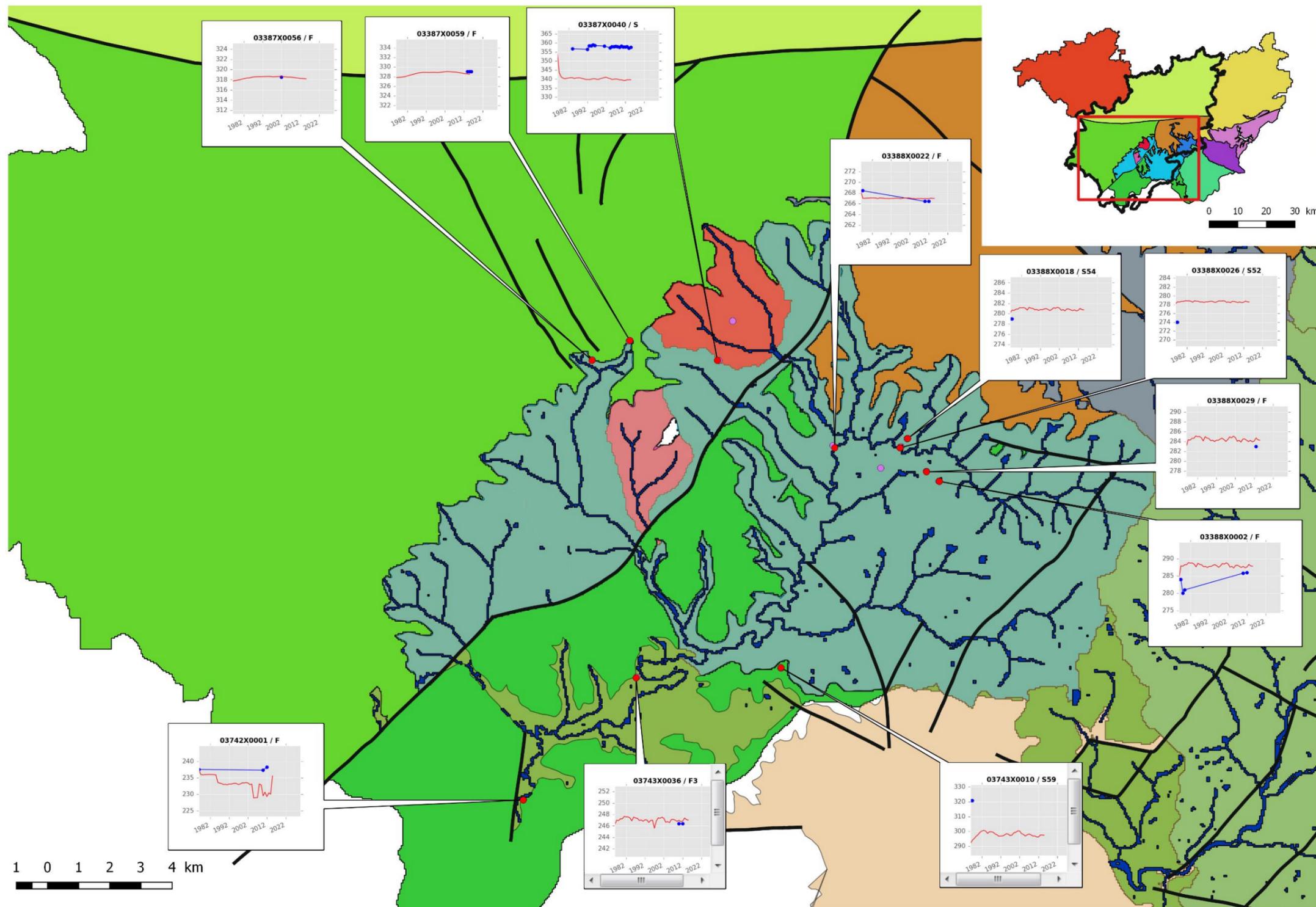


Illustration 15 : Calage des niveaux piézométriques du bassin versant de la Saône amont  
(graphiques : niveaux en mètres, en bleu les niveaux mesurés, en rouge les niveaux calculés par le modèle, les graphiques des piézomètres non représentatifs sont cerclés de rouge).

