



MEMOIRE DE STAGE

Réalisation d'une carte piézométrique et intérêts dans la délimitation des aires d'alimentation de captages

Maître de Stage : **Clément DONEY**

Aglaé GUISSADO – promotion 2015

Sommaire

Sommaire.....	2
Listes des tableaux & des figures	3
Remerciements	4
Présentation du BRGM.....	5
Introduction	1
I- Données piézométriques et aires d'alimentation de captage	2
1) Qu'est-ce qu'une carte piézométrique.....	2
2) Qu'est-ce qu'une étude d'aire d'alimentation de captage	3
II- Matériels et méthodes.....	8
1) Contexte et présentation de la zone d'étude	8
2) Préparation et déroulement de la campagne de terrain.....	12
3) Traitement des données	16
4) Méthode de réalisation d'une carte piézométrique.....	17
III- Résultats	21
1) La carte piézométrique de la zone d'étude	21
2) La carte piézométrique recentrée sur les communes où se trouvent les études d'AAC	23
3) Analyse de la carte piézométrique.....	24
4) Incertitudes et limites.....	26
IV- Comparaison avec les études d'AAC choisies.....	28
1) Comparaison avec l'étude AAC de Charentenay	28
2) Comparaison avec l'étude AAC de Courson-les-Carières	30
3) Comparaison avec l'étude AAC de Druyes-les-Belles-Fontaines.....	32
4) Synthèse de ces comparaisons.....	34
Conclusion.....	35

Listes des tableaux & des figures

Tableau 1 : Grandes phases de l'élaboration d'une étude AAC (Vernoux et al., 2014).....	4
Tableau 2 : Présentation des 3 études AAC.	5
Figure 1 : Coupe représentant une AAC en contexte de nappe libre (Vernoux et al., 2014).	3
Figure 2 : Situation géographiques des 3 sources prises pour illustrer les études AAC.....	6
Figure 3 : Localisation de la zone d'étude.	8
Figure 4 : Carte géologique harmonisée centrée sur la zone d'étude.....	10
Figure 5 : Présentation des points de mesures potentiels avant la campagne terrain.	13
Figure 6 : Carte à l'échelle communale réalisée pour la campagne de terrain.....	14
Figure 7 : Une partie du matériel utilisé lors de la campagne de mesures.	14
Figure 8 : Mesure du niveau piézométrique dans un puits communal à Cravant (89).	15
Figure 9 : Histogramme représentant la variable "niveau de la surface piézométrique en m NGF"	17
Figure 10 : Direction moyenne du variogramme avec le modèle ajusté.	18
Figure 11 : Coupe représentant en noir la surface topographique et en bleu la surface piézométrique (tracé de la coupe sur la carte ci-contre).....	19
Figure 12 : Coupe réalisée sur le même modèle que la figure 9 (en noir la surface topographique, en bleu la surface piézométrique).	20
Figure 13 : Carte piézométrique de l'aquifère des calcaires et des marnes du Dogger-Jurassique supérieur du Nivernais nord et de l'aquifère des calcaires du Jurassique supérieur correspondant à l'aquifère de l'Albien-Néocomien entre Loire et Yonne.....	22
Figure 14 : Carte piézométrique centrée sur Charentenay, Courson-les-Carières et Druyes-les-Belles-Fontaines.....	23
Figure 15 : Carte piézométrique annotée.....	24
Figure 16 : Carte piézométrique annotée zoomée.	25
Figure 17 : Nuage de corrélation entre surface piézométrique (ZNAP) et surface topographique (Z050).	27
Figure 18 : Aire d'Alimentation du Captage de la Fontaine sous le Vau d'après le bureau d'études.....	28
Figure 19 : AAC de la Fontaine sous le Vau délimité par le bureau d'études sur fond de la carte piézométrique.	29
Figure 20 : Aire d'Alimentation du Captage de la Source des Glonds d'après le bureau d'études.	30
Figure 21 : AAC de la Source des Glonds délimité par le bureau d'études sur fond de la carte piézométrique.	31
Figure 22 : Aire d'Alimentation du Captage de la Source de Gulène d'après le bureau d'études.....	32
Figure 23 : AAC de la Source de Gulène délimité par le bureau d'études sur fond de la carte piézométrique.	33

Remerciements

Je tiens à remercier toutes les personnes qui m'ont permis de faire de ces 6 mois de stage à la direction régionale Bourgogne du BRGM une réussite, et qui m'ont aidé lors de la rédaction de ce rapport.

Tout d'abord, mes remerciements vont à mon maître de stage, Mr Clément DONEY, ingénieur d'études et hydrogéologue au BRGM qui m'a accueilli. Le temps passé à m'épauler et ses conseils ont été précieux pour la rédaction de ce rapport, mais également pour la préparation de nos campagnes de terrain et pour l'avancement du projet de réalisation de cartes piézométriques.

Je tiens également à remercier Mr Philippe AMIOTTE SUCHET de l'Université de Bourgogne pour son travail lors de la recherche de stage de ses étudiants. C'est en effet grâce à l'une des offres qu'il nous a transmis que j'ai pu décrocher mon stage au BRGM. De plus, je le remercie de son aide pour la définition du sujet de ce rapport et de ses idées pour le plan.

Je remercie chaleureusement toute l'équipe du BRGM de Dijon pour leur aide, de près ou de loin, et également pour les bons moments passés pendant ces 6 mois. Je remercie particulièrement Pierre-Antoine DAUBIGNEY et Guillaume DUYCK pour leur investissement dans mon travail.

Présentation du BRGM

Le Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) est un établissement public qui porte la mission de service géologique national français. A ce titre, il est une référence dans toutes les sciences de la Terre, ainsi qu'en matière de gestion des risques et des ressources du sol et du sous-sol. Il compte aujourd'hui plus de 1000 employés, pour un montant total des activités de près de 142 millions d'Euros. Créé en 1959 par décret, il est sous la régie des Ministères de l'Education nationale, de l'Enseignement supérieur et de la Recherche, de l'Ecologie, du Développement durable et de l'Energie et de l'Economie, de l'Industrie et du Numérique. C'est un Etablissement Public à caractère Industriel et Commercial (EPIC).

Le BRGM a 4 objectifs majeurs qui sont :

- comprendre les phénomènes géologiques et les risques associés,
- développer des méthodologies et des techniques nouvelles,
- produire et diffuser des données pour la gestion du sol, du sous-sol et des ressources,
- mettre à disposition les outils nécessaires à la gestion du sol, du sous-sol et des ressources, à la prévention des risques et des pollutions, aux politiques de réponse au changement climatique.

Ses missions s'organisent autour de la recherche scientifique, l'appui aux politiques publiques, la coopération internationale, la sécurité minière et la formation ; et cela dans différents domaines. Ces domaines sont principalement la géologie, l'eau, les ressources minérales, les risques, l'environnement et l'écotechnologie, la géothermie, le stockage géologique du CO₂, la partie laboratoire et expérimentation, les systèmes d'information, l'après-mine, la formation.

Le centre scientifique et technique du BRGM est implanté à Orléans (Loiret 45), mais 27 antennes régionales permettent de travailler avec les partenaires locaux (DREAL, ARS, DDT, Agences de l'eau...) en ayant des échanges de proximité. L'agence de Dijon est la direction régionale de Bourgogne. 6 personnes y travaillent, épaulées par 1 alternant et 4 stagiaires. Les activités sont multiples : cartographie géologique, alimentation de la Banque de données du Sous-Sol (BSS), accueil et information de tous publics, gestion des risques naturels et gestion de l'eau. La gestion de l'eau passe par le réseau de suivi piézométrique régional de Bourgogne qui permet de connaître le niveau des nappes bourguignonnes, l'appui aux services de l'Etat en charges de la Police de l'Eau, un partenariat académique et l'actualisation des synthèses hydrogéologiques.

C'est dans ce dernier volet, l'actualisation des synthèses hydrogéologiques, que se place le projet sur lequel j'ai travaillé au sein du BRGM Bourgogne, et qui a été le support de ce rapport de stage. Ce projet est sous la tutelle de Clément DONEY, hydrogéologue en charge des questions de l'eau au BRGM Bourgogne, et également mon maître de stage.

Introduction

La direction régionale du BRGM en Bourgogne a été mandatée par l'Agence de l'Eau Seine-Normandie pour réaliser une carte piézométrique de deux masses d'eau : la masse d'eau souterraine 4061 correspondant à l'aquifère des calcaires et des marnes du Dogger-Jurassique supérieur du Nivernais nord et une partie de la masse d'eau souterraine 3217 correspondant aux calcaires du Jurassique supérieur (Albien-Néocomien) entre Loire et Yonne. Ce projet a pour but de mieux connaître l'aquifère des calcaires du Jurassique supérieur et moyen dans cette zone, et ainsi mieux comprendre son fonctionnement. C'est un projet qui entre dans les missions du BRGM d'appui aux politiques publiques en matière de compréhension du fonctionnement des hydrosystèmes complexes.

L'aquifère des calcaires du Jurassique supérieur et moyen étudié dans cette zone est un aquifère karstique, principalement capté pour l'alimentation en eau potable, et plus rarement pour l'irrigation ou l'industrie. Les données piézométriques acquises sur cet aquifère permettront de tracer une carte piézométrique qui sera une référence dans le secteur, peu étudié par le passé. Les sens d'écoulement, les axes de drainage et les aires d'alimentation pourront être identifiés.

Dans ce rapport, nous nous demanderons en quoi une carte piézométrique permet-elle d'améliorer la pertinence d'études d'Aire d'Alimentation de Captages (AAC). En effet, plusieurs études de ce type ont été menées dans le secteur jusqu'alors, bien qu'il n'y ait aucune carte piézométrique de référence. Celle réalisée apportera donc des informations nouvelles.

La première partie de ce rapport sera consacrée à la définition du sujet, elle apportera des informations sur ce qu'est une carte piézométrique et ce que sont les études d'AAC. La seconde partie « matériels et méthodes » présentera les moyens mis en œuvre pour réaliser la carte piézométrique demandée par l'Agence de l'Eau. La troisième partie détaillera les résultats obtenus, et pour finir la quatrième partie comparera les études d'AAC avec la carte piézométrique réalisée.

I- Données piézométriques et aires d'alimentation de captage

1) Qu'est-ce qu'une carte piézométrique

Le niveau piézométrique correspond au niveau atteint par l'eau d'une nappe souterraine en un point et à un instant donné. La piézométrie, quant à elle, est la mesure de la profondeur de la surface de la nappe. Elle peut être exprimée soit en mètres par rapport au sol, soit en mètres NGF (Nivellement Général Français) par rapport à l'altitude 0 du niveau de la mer.

Une carte piézométrique est une carte qui permet de visualiser les niveaux d'eau dans le sous-sol. Ces niveaux sont représentés par des courbes d'égale altitude, ou hydroisohypses, qui rejoignent les niveaux piézométriques identiques ; elles sont tracées grâce à des méthodes d'interpolations. Une carte piézométrique est donc une représentation spatiale des niveaux piézométriques. Elle se présente classiquement avec les hydroisohypses tracés sur un fond blanc et entourés par les limites de la nappe d'eau ou de l'aquifère étudié. Dans certains cas, un fond en dégradé noir et blanc ou de couleur représentant les variations entre les hydroisohypses peut être ajouté pour plus de précision, ou encore un fond IGN pour une meilleure localisation.

Une fois réalisées, les cartes piézométriques permettent de mieux comprendre l'hydrogéologie et l'hydrologie de la zone qu'elles représentent.

En effet, leur analyse permet de (Brugeron A., 2012) :

- Réaliser une analyse morphologique de la surface piézométrique, en traçant les lignes de courant et les principaux axes de flux. Cela permet d'identifier les sens d'écoulement de l'eau souterraine grâce aux gradients hydrauliques de la nappe
- Etudier la structure de l'aquifère et évaluer sa capacité, c'est-à-dire ses réserves potentielles en eau
- Connaître la distribution spatiale des stocks d'eau et des axes de drainage
- Identifier les aires d'alimentation pour ainsi connaître le régime d'alimentation de l'aquifère et les relations de la nappe avec la surface
- Analyser les fluctuations de la surface piézométrique pour suivre leur évolution dans le temps et ainsi prévoir l'évolution des niveaux piézométriques pour pouvoir par exemple surveiller le niveau d'une nappe exploitée. De plus, l'analyse de ces fluctuations permet de déterminer des cycles de recharge et de vidange de la nappe (hautes et basses eaux)
- Savoir si la nappe est perturbée par un pompage
- Comblent les vides de mesures par interpolation

L'interprétation globale des cartes structurales et piézométriques conduit à l'identification des zones favorables à l'implantation des captages. Elle contribue également à la prescription des mesures de protection de la qualité des eaux souterraines captées pour l'alimentation humaine. D'une manière générale, leur usage est très vaste et elles sont utiles à partir du moment où on veut connaître plus précisément le comportement hydrologique d'un aquifère ou d'une nappe en particulier. Elles visent un public très large, allant de l'Agence de l'Eau qui veut caractériser en détails son bassin, à l'agriculteur souhaitant connaître les ressources dont il dispose.

La carte présentée dans ce rapport a permis d'avoir un état piézométrique de référence, appuyé sur un grand nombre de mesures synchrones et ainsi préciser les caractéristiques de la nappe en hautes eaux. On parle d'une carte réalisée en hautes eaux car les mesures ont été faites en avril, c'est à dire au printemps quand les nappes sont théoriquement à leur niveau d'eau le plus élevé. Par la suite, une seconde carte sera réalisée en période de basses eaux ; pour ainsi comparer ces 2 périodes et avoir une vision de la nappe à ses 2 niveaux extrêmes.

2) Qu'est-ce qu'une étude d'aire d'alimentation de captage

L'Aire d'Alimentation de Captage (AAC) est également appelée Bassin d'Alimentation de Captage (BAC). Il s'agit de l'ensemble des surfaces contribuant à l'alimentation du captage ; c'est-à-dire toutes les surfaces sur lesquelles tombe une goutte d'eau qui parviendra jusqu'au captage. La figure 1 montre la représentation en coupe schématique d'une AAC. Il ne faut pas les confondre avec les Périmètres de Protection de Captage (PPC) qui visent à protéger les captages des pollutions ponctuelles ou diffuses sur des périmètres restreints. Les AAC ont pour mission de les protéger des pollutions diffuses sur toute l'étendue géographique de l'aire d'alimentation. Les « études BAC » ou « études d'AAC » sont les études qui cherchent à caractériser précisément l'AAC, à définir ses limites et à identifier sa vulnérabilité vis-à-vis des pollutions. Elles sont réalisées par des bureaux d'études et sont utilisés par les gestionnaires du réseau d'alimentation en eau potable.

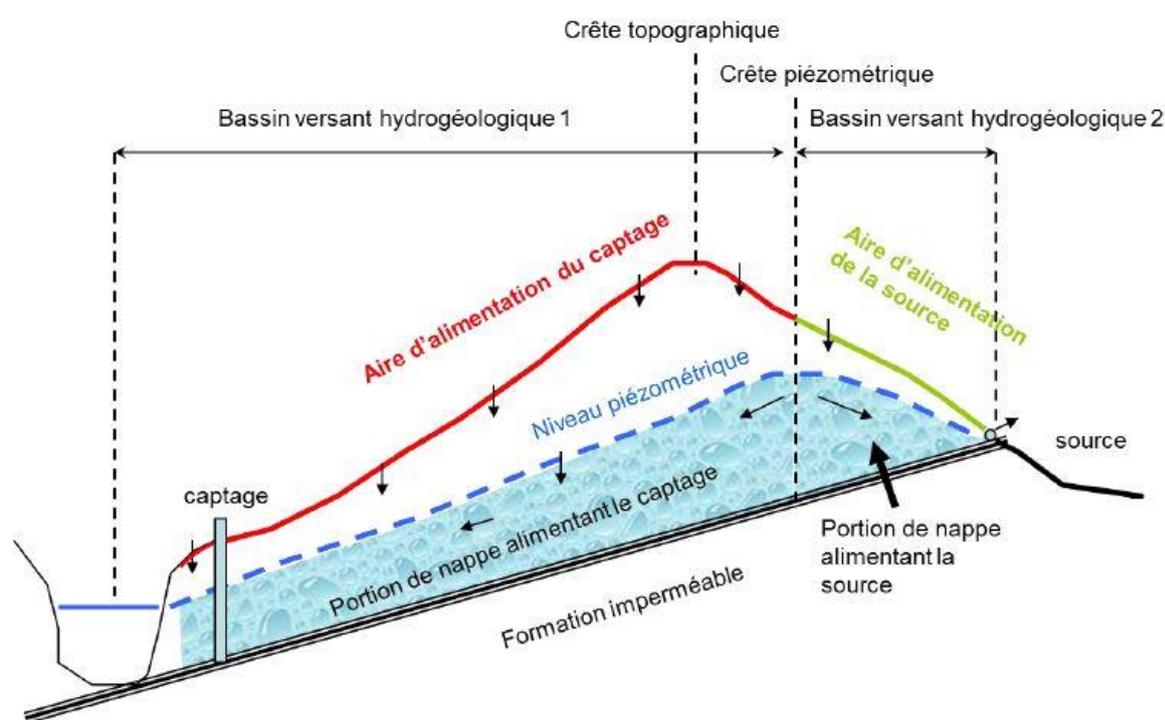


Figure 1 : Coupe représentant une AAC en contexte de nappe libre (Vernoux et al., 2014).

