



Champs captants de Montreuil et Vert-en-Drouais (28) : délimitation des bassins d'alimentation de captages et des zones vulnérables

Rapport final

BRGM/RP-58587-FR

Décembre 2010



Champs captants de Montreuil et Vert-en-Drouais (28) : délimitation des bassins d'alimentation de captages et des zones vulnérables

Rapport final

BRGM/RP-58587-FR

Décembre 2010

Étude réalisée dans le cadre des projets de Service public du BRGM 08EAUK85

JF. Vernoux, E. Buscarlet, L. Gourcy, A. Wulleumier

Vérificateur :

Nom : Jérôme Perrin

Date : 28/02/2013

Signature :



Approbateur :

Nom : Serge Lallier

Date : 22/08/2013

Signature :



En l'absence de signature, notamment pour les rapports diffusés en version numérique, l'original signé est disponible aux Archives du BRGM.

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

Mots clés : bassin d'alimentation de captage, alimentation en eau potable, bassin versant souterrain, pollution diffuse, nitrates, vulnérabilité intrinsèque, Vert-en-Drouais, Montreuil.

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

JF. Vernoux, E. Buscarlet, L. Gourcy, A. Wuilleumier (2010) - Champs captants de Montreuil et Vert-en-Drouais (28) : délimitation des bassins d'alimentation de captages et des zones vulnérables, rapport final – rapport BRGM/RP-58587-FR, 132 pages, 81 figures, 10 tableaux, 2 annexes

Synthèse

EAU DE PARIS souhaite lancer des actions de protection de la ressource en eau souterraine sur deux champs captants situés en Eure-et-Loir, en zone alluviale : le champ captant de Vert-en-Drouais et celui de Montreuil qui montrent des teneurs en nitrates entre 35 et 45 mg/l. La protection de cette ressource passe par la mise en œuvre de plans d'actions de lutte contre les pollutions diffuses dans les zones les plus vulnérables des aires d'alimentation de captages.

Les captages se situent respectivement dans les vallées de l'Avre et de l'Eure. Les nappes alluviales sont de faible extension mais alimentées par la nappe de la craie qui est, elle, d'extension régionale. Les captages étant situés à proximité des cours d'eau, il est important pour les protéger de connaître la part d'alimentation entre la nappe de la craie, la nappe alluviale et le cours d'eau. Cette caractérisation a été établie sur la base d'une étude hydrologique et hydrogéologique qui comportait deux campagnes piézométriques (hautes eaux et basses eaux), d'une modélisation hydrologique globale (avec le logiciel GARDENIA), d'une modélisation hydrodynamique (avec le logiciel MARTHE) et d'une étude géochimique intégrant des campagnes d'analyse isotopiques et de gaz rares.

L'étude hydrologique montre que dans le secteur des captages, l'Avre a un débit d'étiage nettement plus important (par rapport au débit de hautes eaux) que l'Eure ce qui indique que le soutien par la nappe de la craie est plus important. Les deux cartes piézométriques réalisées dans le cadre de l'étude montrent nettement un drainage de la nappe de la craie par les cours d'eau et permettent de bien délimiter le bassin versant hydrogéologique de la rive droite de l'Avre à l'intérieur duquel se situent les captages de Vert-en-Drouais. La modélisation du débit de l'Avre à Musy indique une part importante des écoulements lents, ce qui traduit une forte participation des eaux souterraines au débit de l'Avre dans cette partie du bassin versant.

L'étude hydrogéochimique a été réalisée à partir des données acquises par Eau de Paris depuis 1990, des informations de la base de données ADES et des données acquises lors de deux campagnes de prélèvements complètes et trois campagnes partielles. La première campagne de prélèvement effectuée en mars 2009 inclut 10 points d'eau souterraines sur les deux champs captants de Vert-en-Drouais et Montreuil et les eaux des rivières Eure et Avre. La deuxième campagne s'est déroulée en novembre 2009 et a permis l'échantillonnage des eaux souterraines des champs captants, des rivières Eure, Avre et Blaise et d'eau souterraine localisée dans les secteurs susceptibles d'appartenir aux aires d'alimentation des captages. En mai, août et octobre deux forages du champ captant de Montreuil et la rivière Eure ont été prélevés dans le but de définir les meilleurs traceurs pour l'étude des relations nappes-rivières dans le contexte local. Au total ce sont 6 familles de traceurs qui ont été testés ; isotopes stables de la molécule d'eau ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$), gaz dissous (CFC-11, CFC-12, CFC-113, SF_6), terres rares, éléments traces, rapports $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ et paramètres in-situ température et conductivité. Les outils géochimiques indiquent, sur le secteur de Vert-en-Drouais, une homogénéité chimique des eaux. L'absence de différenciation

entre les eaux de rivière, les eaux de l'aquifère alluvial et les eaux de la craie indique une prédominance de la signature des eaux souterraines (aquifère de la craie) au niveau du champ captant. Cette absence de contraste rend les outils géochimiques peu utilisables pour la détermination du fonctionnement des relations nappes-rivières. Sur le secteur de Montreuil il existe un contraste chimique plus important entre les eaux de surface, les eaux des différents aquifères et les eaux captées aux différents forages. Les apports par la rivière Eure sont sensiblement différents sur les divers forages du champ captant. Les isotopes du strontium indiquent a priori que c'est l'aquifère de la craie en rive droite de l'Eure qui est le plus fortement sollicité lors des pompages. D'autre part un calcul de mélange a permis d'estimer à 20% environ la part d'eau provenant de l'aquifère de la craie au niveau du forage P9 de Montreuil et 80% de la rivière Eure. Cette proportion semble identique en mars et novembre.

Un modèle maillé a été mis en œuvre pour affiner la représentation des écoulements de la nappe de la craie au niveau des deux champs captants, étudier l'impact de leurs exploitations sur les relations nappe/rievière et apprécier leurs zones d'appel. Le modèle a été calé en régime permanent sur la piézométrie basses eaux. Des simulations intégrant l'exploitation des champs captants et un colmatage éventuel du lit des rivières montrent que l'influence du champ captant de Vert-en-Drouais est beaucoup plus étendue que celle de Montreuil. Elles montrent aussi que les débits provenant de la rivière diminuent avec l'intensification du colmatage et surtout que la contribution de l'Avre (8 à 10 %) est beaucoup plus faible que celle de l'Eure (70 à 45 %). Enfin un calcul de trajectoire des particules montre pour les captages de Vert-en-Drouais, une contribution non négligeable des eaux souterraines en rive gauche de l'Avre.

L'utilisation de ces différents outils a permis d'affiner la compréhension des écoulements alimentant les deux champs captants. Pour le champ captant de Vert-en-Drouais, avec une composante eau souterraine très majoritaire, le bassin d'alimentation peut être tracé de façon relativement précise. Il occupe une superficie de 59 km² environ. Pour le champ captant de Montreuil, avec une composante eau de surface majoritaire et une composante eau souterraine qui reste non négligeable, la délimitation est plus délicate car elle devrait théoriquement prendre en compte à la fois le bassin versant souterrain et le bassin versant de surface qui dans le cas présent s'avère extrêmement étendu. Nous avons donc opté pour une délimitation un peu arbitraire en amont à partir des deux dômes piézométriques situés en rive gauche et en rive droite de l'Eure.

Les cartes de vulnérabilité ont été établies en prenant en compte la pluie efficace, la nature, l'épaisseur et la pierrosité du sol, la capacité d'infiltration des formations géologiques de la zone non saturée, l'épaisseur de la zone non saturée et la perméabilité de l'aquifère. Ces cartes de vulnérabilité, une fois combinées au diagnostic des pressions agricoles, permettront d'élaborer des cartes de sensibilité pour la mise en œuvre de plans d'action de lutte contre les pollutions diffuses.

Sommaire

| | |
|---|-----------|
| 1. Introduction | 13 |
| 2. Champs captants et contexte hydrogéologique | 14 |
| 2.1. PRESENTATION DES CHAMPS CAPTANTS | 14 |
| 2.1.1. Localisation | 14 |
| 2.1.2. Description des champs captants..... | 15 |
| 2.2. CONTEXTES GEOGRAPHIQUE ET CLIMATIQUE | 17 |
| 2.2.1. Altitudes et pentes..... | 17 |
| 2.2.2. Anthropisation | 19 |
| 2.2.3. Contexte climatique..... | 21 |
| 2.3. CONTEXTE HYDROLOGIQUE | 23 |
| 2.3.1. Bassin versant de l'Avre | 23 |
| 2.3.2. Bassin versant de l'Eure..... | 26 |
| 2.3.3. Bassin versant de la Blaise | 27 |
| 2.4. CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE | 28 |
| 2.4.1. Géologie..... | 28 |
| 2.4.2. Les argiles à silex..... | 33 |
| 2.4.3. Capacité d'infiltration des formations | 37 |
| 2.4.4. Productivité des aquifères et karstification..... | 39 |
| 2.4.5. Piézométrie | 41 |
| 2.4.6. Cartes piézométriques | 44 |
| 2.5. QUALITE DE LA NAPPE DE LA CRAIE VIS-A-VIS DES NITRATES | 51 |
| 3. Modélisation hydrologique globale des bassins versants de l'Avre et de l'Eure53 | |
| 3.1. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DU MODELE GARDENIA..... | 53 |
| 3.1.1. Principes et objectifs | 53 |
| 3.1.2. Schématisation du bassin versant..... | 55 |
| 3.2. DONNEES COLLECTEES | 56 |
| 3.3. MODELISATION DU BASSIN VERSANT..... | 57 |
| 3.3.1. Données utilisées..... | 57 |
| 3.3.2. Résultats | 58 |

| | |
|---|-----------|
| 4. Analyses géochimiques pour l'estimation des relations eau de surface-eau souterraine..... | 61 |
| 4.1. METHODOLOGIE | 61 |
| 4.1.1. Méthodes de mesures | 61 |
| 4.1.2. Qualité des eaux aux champs captant de Montreuil et Vert-en-Drouais.. | 61 |
| 4.1.3. Choix des points de prélèvement..... | 62 |
| 4.2. LES RESULTATS DE LA CAMPAGNE DE PRELEVEMENT DE MARS 2009 | 63 |
| 4.2.1. Diagramme de Piper : faciès chimique des eaux | 63 |
| 4.2.2. Relation inter-éléments..... | 64 |
| 4.2.3. Rapports élémentaires | 67 |
| 4.2.4. Approche isotopique..... | 69 |
| 4.2.5. Datation des eaux | 69 |
| 4.3. SELECTION DES OUTILS ET DES POINTS D'ECHANTILLONNAGES..... | 70 |
| 4.3.1. Isotopes du strontium | 70 |
| 4.3.2. Terres rares..... | 71 |
| 4.3.3. Eléments traces..... | 73 |
| 4.3.4. Variations des paramètres in-situ | 73 |
| 4.4. RESULTATS DE LA CAMPAGNE DE PRELEVEMENT DE NOVEMBRE 2009 | 75 |
| 4.4.1. Traitement des données existantes | 75 |
| 4.4.2. Approche statistique | 78 |
| 4.4.3. Sélection des points de prélèvement | 79 |
| 4.4.4. Résumé des informations obtenues directement par les outils géochimiques | 89 |
| 5. Délimitation des bassins d'alimentation des captages | 93 |
| 5.1. ESSAI DE DELIMITATION DE LA ZONE D'APPEL A PARTIR D'UNE APPROCHE ANALYTIQUE SIMPLE | 93 |
| 5.1.1. Champ captant de Vert-en-Drouais | 93 |
| 5.1.2. Champ captant de Montreuil..... | 94 |
| 5.2. ELEMENTS DE DELIMITATION DES BASSINS D'ALIMENTATION DE CAPTAGE PAR MODELISATION MAILLEE | 95 |
| 5.2.1. Méthodologie..... | 96 |
| 5.2.2. Modèle conceptuel | 96 |
| 5.2.3. Calage du modèle en régime permanent..... | 97 |
| 5.2.4. Rabattements modélisés | 99 |
| 5.2.5. Zone d'appel des captages..... | 102 |
| 5.2.6. Débits provenant des rivières | 102 |

| | |
|--|------------|
| 5.2.7. Temps de parcours des particules dans la nappe | 106 |
| 5.3. CHOIX FINAL DE DELIMITATION DU BAC | 107 |
| 5.3.1. Champ captant de Vert-en-Drouais | 107 |
| 5.3.2. Champ captant de Montreuil | 109 |
| 6. Vulnérabilité | 111 |
| 6.1. CHOIX DE LA METHODE | 111 |
| 6.2. CARACTERISATION DES DIFFERENTS PARAMETRES..... | 114 |
| 6.2.1. Pluie efficace (P) | 114 |
| 6.2.2. Sol (S) | 114 |
| 6.2.3. Capacité d'infiltration des formations constituant la zone non saturée (I)..... | 116 |
| 6.2.4. Epaisseur de la zone non saturée (H) | 119 |
| 6.2.5. Perméabilité de l'aquifère (K) | 121 |
| 6.3. CARTOGRAPHIE DE LA VULNERABILITE SUR LES BAC..... | 123 |
| 7. Conclusion | 127 |
| 8. Bibliographie | 129 |

Annexe 1 : Formation résiduelle à silex : description du faciès du Drouais

Annexe 2 : Vitesses de transfert de l'eau et des nitrates dans le système craie + argile à silex en Normandie