## **4. Estimation de l'impact d'un nouveau prélèvement dans le secteur Sud-Est du SAGE GTI**

### **4.1. CONDITIONS DES SIMULATIONS**

Quatre simulations ont été réalisées, visant à calculer l'impact de la mise en place d'un ou deux forages sur le débit de drainage des cours d'eau et sur les niveaux piézométriques du secteur Sud-Est et de la Saône amont.

Ces simulations ont été réalisées en choisissant une simulation de référence issue des tests de calage, puis en refaisant les calculs sur la même période et avec les mêmes paramètres, le seul changement étant l'introduction d'un ou de deux pompages dans le secteur Sud-Est au début de la simulation. Le calcul de l'impact se fait ensuite en comparant les résultats de la simulation de référence « sans pompage supplémentaire » à chaque simulation « avec pompage de substitution ».

Les conditions de simulation sont les suivantes :

- la période de simulation correspond à la période de calage, qui s'étend de l'année 1977 à l'année 2015 ;
- la simulation de référence est la meilleure simulation de calage obtenue ;
- le ou les pompages sont mis en place au début de la période de simulation, soit dès l'année 1977, à un débit constant ;
- l'année de référence pour calculer l'impact est la dernière année de la période de simulation (1977-2015), ce qui permet de calculer l'impact des pompages au bout de 39 ans ; en considérant une année plutôt sèche (2015) ;
- le débit total de pompage testé varie entre 125 000 et 1 000 000 m<sup>3</sup>/an selon la simulation, ce débit total de pompage étant réparti à parts égales sur les 2 forages le cas échéant.

### **4.2. RESULTATS DES SIMULATIONS**

#### **4.2.1. Estimation de l'impact sur les débits d'étiage des cours d'eau du secteur Sud-Est**

Dans le secteur Sud-Est et le secteur Saône amont, le débit moyen annuel d'étiage des zones de drainage de la nappe des GTI baisserait de 0,1 % à 9 % selon les simulations (tableau de l'illustration 16). Les zones de drainage considérées sont les zones figurant sur les cartes de l'illustration 5 et de l'illustration 6.

*Nota bene : le débit de référence permettant le calcul du % d'impact est le débit moyen annuel d'étiage de la simulation de référence pour l'année 2015 qui est représentative d'une année sèche. Ce débit d'étiage est égal au débit de drainage de la nappe des GTI pour les zones Madon amont, Illon amont et Saône amont. Il est égal au double du débit de drainage pour les zones Madon aval et Illon aval (cf. § 3.3 : Répartition spatiale du drainage de la nappe des GTI dans le secteur Sud-Est).*

Zones de Drainage	Débit d'étiage de référence (2015) en m3/an	Impact au bout de 39 ans (1977-2015)	1 000 000 m3/an avec 2 forages	500 000 m3/an avec 2 forages	250 000 m3/an avec 1 forage	125 000 m3/an avec 1 forage
Madon amont	-1315647	Baisse du drainage (m3/an)	-18613	-9335	-3754	-1873
		Pourcentage de baisse (%)	1,4	0,7	0,3	0,1
Madon aval	-3973279	Baisse du drainage (m3/an)	-358954	-179565	-81213	-40610
		Pourcentage de baisse (%)	9,0	4,5	2,0	1,0
Illon amont	-789606	Baisse du drainage (m3/an)	-13159	-6446	-2879	-1463
		Pourcentage de baisse (%)	1,7	0,8	0,4	0,2
Illon aval	-5130620	Baisse du drainage (m3/an)	-94890	-47095	-26616	-13292
		Pourcentage de baisse (%)	1,8	0,9	0,5	0,3
Saône amont	-14183830	Baisse du drainage (m3/an)	-315330	-157928	-71564	-32090
		Pourcentage de baisse (%)	2,2	1,1	0,5	0,2

*Illustration 16 : Impact calculé sur les zones de drainage des secteurs Sud-Est et Saône amont (les valeurs de débits apparaissant dans ce tableau sont calculées par le modèle hydrogéologique MARTHE).*

#### 4.2.2. Estimation de l'impact sur les niveaux piézométriques du secteur Sud-Est

Les impacts calculés sont présentés sous la forme d'isolignes de baisse du niveau piézométrique – par rapport à la simulation de référence – autour du(des) nouveau(x) point(s) de pompage pour chacune des 4 simulations réalisées (cf. les 4 cartes de l'illustration 18 à l'illustration 21).