L'Europe a demandé par la Directive Cadre sur l'Eau (directive 2000/60/CE) à ses Etats membres d'assurer une protection des captages pour pouvoir prévenir la baisse de la qualité de l'eau et ainsi diminuer les traitements nécessaires à la production d'eau potable. En réponse à cela, la France a mis en place la LEMA (Loi sur l'Eau et les Milieux Aquatiques) le 30/12/2006. L'article 21 de cette loi précise la création de « zones de protection quantitative et qualitative des aires d'alimentation des captages », pour lutter notamment contre les pollutions d'origine agricole. Ce sont les AAC. La LEMA impose une méthodologie commune pour la délimitation des AAC à l'échelle nationale, méthodologie qui devra être mise en place par les bureaux d'études en charge de déterminer les limites de ces AAC.

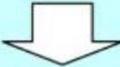
Cette méthodologie a été élaborée en 2007 par le BRGM (Vernoux et al., 2007). Depuis, un grand nombre d'études d'AAC ont été menées ce qui a permis de réaliser en 2014 un guide méthodologique révisé et amélioré (Vernoux et al., 2014).

Cette méthode à utiliser est dépendante du contexte géologique et hydrogéologique de l'aquifère étudié, cependant, ses phases successives sont les mêmes pour chaque contexte :

- Collecter et exploiter les données géologiques, hydrogéologiques et hydrologiques
- Caractériser l'état initial de la ressource (nature de la contamination s'il y en a une)
- Délimiter l'AAC et déterminer les types de transferts mis en jeu dans la contamination des eaux captées
- Réaliser une carte de vulnérabilité
- Identifier les pressions exercées par les activités sur la zone

Ces phases sont résumées dans le tableau 1, extrait du guide méthodologique pour la réalisation des études AAC (Vernoux et al., 2014). Dans le présent rapport, les parties vulnérabilité et pressions ne seront pas détaillées.

Tableau 1 : Grandes phases de l'élaboration d'une étude AAC (Vernoux et al., 2014).

<p>Phase 1 Etude hydrogéologique du bassin versant souterrain</p> 	<ul style="list-style-type: none"> - Caractéristiques du captage - Synthèse et/ou acquisition de données - Compréhension du système aquifère - Typologie du système - Choix de la méthode
<p>Phase 2 Délimitation du BAC</p> 	<ul style="list-style-type: none"> - Délimiter la portion de nappe alimentant le captage - Identifier la zone en surface susceptible d'influer sur la qualité de l'eau du captage
<p>Phase 3 Cartographie de la vulnérabilité</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Identifier à l'intérieur du BAC les secteurs les plus contributifs à l'alimentation du captage et donc les plus vulnérables vis-à-vis d'une pollution

Le bureau d'étude en charge d'un tel dossier doit suivre la méthodologie présentée ci-dessus. C'est lors des phases 1 et 2, lorsque le bureau d'étude cherche à connaître les caractéristiques d'un bassin versant, qu'une carte piézométrique peut apporter des informations très utiles.

Dans ce rapport, 3 études d'AAC ont été choisies pour être comparées avec la carte piézométrique réalisée. Il s'agit des études réalisées par un bureau d'études spécialisé, présentées dans le tableau 2. Dans un souci de confidentialité, le bureau d'étude qui a réalisé ces travaux ne sera pas nommé.

Tableau 2 : Présentation des 3 études AAC.

Etude d'Aire d'Alimentation du captage (AAC) de la Source de la Fontaine sous le Vau à Charentenay (89)
Etude d'Aire d'Alimentation du captage (AAC) de la Source des Glonds à Courson-les-Carières (89)
Etude d'Aire d'Alimentation du captage (AAC) de la Source de Gulène à Druyes-les-Belles-Fontaines (89)

Ces 3 sources sont exploitées par le Syndicat Intercommunal d'Alimentation en Eau Potable de Forterre (SIAEP de Forterre), qui assure l'alimentation en eau de 16 communes. Elles se situent sur 3 communes différentes : Charentenay, Courson-les-Carières et Druyes-les-Belles-Fontaines représentées sur la figure 2.

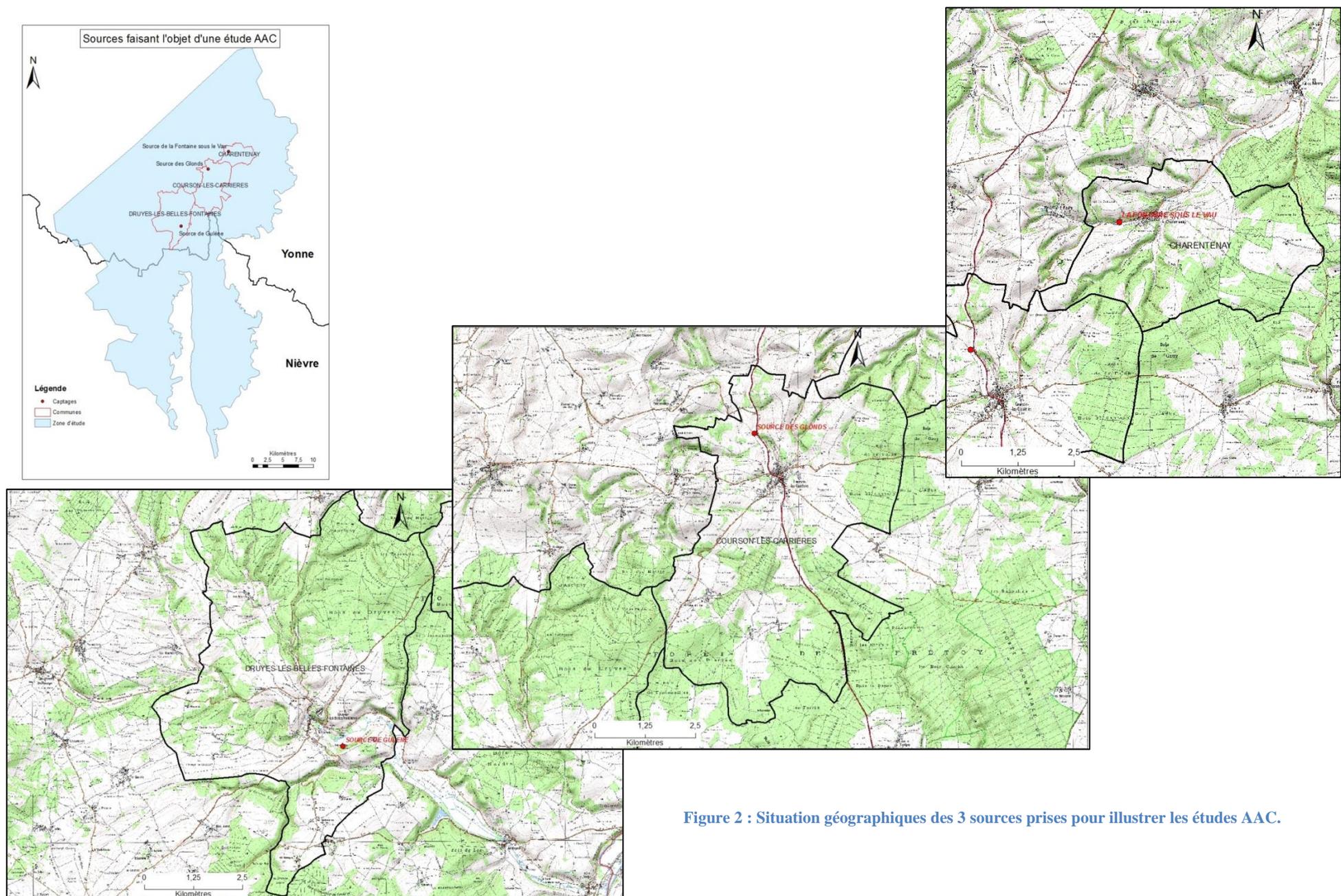


Figure 2 : Situation géographique des 3 sources prises pour illustrer les études AAC.

La source de la Fontaine sous le Vau de Charentenay est une résurgence où l'eau qui est captée provient des terrains jurassiques du Kimméridgien, son origine est donc karstique. En effet, dans la région le Kimméridgien est un calcaire karstifié (cf. II- 1)). Les eaux captées au regard de cette source sont sujettes à plusieurs problèmes importants de bactériologie et de teneurs en nitrates et en pesticides élevées. La source alimente le Ru de Genotte.

La source des Glonds qui se trouve à Courson-les-Carières n'assure pas l'alimentation en eau potable du SIAEP, elle sert pour le lavage de réseau. Elle provient des mêmes formations géologiques que la source de la Fontaine sous le Vau de Charentenay, et a les mêmes problèmes de pollution. Cette source alimente le Ru des prés, petit ruisseau qui se perd dans le karst.

La source de Gulène de Druyes-les-Belles-Fontaines a le même usage que la source des Glonds. En revanche, l'eau provient ici des terrains jurassiques récifaux de l'Oxfordien-Rauracien. Encore une fois, des problèmes de pollution aux nitrates et aux pesticides sont rencontrés sur cette source. Ces problématiques sont couramment rencontrées dans l'Yonne (B. Mazenc, 1989). Les eaux de la source de Gulène vont se jeter dans la Rivière de Druyes, qui devient plus en aval le Ruisseau d'Andryes (affluent de l'Yonne).

Ces 3 études ont été choisies pour plusieurs raisons. Tout d'abord, elles se trouvent au centre de la zone d'étude sur laquelle a été réalisée la carte piézométrique, ce qui permet de ne pas avoir à prendre en compte les incertitudes liées aux bordures de la carte (cf. III-4)). Il existe peu d'études d'AAC sur le secteur. Ensuite, leur proximité géographique est intéressante car cela permet une étude plus poussée du contexte hydrogéologique, et elles sont sur la même masse d'eau (la MESO 4061). De plus, ce sont des études récentes, datant de décembre 2014 et janvier 2015. Elles ont donc théoriquement une bonne corrélation avec la carte piézométrique réalisée quelques mois plus tard. Enfin, ces études ont été réalisées par le même bureau d'étude pour le même commanditaire. Cela laisse supposer une méthode commune qui sera plus facile à analyser et à comparer avec la carte piézométrique.

II- Matériels et méthodes

1) Contexte et présentation de la zone d'étude

La zone d'étude se situe à l'ouest de la Bourgogne, sur les départements de l'Yonne et de la Nièvre. Elle s'étend depuis Auxerre au nord jusqu'à Saint-Révérien au sud, en passant par Clamecy à l'est.

Cette zone d'étude recouvre en partie 2 Masses d'Eau Souterraines (MESO) ; la MESO 3217 des calcaires du Jurassique supérieur de l'aquifère de l'Albien-Néocomien entre Loire et Yonne au nord, et la MESO 4061 correspondant à l'aquifère des calcaires et des marnes du Dogger-Jurassique supérieur du Nivernais nord au sud. Ce sont des formations majoritairement calcaires qui forment un ensemble de plateaux et de vallées. Une MESO est un découpage des milieux aquatiques destiné à être l'unité d'évaluation de la Directive Cadre sur l'Eau 2000/60/CE. Selon cette directive, une MESO est un « volume distinct d'eau souterraine à l'intérieur d'un ou de plusieurs aquifères » (article 2 et annexe II), ces aquifères étant en communication. Seuls les aquifères pouvant être exploités à des fins d'alimentation en eau potable ont été retenus pour constituer les MESO.

Il s'agit de régions qui sont surtout agricoles, caractérisées par de grandes cultures. La zone d'étude est localisée sur la figure 3.

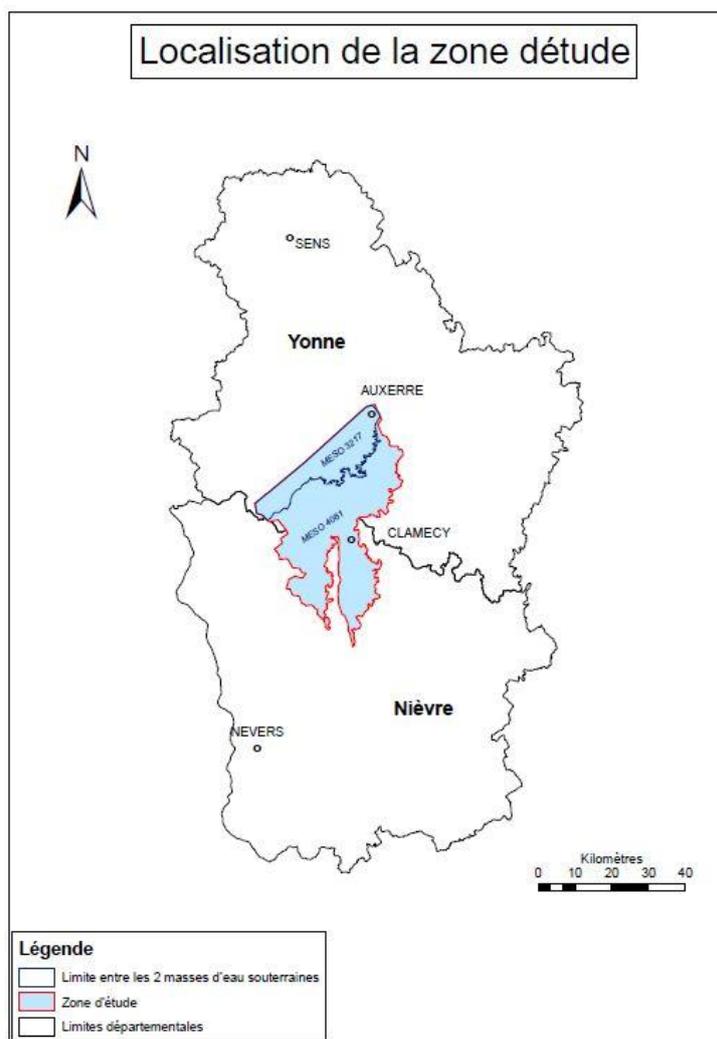


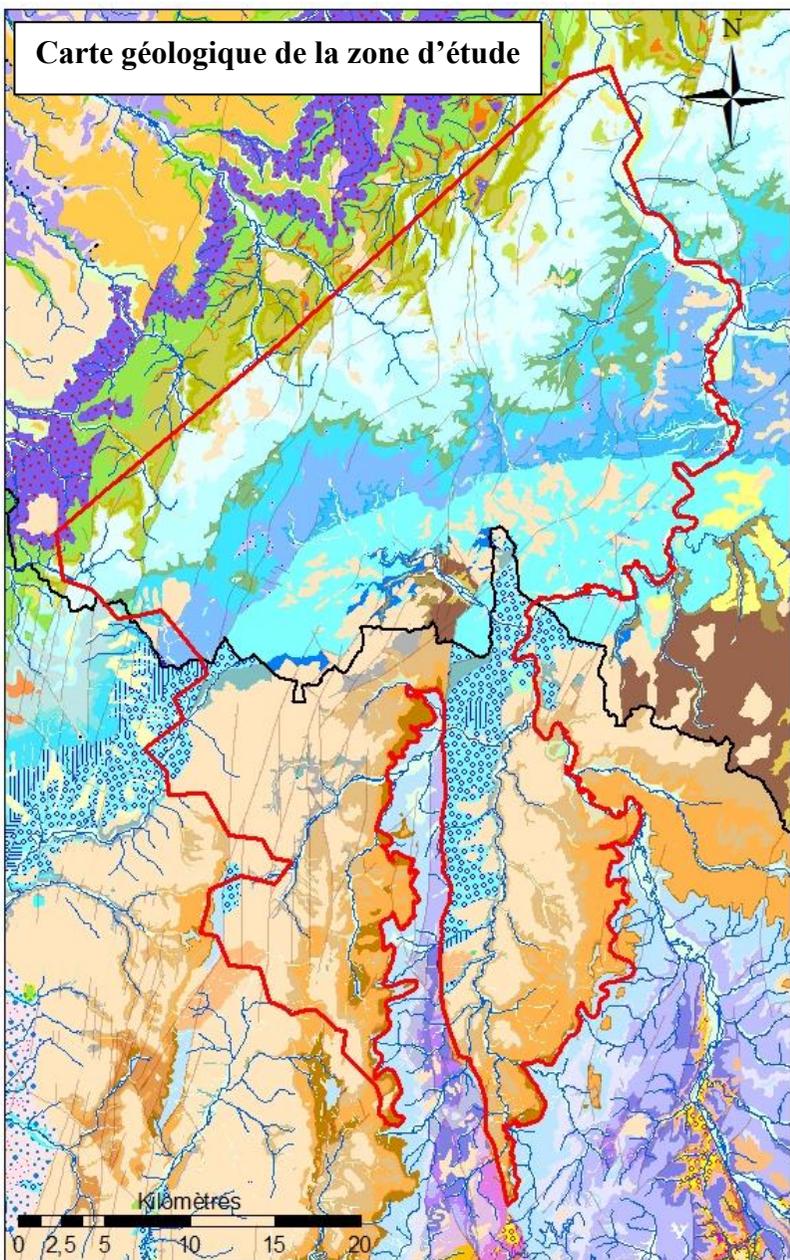
Figure 3 : Localisation de la zone d'étude.

La partie synthèse bibliographique sur la géologie a été réalisée à partir de plusieurs études : La synthèse hydrogéologique et structurale des aquifères du vézelien et des plateaux de Bourgogne ouest et sud-ouest du BRGM (1997), Les notices des cartes géologiques au 1/50 000 d'Auxerre, Chablis, Clamecy, Courson-les-Carières, Préméry, Saint-Fargeau et Vermenton, la notice de la carte hydrogéologique d'Auxerre au 1/20 000 et l'étude datant de 1969 de Rambert B.