Liste des figures

| | |
|--|----|
| Figure 1 : Localisation des périmètres de protection des champs captants de Montreuil et de Vert-en-Drouais (sources : EAUDEPARIS et IGN) | 14 |
| Figure 2 : Localisation des puits dans le champ captant de Montreuil (fond IGN 1/25000 ^{ème}) | 16 |
| Figure 3 : Localisation des puits dans le champ captant de Vert-en-Drouais (fond IGN 1/25000 ^{ème}) | 16 |
| Figure 4 : Altitude des terrains au voisinage des champs captant de Montreuil-sur-Epte et de Vert-en-Drouais (d'après MNT de l'IGN au pas de 50 m) | 17 |
| Figure 5 : Pente des terrains au voisinage des champs captant de Montreuil-sur-Epte et de Vert-en-Drouais (calculée à partir du MNT de l'IGN au pas de 50 m) | 18 |
| Figure 6 : Falaise de craie au voisinage du champ captant de Montreuil-sur-Epte (photo extraite du rapport « le champ captant de Montreuil (Eure-et-Loir) » de Gilles Souchet – décembre 1997)..... | 19 |
| Figure 7 : Carte d'occupation des sols selon Corine Land Cover (2006)..... | 20 |
| Figure 8 : Pluviométrie annuelle moyenne selon la grille AURELHY établie par Meteo France..... | 22 |
| Figure 9 : Localisation des principales stations hydrométriques de l'Avre et de l'Eure | 23 |
| Figure 10 : Débit moyen mensuel de l'Avre à la station hydrométrique de Muzy (source : Banque HYDRO) | 24 |
| Figure 11 : Débit moyen mensuel de l'Avre à la station hydrométrique de Acon (source : Banque HYDRO) | 25 |
| Figure 12 : Tronçons hydrauliques de l'Avre (figure issue de l'état des lieux du SAGE de l'Avre)..... | 25 |
| Figure 13 : Débit moyen mensuel de l'Eure aux stations hydrométriques de Sainte-Luperce (en haut) et de Charpont (en bas ; source : Banque HYDRO)..... | 27 |
| Figure 14 : Débit moyen mensuel de la Blaise à la station hydrométrique de Garnay (source : Banque HYDRO) | 28 |
| Figure 15 : Carte géologique du secteur d'étude (extrait de la carte géologique au 1 / 1 000 000 ^{ème} du BRGM) | 29 |
| Figure 16 – Extrait de la carte géologique au 1/50.000 (feuille Dreux) dans le secteur de Vert-en-Drouais | 31 |
| Figure 17 – Extrait de la carte géologique au 1/50.000 (feuille Dreux) dans le secteur de Montreuil | 32 |
| Figure 18 : Epaisseur des formations résiduelles à silex (source : thèse de Florence Quesnel, 1997) - L'ellipse indique la localisation approximative des champs captants..... | 34 |
| Figure 19 : Cartographie des types de faciès des formations résiduelles à silex (source : thèse de Florence Quesnel, 1997) - L'ellipse indique la localisation approximative des champs captants | 35 |

| | |
|---|----|
| Figure 20 : Cartographie des types de faciès des formations résiduelles à silex et limites proposées pour les BAC (en jaune faciès du Drouais et en rouge faciès du Thimerais) | 36 |
| Figure 21 : Indice de Développement et de Persistance des Réseaux sur les bassins versants de l'Avre et de l'Eure | 38 |
| Figure 22 : Localisation des cavités connues au voisinage des champs captants (source : BD Cavités, http://www.bdcavite.net)..... | 40 |
| Figure 23 : Indice de présence d'une cavité à proximité de la ferme des Ormes..... | 41 |
| Figure 24 : Localisation des piézomètres à proximité des champs captants | 42 |
| Figure 25 : Chroniques de piézomètres situés au voisinage des deux champs captants | 43 |
| Figure 26 : Fiche d'un ouvrage mesuré durant la campagne piézométrique de mars 2009 | 46 |
| Figure 27 : Contexte des campagnes de hautes eaux (en bleu) et des basses eaux (en orange) sur deux chroniques piézométriques issues de piézomètres du secteur | 47 |
| Figure 28 : Carte piézométrique de hautes eaux 2009 et points de mesure | 49 |
| Figure 29 : Carte piézométrique de basses eaux 2009 et points de mesure | 49 |
| Figure 30 : Délimitation du bassin versant hydrogéologique de la rive droite de l'Avre aval d'après la carte piézométrique établie à l'échelle de l'Eure-et-Loir..... | 50 |
| Figure 31 : Cartographie des nitrates dans les eaux souterraines de l'Eure-et-Loir (source CG28)..... | 51 |
| Figure 32- Teneurs en nitrates dans les eaux souterraines (données récentes issues d'Eau de Paris et d'ADES)..... | 52 |
| Figure 33 : Représentation schématique des éléments du bilan hydrologique d'un bassin versant | 54 |
| Figure 34 : Principe du modèle hydrologique global GARDENIA pour la simulation du débit d'un cours d'eau ou d'un niveau piézométrique | 56 |
| Figure 35 : Simulation du débit de l'Avre à Muzy | 58 |
| Figure 38 : Concentrations en nitrates des eaux souterraines aux forages P6 et P10 de Montreuil et V1 et V3 de Vert-en-Drouais sur la période 1990-2008..... | 62 |
| Figure 39 : Localisation des points de prélèvement pour la campagne de mars 2009 | 63 |
| Figure 41: Diagramme de Piper pour les eaux de l'Avre et de l'Eure et des eaux souterraines (alluvions + craie) prélevées sur la zone d'étude en mars 2009..... | 64 |
| Figure 42: Température vs. pH et conductivité vs. oxygène dissous pour les eaux de rivières et les eaux souterraines (craie et alluvial) du secteur d'étude | 65 |
| Figure 43: HCO ₃ vs. Ca et Cl vs. NO ₃ pour les eaux de rivières et les eaux souterraines (craie et alluvial) du secteur d'étude (en bleu points dans le bassin versant de l'Eure, en vert points dans le bassin versant de l'Avre) | 65 |
| Figure 44: Na vs. Cl (a), SO ₄ vs. Cl (b), K vs. Cl (c) et Ca vs. Cl (d) pour les eaux de rivières et les eaux souterraines (craie et alluvial) prélevées sur la zone d'étude en mars 2009 (en bleu points dans le bassin versant de l'Eure, en vert points dans le bassin versant de l'Avre)..... | 67 |

| | |
|--|----|
| Figure 45 : Ca/Na vs. Mg/Na pour les eaux de rivières et les eaux souterraines (craie et alluvions) prélevées sur la zone d'étude en mars 2009 | 68 |
| Figure 46 : $\delta^2\text{H}$ vs. $\delta^{18}\text{O}$ ‰ vs VSMOW et ligne météorique régionale à Orléans et zoom sur les données du site d'étude | 69 |
| Figure 47 : $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ vs. $1/\text{Sr}$ pour les eaux collectées en mai 2009 | 71 |
| Figure 48 : Profil des terres rares normalisées pour les points prélevés sur le secteur de Montreuil | 72 |
| Figure 49 : Résultats des analyses des éléments majeurs et traces des eaux prélevées aux forages 6 et 9 et dans l'Eure à Montreuil en octobre 2009..... | 73 |
| Figure 50 : Variations de température et conductivité aux points P9, P6 et rivière Eure sur la période mars – octobre 2009..... | 74 |
| Figure 51 : suivi de la température aux forages 6 et 9 de Montreuil et la rivière Eure de janvier à mars 2010 et moyenne des température maximales de l'air à Chartres en janvier et février 2010 | 74 |
| Figure 52 : Localisation des points retenus pour l'étude régionale de la chimie des eaux souterraines et de la campagne de novembre 2009 | 76 |
| Figure 53 : Diagramme de Piper pour les données extraites de ADES sur la période janvier-mai de 2004 à 2008 ainsi que V5 et P9 d'avril 2009 | 76 |
| Figure 54 : Diagrammes binaires pour les eaux extraites de la base ADES prélevées entre janvier et mai sur la période 2004-2008 | 78 |
| Figure 55 : Résultats de l'AFD : diagramme des variables et des observations..... | 79 |
| Figure 56 : Diagramme de Piper pour les eaux collectées en novembre 2009 | 80 |
| Figure 57 : Comparaison des concentrations en éléments majeurs et in situ pour les eaux collectées en mars et novembre 2009..... | 81 |
| Figure 58 : Diagrammes binaires pour les eaux collectées en novembre 2009 et les eaux de la craie à Luat-Clairnet (mars 2009) | 83 |
| Figure 59 : NO_3 vs Sr et Ca vs Sr des eaux prélevées en novembre 2009 | 84 |
| Figure 60 : Rapports molaires Mg/Na vs Ca/Na pour les eaux collectées en novembre 2009 et Luat-Clairnet (mars 2009)..... | 85 |
| Figure 61 : Rapports molaires NO_3/Na vs Cl/Na pour les eaux collectées en novembre 2009 (et point rouge : Luat-Clairnet, mars 2009) | 85 |
| Figure 62 : Rapports molaires Ca/Sr vs Mg/Sr pour les eaux collectées en novembre 2009 | 86 |
| Figure 63 : $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ vs $1/\text{Sr}$ (molaire) pour les eaux collectées en novembre 2009 et références de la littérature pour les eaux circulant sur la craie du bassin de Paris | 88 |
| Figure 64 : Essai de délimitation de la zone d'appel du champ captant de Vert-en-Drouais..... | 94 |
| Figure 65 : Essai de délimitation de la zone d'appel du champ captant de Montreuil | 95 |
| Figure 66 - Emprise du modèle et conditions aux limites..... | 97 |
| Figure 67 - Distribution des perméabilités simulées..... | 98 |
| Figure 68 - Comparaison des isopièzes simulés et mesurés..... | 99 |

| | |
|---|-----|
| Figure 69 - Rabattements induits par l'exploitation des champs captants dans plusieurs cas de colmatage des rivières [perméabilité du colmatage identique à celle de l'aquifère dans le premier cas (pas de colmatage), perméabilité du colmatage 2 fois plus faible que l'aquifère (cas 2), 20 fois plus faible (cas 3)] | 101 |
| Figure 70 - Trajectoires des particules d'eau pompées pour plusieurs configurations de colmatage de rivière | 104 |
| Figure 71 - Relations nappe-rivière pour un colmatage deux fois inférieur à la perméabilité de l'aquifère. Champs captants de Vert-en-Drouais (haut) et Montreuil (bas) | 105 |
| Figure 72 - Temps de parcours des particules d'eau pompée dans le cas d'une perméabilité de colmatage des rivières à 10^{-5} m/s. | 106 |
| Figure 73 : Délimitation des BAC des champs captant de Vert-en-Drouais et de Montreuil..... | 108 |
| Figure 74 – Découpage des BAC en « unités fonctionnelles » | 113 |
| Figure 75 – Caractérisation du paramètre « sol » sur les BAC de Montreuil et de Vert-en-Drouais..... | 115 |
| Figure 76 – Carte de l'IDPR sur sur les BAC de Montreuil et de Vert-en-Drouais | 117 |
| Figure 77 – Caractérisation de la capacité d'infiltration des formations constituant la zone non saturée sur les BAC de Montreuil et de Vert-en-Drouais..... | 118 |
| Figure 78 – Caractérisation du paramètre « épaisseur de la zone non saturée » sur les BAC de Montreuil et de Vert-en-Drouais | 120 |
| Figure 79 – Caractérisation du paramètre perméabilité sur les BAC de Montreuil et de Vert-en-Drouais..... | 122 |
| Figure 80 –Vulnérabilité des eaux souterraines captées par les captages de Montreuil et de Vert-en-Drouais (présentation par classes) | 124 |
| Figure 81 –Vulnérabilité des eaux souterraines captées par les captages de Montreuil et de Vert-en-Drouais (présentation par valeurs) | 125 |

Liste des tableaux

| | |
|--|-----|
| Tableau 1 : Superficies des périmètres de protection de Montreuil et de Vert-en-Drouais | 15 |
| Tableau 2 : Indice, désignation, altitude et profondeur initiale des puits du champ captant de Montreuil..... | 15 |
| Tableau 3 : Transmissivité de la craie au droit des puits du champ captant de Montreuil (source : rapport du bureau d'études Archambault Conseil, décembre 2001) | 40 |
| Tableau 4 : Baisse de l'altitude de la nappe entre mars et octobre 2009 et en fonction de celle-ci | 50 |
| Tableau 5 : Bilan de la modélisation de l'Avre à Muzy sur la période 1998-2008 | 59 |
| Tableau 6 : Tableau récapitulatif des méthodes d'analyses d'isotopes et gaz dissous | 150 |
| Tableau 7 - Débits pompés provenant des rivières | 102 |

| | |
|---|-----|
| Tableau 8 : Classification de 4 des 5 paramètres utilisés pour l'évaluation de la vulnérabilité..... | 112 |
| Tableau 9 : Classification du sol en fonction de sa nature, de sa pierrosité et de son épaisseur | 114 |
| Tableau 10 : Valeur de indice lié à l'épaisseur de la zone non saturée selon des classes réajustées compte tenu du contexte de très basses eaux | 119 |

1. Introduction

EAU DE PARIS souhaite mettre en œuvre des actions de protection de la ressource en eau souterraine sur deux champs captant situés en Eure-et-Loir, en zone alluviale : le champ captant de Vert-en-Drouais et celui de Montreuil. Ces deux champs captants sont alimentés par la nappe de la craie et probablement par une nappe alluviale (Avre et Eure) avec des concentrations en nitrates qui se situent entre 35 et 45 mg/l.

Afin de restaurer la qualité de l'eau (pour les nitrates principalement), EAU DE PARIS envisage de développer des actions auprès des agriculteurs de ces territoires pour restaurer la qualité des eaux. La nappe de la craie étant habituellement plus contaminée par les nitrates que les nappes alluviales, une action forte localisée autour des zones de captage pourrait permettre d'obtenir un impact positif sur la ressource captée.

Pour consolider son projet et l'orienter, EAU DE PARIS souhaite réaliser une étude hydrogéologique détaillée sur ces deux champs captants afin de délimiter leur bassin d'alimentation et les zones sur lesquelles concentrer les actions.

Les objectifs de l'étude sont les suivants :

- préciser pour chaque puits des 2 champs captants la part d'alimentation par la nappe alluviale et par la nappe de la craie
- définir le bassin d'alimentation des captages (influence de la nappe de la craie principalement)
- définir des zones prioritaires pour la mise en œuvre d'actions (zonage et hiérarchisation selon la sensibilité à l'échelle du bassin d'alimentation de chaque champ captant)

Pour le BRGM, l'étude est également le moyen de valider la méthodologie qu'il a développé pour la délimitation des bassins d'alimentation des captages et de leur vulnérabilité vis-à-vis des pollutions diffuses (Vernoux et al., 2007). Cette méthodologie, élaborée selon le type d'aquifère, met en œuvre des techniques reproductibles d'un bassin à l'autre permettant d'aboutir à des résultats opérationnels.

2. Champs captants et contexte hydrogéologique

2.1. PRESENTATION DES CHAMPS CAPTANTS

2.1.1. Localisation

Les champs captants de Montreuil et de Vert-en-Drouais se situent respectivement au nord-est et au nord-ouest de Dreux, dans le nord du département de l'Eure-et-Loir, en bordure du département de l'Eure. Ils disposent de périmètres de protection (figure 1).

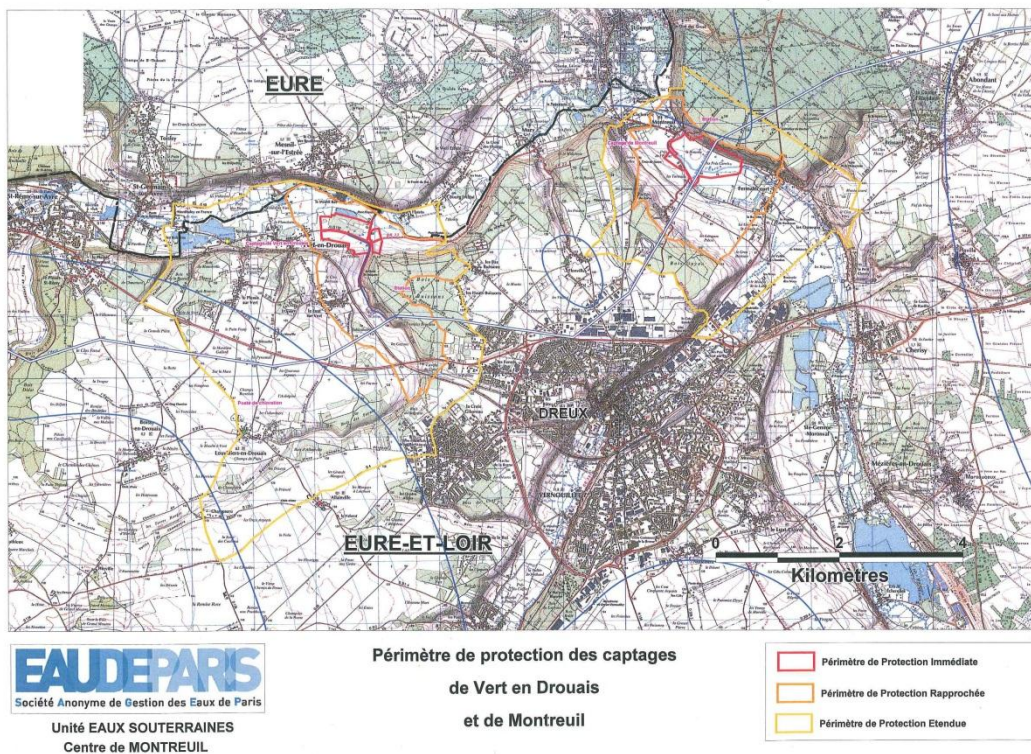


Figure 1 : Localisation des périmètres de protection des champs captants de Montreuil et de Vert-en-Drouais (sources : EAUDEPARIS et IGN)

Le champ captant de Montreuil se situe dans la vallée de l'Eure, entre la confluence avec la Blaise à l'amont et la confluence avec l'Avre à l'aval (toutes les deux en rive gauche de l'Eure).