Pour le prélèvement le plus élevé (1 million de m<sup>3</sup>/an en continu pendant 39 ans sur 2 nouveaux forages), le rabattement maximal au bout de 39 ans peut atteindre 17 m aux points de pompage et 8 m à proximité des ouvrages de pompage.

Le rabattement se propage au secteur sud-ouest en nappe captive par l'intermédiaire de la faille de Relanges car cette dernière est semi-perméable dans la configuration actuelle du calage.

A très long terme (2050), le niveau piézométrique de la nappe des GTI baisserait de 0 à 3,6 m au niveau des forages exploités les plus proches des points de pompage simulés, dans les secteurs Sud-Est et Sud-Ouest (cf. tableau de l'illustration 17).

<b>Numéro BSS</b>	<b>Nom de l'ouvrage</b>	<b>Simulation 1 million m<sup>3</sup>/an</b>	<b>Simulation 500 000 m<sup>3</sup>/an</b>	<b>Secteur</b>
03384X0039	Forage de Valfroicourt	3.6 m	1.8 m	Sud-Est
03391X0059	Forage de Gelvécourt	0.2 m	0 m	Sud-Est
03391X0040	Forage du Rupt d'Aille	0.2 m	0 m	Sud-Est
03395X0031	Forage d'Escles	0.3 m	0.2 m	Sud-Est
03383X0042	Forage 7 Vittel	1 m	0.5 m	Sud-Ouest

*Illustration 17 : Impact calculé sur les forages d'exploitation les plus proches des nouveaux forages.*