Du point de vue de la géologie, les terrains de la zone d'étude sont majoritairement des formations calcaires, entrecoupées par des formations marneuses datant du Jurassique. Toutefois, on peut également observer des terrains d'âge Crétacés recouvrant à certains endroits les formations du Jurassique ainsi que des dépôts du Quaternaire, notamment des alluvions déposés par les différents cours d'eau traversant les plateaux calcaires. Ces formations géologiques sont impactées par un réseau de failles principalement orientées SSW-NNE. Un extrait de la carte géologique harmonisée au 1/50 000 est visible sur la figure 4.

La description par étage des formations géologiques est présentée ci-dessous. De la plus ancienne à la plus récente, on trouve :

- Les argiles et marnes du Toarcien : épaisse couche de plus de 60 mètres de puissance alternant des marnes noires et des argiles tendres et grises
- Les formations du Bajocien : superposition de calcaires à entroques et de calcaires argileux à oolithes ferrugineuses d'une puissance de 5 à 10 mètres
- Le calcaire Bathonien moyen et inférieur : c'est en fait une alternance de marne et de calcaire argileux à Pholadomyes s'altérant en plaquettes gélives, d'une épaisseur de 40 à 70 mètres
- Le Bathonien supérieur : composé d'une superposition de calcaires argileux, oolithiques et micritiques d'une épaisseur inférieure à 50 mètres. Cependant, dans la région de Vermenton la série du Bathonien supérieur est deux fois plus puissante et peut mesurer jusqu'à 100 mètres d'épaisseur. Sa base est constituée d'une superposition d'oolithes blanches, de calcaires compacts et de calcaires marneux
- Les calcaires du Callovien : étagement de marnes et de calcaires argileux, recouverts de calcaires bioclastiques, de calcaires argileux et de calcaires oolithiques. Cette série sédimentaire peut atteindre 40 mètre d'épaisseur
- L'Oxfordien moyen et supérieur : superposition de calcaires à chailles dans sa partie inférieure et de calcaires récifaux dans sa partie supérieure. Cet étage à une puissance de 70 mètres environ
- L'Oxfordien supérieur : succession de calcaire gris à pâte fine, de calcaire oolithique, de calcaire crayeux et de calcaire beige clair. Leur puissance est inférieure à 50 mètres
- Les calcaires à Astartes du Kimméridgien inférieur : niveau épais de 25 à 35 m qui présente différents faciès de calcaires. Du plus ancien au plus récent se succèdent : le marbre de Bailly, les calcaires lithographiques en petits bancs (calcaires argileux), une alternance de calcaires lithographiques et de calcaires rocailloux, des lumachelles et des conglomérats
- Les calcaires et marnes à Exogyra virgula du Kimméridgien moyen et supérieur : étage d'épaisseur importante, allant de 55 à 60 m. On distingue de la formation la plus ancienne à la plus récente : un petit banc calcaire argileux, quelques mètres de marnes, 25 à 30 m de calcaires lithographiques compacts en petits bancs séparés par des joints marneux, un niveau de 5 à 7 m avec une alternance de lumachelles et de marnes noires, 7 à 8 m de calcaires marneux tendres, une alternance marno-calcaire avec des calcaires lumachelliques sur environ 3 m, puis 20 m de marnes présentant quelques calcaires argileux lumachellique et la formation se termine par quelques centimètres d'une lumachelle avec une dureté importante
- Les calcaires du Barrois du Portlandien : ils se divisent en deux faciès dont la puissance totale varie de 40 à 50 m. Le premier faciès est constitué de bancs calcaires séparés par des petits niveaux marneux tandis que le second est un faciès de calcaires sublithographique découpés en petits bancs décimétriques et sans joints marneux. Dans l'ensemble ce sont des calcaires assez compacts et très fracturés



Légende :

- Limite de la zone d'étude
- Cours d'eau
- Limite entre l'Yonne et la Nièvre
- Limons quaternaires loessiques, argilo-sableux, hydromorphes, à silex
- Alluvions
- Argiles d'altération sur calcaires du Jurassique
- Calcaire de Bazarnes
- Calcaires récifaux
- Calcaires marneux
- Argovien : calcaires à chailles
- Alternance marno-calcaire
- Alternance marno-calcaire
- Calcaire bioclastique à entroques
- Albien : marnes de Brienne et argiles du Gault
- Aptien : argiles
- Barrémien supérieur : sables et argiles panachées
- Barrémien inférieur : lumachelles et marnes ostréennes
- Hauterivien : calcaire à Spatangues
- Valanginien : calcaire de Bernouil
- Portlandien : calcaires du Barrois
- Kimméridgien moyen et supérieur : calcaires et marnes à Exogyra virgula
- Kimméridgien inférieur : calcaires à Astartes
- Kimméridgien inférieur : calcaires de Villiers
- Oxfordien supérieur : caclaire de Tonnerre
- Oxfordien supérieur
- Oxfordien moyen et supérieur
- Oxfordien moyen
- Callovien inférieur : Dalle nacrée
- Bathonien supérieur
- Bathonien moyen et inférieur

Figure 4 : Carte géologique harmonisée centrée sur la zone d'étude.

Sur la zone, le chevelu hydrographique est très faible. Cela s'explique par un substratum calcaire très perméable favorisant l'infiltration des eaux de surface et ne permettant pas le développement d'un réseau hydrographique important. La rivière principale est l'Yonne, affluent principal en rive gauche de la Seine. On retrouve aussi le Loing, l'Ouanne, le Beuvron ou l'Oisy dans lesquels viennent se jeter de petits rus. Ces cours d'eau sont rarement asséchés, même lors des périodes estivales.

Grâce aux informations stratigraphiques et lithologiques, on peut distinguer plusieurs formations aquifères séparées par des formations aquicludes :

- Le Bajocien inférieur est un niveau aquifère au contact des marnes et des argiles toarciennes. A l'affleurement, cet aquifère donne une ligne de source souvent captée pour l'eau potable (Oisy par exemple).
- Le Bajocien supérieur, le Bathonien inférieur et moyen forment un aquifère peu perméable. Par ses intercalations de faciès marneux ils renferment à certains endroits des aquifères captifs.
- Le Bathonien supérieur est un aquifère libre connecté à certains endroits avec celui de l'Oxfordien lorsqu'il présente un faciès calcaire. Il donne naissance à de nombreuses sources à débit assez importants et souvent captées elles aussi pour l'alimentation en eau potable.
- Le Callovien, l'Oxfordien moyen et supérieur et le Kimméridgien inférieur sont presque entièrement calcaire, formant ainsi un aquifère unique grâce aux réseaux karstiques situés entre les étages sédimentaires. Ils ont une perméabilité moyenne.
- Les calcaires et marnes du Kimméridgien moyen et supérieur sont imperméables et forment donc le substratum de la nappe des calcaires du Portlandien. Cependant, les niveaux calcaires placés entre deux niveaux marneux forment de petites nappes cloisonnées.
- Les calcaires du Portlandien sont perméables et renferment une nappe libre très importante. Cette nappe est formée dans un karst, ce qui explique sa forte perméabilité.
- Dans les alluvions de l'Yonne on distingue également de petites nappes aquifères retenues par des couches marneuses.

Comme décrit ci-dessus, les aquifères de la région sont principalement des aquifères karstiques. Un karst est une structure géomorphologique formée par la dissolution des calcaires par les eaux de surface par infiltration. Cette infiltration est facilitée par la présence de failles et de fractures. Les karsts sont souvent visibles en surface grâce aux dolines, aux vallées sèches, aux lapiaz ou aux gouffres et en profondeur par des réseaux complexes de conduits avec des cavités, des grottes, des siphons... L'eau peut donc circuler librement dans ces réseaux et de façon rapide, ce qui donne aux aquifères karstiques des caractéristiques propres. Ce sont des aquifères qui ont une forte perméabilité, ce qui entraîne une vulnérabilité non négligeable aux pollutions. En effet, si l'eau de surface est polluée, sa facilité à circuler dans le karst va entraîner une diffusion rapide de la pollution jusqu'aux nappes. Enfin, la karstification peut entraîner des interconnexions possibles entre les différents aquifères.

Grâce à ces informations, la campagne de terrain a pu être préparée au mieux, en tenant compte caractéristiques géologiques, hydrologiques et hydrogéologiques de la zone.

2) Préparation et déroulement de la campagne de terrain

Avant de partir sur le terrain pour deux semaines de relevés piézométriques, un important travail de préparation a dû être réalisé. Celui-ci a permis de partir dans les meilleures conditions et d'effectuer sur le terrain un travail précis et efficace.

Tout d'abord, un recensement des différents points de la Base de données Sous-Sol (BSS) du BRGM fut réalisé. La BSS est une base de données gérée par le BRGM, mais qui ne recense pas uniquement des points créés par le BRGM. En effet, divers entreprises dont par exemple les foreurs leurs donnent les informations dont ils disposent, puis le BRGM s'occupe de les référencer et de les mettre à disposition. Cependant ces données transmises par des tiers extérieurs au BRGM ne sont pas vérifiées avant d'être entrées sur la BSS. Ont été sélectionnés les points BSS se situant sur la masse d'eau, mais uniquement les « points d'eau » (ouvrages ayant un lien avec la nappe). Au final, grâce à la BSS 406 points de mesure potentiels ont été identifiés.

Parallèlement à cela, les DDT de l'Yonne et de la Nièvre ainsi que l'Agence de l'Eau Seine Normandie ont été contactées pour transmettre les éventuels puits et forages dans la zone d'étude dont elles auraient connaissances. Grâce à elles, 6 nouveaux points ont été identifiés.

De plus, les mairies de chaque commune de la zone d'étude ont été contactées par courrier, par mail puis relancées par téléphone afin de nous aider à localiser les puits, forages et sources sur leur territoire. Il s'agissait d'un travail de recensement conséquent mais il était nécessaire car les deux étapes précédentes n'ont pas révélé une répartition homogène des points sur la zone d'étude. En effet, pour réaliser une carte piézométrique l'idéal est d'avoir des points répartis uniformément sur la zone à cartographier, or ce n'était pas le cas avec les points de la BSS. En sollicitant l'aide des mairies, nous souhaitons améliorer cela.

Enfin, il a été décidé que le niveau des sources qui prennent naissance dans les formations calcaires seraient pris en compte afin d'augmenter le nombre de points de mesures et la répartition de ceux-ci. Sur la zone d'étude, une source peut être considérée comme un point de mesure du niveau de la nappe car ce sont des sources d'affleurement.

Après réception des réponses des différentes mairies, 179 points ont été ajoutés à ceux déjà recensés. Grâce aux SIG une carte de tous les points collectés a été réalisée (figure 5). Dans un souci de précision, d'homogénéité de l'échantillonnage et de représentativité, il a été choisi d'obtenir dans l'idéal, à minima 1 point par maille de 3,5 km². Ce maillage est représenté sur la carte de la zone d'étude (visible sur la figure 5 également). D'autre part, grâce à cette représentation, la répartition géographique des points de mesure recensés sur la zone d'étude a pu être appréciée. Cela a révélé que, malgré l'augmentation du nombre de points, notamment grâce aux informations des mairies, le problème de répartition de ceux-ci persiste. De ce fait, le manque de données dans certains secteurs pourrait diminuer l'exactitude de la carte quant à la morphologie de la nappe. Un travail de prospection conséquent a donc été mené durant les 2 semaines de terrain pour pouvoir atteindre un nombre de points représentatif et acceptable pour réaliser une carte piézométrique au plus proche de la réalité.

Une fois l'inventaire des points de mesure potentiels du niveau piézométrique réalisé, 3 zones d'études ont été définies, une pour chaque binôme participant à la campagne de mesures. Les 3 zones ont été définies en fonction de la surface totale d'étude qui a été divisée par 3. Elles sont représentées sur la figure 5.

Résumé des données avant la campagne terrain en hautes eaux

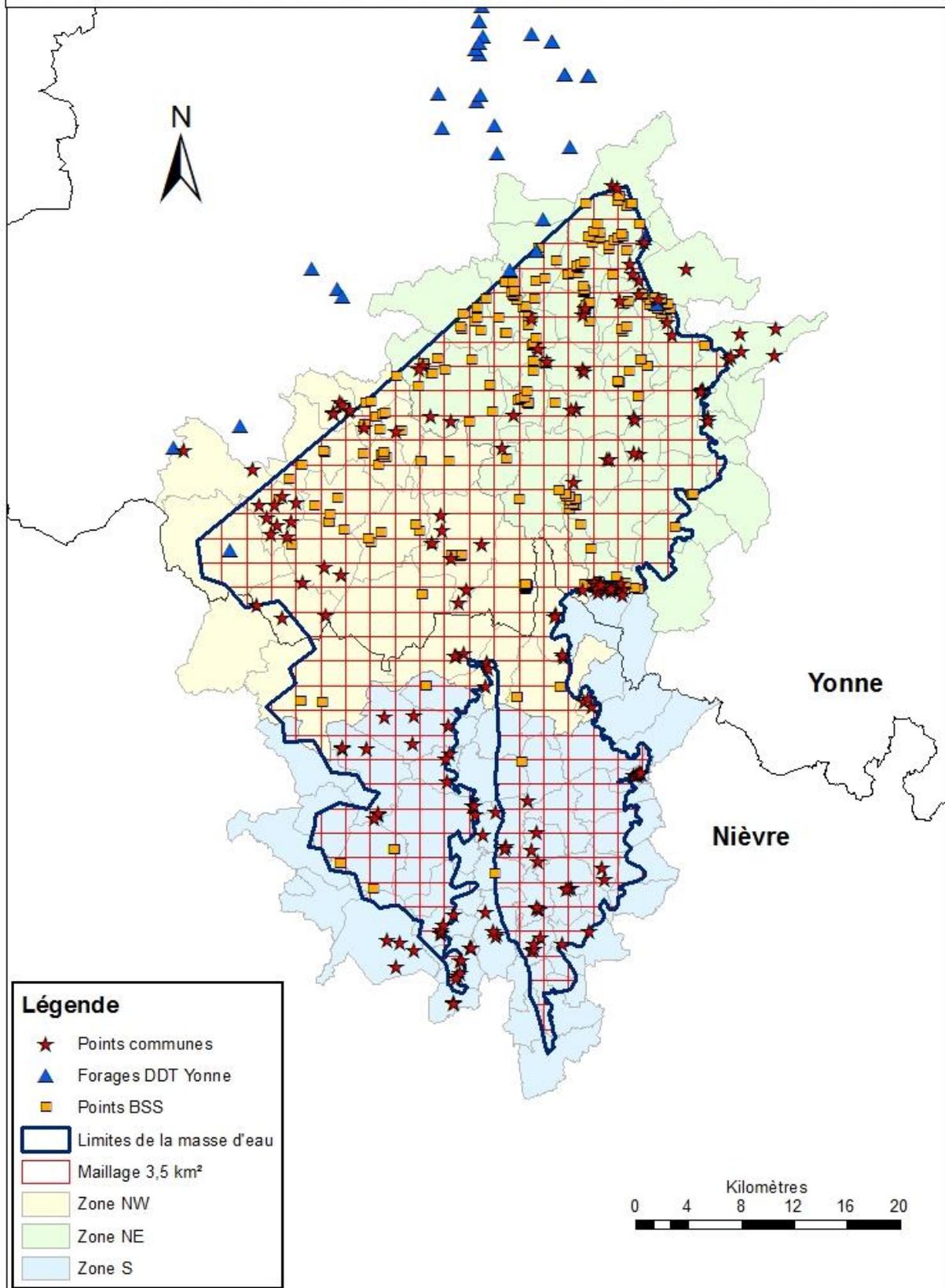


Figure 5 : Présentation des points de mesures potentiels avant la campagne terrain.

Sur le terrain, chaque équipe disposait du matériel suivant (présenté sur les figures 6 et 7) :

- Une carte avec fond IGN par commune avec les points de mesure potentiels identifiés en amont (figure 6)
- Un GPS de terrain
- Un appareil photo numérique
- Une sonde piézométrique
- Des marqueurs de peinture
- Un mètre ruban
- Un ordinateur
- Les fiches piézomètres à remplir sur ordinateur
- Des outils (pieds de biche, clefs d'artilleur, pinces, déboulonneur, dégrippant)

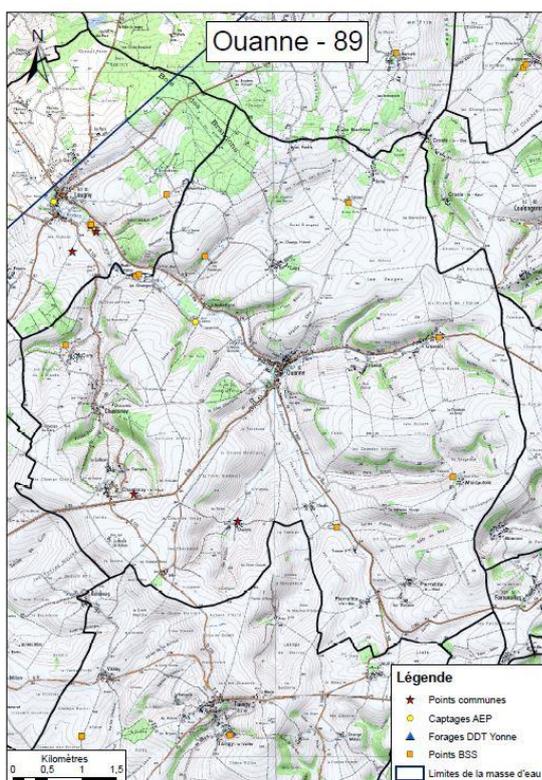


Figure 6 : Carte à l'échelle communale réalisée pour la campagne de terrain.