Le champ captant de Vert-en-Drouais se situe dans la vallée de l'Avre.

Leurs périmètres de protection ont été définis par M. Alcayde (rapports des 5 et 12 octobre 1989). Leur superficie est donnée dans le Tableau 1 :

| Champ captant | PP immédiat | PP rapproché | PP éloigné |
|-----------------|-------------|--------------|------------|
| Montreuil | 0.54 | 3.7 | 10.3 |
| Vert-en-Drouais | 0.38 | 4.6 | 20.4 |

les superficies sont exprimées en km²

Tableau 1 : Superficies des périmètres de protection de Montreuil et de Vert-en-Drouais

Concernant le champ captant de Vert-en-Drouais :

- le périmètre de protection éloigné est interdépartemental : il s'étend aussi dans le département de l'Eure.
- le périmètre de protection rapproché comporte des éléments satellites définis par M. Alcaydé : « autour des bétoires et des puits désaffectés de Champseru ».

2.1.2. Description des champs captants

Le champ captant de Montreuil est constitué de dix puits, tous localisés en rive droite de l'Eure, entre la rivière et la falaise. Le champ captant est séparé en deux zones situées au NW (puits 6 à 10) et au SE (puits 1 à 5) de l'aqueduc de l'Avre (cf. Figure 2).

Les indices, désignations, altitudes et profondeurs initiales des ouvrages du champ captant sont fournis dans le Tableau 2 :

| Indice BSS | Puits | Z (en m NGF) | Profondeur initiale (en m) |
|------------|-------|--------------|----------------------------|
| 02164X0092 | P1 | 74.18 | 20.0 |
| 02164X0093 | P2 | 73.89 | 20.6 |
| 02164X0094 | P3 | 73.91 | 24.8 |
| 02164X0095 | P4 | 73.58 | 20.0 |
| 02164X0096 | P5 | 73.97 | 19.8 |
| 02164X0097 | P6 | 73.55 | 19.8 |
| 02164X0098 | P7 | 73.03 | 19.8 |
| 02164X0099 | P8 | 73.52 | 20.0 |
| 02164X0100 | P9 | 73.11 | 20.0 |
| 02164X0101 | P10 | 72.89 | 20.0 |

Tableau 2 : Indice, désignation, altitude et profondeur initiale des puits du champ captant de Montreuil

Mis à part le P3 qui atteint presque 25 m, les autres puits du champ captant ont une profondeur de 20 m environ.

Le champ captant de Vert-en-Drouais est constitué de six puits, situés en rive droite de l'Avre. La RD 152 passe à l'Est et au Sud du champ captant.

Champs captants de Montreuil et Vert-en-Drouais (28)
délimitation des bassins d'alimentation de captages et des zones vulnérables

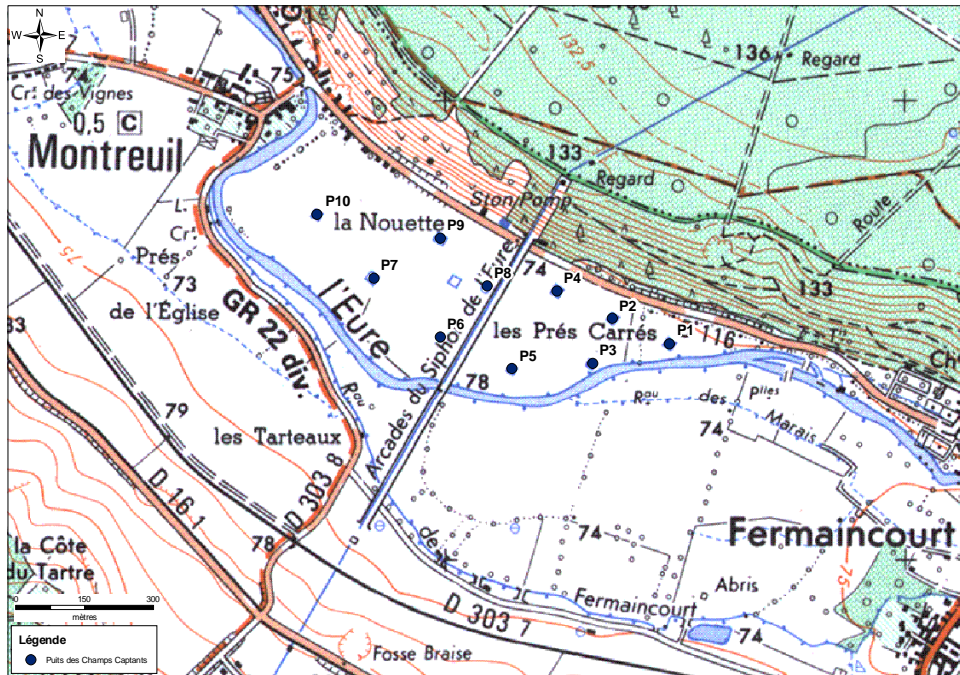


Figure 2 : Localisation des puits dans le champ captant de Montreuil (fond IGN 1/25000^{ème})

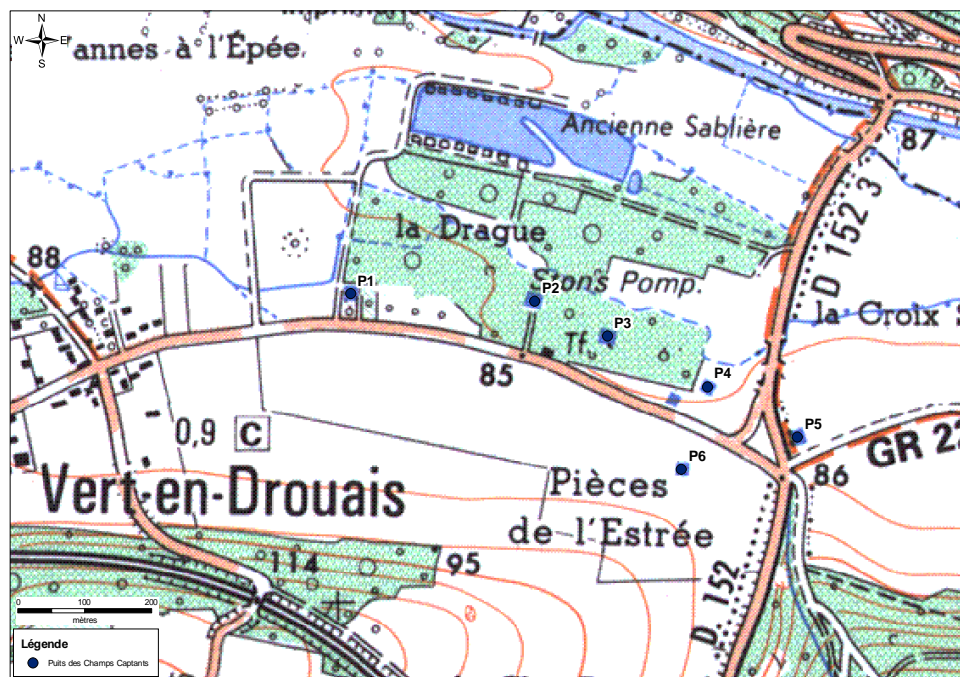


Figure 3 : Localisation des puits dans le champ captant de Vert-en-Drouais (fond IGN 1/25000^{ème})

2.2. CONTEXTES GEOGRAPHIQUE ET CLIMATIQUE

2.2.1. Altitudes et pentes

Les deux champs captants sont situés en fond de vallée (cf. Figure 4).

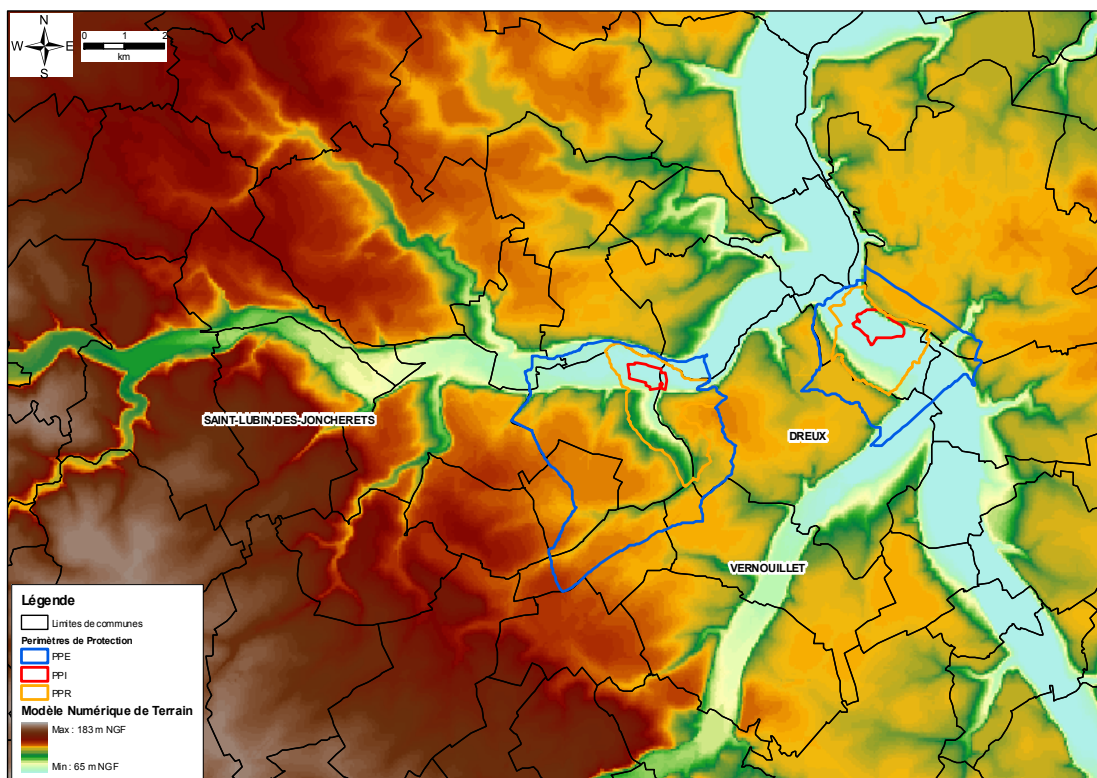


Figure 4 : Altitude des terrains au voisinage des champs captant de Montreuil-sur-Epte et de Vert-en-Drouais (d'après MNT de l'IGN au pas de 50 m)

La Figure 5 présente une carte des pentes dans le secteur d'étude, selon une maille de 50 m par 50 m. Cette carte fait apparaître l'existence de vallées assez fortement encaissées (Avre, Blaise et Eure) : les vallées sont entourées de fortes pentes – en marron sur la figure – pouvant aller jusqu'à 40% localement. Des falaises sont par ailleurs observées, notamment au voisinage du champ captant de Montreuil-sur-Epte (cf. Figure 6). Ces vallées s'insèrent dans un paysage de plateaux.

Ce système de plateaux et de vallées assez encaissées (pour un bassin sédimentaire) génère un contexte favorable à l'infiltration des pluies efficaces, sous réserve que les terrains affleurant le permettent (en fonction de leur degré de perméabilité). Dans des systèmes de ce type et lorsque les formations géologiques constituant les plateaux sont également présentes en fond de vallées (ce qui est le cas dans ce secteur, cf. « contexte hydrogéologique »), ceux-ci constituent généralement le lieu d'exutoire de la nappe, le cours d'eau et la nappe alluviale bénéficiant de cette alimentation.

Champs captants de Montreuil et Vert-en-Drouais (28)
délimitation des bassins d'alimentation de captages et des zones vulnérables

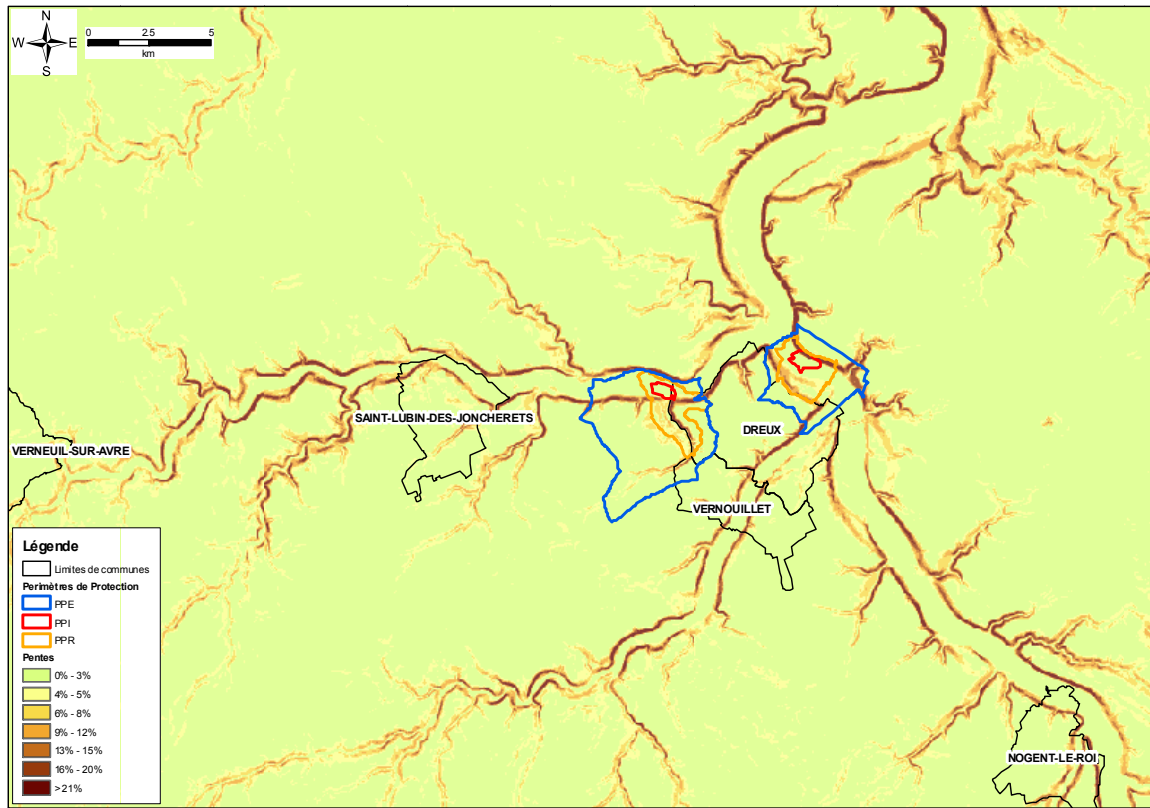


Figure 5 : Pente des terrains au voisinage des champs captant de Montreuil-sur-Epte et de Vert-en-Drouais (calculée à partir du MNT de l'IGN au pas de 50 m)



Figure 6 : Falaise de craie au voisinage du champ captant de Montreuil-sur-Epte (photo extraite du rapport « le champ captant de Montreuil (Eure-et-Loir) » de Gilles Souchet – décembre 1997)

Figure 6 : Falaise de craie au voisinage du champ captant de Montreuil-sur-Epte (photo extraite du rapport « le champ captant de Montreuil (Eure-et-Loir)» de Gilles Souchet – décembre 1997)

2.2.2. Anthropisation

Il existe de nombreux forages dans la zone d'étude. Néanmoins, l'existence d'un seul aquifère dans les 100 premiers mètres de profondeur limite considérablement le risque de mise en communication d'aquifères différents dans la zone. Une attention particulière doit néanmoins être portée aux puits et forages existants, ceux-ci étant susceptibles – en cas de défaut de construction – de conduire des eaux de ruissellement directement dans la nappe.