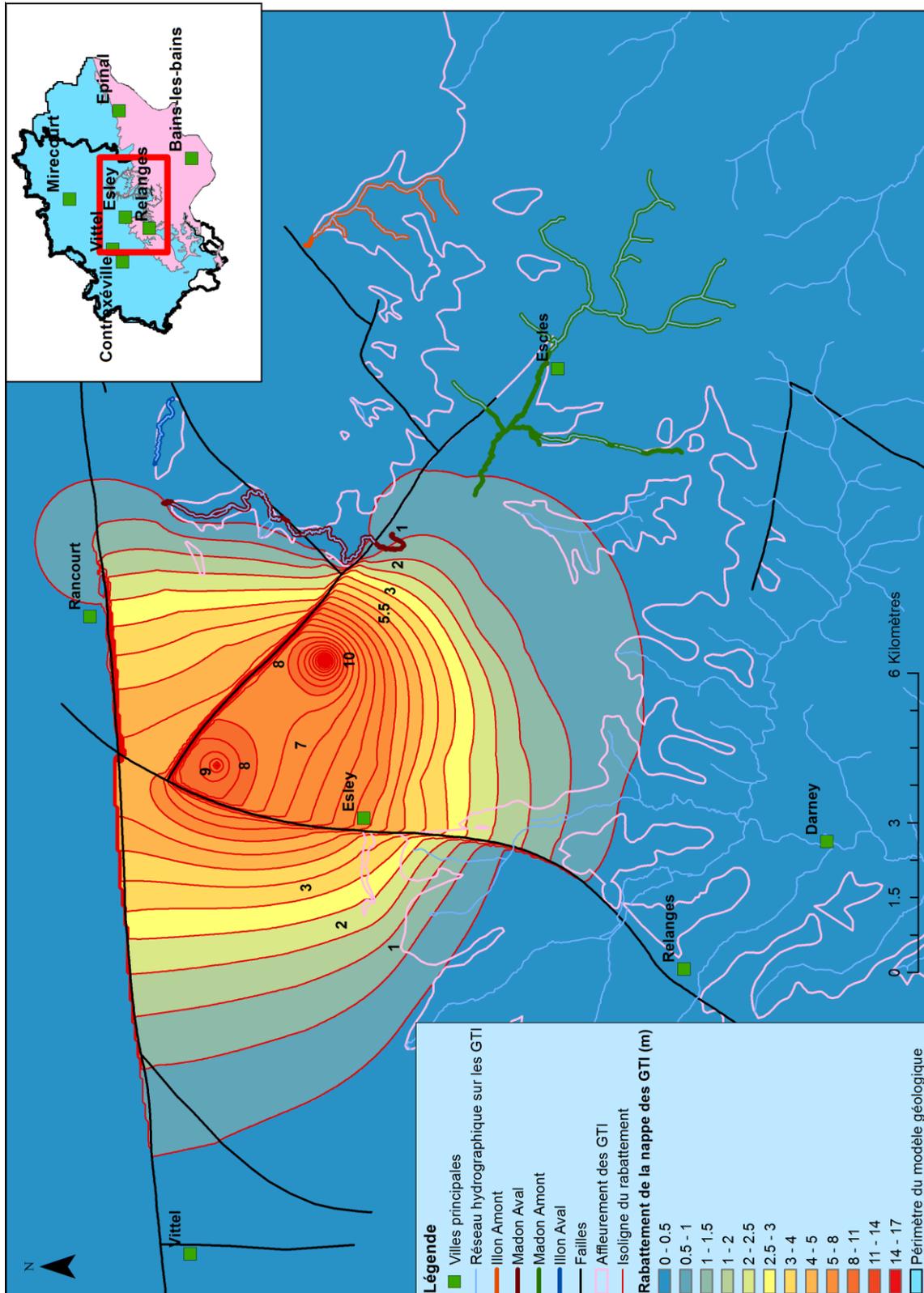


Illustration 18 : Impact sur les niveaux piézométriques d'un prélèvement total de 1 000 000 m<sup>3</sup>/an réparti sur 2 nouveaux forages implantés dans le secteur Sud-Est du SAGE GTI (baisse en mètres).