Figure 7 : Une partie du matériel utilisé lors de la campagne de mesures.

Chaque binôme avait des cartes à l'échelle communale de toutes les communes se trouvant sur sa zone afin d'être précis dans la prospection (figure 6). La prospection consistait à rechercher sur le terrain les puits, les sources ou les forages dans lesquels une mesure de niveau piézométrique serait réalisable. Il peut s'agir de puits situés sur des propriétés privées ; auquel cas il a fallu faire preuve de relationnel auprès des particuliers. Ce travail a permis d'augmenter considérablement le nombre de points de mesure. Il a été d'autant plus important que, comme nous le pensions lors de la préparation du terrain, la quasi-totalité des points de la BSS se sont révélés inexploitable une fois sur le terrain (détruits, introuvables, mal localisés...).

La méthode de mesure a été automatisée et mutualisée pour tous les binômes afin d'avoir un jeu de données final le plus cohérent possible. Lorsqu'une équipe de terrain arrivait sur un point de mesure, la démarche était la suivante :

- Relevé des coordonnées GPS (après localisation par l'appareil de mesure de tous les satellites)
- Traçage à la peinture d'un repère de mesure sur l'ouvrage. Cela permettra lors de la 2^{ème} campagne de terrain (en basses eaux) de reprendre la mesure exactement au même endroit et pouvoir ainsi comparer précisément les niveaux d'eau en hautes eaux et en basses eaux
- Mesure du niveau d'eau à l'aide d'une sonde piézométrique manuelle (capacitive sonore), comme sur la figure 8
- Mesure du fond de l'ouvrage, également grâce à la sonde. Cette mesure permettra au moment du traitement des données de savoir si l'ouvrage capte bien l'aquifère souhaité en comparant la profondeur de l'ouvrage avec l'épaisseur de l'aquifère
- Relevé des dimensions de l'ouvrage (diamètre, hauteur par rapport au sol, hauteur du repère par rapport au sol...)
- Prise de photos pour pouvoir reconnaître l'ouvrage sur le terrain lors de prochaines campagnes piézométriques
- Pour chaque point de mesure, une fiche a été remplie où ont été retranscrites toutes les informations citées ci-dessus. Ces « Fiche Piézomètre » permettent d'avoir une synthèse des informations de chaque point et une traçabilité de la mesure (un exemple est présenté dans l'annexe 1)



Figure 8 : Mesure du niveau piézométrique dans un puits communal à Cravant (89).

3) Traitement des données

La première étape après les deux semaines de campagne terrain a été de déterminer les altitudes de chaque ouvrage d'où ont été prises les différentes mesures. Pour cela, c'est le MNT qui a été utilisé sous Arc Gis, puis vérifié à l'aide de la topographie des cartes IGN. Au vu du nombre de mesures et de la taille de la zone d'étude, nous n'avons pas fait appel à un géomètre pour niveler les ouvrages au centimètre près. La précision au mètre du MNT et de la carte IGN est suffisante au vue de l'écartement entre eux des points de mesure.

Un grand nombre de mesures piézométriques a été collecté. Toutes n'étant pas exploitables pour réaliser la carte piézométrique, il a fallu effectuer un traitement et un tri des données. Chaque point de mesure a été reporté sur la carte géologique au 1/50000 pour savoir s'il se situait bien dans l'un des aquifères faisant l'objet de cette étude. En comparant les différents logs géologiques réalisés grâce aux notices des cartes géologiques au 1/50000 de la zone, et les profondeurs des ouvrages ; il a été possible de déterminer quelles couches géologiques se trouvaient au droit de chaque point d'eau, et ainsi connaître l'aquifère capté. Il a été décidé que toutes les mesures validées seraient conservées pour réaliser la carte piézométrique, même si sur le maillage de 3,5 km², certaines mailles contenaient plusieurs points. En effet, nous avons préféré augmenter la précision de la carte sur certaines zones où il y avait plus de points de mesure.

Au total, les 6 agents de la campagne de terrain ont récolté au cours des 2 semaines 320 points de mesures. Après traitement des données, 310 points ont été gardés et 1 point du réseau de surveillance en continu du BRGM a été ajouté (point se situant sur la commune de Trucy l'Orgeuilleux). La carte piézométrique réalisée se base donc sur 311 points de mesures. Ces points sont visibles sur la carte en annexe 2.

4) Méthode de réalisation d'une carte piézométrique

Pour réaliser la carte piézométrique demandée par l'Agence de l'Eau, plusieurs essais de logiciels d'interpolation et de cartographie ont été réalisés. ArcGIS et Surfer n'étant pas convaincants, le logiciel GDM a été testé et l'interpolation s'est révélé être de meilleure qualité. C'est donc ce logiciel, GDM (logiciel de modélisation géologique développé par le BRGM), qui a été retenu. C'est la méthode de krigeage avec modèle de variogramme qui a été choisie pour réaliser la carte piézométrique avec GDM.

Un krigeage est une technique géostatistique de modélisation spatiale permettant à partir de points d'avoir une représentation de valeurs sur toute la surface de la zone étudiée (Y. Gratton, 2002). Cela permet dans le cas de cette carte piézométrique d'estimer l'altitude piézométrique en dehors des points de mesure. Cette technique a été choisie car elle tient compte de la distance entre les points de mesure (G. Matheron, 1969). Le krigeage se base sur l'hypothèse que deux données qui sont proches dans l'espace tendent à posséder des caractéristiques similaires. Pour ces raisons, il est la méthode d'estimation la plus précise (Y. Gratton, 2002). Le logiciel GDM construit la carte piézométrique par krigeage avec modèle de variogramme de façon autonome.

Sous GDM, la première étape pour créer une carte piézométrique est de réaliser l'histogramme des données pour représenter la répartition de la variable « Z_nappe_NGF », c'est-à-dire l'altitude piézométrique en mètres NGF (figure 9).

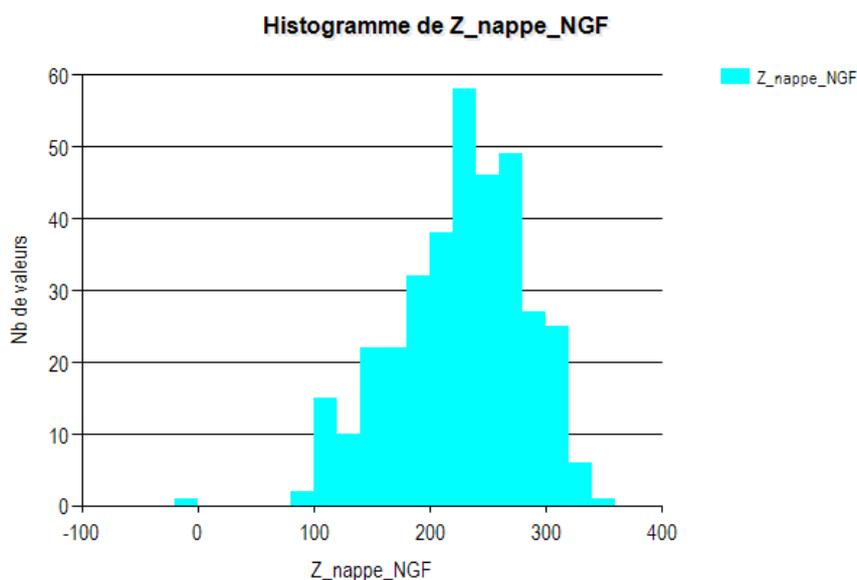


Figure 9 : Histogramme représentant la variable "niveau de la surface piézométrique en m NGF".

Les données sont réparties selon une loi normale, centrée autour de la moyenne. La répartition s'approche en effet d'une courbe gaussienne. Il est donc possible de se servir d'un modèle statistique pour réaliser l'interpolation des données par krigeage. Le krigeage est une méthode d'estimation linéaire qui teste pour chaque point quelle valeur a le plus de chances d'être en x et génère le moins de variance avec les points autour de x.

Ensuite, c'est le variogramme de la variable $Z_{\text{nappe_NGF}}$ qui est tracé (figure 10).

Ce variogramme compare les mesures en fonction de leur interdistance. On remarque une bonne corrélation entre les points proches. En effet la proximité géographique des points fait que leurs valeurs piézométriques sont proches. Face à ce constat, nous avons décidé de limiter l'interpolation aux 15 premiers kilomètres, car au-delà il y a une mauvaise corrélation entre les points.

On ajuste un modèle de variogramme (en rouge sur la figure 10). Il permettra d'interpoler des valeurs de niveau piézométrique au niveau des zones où il n'y a pas eu de mesure. Le modèle est ajusté au donné sur les 15 premiers kilomètres, pour les raisons évoquées au paragraphe précédent.

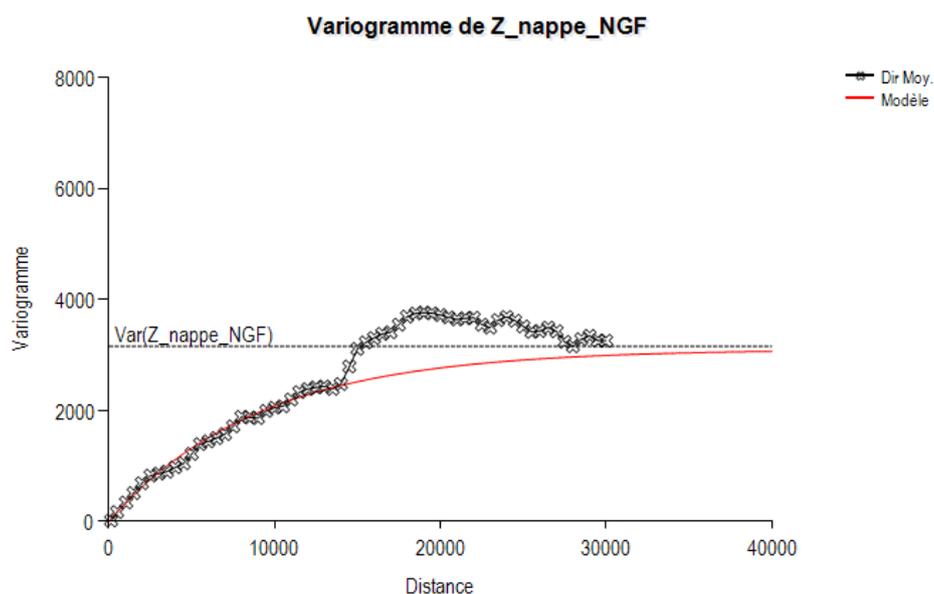


Figure 10 : Direction moyenne du variogramme avec le modèle ajusté.

Le modèle étant choisi, une étape de validation croisée est nécessaire pour estimer la fiabilité du modèle et vérifier qu'il est bien représentatif du jeu de données. Dans la validation croisée les valeurs interpolées sont comparées aux valeurs. De plus, cette étape permet de se rendre compte de la présence ou non de points aberrants. Par exemple, une faute avait été commise lors de la saisie des données sur ordinateur. Elle a pu être retrouvée et corrigée grâce à la validation croisée. Concernant le modèle de variogramme choisi, la validation croisée a donné de bons résultats, en effet le coefficient de corrélation entre l'altitude de la nappe calculée et l'altitude réelle est de 0,94. Le modèle de variogramme est donc validé, il sera la base du krigeage permettant la réalisation de la carte piézométrique.

La dernière étape est le tracé de la carte piézométrique à partir d'un krigeage avec le modèle de variogramme choisit précédemment.

Une première interpolation avec les données brutes a été réalisée, donnant de bons résultats en termes de statistiques (variogrammes indiquant une bonne corrélation entre les points proches, coefficient de corrélation avec le modèle de variogramme supérieur à 0,9). Cependant, la surface piézométrique calculée à l'aide de GDM présentait certains secteurs où elle recoupait la surface topographique (voir figure 11). Or, la région ne présente pas de nappe artésienne pouvant expliquer ce phénomène. Cette première carte présentait donc des incohérences et a nécessité une réflexion pour comprendre l'origine de ces erreurs, et surtout comment les corriger pour que la carte soit la plus proche de la réalité.

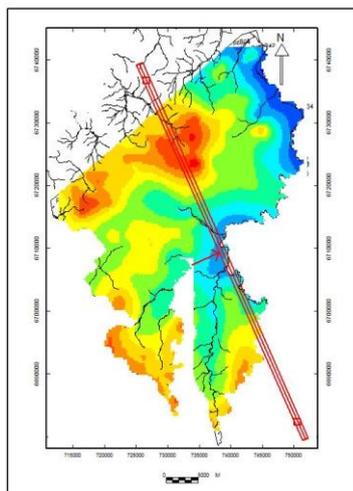
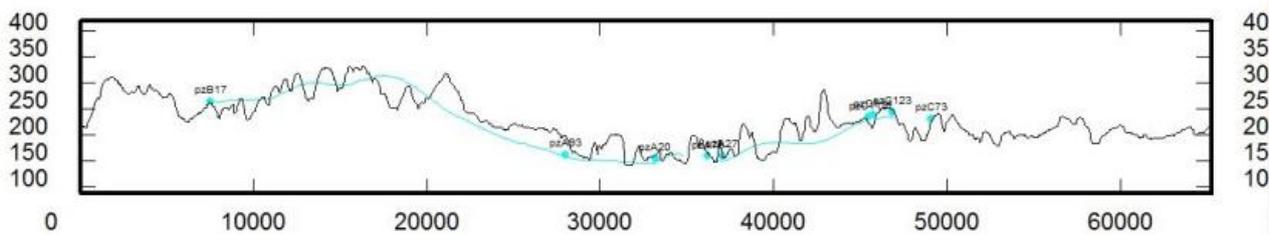


Figure 11 : Coupe représentant en noir la surface topographique et en bleu la surface piézométrique (tracé de la coupe sur la carte ci-contre).

Comme indiqué dans le paragraphe précédent, il y a des problèmes entre le niveau topographique et le niveau piézométrique. Pour pallier à ce problème, plusieurs méthodes ont été mises en place. Premièrement, il a été testé de réaliser une nouvelle version de la carte piézométrique en contraignant la surface piézométrique à rester sous la topographie. Toutefois, le résultat n'a pas été concluant car les isopèses tracés étaient strictement parallèles à ceux de la topographie, créant par endroits une carte piézométrique identique à la carte topographique de la zone (avec quelques mètres de moins). Cela ne représente pas la réalité de la morphologie de la masse d'eau. En effet, dans certains endroits comme les zones de fortes pentes par exemple, la surface piézométrique n'est pas parallèle à la surface topographique. Cet essai a donc été abandonné.

Suite à cela, les coupes piézométriques (figure 11) ont été de nouveau étudiées afin de déterminer les zones présentant des aberrations. Il a été mis en évidence que les erreurs au niveau de la carte piézométrique se situaient au niveau des vallées, dans lesquelles s'écoule ou non un cours d'eau.

Une nouvelle solution a été testée : 40 points « fictifs » ont été créés dans les vallées de la zone ; points pour lesquels nous avons déterminé que l'altitude de la nappe serait égale à l'altitude des eaux de surface. Cette approximation est envisageable car dans le secteur les eaux de surface sont en communication avec les eaux souterraines (Mégnyen C., 1964). Cette solution a permis de contraindre la piézométrie à rester sous la topographie dans les vallées (figure 12), sans pour autant créer une carte fausse où les deux surfaces seraient parallèles.

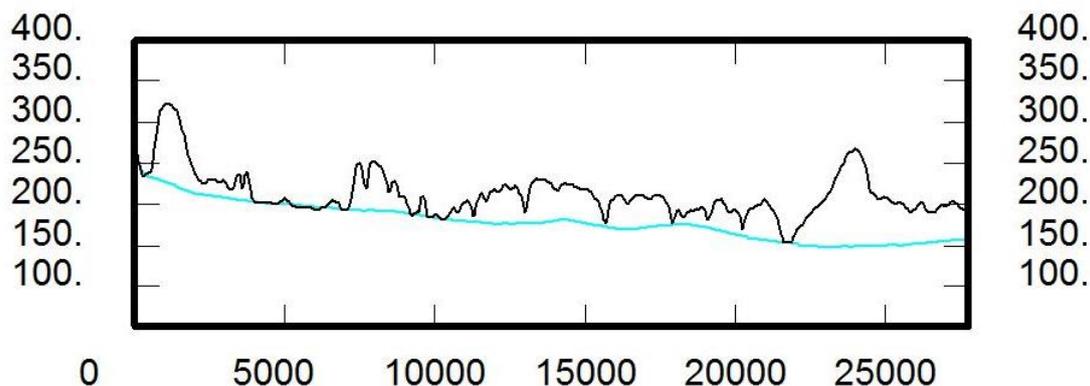


Figure 12 : Coupe réalisée sur le même modèle que la figure 9 (en noir la surface topographique, en bleu la surface piézométrique).

Au final, nous avons donc décidé de réaliser la carte piézométrique avec le jeu de données récolté sur le terrain, plus les 40 points « fictifs » ajoutés dans les vallées.