Les prélèvements sont évalués à :

- Vert-en-Drouais et Montreuil 25 000 m³/j chacun ;
- Sources de la Vigne et du Breuil qui disposent d'une autorisation de prélèvement jusqu'à 110 000 m³/j, les débits peuvent descendre très bas en période d'étiage, jusqu'à 35 000 m³/j certaines années ;
- Prélèvements agricoles : 700 000 m³/an pour le bassin versant de l'Avre à Muzy d'après le rapport BRGM RP-56690-FR de décembre 2008 ;
- Prélèvements industriels : 730 000 m³/an pour le bassin versant de l'Avre à Muzy d'après le rapport BRGM RP-56690-FR de décembre 2008.

La carte d'occupation des sols (Corine Land Cover 2006) est présentée en Figure 7.

Les principales activités rencontrées sont :

- en rouge et violet : tissu urbain et zone industrielle ;
- en vert clair et vert foncé : forêts ;
- en ocre en fond de vallée : prairie ;
- en jaune pâle essentiellement sur les plateaux mais aussi dans les périmètres de protection du champ captant de Vert-en-Drouais : terres arables non irriguées.

Champs captants de Montreuil et Vert-en-Drouais (28)
 délimitation des bassins d'alimentation de captages et des zones vulnérables

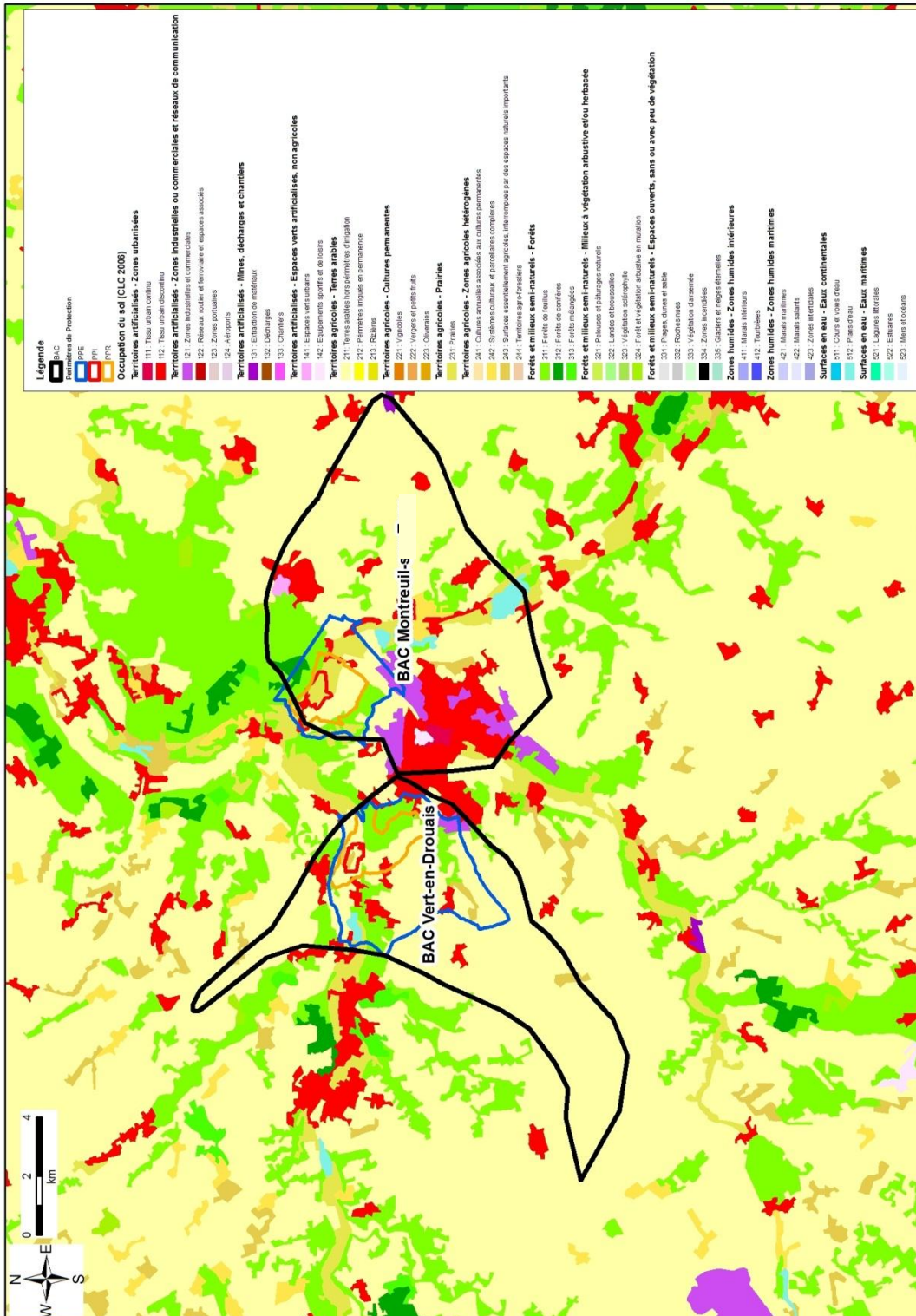


Figure 7 : Carte d'occupation des sols selon Corine Land Cover (2006)

2.2.3. Contexte climatique

La grille Aurelhy de MétéoFrance présente la pluviométrie moyenne annuelle (1972-2000) au pas de 1 km et à l'échelle de la France métropolitaine (cf. Figure 8 , zoom sur les bassins versants de l'Avre, de la Blaise et de l'Eure amont).

Cette grille fait apparaître une faible pluviométrie au niveau des deux champs captants, puisque l'on atteint la valeur moyenne minimale observée sur l'ensemble du bassin Seine-Normandie (580 mm). Sur le territoire couvert par les périmètres de protection, la pluviométrie moyenne annuelle reste inférieure à 610 mm.

A l'échelle du bassin versant de l'Avre, une variabilité importante est observée : la pluviométrie augmente en allant vers l'ouest (la partie amont) du bassin versant, pour atteindre un peu plus de 800 mm au niveau de la crête topographique. Il en va de même pour la Blaise, bien que dans une moindre mesure (la pluviométrie moyenne annuelle maximale reste inférieure à 800 mm).

La partie amont du bassin versant de l'Eure, qui se situe à l'ouest des têtes de vallée de la Blaise et de l'Avre, connaît lui aussi une pluviométrie supérieure à 800 mm.

Dans le cadre de l'atlas hydrogéologique du département de l'Eure (rapport BRGM RP-52988-FR), les précipitations efficaces moyennes sur la période 1986-1999 ont été évaluées à 133 mm en utilisant la station pluviométrique de Verneuil-sur-Avre et l'ETP (Evapotranspiration Potentielle) d'Evreux Huest. Une RFU (Réserve Facilement Utilisable) de 80 mm a été considérée.

Champs captants de Montreuil et Vert-en-Drouais (28)
délimitation des bassins d'alimentation de captages et des zones vulnérables

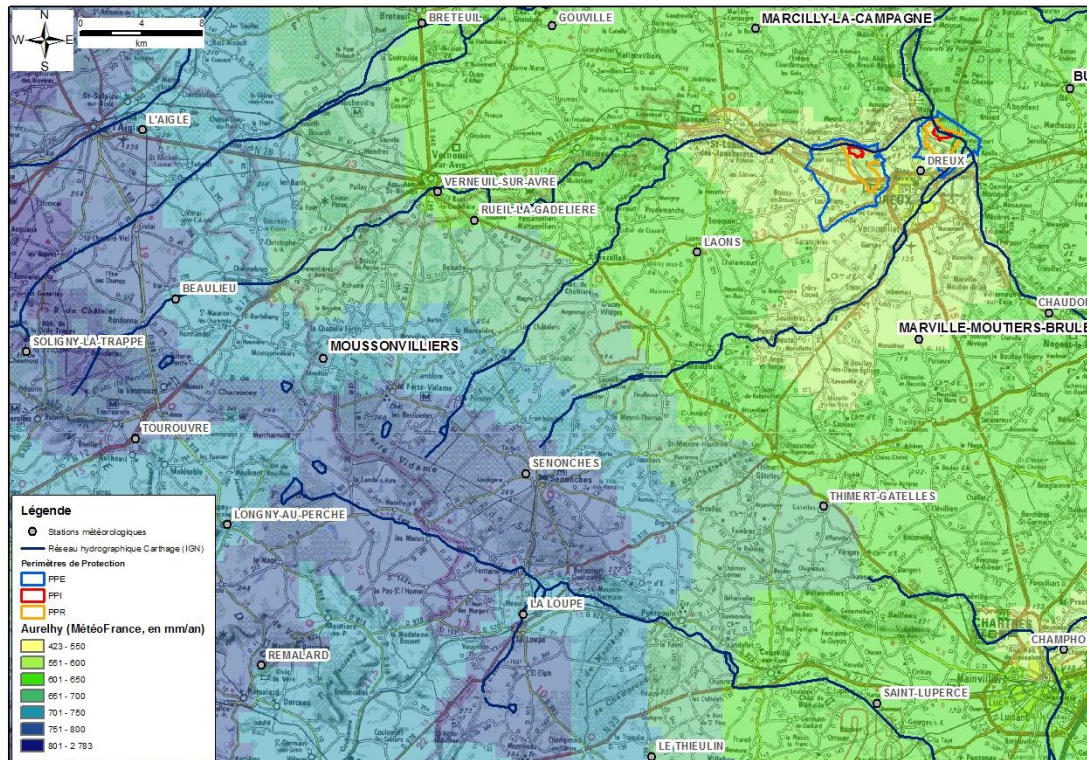


Figure 8 : Pluviométrie annuelle moyenne selon la grille AURELHY établie par Météo France

Cinq stations météorologiques ont été présélectionnées en vue de la modélisation globale effectuée avec le logiciel GARDENIA. Il s'agit des stations suivantes (on pourra se reporter à la Figure 8 pour leur localisation) :

- Bu-Man (type 4, station créée en décembre 1971, code MétéoFrance : 28064001). Cette station est située en dehors du bassin versant, à 13 km à l'Est de la station hydrométrique de l'Avre à Muzy. Elle reçoit une pluviométrie annuelle moyenne de 640 mm environ.
- Marcilly-la-Campagne (type 4, station créée en novembre 1970). La station est située en dehors du bassin, à 12 km au Nord-Ouest de la station hydrométrique de Muzy. Elle reçoit une pluviométrie annuelle moyenne de 630 mm environ.
- Marville-Moutiers-Brûlé (type 4, station créée en janvier 1975). Localisée en dehors du bassin versant, cette station est à 12 km au Sud de la station hydrométrique de l'Avre à Muzy. Elle reçoit une pluviométrie annuelle moyenne légèrement inférieure à 600 mm.
- Moussonvilliers (type 4, station créée en novembre 1971, code MétéoFrance : 61299002). Située dans la partie amont du bassin versant, entre l'Avre et son principal affluent en rive droite la Meuvette, elle reçoit une pluviométrie annuelle moyenne de 725 mm environ.

- Evreux-Huest (station située à Huest, de type 0, créée en 1968) qui a servi pour les données d'évapotranspiration Penman. Cette station est située en dehors du bassin versant, à 32 km au Nord de la station hydrométrique de l'Avre à Muzy.

2.3. CONTEXTE HYDROLOGIQUE

On identifie trois cours d'eau majeurs dans le secteur : l'Avre, la Blaise et l'Eure dont les deux premiers sont affluents en rive gauche. Le débit de ces cours d'eau est suivi par des stations hydrométriques dont la localisation est indiquée sur la Figure 9 :

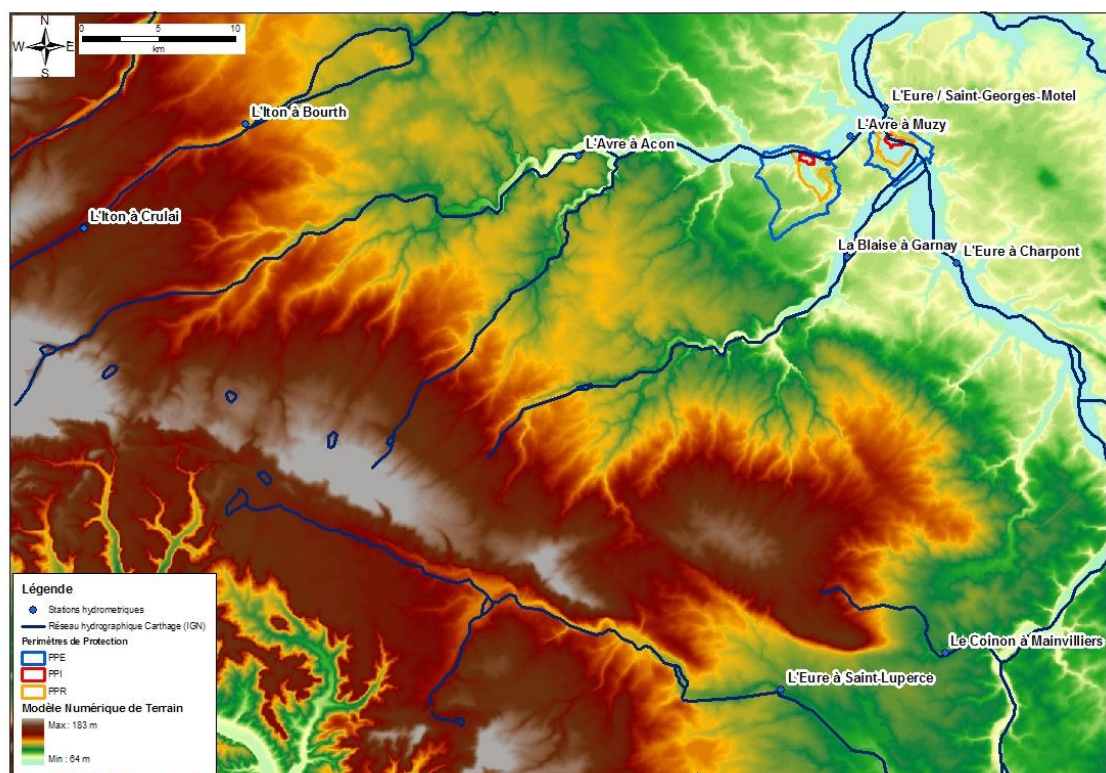


Figure 9 : Localisation des principales stations hydrométriques de l'Avre et de l'Eure

2.3.1. Bassin versant de l'Avre

L'Avre s'écoule de l'ouest vers l'est. Son débit est connu au travers de trois stations hydrométriques :

- Saint-Christophe-sur-Avre (code HYDRO : H9202020), avec un bassin versant de 109 km² et une acquisition de données ayant démarré en 2004 ;
- Acon (code HYDRO : H9202010), avec un bassin versant de 495 km² et des données disponibles à partir de 1972 ;

- Muzy (code HYDRO : H9222010), avec un bassin versant de 880 km² et des données disponibles à partir de 1971.