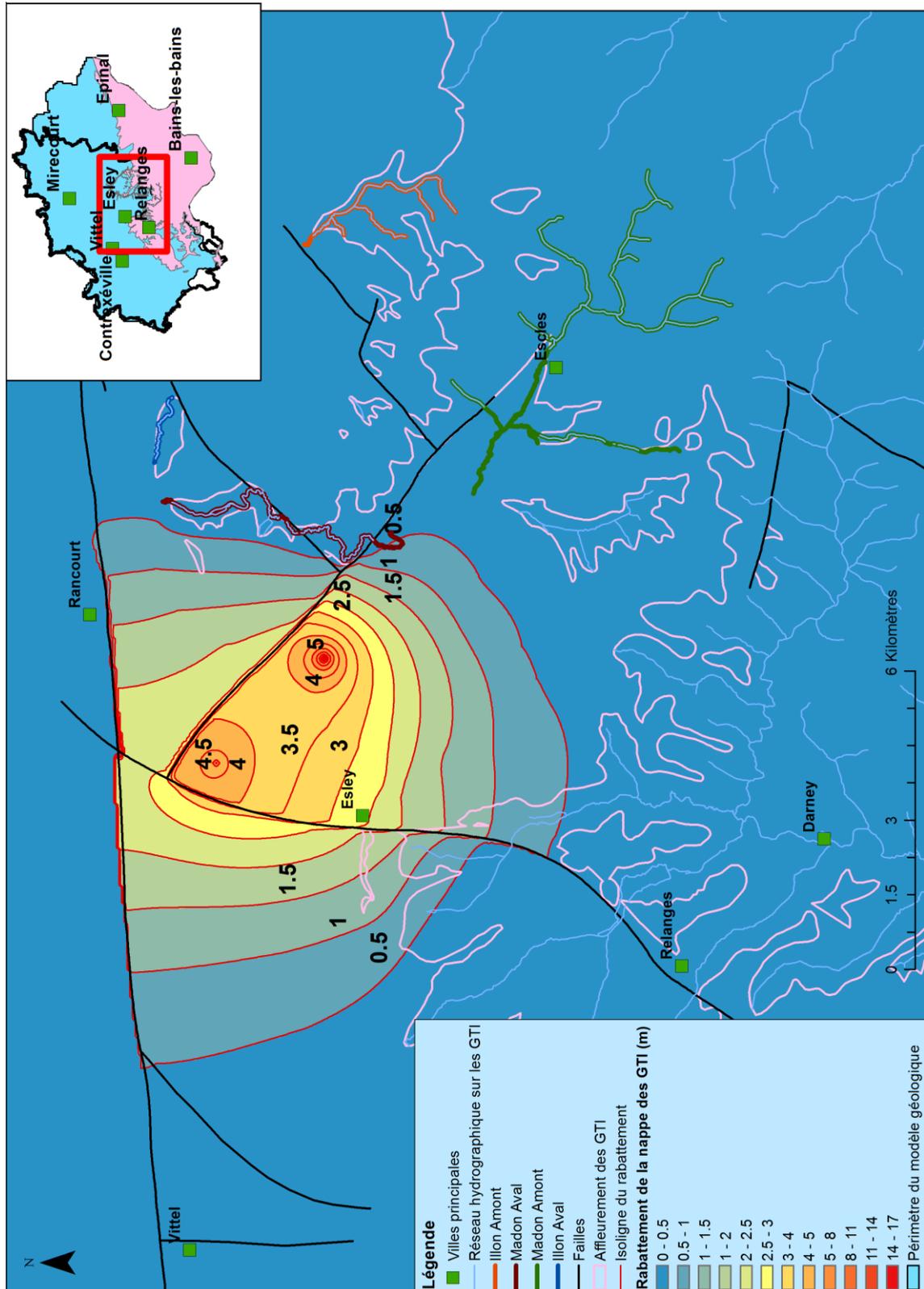


Illustration 19 : Impact sur les niveaux piézométriques d'un prélèvement total de 500 000 m<sup>3</sup>/an réparti sur 2 nouveaux forages implantés dans le secteur Sud-Est du SAGE GTI (baisse en mètres).