Dans un second temps, il a fallu déterminer si les aquifères de la zone étaient distincts les uns des autres, ou s'ils communiquaient entre eux. Grâce aux données bibliographiques, on sait que la seule limite imperméable qui pourrait séparer 2 aquifères est celle du Kimméridgien moyen est supérieur (cf figure 4). L'aquifère du Portlandien au Nord est donc peut-être séparé du reste des formations de la zone d'étude. Pour vérifier cette hypothèse, 2 cartes piézométriques séparées (1 de l'aquifère du Portlandien et 1 du reste de la zone) ont été réalisées. Ces 2 cartes se sont révélées parfaitement complémentaires, laissant fortement penser à une communication entre les aquifères. En effet, si les aquifères n'étaient pas en communication, la carte présenterait des ruptures de pente importantes entre les deux aquifères. Or ce n'est pas le cas. De plus, dans la zone d'étude de nombreuses failles traversent de façon continue les formations du Portlandien et du Kimméridgien (cf figure 4), ce qui appuierait le fait que les aquifères peuvent communiquer. En effet, ce sont des terrains karstifiés et faillés donc très perméables. L'eau pourrait passer d'une formation à l'autre par le biais des failles. Pour ces raisons, nous avons décidé de réaliser une carte piézométrique de l'ensemble des aquifères confondus. Précisons qu'à l'écriture de ce rapport nous nous posons toujours la question de savoir si l'aquifère du Portlandien communique bien avec le reste de la zone.

III- Résultats

1) La carte piézométrique de la zone d'étude

Une fois l'ensemble des corrections réalisées, on a obtenu une carte piézométrique finale présentée sur la figure 13. Une version en grand format avec les points de mesure est visible en annexe 2 de ce rapport.

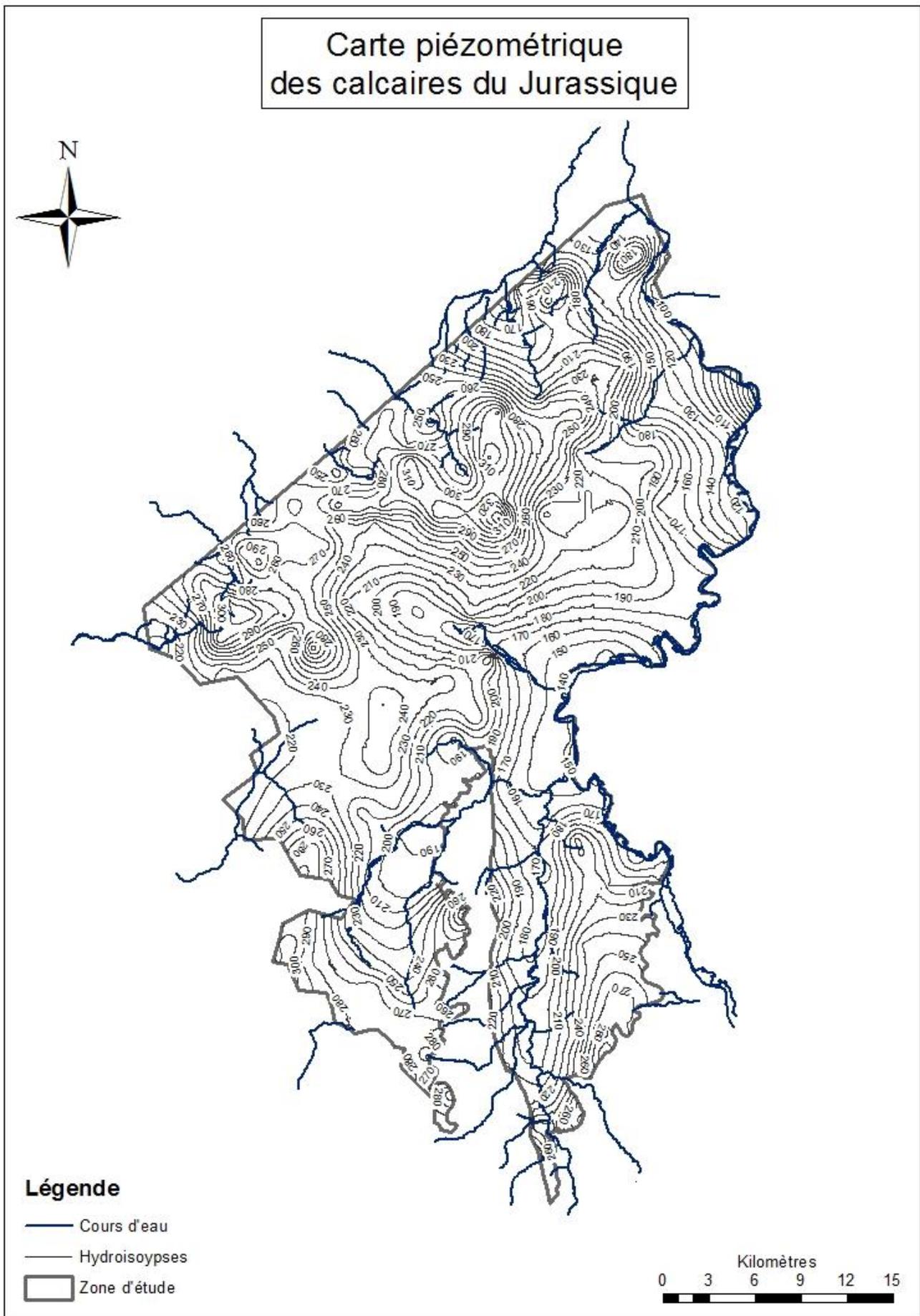


Figure 13 : Carte piézométrique de l'aquifère des calcaires et des marnes du Dogger-Jurassique supérieur du Nivernais nord et de l'aquifère des calcaires du Jurassique supérieur correspondant à l'aquifère de l'Albien-Néocomien entre Loire et Yonne.

2) La carte piézométrique recentrée sur les communes où se trouvent les études d'AAC

Pour pouvoir mettre en lumière les applications d'une carte piézométrique, j'ai choisi de la comparer avec 3 études d'AAC réalisées sur la zone d'étude. Sur la figure 14 est représenté un zoom de la carte piézométrique réalisée, centré sur les 3 communes où se trouvent les études d'AAC présentées dans la partie I-2).

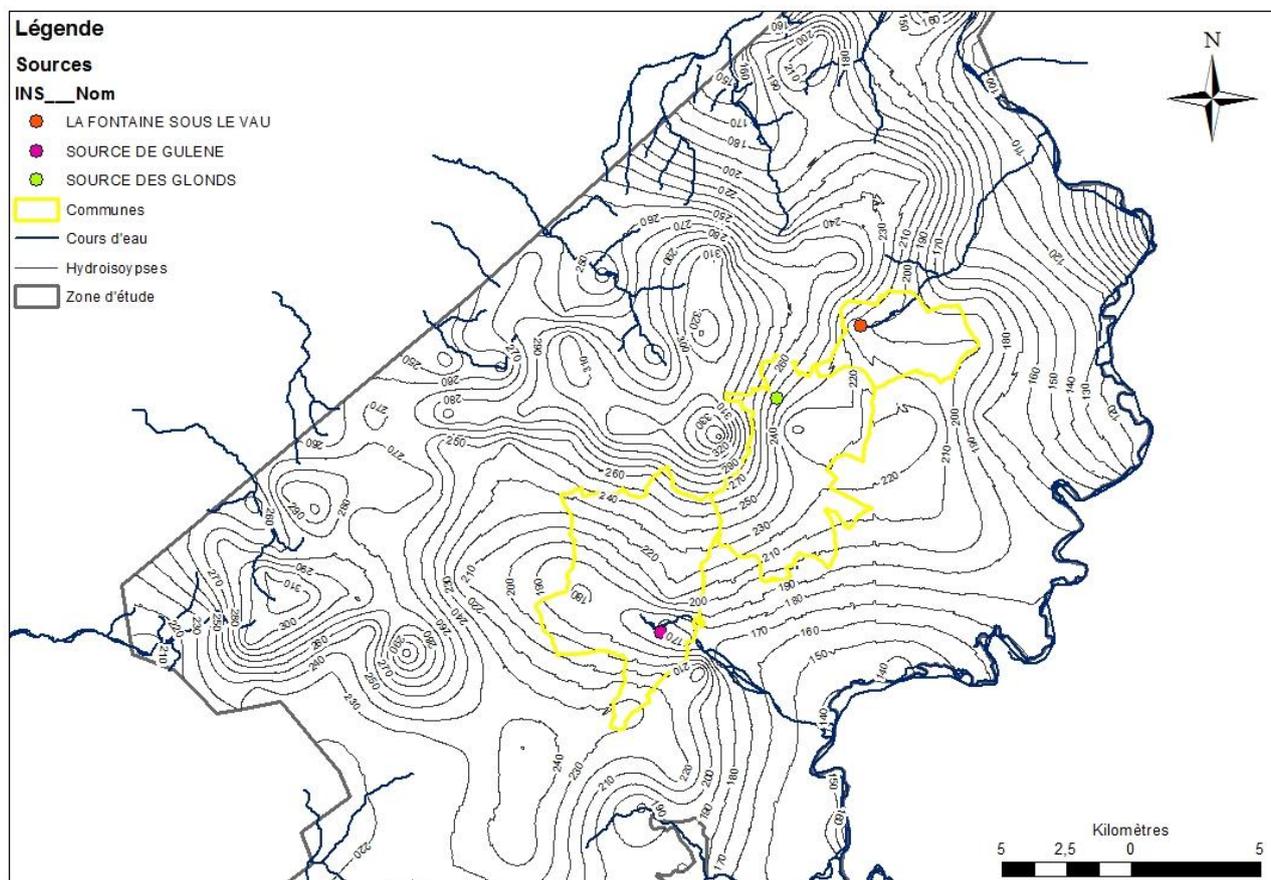


Figure 14 : Carte piézométrique centrée sur Charentenay, Courson-les-Carrières et Druyes-les-Belles-Fontaines.

3) Analyse de la carte piézométrique

Pour pouvoir analyser les processus mis en relief par la carte piézométrique, celle-ci a été annotée avec les principales crêtes piézométriques et les principales lignes d'écoulement préférentielles. Sur la figure 15 on peut voir les analyses sur la carte entière. Une version en plus grand format est visible dans l'annexe 3. En rouge sont tracées les crêtes piézométriques qui ont pu être identifiées grâce aux hydroisopèses. En bleu, les lignes d'écoulement préférentiels. L'épaisseur du trait indique l'importance du phénomène (en épais la ligne principale, en fin les lignes secondaires d'importance moindre). On remarque que les axes sont majoritairement orientés ouest-est, bien qu'au sud de la zone on retrouve 2 axes drainant du sud au nord. Tous les axes de la partie est convergent vers l'Yonne. Les zones de recharge de l'aquifère sont plus présentes dans la partie nord-ouest. Il s'agit des parties les plus hautes de la surface piézométrique, où les hydroisopièzes sont rondes. La partie nord présente des gradients beaucoup plus forts que la partie sud, où les courbes de niveau sont bien plus espacées. L'observation la plus marquante de cette carte est que l'on remarque bien qu'en période de hautes eaux les rivières drainent systématiquement la nappe. Un important bassin de drainage est d'ailleurs situé au centre de la zone.

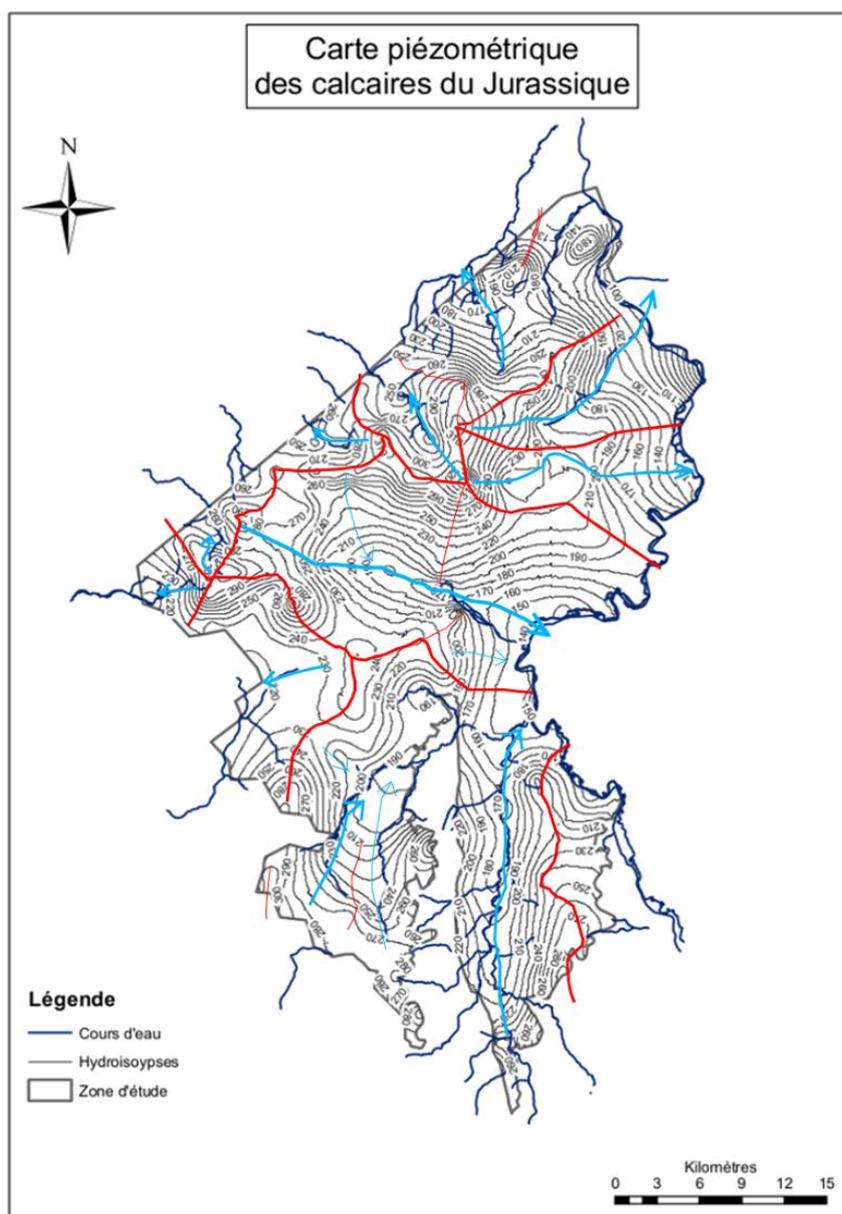


Figure 15 : Carte piézométrique annotée.

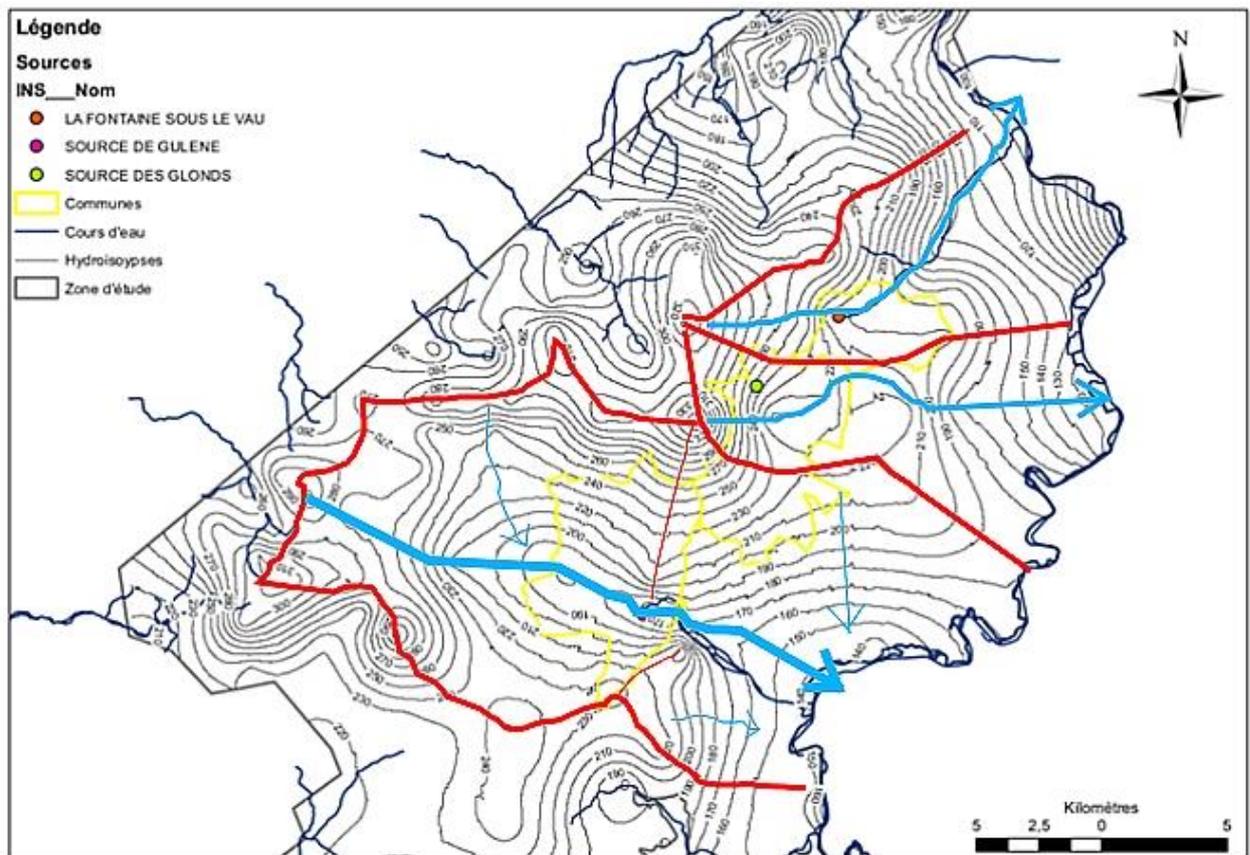


Figure 16 : Carte piézométrique annotée zoomée.