A Muzy, les basses eaux sont rencontrées en août-septembre et les hautes eaux en février. La lame d'eau moyenne annuelle est de 124 mm, ce qui correspond à un écoulement faible compte tenu du contexte climatique.

La Figure 10, qui montre le débit moyen mensuel de l'Avre à Muzy (source : banque HYDRO), fait apparaître l'existence d'un soutien important en période d'étiage.

Le QMNA 5¹ est de 1,3 m³/s pour une superficie de 880 km².

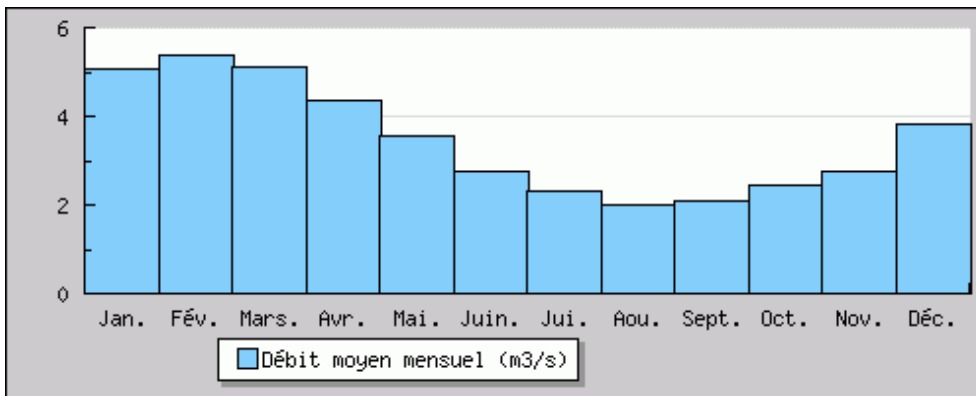
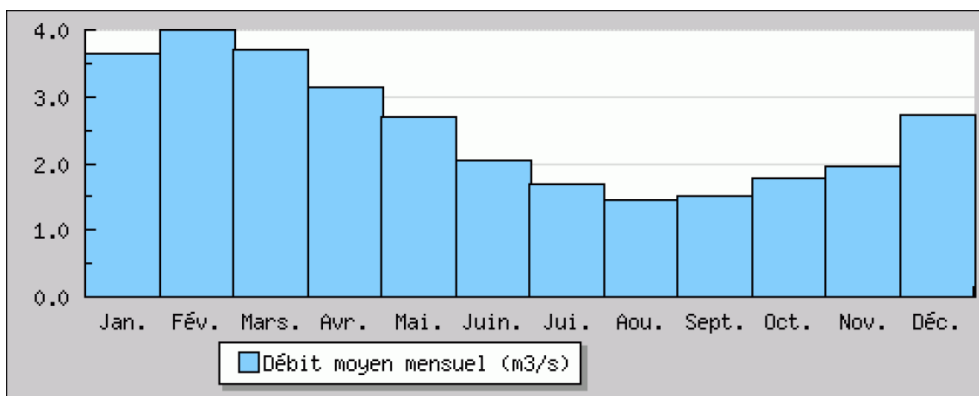


Figure 10 : Débit moyen mensuel de l'Avre à la station hydrométrique de Muzy (source : Banque HYDRO)

A Acon – comme à Muzy – les basses eaux sont rencontrées en août-septembre et les hautes eaux en février. La lame d'eau moyenne annuelle est de 161 mm, ce qui nous amène donc à constater une diminution de la part des écoulements de surface entre l'amont et l'aval du bassin versant de l'Avre. Le QMNA5 est de 0,93 m³/s pour une superficie du bassin versant de 495 km².



¹ Débit d'étiage ayant une probabilité d'être dépassé 4 années sur 5

Figure 11 : Débit moyen mensuel de l'Avre à la station hydrométrique de Acon (source : Banque HYDRO)

L'état des lieux effectué dans le cadre du SAGE de l'Avre a conduit à considérer trois tronçons hydrauliques distincts pour ce cours d'eau (cf. Figure 12) :

- des sources de l'Avre à Randonnai : l'Avre naît des sources situées dans les sables du Perche puis s'écoule en direction du nord-est. Son cours traverse plusieurs étangs qui atténuent fortement sa pente naturelle (biefs artificialisés).
- de Randonnai à Verneuil-sur-Avre : « le cours d'eau est perché par rapport à la nappe. Le substrat crayeux sous-jacent est karstifié et responsable de pertes limitant le débit jusqu'au niveau de Verneuil-sur-Avre [...]. Les étiages conduisent assez fréquemment à un assèchement de la rivière en amont de Verneuil-sur-Avre durant l'été. » (extrait de l'état des lieux du SAGE de l'Avre)
- de Verneuil-sur-Avre à la confluence : la rivière redevient drainante et se trouve alimentée par la nappe de la craie. On verra par la suite au travers de la carte piézométrique et de la modélisation globale du débit de l'Avre à Muzy que cette alimentation du cours d'eau par la nappe est bien confirmée.

Tronçons hydrauliques de l'Avre

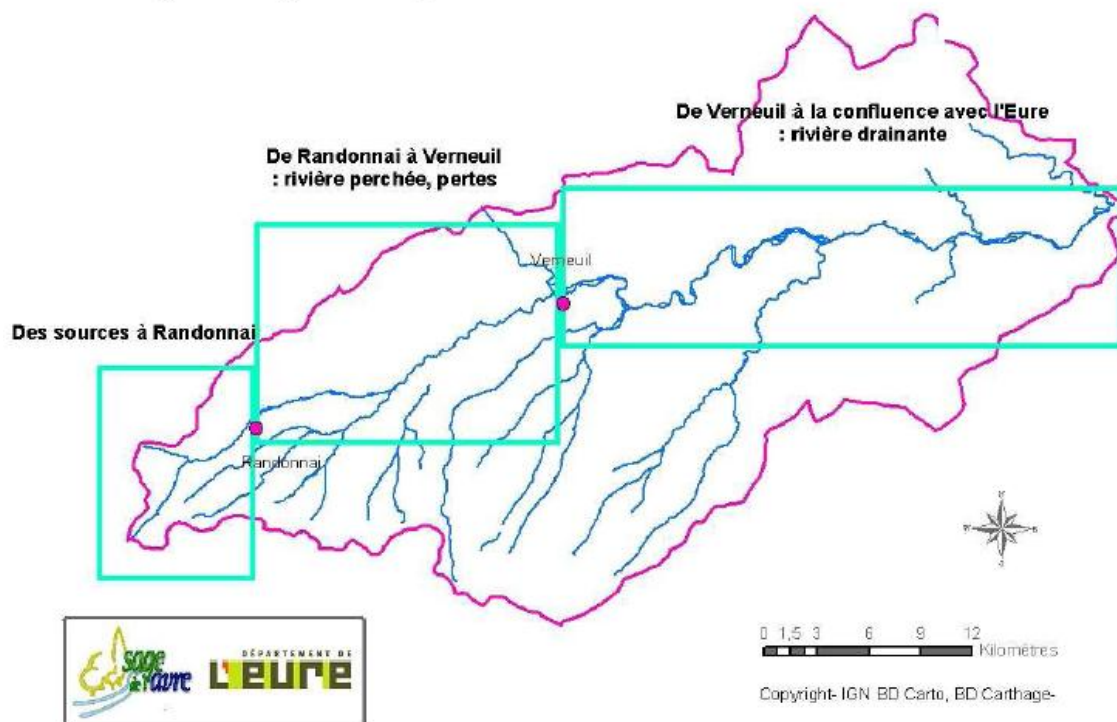


Figure 12 : Tronçons hydrauliques de l'Avre (figure issue de l'état des lieux du SAGE de l'Avre)

2.3.2. Bassin versant de l'Eure

L'Eure démarre sa course en tournant le dos à la mer, selon un axe WNW-ESE correspondant à une direction de fracturation prédominante dans ce secteur (cf. Figure 15). Son cours s'infléchit ensuite vers le NE au sud de Chartres, puis vers le NNW dans le secteur du champ captant de Montreuil.

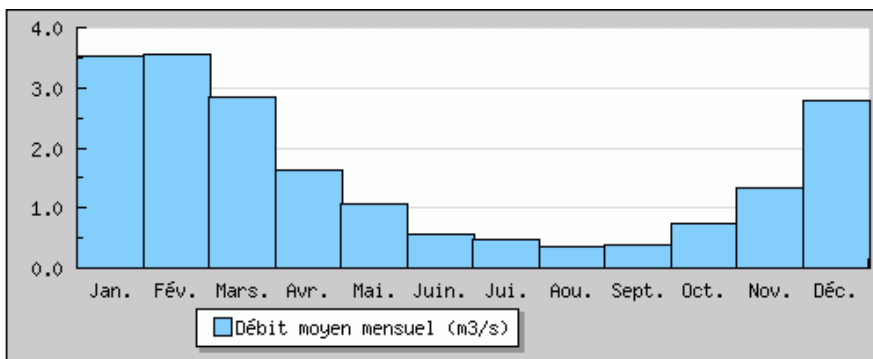
A Saint-Georges-Motel, soit juste après la confluence avec l'Avre, le bassin versant de l'Eure couvre une superficie de 3580 km².

Plusieurs stations hydrométriques suivent le débit de l'Eure :

- Sainte-Lupercie (code HYDRO : H9021010), avec un bassin versant de 330 km² et des données disponibles à partir de 1965 ;
- Ver-lès-Chartres (code HYDRO : H9021020), avec un bassin versant de 568 km² et des données disponibles de 1969 à 1985 ;
- Charpont (code HYDRO : H9121010), avec un bassin versant de 2050 km² et des données disponibles à partir de 1984 ;
- Saint-Georges-Motel (code HYDRO : H9301010), avec un bassin versant de 3580 km² et des données disponibles à partir de 1999 (niveaux d'eau uniquement).

De l'amont vers l'aval, la lame d'eau écoulee dans le cours d'eau diminue : de 153 mm à la station de Sainte-Lupercie, elle passe à 133 mm à celle de Ver-lès-Chartres pour atteindre 103 mm à la station de Charpont. Deux autres stations hydrométriques situées plus à l'aval montrent que cette tendance s'inverse (Cailly-sur-Eure – bassin versant de 4598 km² – 125 mm et Louviers – bassin versant de 5935 km² – 137 mm).

Une lame d'eau de 103 mm à la station de Charpont est une valeur faible pour le bassin Seine-Normandie. Plusieurs hypothèses peuvent être évoquées pour expliquer ce phénomène : une prédominance des écoulements souterrains, des pertes dans le lit mineur de la rivière ou encore l'existence de pompages importants.



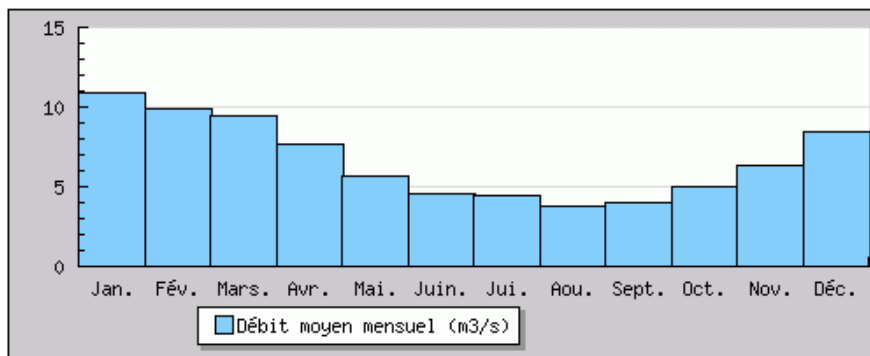


Figure 13 : Débit moyen mensuel de l'Eure aux stations hydrométriques de Sainte-Lupercie (en haut) et de Charpont (en bas ; source : Banque HYDRO)

Le graphique des débits moyens mensuels à Sainte-Lupercie et à Charpont montrent par ailleurs une évolution du comportement du cours d'eau :

- à Saint-Lupercie, le rapport entre le débit mensuel de crue et le débit mensuel d'étiage est élevé, et le débit moyen mensuel en étiage particulièrement faible ;
- à Charpont, ce rapport est faible et le débit du cours d'eau à l'étiage paraît bien plus soutenu.

L'Eure évolue donc d'un comportement ruisselant à l'amont vers un comportement dans lequel la nappe joue un rôle important au niveau de la station de Charpont. Ceci est corroboré par la Figure 21 (voir chapitre « contexte hydrogéologique ») qui montre la carte de l'IDPR sur ce bassin versant : les terrains sont majoritairement ruisselants dans la partie amont tandis qu'ils sont plutôt infiltrants au nord de Chartres, notamment en rive gauche de l'Eure.

2.3.3. Bassin versant de la Blaise

Ce cours d'eau est un affluent en rive gauche de l'Eure, dont la confluence se situe légèrement à l'amont du champ captant de Montreuil. Il est suivi au niveau de la station hydrométrique de Garnay (station H9133040, bassin versant de 413 km²).

Son débit (cf. Figure 14) reçoit un fort soutien de la nappe de la craie dans laquelle il s'écoule (faible amplitude des débits moyens mensuels, débit d'étiage élevé – son QMNA5 est de 1,1 m³/s). La lame d'eau moyenne annuelle est de 150 mm.