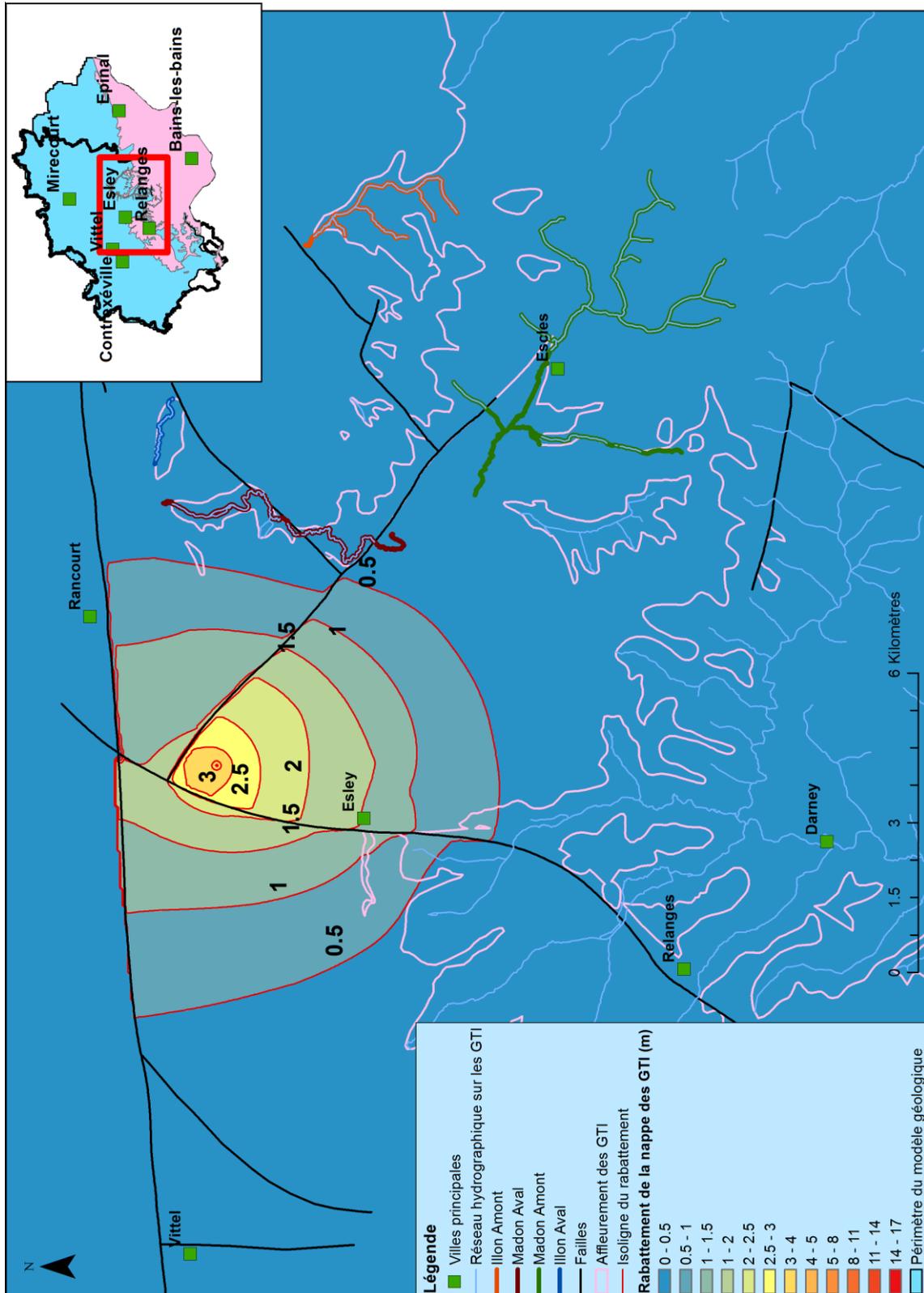


Illustration 20 : Impact sur les niveaux piézométriques d'un prélèvement de 250 000 m<sup>3</sup>/an sur 1 nouveau forage implanté dans le secteur Sud-Est du SAGE GTI (baisse en mètres).