La figure 16 reprend les axes de drainage et les crêtes piézométriques sur la carte centrée sur les communes de Druyes, Courson et Charentenay.

Le bassin de drainage principal évoqué précédemment correspond en fait à la source de Gulène de Druyes-les-Belles-Fontaines. Contrairement à cette source, celles de Courson et de Charentenay ont un bassin beaucoup plus petit, environ moitié moins. Pourtant ces bassins ont été plus difficiles à délimiter car l'analyse des isopièthes dans ce secteur est compliquée.

4) Incertitudes et limites

Les incertitudes et les limites de la carte piézométrique résident dans de nombreux points liés à sa réalisation, de la prise de données à l'interprétation de la carte. Tout d'abord, sur le terrain les relevés piézométriques ont été la source de biais potentiels. En effet, certains puits ont pu être exploités (pompés) sans que les agents de terrain n'en ai été informés, ce qui diminuerait artificiellement le niveau de ces ouvrages. De plus, lors de la prise des mesures il y a toujours une incertitude liée au fait que ce soit des mesures manuelles à l'aide d'outils de mesures avec une précision au centimètre (sonde piézométrique pour le niveau d'eau et mètre ruban pour la mesure de la hauteur du repère). Le choix du repère a également pu avoir une influence car les margelles ne sont pas toujours planes, parfois même absentes ce qui ne facilite pas la répétitivité des mesures.

Pour pallier à ces incertitudes sur la prise de mesures sur le terrain, l'idéal aurait été qu'une seule personne réalise les mesures et que les ouvrages soient tous identiques. Or cela est impossible car les mesures pour réaliser une carte piézométriques doivent être prises dans un laps de temps le plus court possible donc la multiplication des agents de terrain est indispensable pour une telle surface d'étude. De plus, les ouvrages ne peuvent pas être identiques étant donné que ce sont des puits et non des piézomètres dans la quasi-totalité des cas.

Sur le terrain, la mesure du niveau des sources n'a pas été chose facile non plus. En effet chaque ouvrage autour d'une source était différent (bassin après la source, ouvrage drainant, source non aménagée...). De ce fait des erreurs peuvent en découler car les mesures n'ont pas toujours été prises au même endroit, celles-ci dépendant de la morphologie des sources ; parfois dans le bassin après la source, parfois à la sortie de la source etc. Cependant il est difficile là-aussi de corriger cette cause d'erreurs potentielle.

Au moment de renseigner l'altitude des ouvrages pour ensuite pouvoir connaître le niveau piézométrique en m NGF, c'est l'altitude du MNT qui a été utilisée. Le MNT a une précision au mètre, ce qui a pu entraîner des erreurs sur l'altitude piézométrique. Cependant il n'était pas envisageable pour ce projet de faire appel à un géomètre car le nombre de points était beaucoup trop important, et donc le coût trop important.

La réalisation de la carte à l'aide du logiciel GDM a engendré plusieurs sources d'erreurs possibles. Bien que plusieurs logiciels aient été testés et que GDM ai donné les meilleurs résultats, l'interpolation est une étendue de valeurs ponctuelles et non des valeurs exactes en tous points. De ce fait, la valeur extrapolée à un point x n'est pas forcément exactement identique à celle que l'on trouverait si on effectuait un forage en ce point. De plus, les points en bordure de la carte ont une incertitude plus grande que ceux au centre. Cela vient du fait que ces points en bordure ont moins de points autour d'eux, tandis que ceux au centre ont plus de voisins ; leur approximation par interpolation est donc plus juste compte tenu du fait que le krigeage se base sur les points voisins pour réaliser l'interpolation. Il aurait été difficile de résoudre ce problème car les bordures de la carte piézométrique réalisée correspondent aux limites d'aquifères. Donc même si sur le terrain des points avaient été pris autour de la zone pour palier aux incertitudes liées aux bordures de la carte, ces points auraient été dans un aquifère différent et donc leur interpolation avec des points de notre zone aurait été fautive.

Un des points de réflexion intéressant mais sur lequel il est très difficile d'apporter une solution est la répartition des points de mesure. En effet pour qu'un modèle statistique soit représentatif de la réalité il faut que la variable soit aléatoire. Or les points de la carte piézométrique ne sont finalement pas répartis de manière aléatoire ni également répartis sur le maillage initial. En effet sur 311 points de mesure, 262 sont des puits. Les puits sont des ouvrages construits là où l'eau était plutôt facilement accessible donc peu profonde. On peut donc supposer que l'échantillonnage est biaisé, les valeurs d'altitude piézométrique faibles sont faiblement représentées.

Lors du tracé de la carte piézométrique, un essai de contraindre la surface piézométrique sous la surface topographique avait été réalisé ; puis abandonné car il ne semblait pas représenter la réalité (carte piézométrique identique à la carte topographique avec une altitude inférieure). Cependant, lors de cet essai le nuage de corrélation (figure 17) entre les variables piézométrie et topographie avait été réalisé, et il montrait une forte corrélation entre les deux. On peut alors se demander s'il n'y a pas un lien plus étroit entre piézométrie et topographie. Mais avec les logiciels à disposition pour cette étude il était impossible de contraindre la piézométrie avec la topographie sans que celles-ci soient parallèles, ce qui pour une surface piézométrique est incohérent par rapport à la réalité.

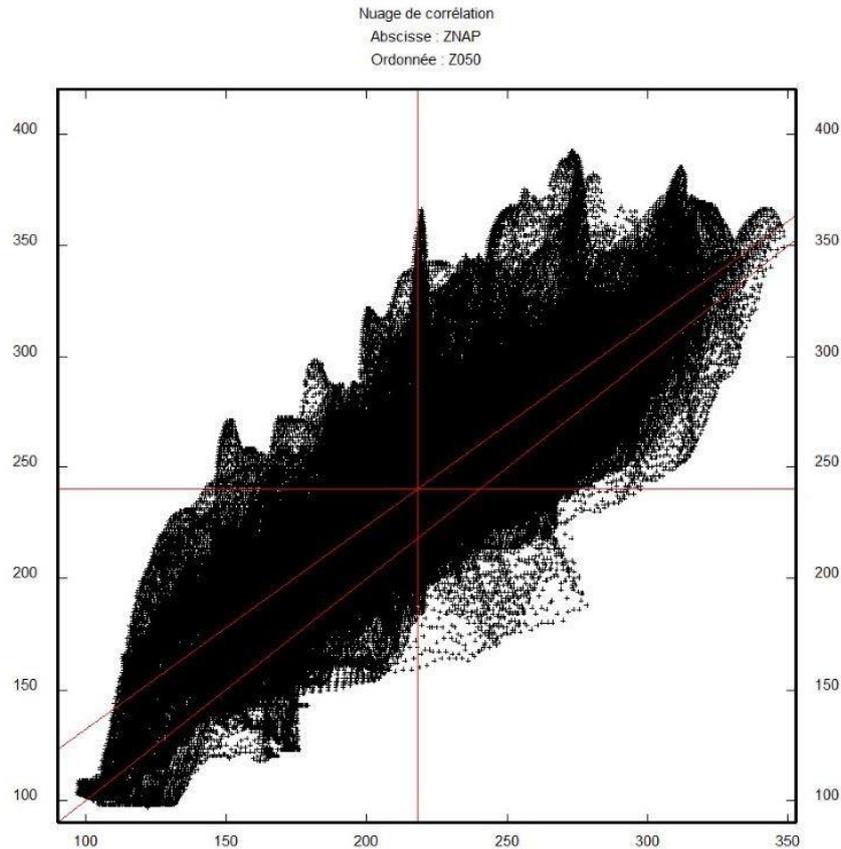


Figure 17 : Nuage de corrélation entre surface piézométrique (ZNAP) et surface topographique (Z050).

Pour réaliser la carte piézométrique, un gros travail a été nécessaire pour trier et corriger les données, réaliser et tracer la carte piézométrique propre et comprendre les mécanismes mis en jeu. Au début de ce projet nous ne pensions pas que ces étapes auraient une telle importance, tant en heures de travail qu'en impacts sur la carte finale.

IV- Comparaison avec les études d'AAC choisies

1) Comparaison avec l'étude AAC de Charentenay

Le captage de Charentenay à la source de la Fontaine sous le Vau assurait avant 2012 l'alimentation en eau potable de la commune. Après cette date elle n'a plus été utilisée pour l'alimentation en eau potable car les eaux captées présentaient trop de problèmes de qualité.

Pour délimiter l'AAC, le bureau d'étude ne disposait que de très peu de données. Dans le rapport est notamment souligné le manque de traçages au droit de la source. Toujours d'après le bureau d'études, les caractéristiques géologiques et hydrogéologiques définissent une typologie discontinue karstique si on se base sur la méthodologie de 2007 du BRGM. Selon cette méthodologie il faut tout d'abord estimer la Portion de Nappe Alimentant le Captage (PNAC), puis délimiter l'étendue du bassin en surface à partir de laquelle se fait la recharge totale de la PNAC ; c'est l'AAC.

Le bureau d'étude précise qu'une AAC n'a pas de limite fixe, celle-ci peut évoluer en fonction de la variation naturelle de la piézométrie. Pour eux, ce fût difficile de délimiter l'AAC de ce captage car ils ne disposaient pas de cartes piézométriques. Ils ont donc considéré que la PNAC serait la même que le bassin versant superficiel, et que l'AAC serait identique à la PNAC. L'AAC déterminée par le bureau d'études est présenté sur la figure 18. Aucune limite structurale n'est mise en évidence par le bureau d'études pour tracer l'AAC. Celle-ci n'est définie que par le seul critère des écoulements de surface.

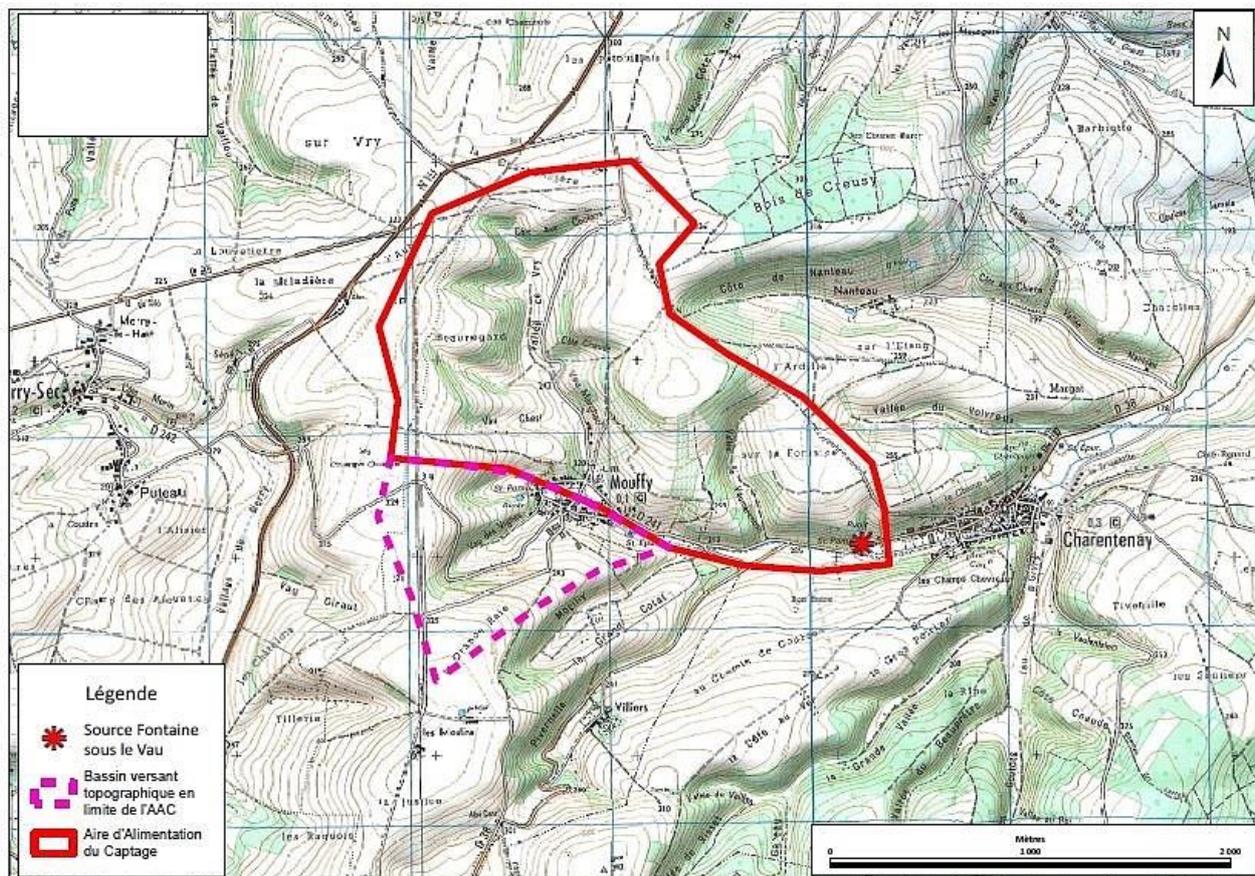


Figure 18 : Aire d'Alimentation du Captage de la Fontaine sous le Vau d'après le bureau d'études.

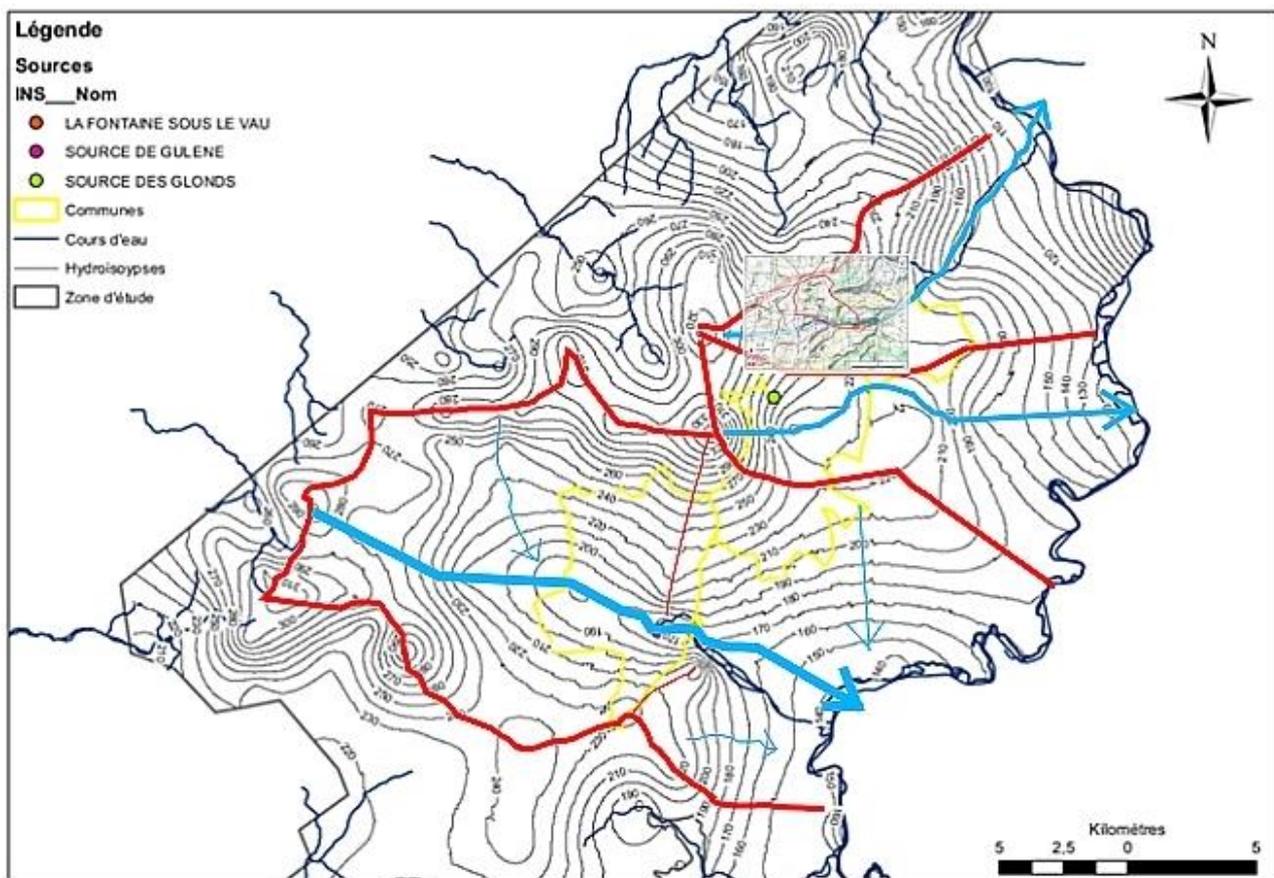


Figure 19 : AAC de la Fontaine sous le Vau délimité par le bureau d'études sur fond de la carte piézométrique.

La figure 19 permet de voir que l'AAC n'est pas assez étendue à l'ouest ainsi qu'au sud. En effet, les crêtes piézométriques indiquent que les eaux dans ces directions vont aussi converger vers la source de la Fontaine sous le Vau.

2) Comparaison avec l'étude AAC de Courson-les-Carières

Cette source n'est pas utilisée pour l'alimentation en eau potable. Elle est également de typologie karstique discontinue et la même méthode a été utilisée par le bureau d'étude pour délimiter l'AAC. Il a conclu que l'AAC était la superposition bassin souterrain supposé et du bassin versant superficiel. L'AAC qui en résulte est représenté sur la figure 20.