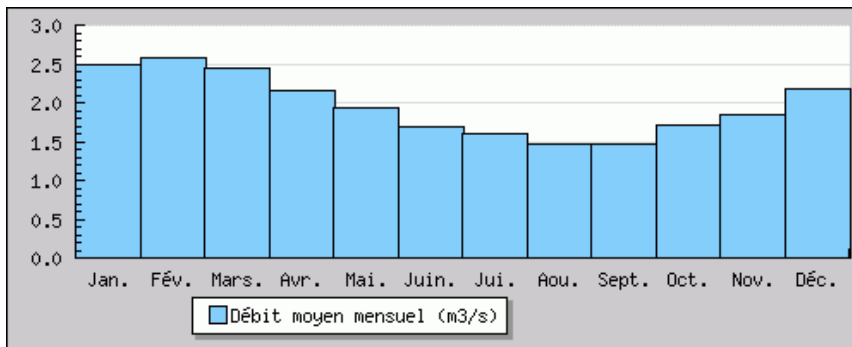


Figure 14 : Débit moyen mensuel de la Blaise à la station hydrométrique de Garnay (source : Banque HYDRO)

2.4. CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE

2.4.1. Géologie

Un extrait de la carte géologique au 1 / 1 000 000^{ème} du BRGM est présenté en Figure 15. Les bassins versants de l'Avre, de la Blaise et de l'Eure se sont très majoritairement développés dans la craie du Sénonien (formation c2 sur la carte), bien que l'Avre prenne par exemple sa source dans les sables du Perche du Cénomaniens supérieur (également c2 sur la carte).

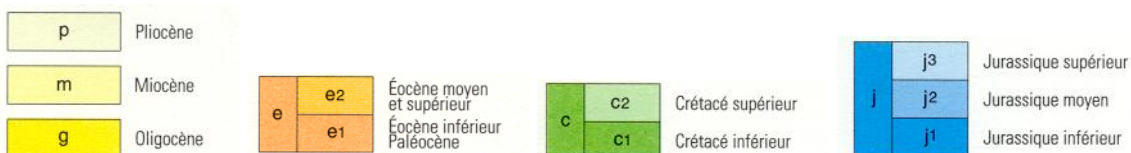
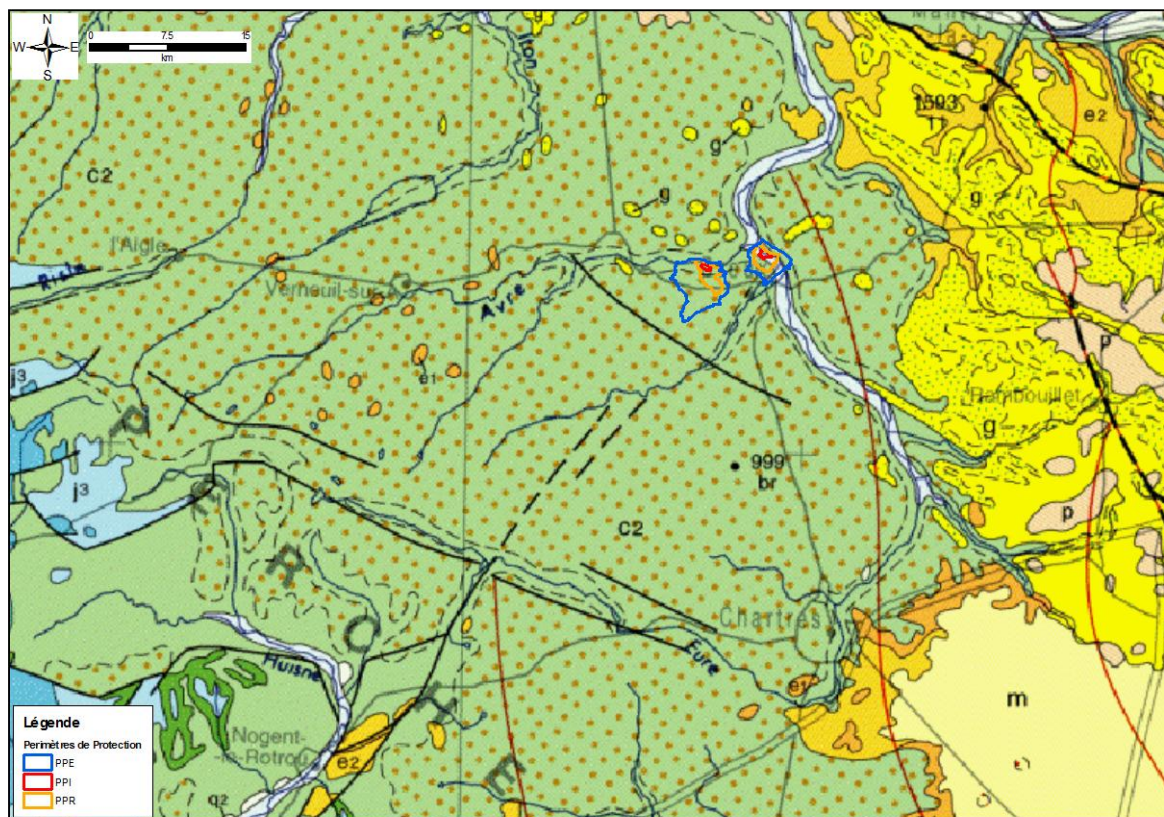


Figure 15 : Carte géologique du secteur d'étude (extrait de la carte géologique au 1 / 1 000 000^{ème} du BRGM)

Des buttes résiduelles de formations du Tertiaire sont par ailleurs présentes au nord de l'Avre et dans la partie amont de son bassin versant, ainsi qu'à l'est de l'Eure à la latitude du champ captant de Montreuil (formations en orange, jaune et rose sur la carte). Plus au sud, en rive droite de l'Eure, la craie disparaît sous recouvrement de formations tertiaires d'extension importante (sables de Fontainebleau par exemple).

Une des caractéristiques de la zone d'étude consiste en la présence de failles importantes. Elles suivent principalement deux directions, que l'on retrouve sur la carte géologique au 1 / 1 000 000^{ème} :

- Nord 60 à 70° (plissement cadomien, correspondant par exemple à la direction d'écoulement de l'Avre et de l'Iton dans leur partie amont ;
- Nord 110° (plissement varisque).

En raison de ces accidents tectoniques et des altérations subies par la craie, celle-ci a connu le développement de réseaux « karstiques ». En Haute-Normandie, la craie est ainsi un milieu à triple porosité : intergranulaire, fissuré, et karstique.

La craie est recouverte par des formations superficielles plus récentes, à savoir (Figure 16 et Figure 17) :

- les limons indifférenciés (B-LPs) recouvrant le sommet des plateaux ;
- les argiles à silex (RS) issues de l'altération de la craie sous-jacente et qui affleurent en tête des vallons secs des bassins versants, ainsi que sur les différents versants des vallées.

Les vallées de l'Avre et de l'Eure sont constituées de formations alluviales (Fz, Fy).

Champs captant de Montreuil et Vert-en-Drouais (28)
délimitation des bassins d'alimentation de captages et des zones vulnérables

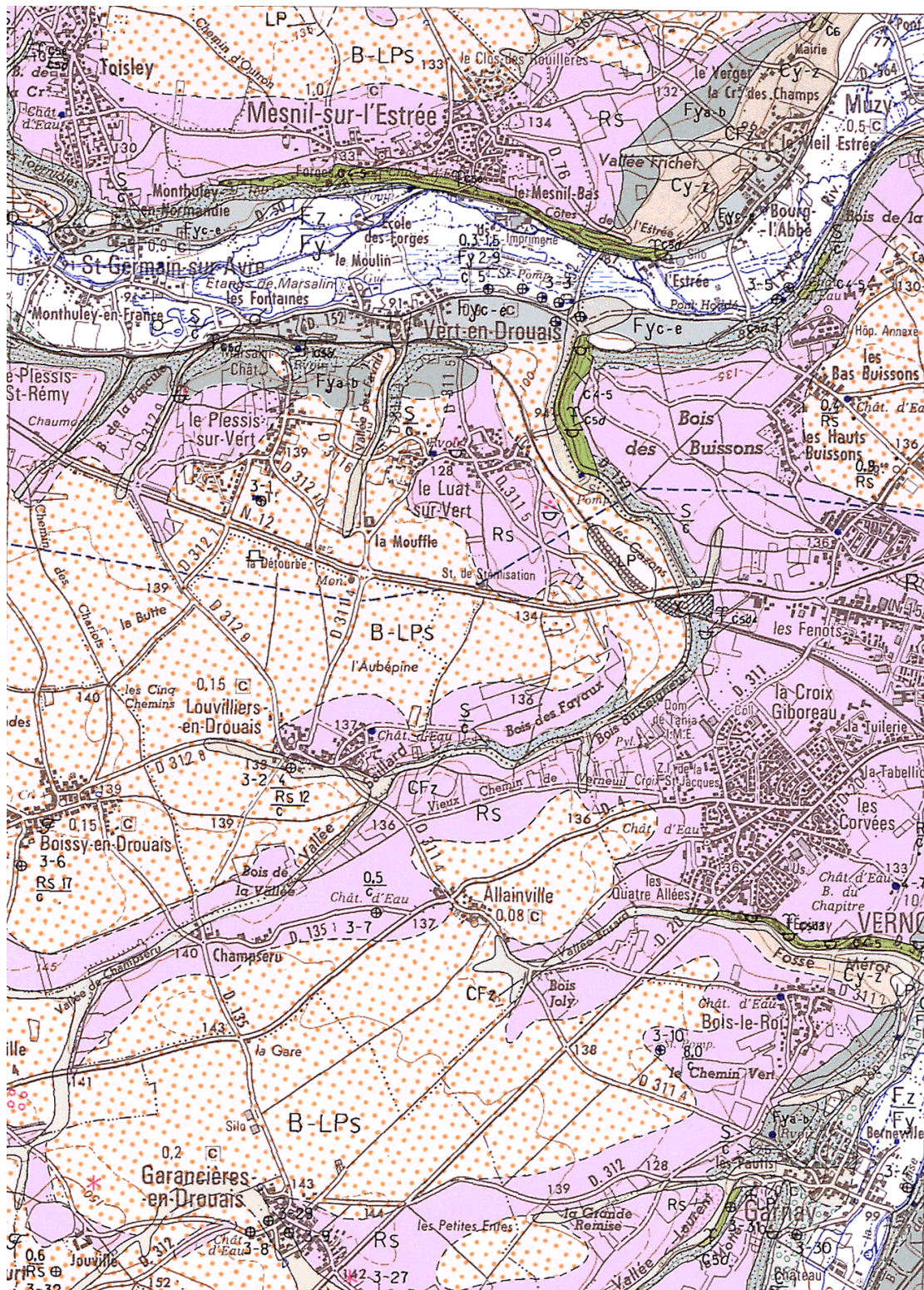


Figure 16 – Extrait de la carte géologique au 1/50.000 (feuille Dreux) dans le secteur de Vert-en-Drouais

Champs captants de Montreuil et Vert-en-Drouais (28)
délimitation des bassins d'alimentation de captages et des zones vulnérables

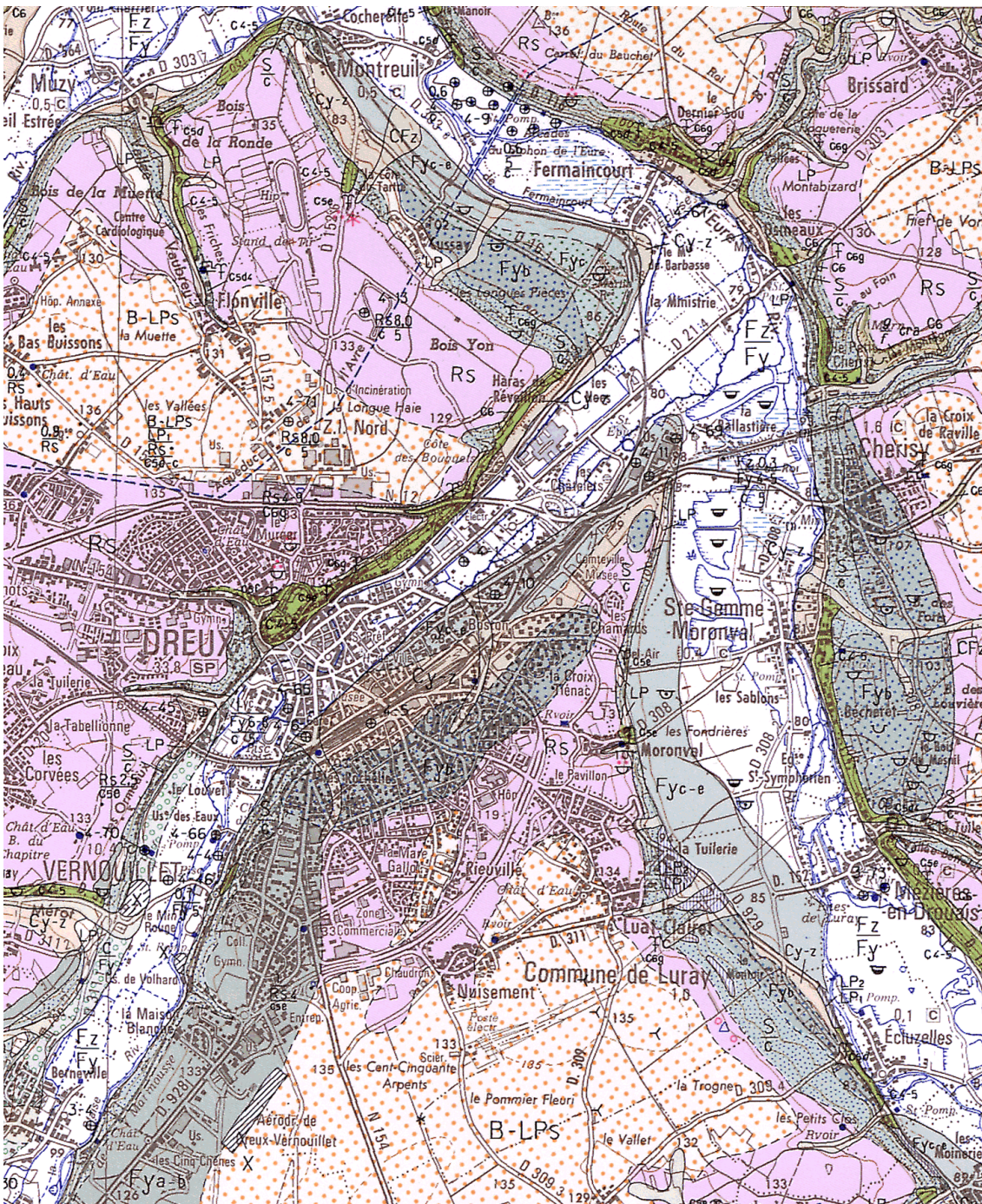


Figure 17 – Extrait de la carte géologique au 1/50.000 (feuille Dreux) dans le secteur de Montreuil

2.4.2. Les argiles à silex

Les argiles à silex font partie d'un ensemble désigné sous l'appellation « formation résiduelle à silex ». Celle-ci désigne une formation d'altération située en recouvrement de la craie et qui « renferme de nombreuses poches de sable (Sables du Thymerais, d'âge éocène possible et Sables de Fontainebleau, d'âge rupélien en Drouais). En surface, principalement en Thymerais, elle est parsemée de blocs de grès et de conglomérats correspondant à une ancienne carapace siliceuse (silcrète) démantelée. » (extrait de la notice de la carte géologique de Dreux). Cette formation est hétérogène dans sa composition (silex, argiles, silts, sables) et son épaisseur et présente des faciès différents selon les secteurs.