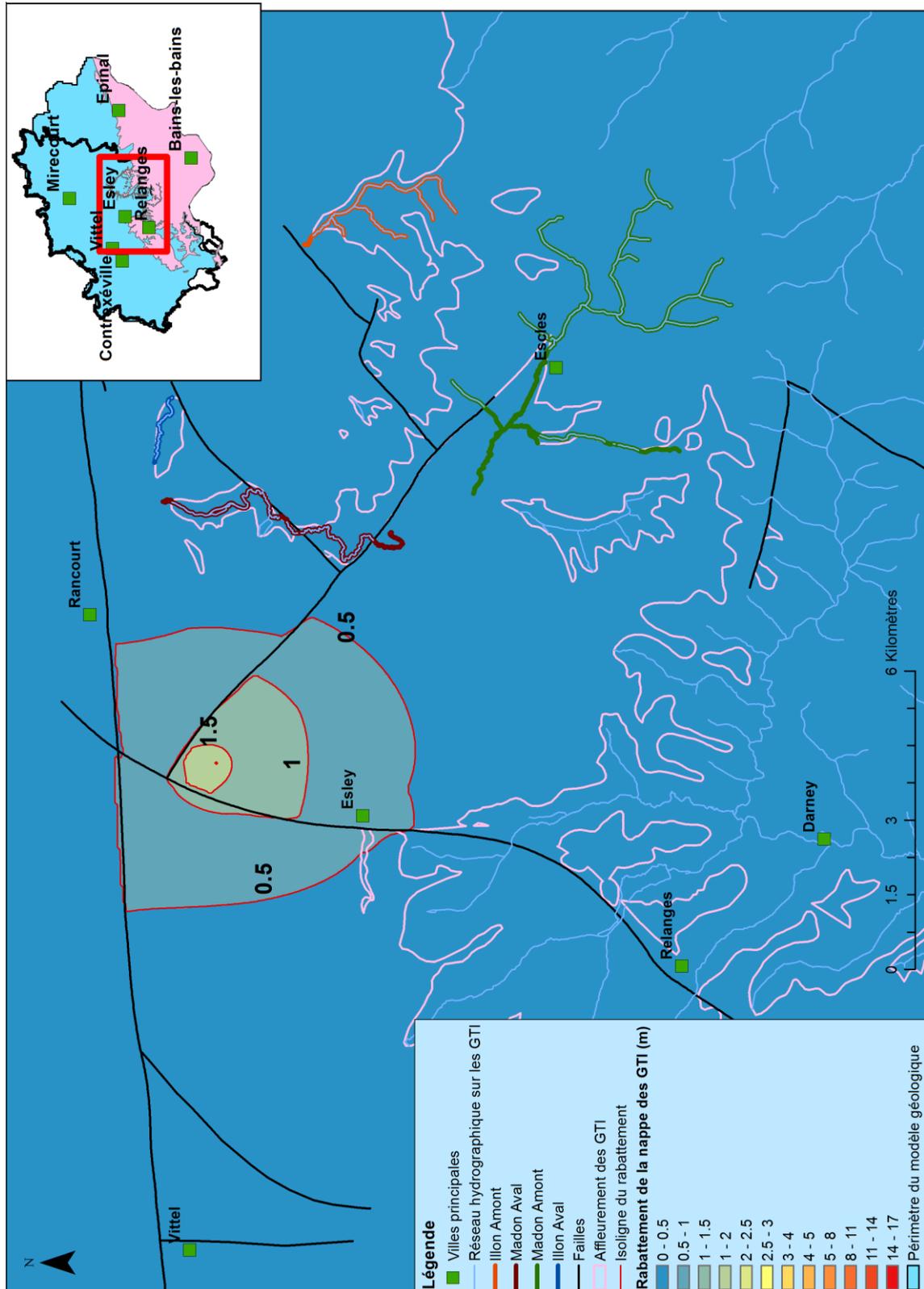


Illustration 21 : Impact sur les niveaux piézométriques d'un prélèvement de 125 000 m<sup>3</sup>/an sur 1 nouveau forage implanté dans le secteur Sud-Est du SAGE GTI (baisse en mètres).



## 5. Conclusion

Le modèle hydrogéologique régional de la nappe des grès du Trias a été étendu vers le sud-est du département des Vosges de manière à englober totalement les premiers bassins versants recoupant la limite entre la nappe sous couverture et la nappe libre des GTI. De nouveaux secteurs ont été définis dans le modèle étendu, et les nouvelles zones d'affleurement des grès prises en compte dans le modèle ont été calées sur les données existantes (niveaux piézométriques et débits de cours d'eau).

Les parties libres et sous couverture de la nappe dans le secteur Sud-Est du SAGE GTI ont fait l'objet d'une attention particulière lors des phases de recherche de données, de construction du modèle et de calage des paramètres hydrodynamiques. Le calage a montré que les failles jouent un rôle hydrogéologique prépondérant en raison de leur caractère souvent imperméable ou semi-perméable, que la présence d'une couche d'alluvions peu perméables voire imperméables dans les fonds de vallée peut limiter le drainage de la nappe dans certaines zones voire provoquer l'artésianisme de la nappe des GTI, et que la partie supérieure des grès à l'affleurement est souvent moins perméable que la partie profonde.

Les simulations réalisées avec le modèle hydrogéologique de la nappe des GTI étendu aux affleurements dans les Vosges ont permis d'estimer l'impact à long terme (39 ans) d'un nouveau prélèvement dans le secteur Sud-Est réparti sur un ou deux nouveaux forages :

- le débit moyen annuel d'étiage des zones de drainage de la nappe des GTI baisserait de 0,1 % à 9 % selon la zone de drainage et l'importance du prélèvement (125 000 m<sup>3</sup>/an à 1 million de m<sup>3</sup>/an) ;
- le niveau piézométrique de la nappe des GTI baisserait au maximum de 0 à 3,6 m au niveau des forages exploités les plus proches des points de pompage simulés, selon la distance au nouveau prélèvement et l'importance du prélèvement (125 000 m<sup>3</sup>/an à 1 million de m<sup>3</sup>/an).

Ces estimations ne tiennent pas compte de l'éventuelle modulation saisonnière du régime de pompage qui pourrait être mise en œuvre afin de diminuer l'impact sur les débits d'étiage des cours d'eau.

Pour préciser ces estimations d'impact par simulation prévisionnelle à l'aide du modèle hydrogéologique, l'acquisition de données visant l'amélioration des connaissances est nécessaire, notamment sur les points suivants :

- perméabilité des failles de Relanges et de Vittel à la limite des secteurs Sud-Est d'une part, et des secteurs Sud-Ouest et Nord d'autre part ;
- relations nappes-rivières (perméabilité des alluvions notamment) dans les secteurs potentiellement impactés par d'éventuels nouveaux pompages de substitution ;
- évolution temporelle des niveaux piézométriques dans le temps ;
- évolution temporelle des débits d'étiage dans chaque zone de drainage ;
- connaissance des débits biologiques des zones potentiellement impactées les plus fragiles.

Le volume prélevable dans le secteur Sud-Est ne pourra être calculé qu'à condition que les conséquences sur l'état des masses d'eau de surface impactées par ce prélèvement soient déterminées précisément, notamment en termes de débit biologique minimum à réserver dans les zones les plus fragiles.

## 6. Bibliographie

**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.

**Thiéry D.** (2015) – Code de calcul MARTHE – Modélisation 3D des écoulements dans les hydrosystèmes - Notice d'utilisation de la version 7.5. Rapport BRGM/RP-64554-FR, 306 p., 150 fig. <http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-64554-FR.pdf> (Accès Mars 2016).

**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., 71 ill., 3 ann.

**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, 56 p., 20 fig., 4 ill.





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

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