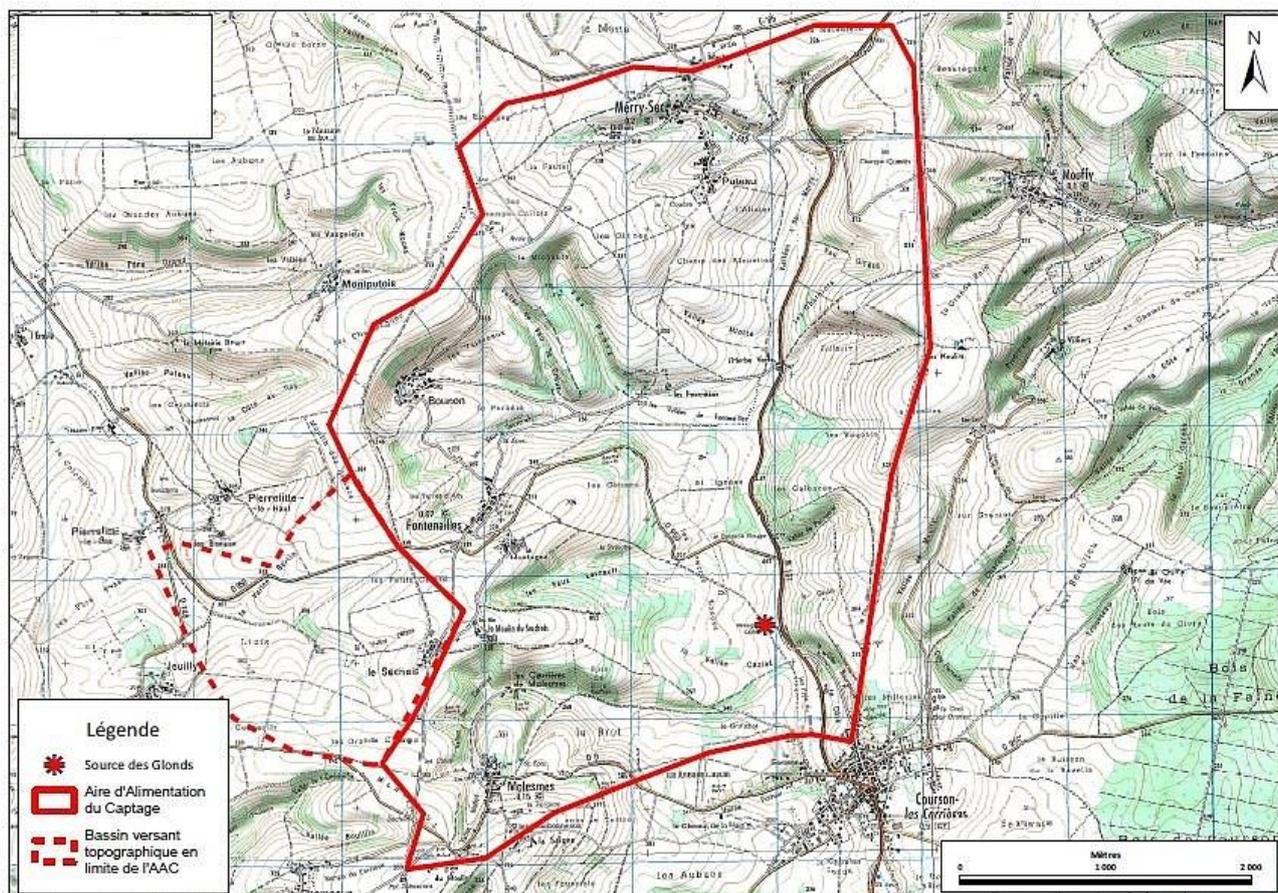


Figure 20 : Aire d'Alimentation du Captage de la Source des Glonds d'après le bureau d'études.

Le bureau d'étude souhaitait dans son rapport s'appuyer sur une méthode d'hydrodynamique graphique (= interprétation d'une carte piézométrique pour définir les lignes de partage des eaux entre les différents bassins hydrogéologiques) pour tracer l'AAC. Or, il n'y en avait pas au moment de la réalisation de leur étude.

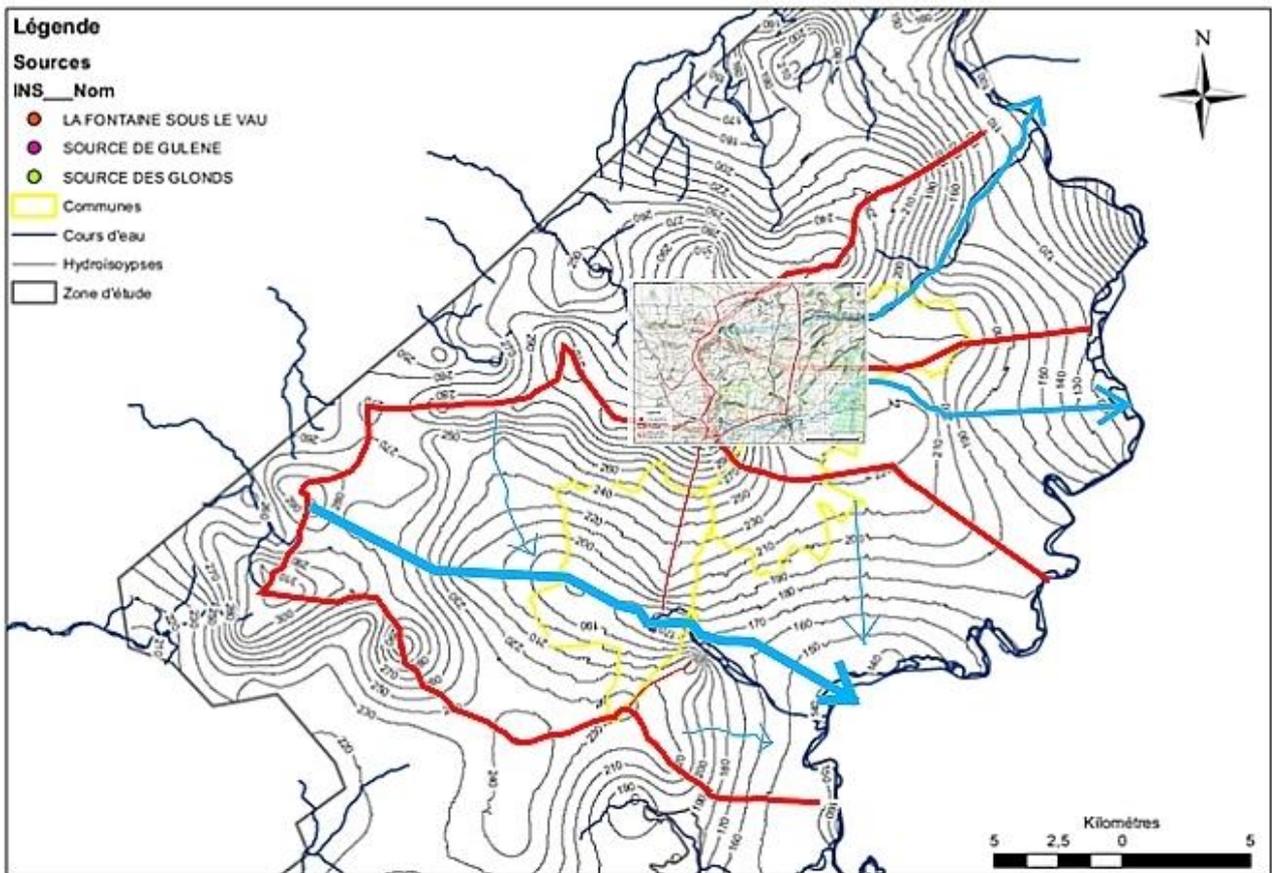


Figure 21 : AAC de la Source des Glonds délimité par le bureau d'études sur fond de la carte piézométrique.

Maintenant qu'il existe une carte piézométrique sur la région, elle ne semble pas en accord avec le tracé de la figure 20. En effet la figure 21 montre que la limite au nord est trop éloignée du captage, tandis que celle au S mériterait d'être élargie. En revanche les limites est et ouest sont cohérentes avec les lignes de crête déterminées grâce à la piézométrie.

3) Comparaison avec l'étude AAC de Druyes-les-Belles-Fontaines.

Là-aussi, la même méthodologie a été appliquée par le bureau d'études. La typologie de la source est discontinue karstique. 3 critères ont été utilisés pour délimiter l'AAC : les limites structurales de la formation aquifère, une carte piézométrique ancienne et à l'échelle mal adaptée et des traçages eux aussi anciens. Le bureau d'étude a conclu que l'AAC correspond au bassin versant élargi jusqu'à une faille à l'est. Cette AAC est visible sur la figure 22.

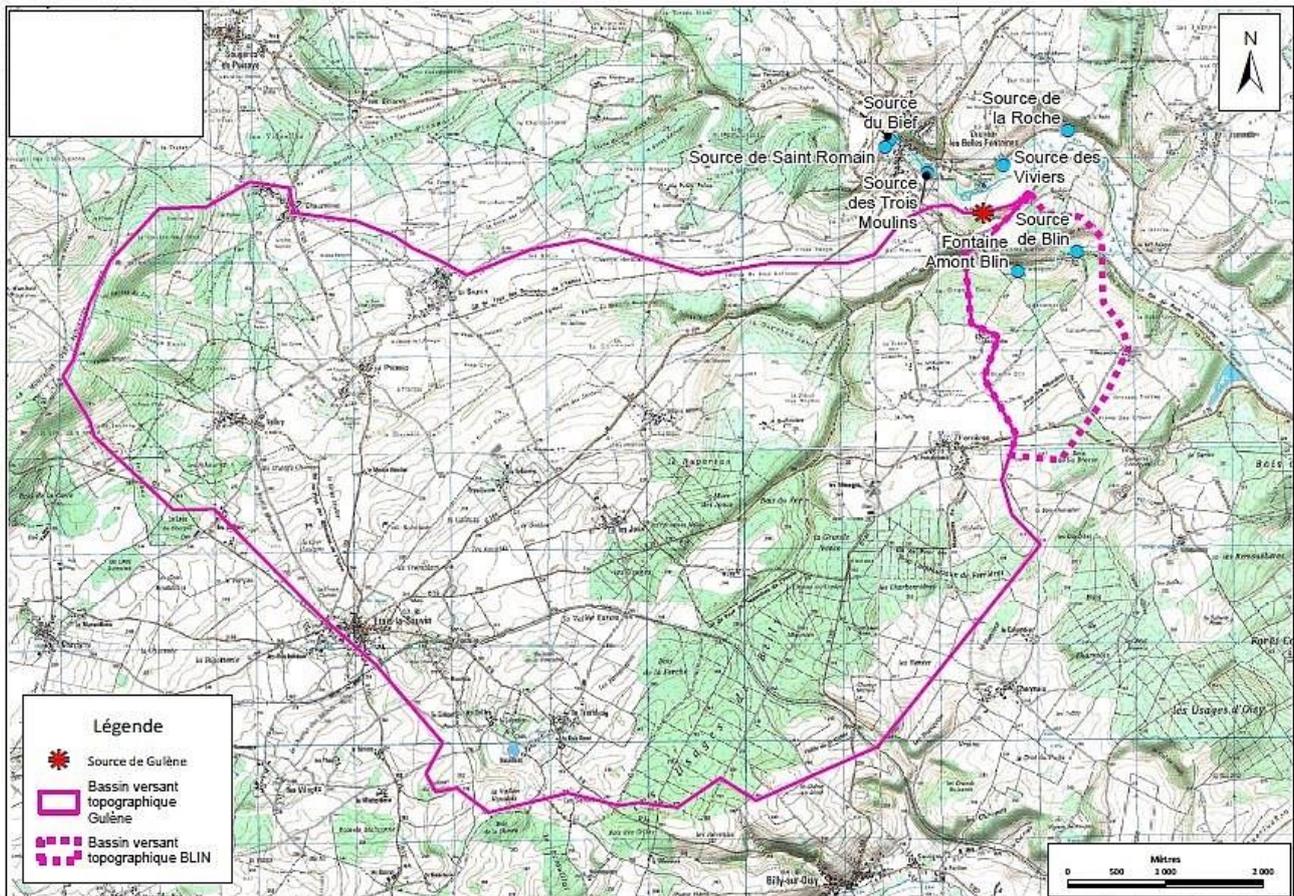


Figure 22 : Aire d'Alimentation du Captage de la Source de Gulène d'après le bureau d'études.

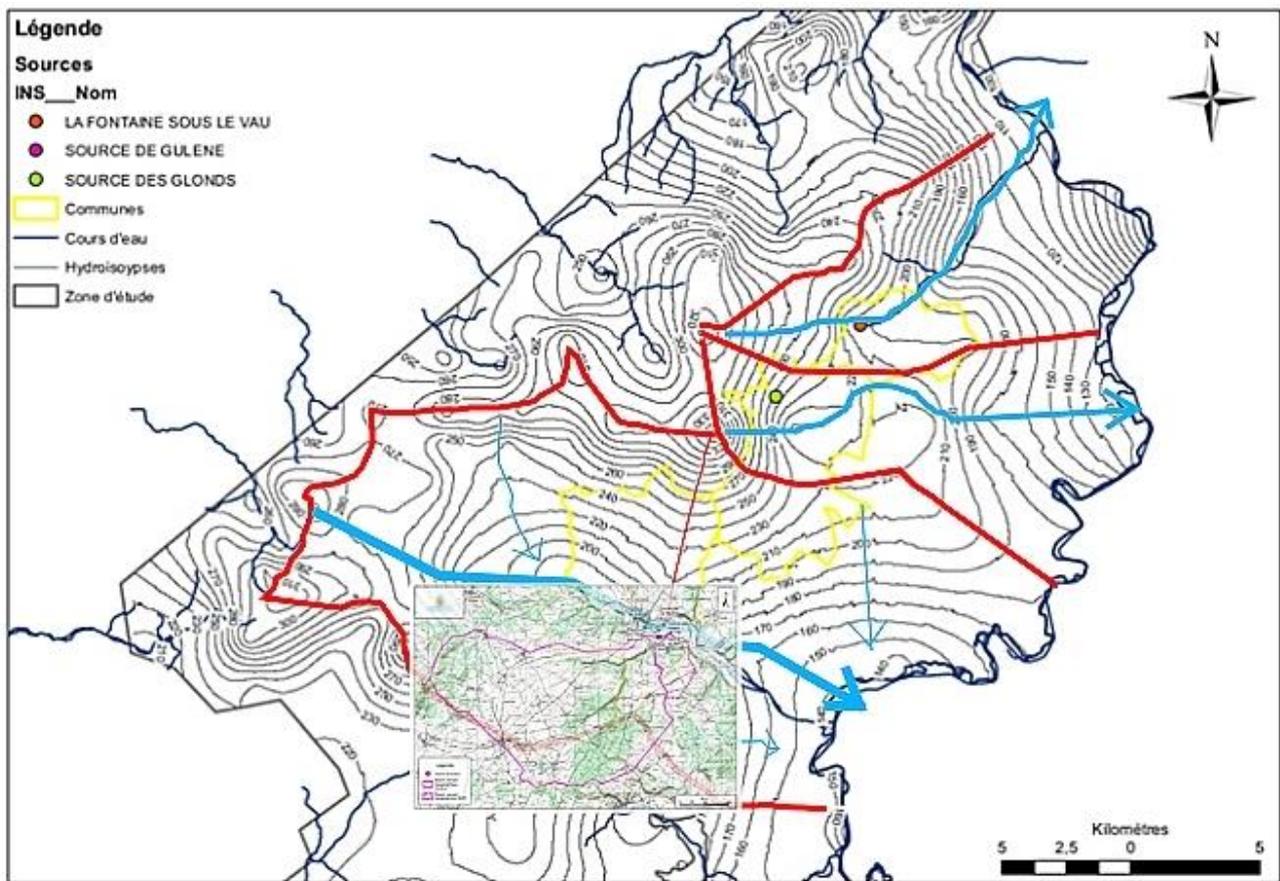


Figure 23 : AAC de la Source de Gulène délimité par le bureau d'études sur fond de la carte piézométrique.

La figure 23 montre que dans ce cas l'AAC n'est pas assez étendue au nord. En effet, dans cette direction c'est l'axe de drainage préférentiel qui semble être la limite de bassin d'alimentation. La limite ouest semble cohérente tout comme la limite est, tandis que la limite sud dépasse le bassin formé par les crêtes piézométriques. Elle mériterait d'être redessinée en suivant la ligne de crête piézométrique.

4) Synthèse de ces comparaisons.

La carte piézométrique réalisée pour l'Agence de l'Eau et présentée dans ce rapport se révèle être d'une aide précieuse pour comprendre l'hydrogéologie de la zone. En effet, grâce aux différentes études d'AAC réalisées dans le secteur, nous avons pu mettre en évidence que le manque de carte piézométrique a rendu la délimitation des AAC dans cette zone difficile ; provoquant même des incohérences entre la délimitation des AAC et le comportement hydrologique de la nappe. D'ailleurs, le bureau d'étude avait déjà souligné ce problème dans ses études concernant les captages de Charentenay, Courson-les-Carières et Druyes-les-Belles-Fontaines.

Les incohérences observées correspondent aux limites qui ne sont pas toujours placées au même endroit, donnant des AAC qui ont une surface différentes de ce que montre la carte piézométrique.

Cependant, il faut rester prudent quant aux conclusions de ces comparaisons. En effet, la carte piézométrique est un outil précieux pour délimiter les AAC, mais on ne peut en réalité se baser uniquement sur cela. Il faut la coupler avec d'autres informations comme par exemple des coupes hydrogéologiques pour comprendre la structure de l'aquifère ou des traçages indiquant les sens d'écoulement.