La thèse de Florence Quesnel – avec celle de Benoît Laignel (document BRGM n°264, 1997) – a permis d'améliorer sensiblement la connaissance de la formation résiduelle à silex (notée RS) dans l'ouest du bassin de Paris. Les travaux effectués ont permis de cartographier l'épaisseur des altérites à silex (hors limons des plateaux, cf. Figure 18). La zone de confluence de l'Avre et de la Blaise avec l'Eure est cerclée de noir : la formation résiduelle à silex y présente une épaisseur de l'ordre de quelques mètres à une quinzaine de mètres selon la légende (la notice de la carte géologique de Dreux fournit une information semblable). L'épaisseur augmente en allant vers l'ouest. D'autre part, la Figure 19 présente une cartographie de la typologie des faciès rencontrés dans l'ouest du bassin de Paris. Dans la zone d'étude, la RS est de type « faciès du Drouais » (cf. Figure 20).

L'intégralité de la description du faciès du Drouais est retranscrite en annexe de cette note. Il en ressort principalement que :

- les teneurs en silex sont relativement homogènes et proches de 50% sur toute l'épaisseur des profils de RS du Drouais ;
- la granulométrie des matrices est à dominante argileuse, plus limoneuse au sommet des profils, et plus sableuse en se rapprochant des poches de sables ;
- les formations cénozoïques résiduelles sont présentes sous la forme d'amas de galets, plus ou moins indurés et de poches de sable, les poches d'argile plastique étant absentes ;
- il a été identifié au sommet des RS du Drouais plusieurs amas de galets de silex ;
- les poches de sables sont assez courantes au sommet des RS en Drouais.

En conclusion, F. Quesnel indique : « les RS du Drouais se sont donc développées [...] sous la couverture des sables de Fontainebleau en cours de démantèlement. Elles sont enrichies d'une part allochtone non négligeable, issue des sables de Fontainebleau. »

Selon la notice de la carte géologique, les poches de sables de Fontainebleau présentent généralement « un diamètre de quelques dizaines de mètres, les plus vastes dépassant la centaine de mètres pour une profondeur excédant rarement 5 mètres. Celle de la Sablonnière, au Nord de Dreux, a 500 m de long et plus de 10 m de profondeur. »

Figure III - 28 : Epaisseurs de RS (FS - LP -cénoz)

Echelle : 1/1 000 000 - projection Lambert I nord

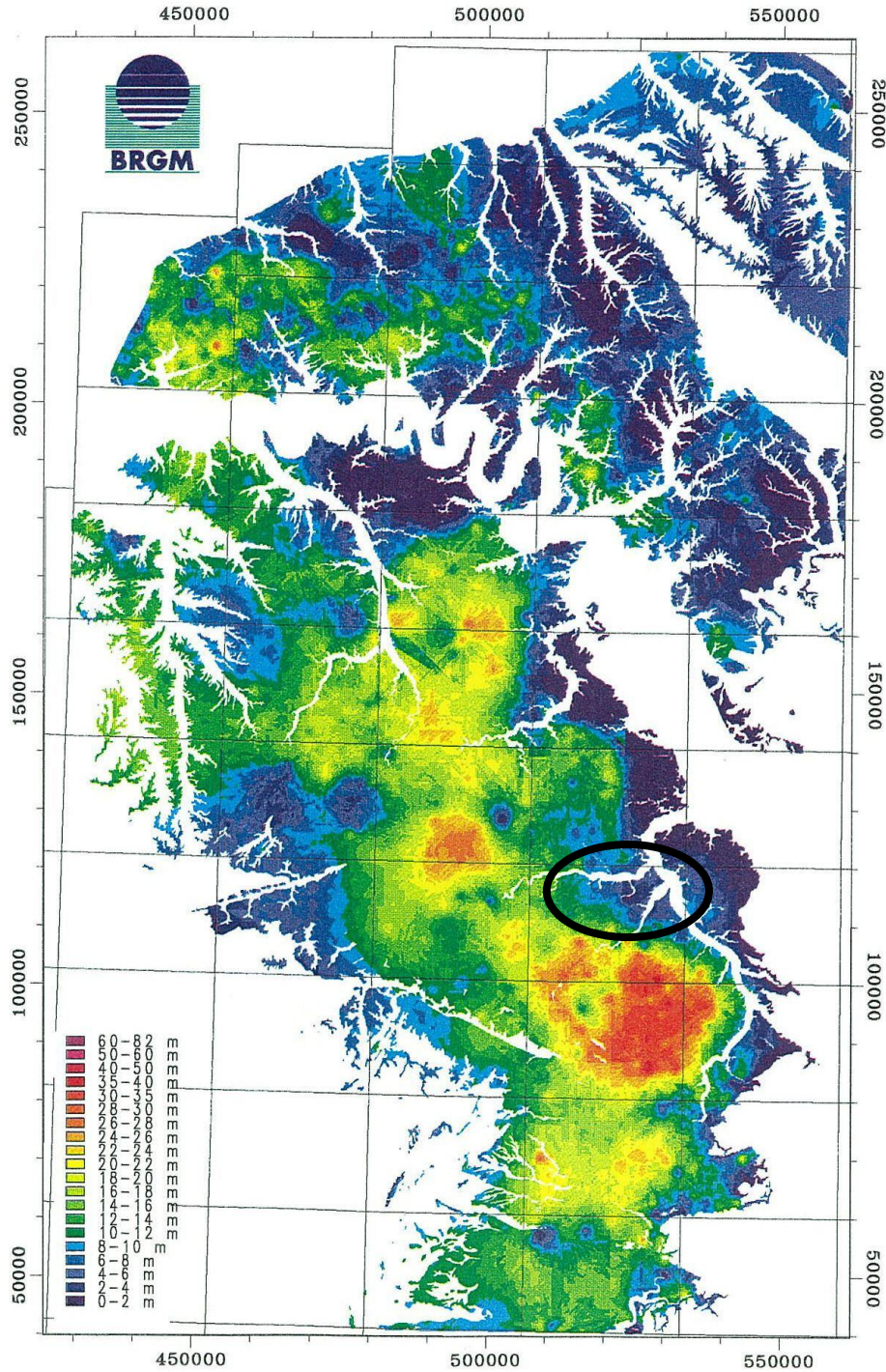


Figure 18 : Epaisseur des formations résiduelles à silex (source : thèse de Florence Quesnel, 1997) - L'ellipse indique la localisation approximative des champs captants

Figure IV - 1 : Carte des faciès-types des RS de plateau
Echelle : 1/1 000 000 - projection Lambert I nord

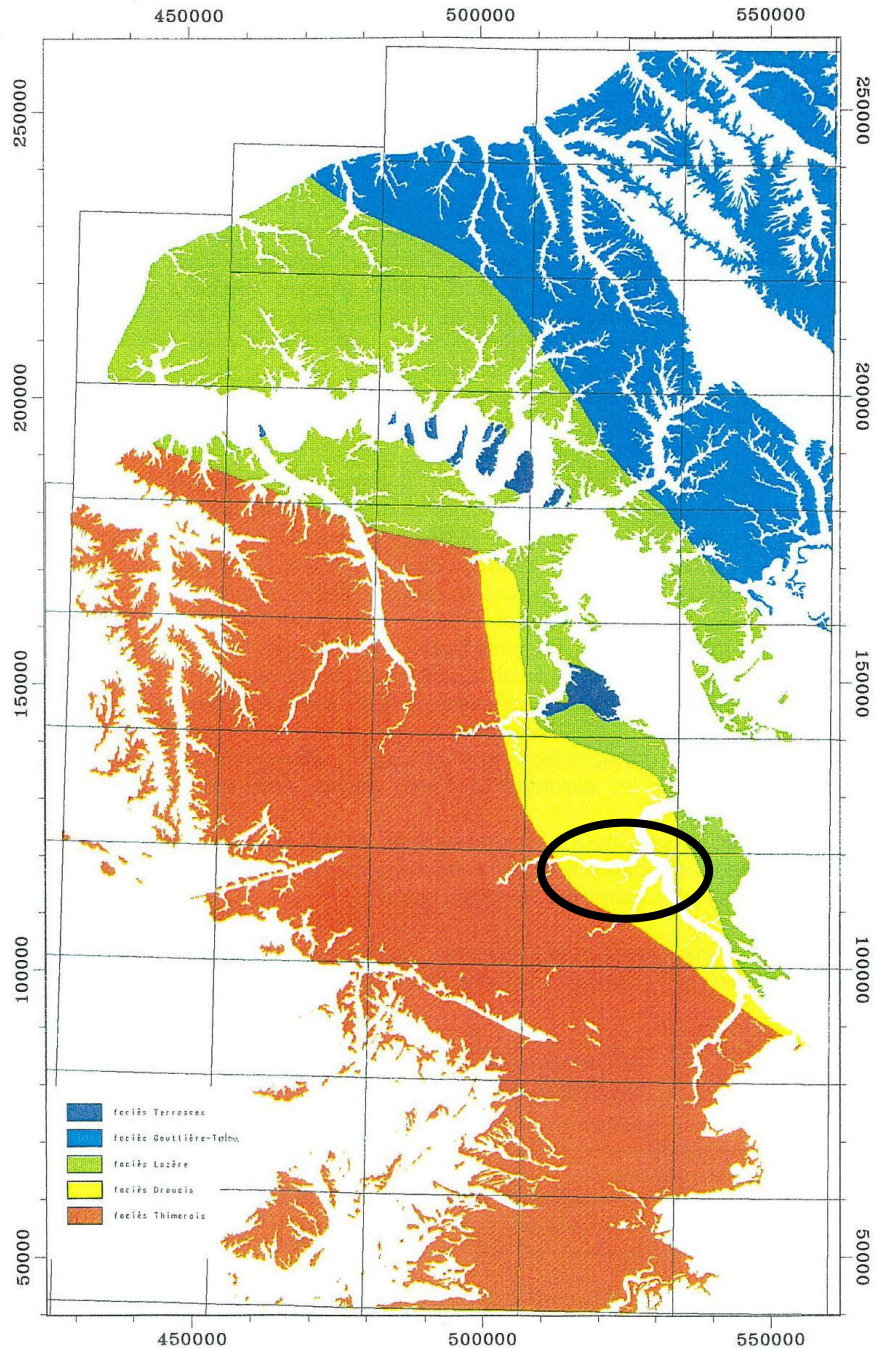


Figure 19 : Cartographie des types de faciès des formations résiduelles à silex (source : thèse de Florence Quesnel, 1997) - L'ellipse indique la localisation approximative des champs captants

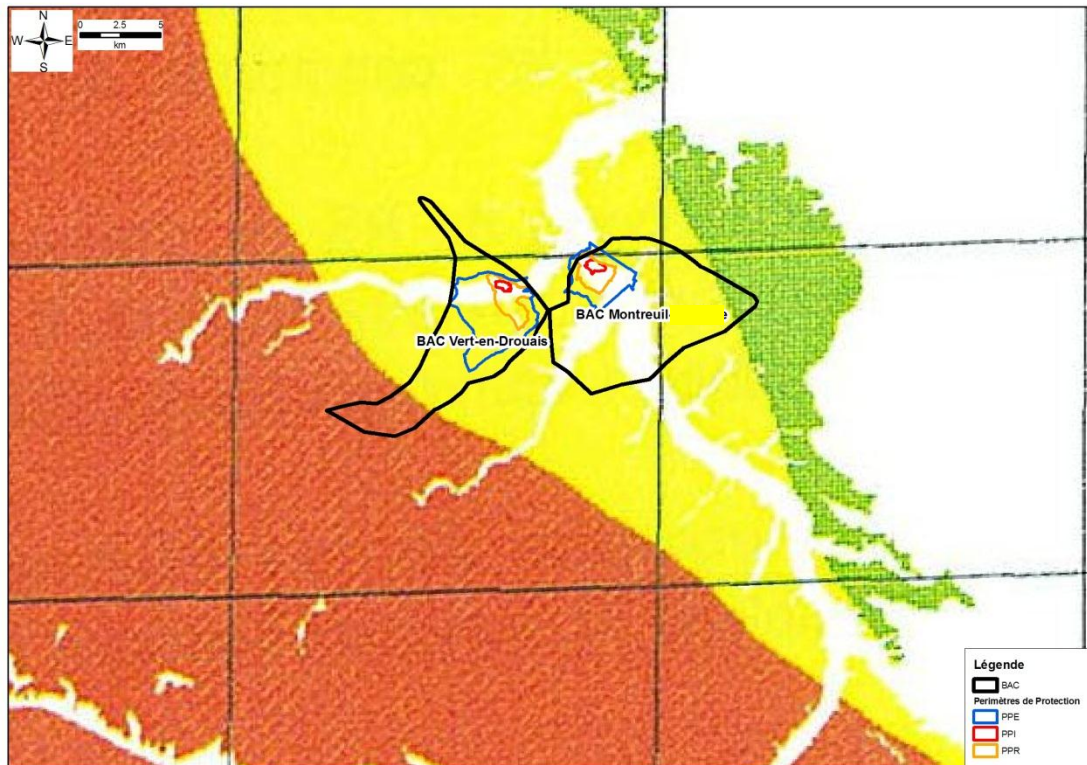


Figure 20 : Cartographie des types de faciès des formations résiduelles à silex et limites proposées pour les BAC (en jaune faciès du Drouais et en rouge faciès du Thimerais).

Cet aspect fortement hétérogène de la formation a été repris dans le cadre de l'étude relative à la recherche de sites pour l'implantation d'un centre de stockage de déchets ultimes stabilisés (Albouy et al., 1994). Concernant cette formation, l'auteur rappelle sa formation composite (argile, sable et silex), sa variabilité verticale et horizontale importante et conclut à une caractérisation géologique « très délicate à cause de l'hétérogénéité des matériaux » (page 24 du rapport). En page 33, la description de la formation dans le département de l'Eure-et-Loir indique :

« C'est dans cette partie que la lithologie est la plus complexe, mais c'est là aussi que les épaisseurs maximales sont atteintes (≤ 40 m). [NDLR : secteur du Thimerais]

Cette complexité est liée à la superposition de plusieurs époques d'altération et à l'incorporation de sédiments plus récents d'âge tertiaire et quaternaire que l'on retrouve sous forme de sables quartzeux, de galets siliceux, de meulière, de grès silicifiés et d'argile.

Ces matériaux sont mélangés à l'argile à silex et constituent alors un matériau complexe hétérogène au sein duquel s'individualiseraient aussi bien des zones à argile dominante que des « poches » sableuses propres.

L'incorporation de matériaux sableux est notée plus fréquemment dans la partie nord de l'Eure-et-Loir, sur les cartes à 1/50.000 Saint-André-sur-Eure (180), Verneuil (215), Nogent-le-Roi (217) et surtout Dreux (216) et Courville (254). Les poches argileuses sont rarement signalées car plus difficiles à détecter. »

2.4.3. Capacité d'infiltration des formations

L'Indice de Développement et de Persistance des Réseaux (IDPR) est un indice développé par le BRGM qui vise à qualifier le caractère plus ou moins infiltrant des formations géologiques présentes à l'affleurement. Sa représentation spatiale est présentée en Figure 21. Une valeur faible (rouge sombre) correspond à une prédominance de l'infiltration tandis qu'une valeur forte (vert foncé) indique que le ruissellement prédomine.