Conclusion

La campagne de terrain réalisée au mois d'avril 2015 a permis au BRGM de réaliser une carte piézométrique des calcaires et des marnes du Dogger-Jurassique supérieur du Nivernais nord et des calcaires du Jurassique supérieur de l'aquifère Albien-Néocomien entre Loire et Yonne basée sur 311 points de mesure. Cette carte commandée par l'Agence de l'Eau Seine-Normandie pour mieux connaître ces aquifères en terme de piézométrie a augmenté les connaissances sur le fonctionnement hydrogéologique de la région. En effet, elle est la première dans la région et met en évidence les sens d'écoulement principaux, les crêtes piézométriques et les aires d'alimentation de la nappe étudiée.

Afin de montrer à quoi pourrait servir une carte piézométrique, j'ai choisi d'analyser 3 études d'AAC avec tracés avant que cette carte n'existe. Cette analyse a mis en évidence des incohérences entre les informations tirées de la carte piézométrique et les 3 études AAC réalisées par le bureau d'études sur le secteur. N'ayant pas de carte piézométrique à disposition, le bureau d'études ne disposait pas de ces informations au moment de leur délimitation des AAC. Certaines limites sont concordantes, cependant la plupart ne le sont pas. En effet les 3 AAC ne sont pas assez étendus au regard des lignes de crête piézométriques identifiées grâce à la carte réalisée. Pourtant, il est impossible de se baser uniquement sur une carte piézométrique pour tracer une limite d'AAC. C'est en effet une combinaison de plusieurs informations comme une carte piézométrique, des traçages, une étude hydrogéologique, une étude pédologique etc... qui vont permettre de tracer l'AAC la plus pertinente.

La carte piézométrique réalisée apporte donc bien des informations sur le tracé des 3 études d'AAC choisies, même si elle n'est pas le seul paramètre à prendre en compte.

Cette carte reste à améliorer par la suite, notamment sur le lissage des isolignes et sur quelques points que souhaite retravailler l'Agence de l'Eau. De plus, pour pouvoir avoir une information plus complète sur le secteur étudié, il ne faut pas se limiter à une seule carte piézométrique. En effet, cette carte est une photographie de la surface de la nappe à un instant t, or cette surface fluctue au cours du temps. La fluctuation des niveaux piézométrique est particulièrement remarquable entre hautes eaux et basses eaux, c'est-à-dire entre le moment où les nappes sont au plus haut (sortie d'hiver) et où elles sont au plus bas (sortie d'été). C'est pour cette raison qu'une deuxième campagne de mesures sur le terrain a été réalisée fin août 2015, et qu'une deuxième carte piézométrique sur la même zone mais en basses eaux sera réalisée. Cette seconde carte apportera des précisions supplémentaires sur le fonctionnement de la nappe et permettra une comparaison avec la carte en hautes eaux.

Bibliographie

- BRGM, 1997, Synthèse hydrogéologique et structurale des aquifères du vézelien et des plateaux de Bourgogne ouest et sud-ouest (Yonne), Rapport BRGM.
- Brugeron A., 2012, Cartographie et systèmes d'information géographique pour la gestion des ressources en eau souterraine, Rapport BRGM.
- Carte hydrogéologique au 1/50 000 d'Auxerre, BRGM.
- Carte géologique au 1/50 000 d'Auxerre (n°402), BRGM.
- Carte géologique au 1/50 000 de Chablis (n°403), BRGM.
- Carte géologique au 1/50 000 de Clamecy (n°465), BRGM.
- Carte géologique au 1/50 000 de Courson-les-Carières (n°434), BRGM.
- Carte géologique au 1/50 000 de Préméry (n°495), BRGM.
- Carte géologique au 1/50 000 de Saint-Fargeau (n°433), BRGM.
- Carte géologique au 1/50 000 de Vermenton (n°435), BRGM.
- Gratton Y., 2002, Le Krigeage : la méthode optimale d'interpolation spatiale, Les articles de l'Institut d'Analyse Géographique.
- Matheron G., 1969, Le Krigeage Universel, Les Cahiers du Centre de Morphologie Mathématique de Fontainebleau.
- Mazenc B., 1989, Qualité des eaux souterraines, traitement statistiques et cartographiques des données physicochimiques du département de l'Yonne.
- Mégnien C., 1964, Observations hydrogéologiques sur le sud-est du Bassin de Paris, BRGM.
- Ponchant L., Massuel S., 2015, La piézométrie, ou mesure de la profondeur de la surface des nappes.
- Rambert B., 1969, Etude bibliographique des phénomènes karstiques du Jurassique de l'Yonne, Rapport BRGM.
- Vernoux J.F., Wuilleumier A., Dörfliger N., 2007, Délimitation des aires d'alimentation de captages d'eau souterraine et cartographie de leur vulnérabilité vis-à-vis des pollutions diffuses. Guide méthodologique, Rapport BRGM.
- Vernoux J.F., Wuilleumier A., Perrin J, 2014, Délimitation des aires d'alimentation de captages d'eau souterraine et cartographie de leur vulnérabilité vis-à-vis des pollutions diffuses. Version révisée du guide méthodologique, Rapport BRGM.

Annexe 1

Exemple d'une « Fiche piézomètre » remplie sur le terrain.

PV DE RECEPTION

Fiche Piézomètre

N° projet	PSP15BOU09	Client	Agence de l'Eau Seine-Normandie
Site	Trucy-sur-Yonne	Département	Yonne
Opérateur(s)	ASSUMEL, GUIADO	Désignation ouvrage	PZ B73
Date/heure visite	23/04/15 à 13h30		

Localisation

N° Photo	Ouvrage dans son environnement: 103-0938	Du repère: 103-0939
----------	--	---------------------

(Situation, accès, lieu, croquis, plan, photographie, descriptif environnement proche...)

Puits dans la rue du Général Leclerc, au bout du village à droite quand on vient de Trucy.



Coordonnées de l'ouvrage	X	749739	Y	6725355
--------------------------	----------	--------	----------	---------

Niveau sol IGN (m NGF)	Zsol	120 m		
------------------------	-------------	-------	--	--

Accès	propriété publique	propriété privée
	<u>Qui contacter</u>	

Observations

Ouvrage	Etat ouvrage:	Puits avec toit arrondi en métal		
	Nature de l'ouvrage	Puits		
	Diamètre ouvrage	80 cm		
	Hauteur de la dalle/sol	50 cm		
	Choix du repère de mesure	margelle		
	hauteur repère/sol	50 cm		

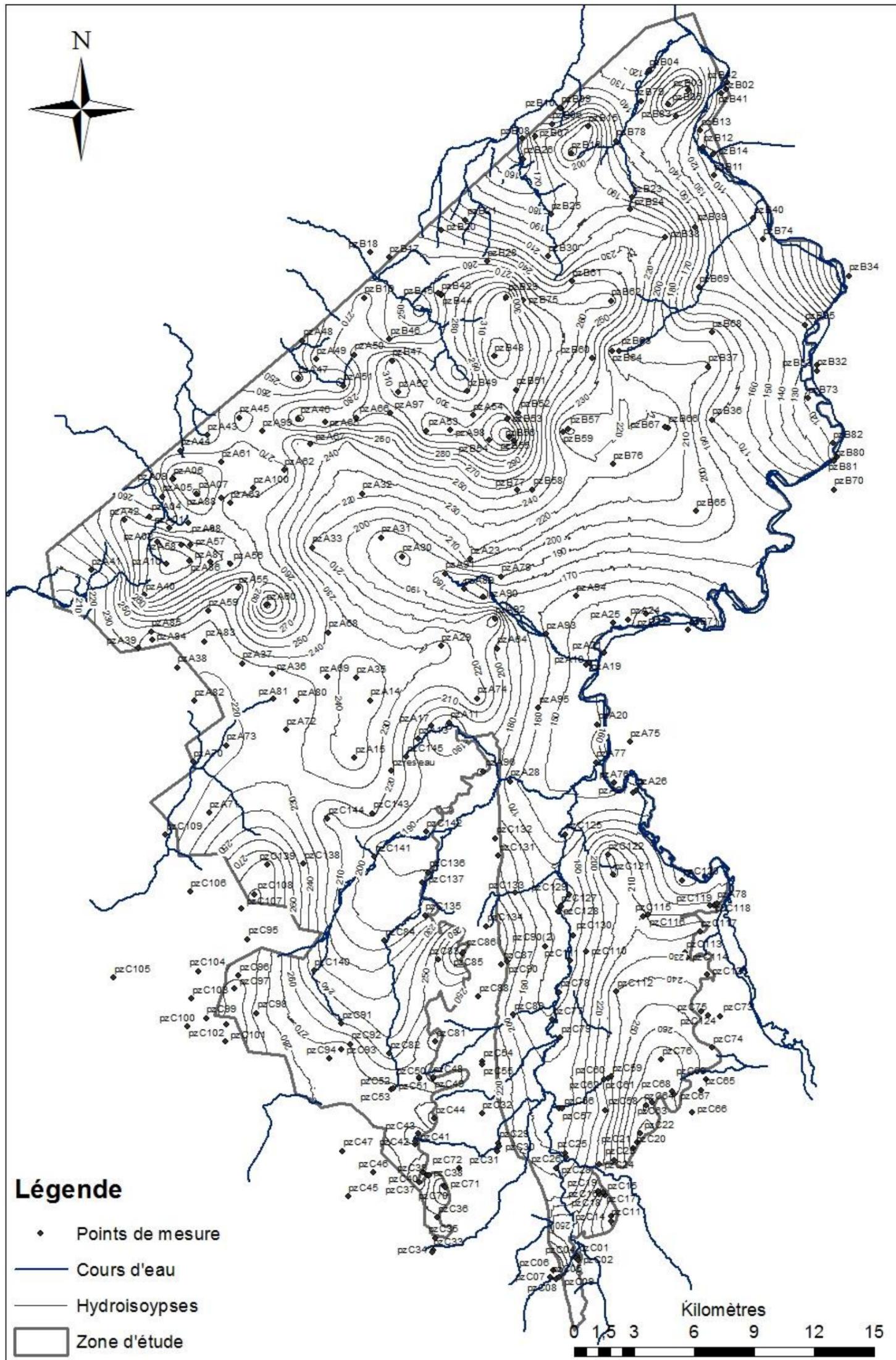
Profondeur	nappe/repère	4 m 35	fond/repère	4 m 97
------------	---------------------	--------	--------------------	--------

Divers (risques/danger liés à l'environnement, facilitée d'accès, observations diverses)

Annexe 2

Carte piézométrique de l'aquifère des calcaires et des marnes du Dogger-Jurassique supérieur du Nivernais nord et de l'aquifère des calcaires du Jurassique supérieur correspondant à l'aquifère de l'Albien-Néocomien entre Loire et Yonne.

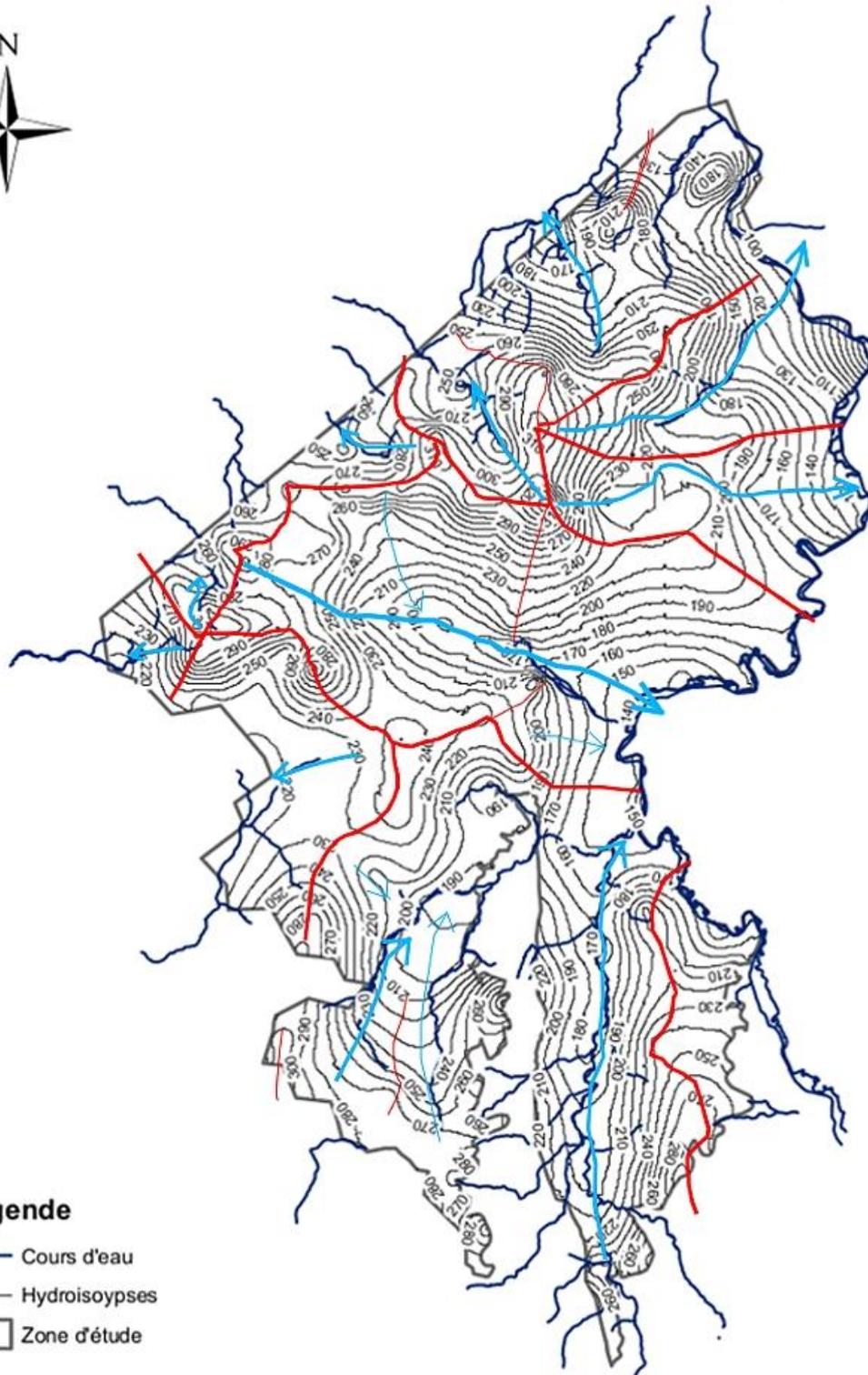
Carte piézométrique des caclaires du Jurassique



Annexe 3

Carte piézométrique annotée.

Carte piézométrique des calcaires du Jurassique



Légende

- Cours d'eau
- Hydroisoysses
- Zone d'étude

Kilomètres
0 3 6 9 12 15

Réalisation d'une carte piézométrique et intérêts dans la délimitation des aires d'alimentation de captage

Résumé

Une carte piézométrique des calcaires du Jurassique supérieur et moyen a été commandée au BRGM de Bourgogne par l'Agence de l'Eau Seine-Normandie. Cette carte a été réalisée dans une région allant d'Auxerre jusqu'au sud de Clamecy, sur les masses d'eau souterraines (MESO) 4061 et 3217. Ces MESO correspondent aux calcaires et marnes du Dogger-Jurassique supérieur du Nivernais nord et aux calcaires du Jurassique supérieur de l'Albien-Néocomien entre Loire et Yonne. Pour réaliser cette carte en contexte de hautes eaux, une campagne de mesures sur le terrain a été mise en place. Cette campagne a nécessité deux semaines de travail pour six agents du BRGM. Au total 311 points de mesure ont été relevés et cela a permis, après traitement des données, de réaliser la carte piézométrique avec le logiciel GDM.

L'analyse de la carte réalisée a permis d'identifier les lignes de crêtes piézométriques, les sens d'écoulements préférentiels et les aires d'alimentation de la nappe. Suite à cela, une comparaison avec trois études d'Aire d'Alimentation de Captage (AAC) définies par un bureau d'étude a mis en relief les discordances entre ce que le bureau d'étude avait tracé comme limite d'AAC et ce que la carte piézométrique identifiait. La différence entre les deux réside principalement dans la surface, qui est sous-estimée dans les rapports du bureau d'étude si on la compare aux lignes de crêtes piézométriques de la carte réalisée.

Mots clés

Piézométrie, carte piézométrique, Aire d'Alimentation de Captage

Production of a piezometric map and interests in the groundwater catchment areas delimitation

Summary

The "Agence de l'Eau Seine-Normandie" commissioned the "BRGM" to realize a piezometric map of the upper and middle Jurassic limestone. This map was produced in an area going from Auxerre to south of Clamecy, on groundwater bodies 4061 and 3217. These groundwater bodies match the limestone and marl from the upper Dogger-Jurassic of north Nivernais and Albian-Neocomian upper Jurassic limestone between Loire and Yonne. To realize this map in winter high water, a field program was set up. This field program required two weeks of work for six BRGM agents. In total three hundred and eleven measurement points were recording and it allowed to, after data processing, realize the piezometric map with the software GDM.

The analysis of the piezometric map allowed to identify the piezometric ridgelines, the favoured drainage axis and preferential areas of infiltration. Then, a comparison with tree studies of groundwater catchment areas delimitations was highlighted mismatches with the piezometric map information. The difference between the two is mainly in the surface; in fact the surface is underestimated in the three studies if we compare it with the piezometric ridgelines in the realized map.

Key words

Piezometry, piezometric map, groundwater catchment area