Cet indice fait apparaître la prévalence de l'infiltration au voisinage des champs captant, notamment entre les vallées de la Blaise et de l'Avre. Les parties amont des bassins versants de l'Avre, de la Blaise et de l'Eure sont quant à elles plus ruisselantes. On peut expliquer cette différence au regard de l'hétérogénéité de la formation d'Argile à Silex présente sur l'ensemble du secteur mais vraisemblablement plus perméable dans la partie aval que dans la partie amont des bassins.

Champs captants de Montreuil et Vert-en-Drouais (28)
délimitation des bassins d'alimentation de captages et des zones vulnérables

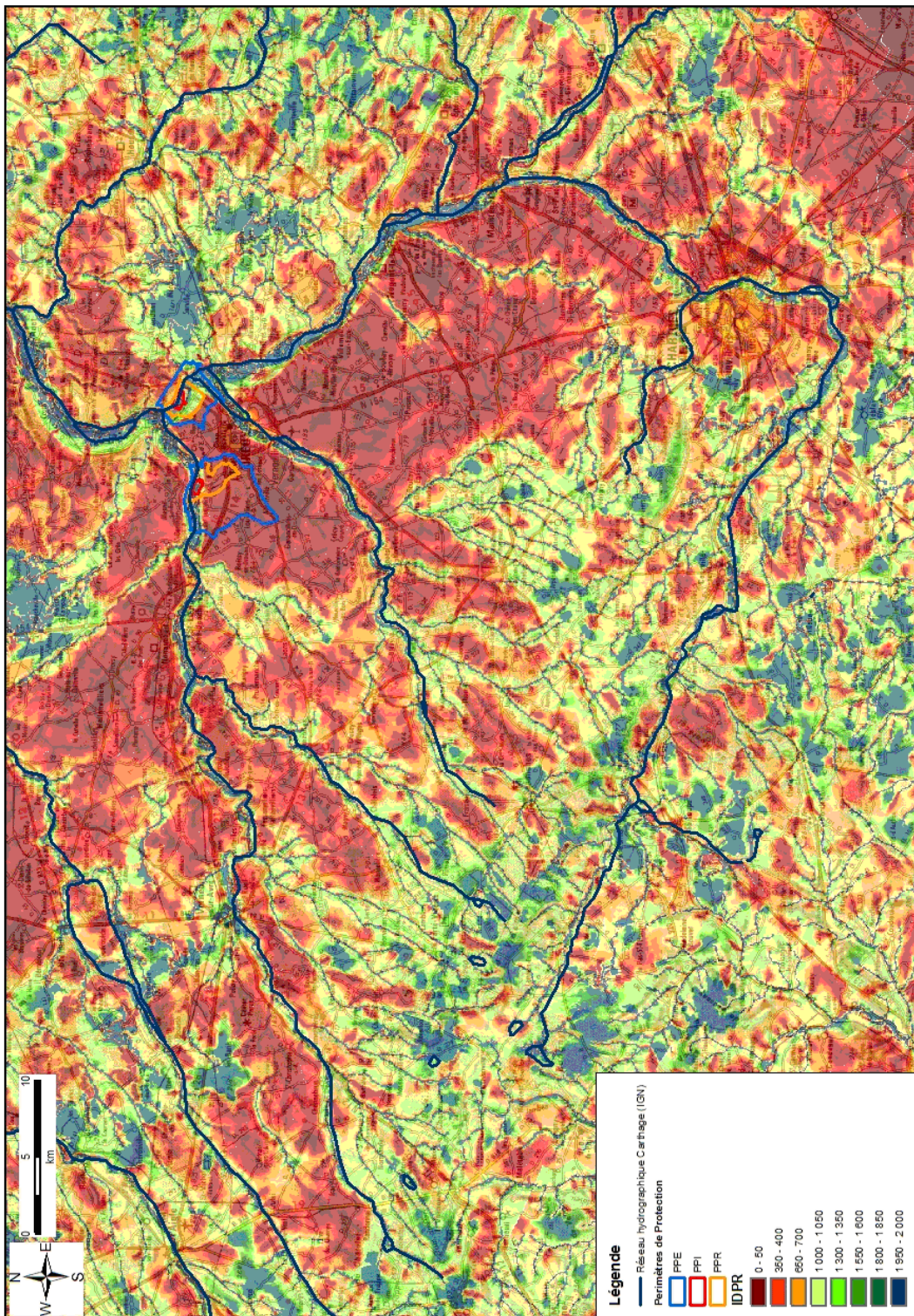


Figure 21 : Indice de Développement et de Persistance des Réseaux sur les bassins versants de l'Avre et de l'Eure

2.4.4. Productivité des aquifères et karstification

Des essais de pompages ont été réalisés en 1957 sur les sites de Vert-en-Drouais et de Montreuil. Le rapport de l'ingénieur des Mines du 09/09/1957 ne fournit pas de valeurs de transmissivité ou de coefficient d'emmagasinement mais permet de calculer un débit spécifique. A Vert-en-Drouais, des valeurs d'environ 85 m³/h/m et de 60 m³/h/m sont obtenues pour les puits n°I et n°II.

La Banque du Sous-Sol fait elle référence à des essais de pompage réalisés en 1971 sur le champ captant de Montreuil. Des valeurs d'environ 10 m³/h/m (02164X0094/P3) à plus de 400 m³/h/m (02164X0093/P2) sont obtenues selon les ouvrages.

Des données similaires sont fournies par le rapport de l'hydrogéologue agréé (M. Alcydé) réalisé en préalable à la définition des périmètres de protection. Les débits spécifiques obtenus pour le champ captant de Montreuil varient ainsi de 15 m³/h/m (02164X0094/P3) à 400 m³/h/m (02164X0095/P4). Pour le champ captant de Vert-en-Drouais, les valeurs connues d'après le rapport (données mesurées en février 1983) varient entre 45 m³/h/m (puits n°1) et 140 m³/h/m (puits n°2). Des débits spécifiques supérieurs sont néanmoins attendus, au puits n°5 par exemple (exploitation à hauteur de 400 m³/h).

Des essais de pompage réalisés en 2001 par le bureau d'étude Archambault Conseil ont ont précisé la productivité des réservoirs au droit des différents puits du champ captant de de Montreuil (cf.

Tableau 3). Les valeurs obtenues sont élevées et confirment donc l'excellente productivité de l'aquifère dans ce secteur.

Concernant le champ captant de Vert-en-Drouais, le rapport de l'hydrogéologue agréé fait état de « circulations de type karstique » dans la vallée sèche débouchant au niveau du champ captant, en rive droite de l'Avre. Des essais de traçage à la fluorescéine ont confirmé « qu'il existait une relation hydrogéologique entre la craie fissurée de la partie haute de la Vallée Saillard et les puits du champ captant de Vert ».

Malheureusement, il n'a pas été possible de retrouver le rapport consignant la réalisation de ces traçages et donc de préciser la localisation des connexions identifiées.

Champs captants de Montreuil et Vert-en-Drouais (28)
 délimitation des bassins d'alimentation de captages et des zones vulnérables

| Champ Captant | Indice BSS | Puits | Transmissivité (m ² /s) | Qmax essai (m ³ /h) |
|---------------|------------|-------|------------------------------------|--------------------------------|
| Montreuil | 02164X0092 | P1 | 0.083 | 177 |
| Montreuil | 02164X0093 | P2 | 0.16 | 251 |
| Montreuil | 02164X0094 | P3 | 0.026 | 102 |
| Montreuil | 02164X0095 | P4 | 0.235 | 226 |
| Montreuil | 02164X0096 | P5 | 0.045 | 116 |
| Montreuil | 02164X0097 | P6 | 0.025 | 124 |
| Montreuil | 02164X0098 | P7 | 0.21 | 128 |
| Montreuil | 02164X0099 | P8 | 0.082 | 130 |
| Montreuil | 02164X0100 | P9 | 0.33 | 212 |
| Montreuil | 02164X0101 | P10 | 0.075 | 126 |

Tableau 3 : Transmissivité de la craie au droit des puits du champ captant de Montreuil
 (source : rapport du bureau d'études Archambault Conseil, décembre 2001)

Afin de rechercher des indices éventuels de karstification, les données de la base de données Cavités ont été portées sur une carte (cf. Figure 22). Cette base de données recense les cavités naturelles ou d'origines anthropiques connues dans le secteur.

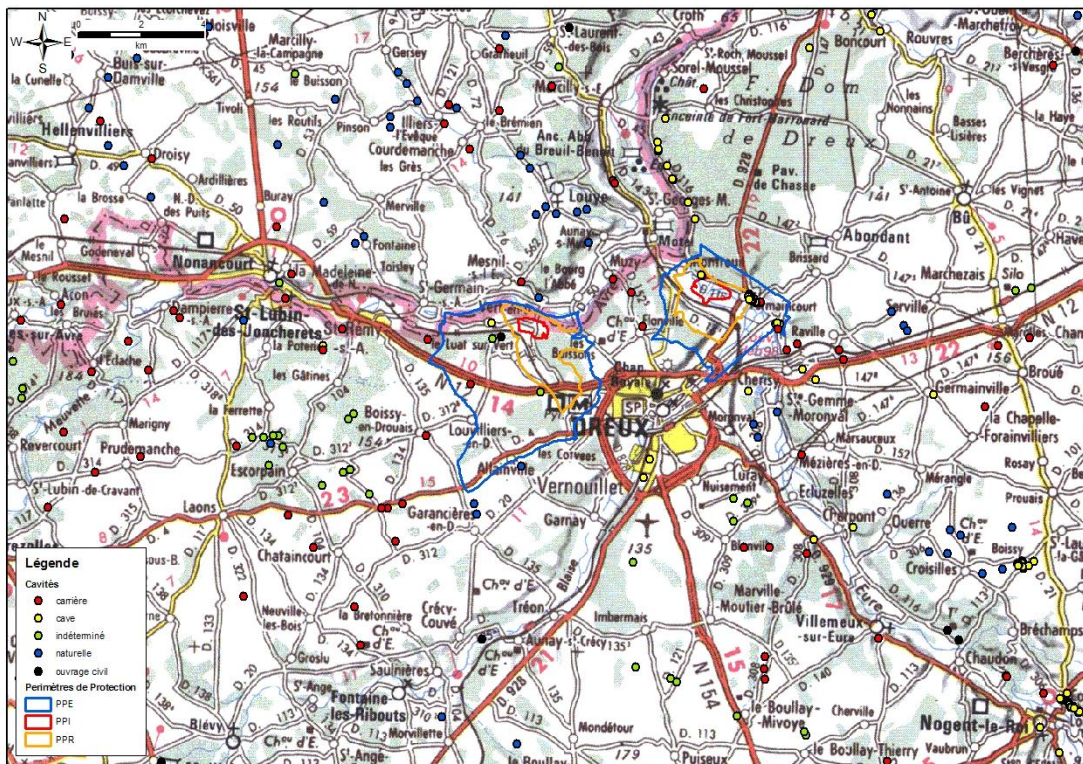


Figure 22 : Localisation des cavités connues au voisinage des champs captants (source : BD Cavités, <http://www.bdcavite.net>)

Une reconnaissance de terrain effectuée en mars 2009 a permis de confirmer l'existence en surface d'un indice de présence d'une cavité. Elle se situe à proximité de la ferme des Ormes, au SW de Broissy-en-Drouais (cf. Figure 23). De façon générale, il existe peu de cavités naturelles identifiées en rive droite de l'Avre.

Enfin, l'état des lieux réalisé dans le cadre du SAGE de l'Avre fait état de karstification mais à l'amont de Verneuil.



Figure 23 : Indice de présence d'une cavité à proximité de la ferme des Ormes

2.4.5. Piézométrie

Plusieurs piézomètres suivent les fluctuations de la nappe de la craie dans les bassins versants de l'Avre, de la Blaise et de l'Eure (cf. Figure 24 : les piézomètres sont identifiés par leur indice national).

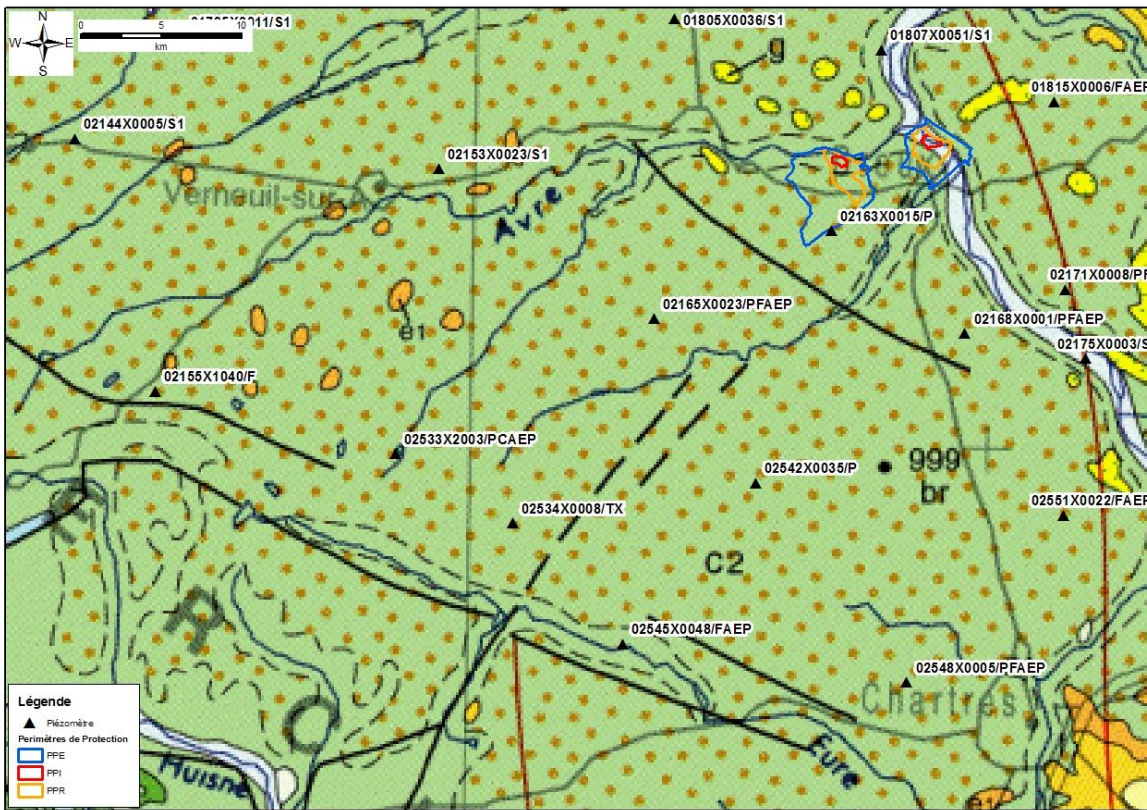


Figure 24 : Localisation des piézomètres à proximité des champs captants

Les chroniques des piézomètres parmi les plus proches des deux champs captants sont présentées en Figure 25.

Ces chroniques font apparaître une composante interannuelle très importante, particulièrement visible sur les ouvrages d'Allainville et de Crucey-village mais que l'on retrouve aussi à Moisville et à Marcilly-sur-Eure : tendance à la hausse du niveau d'étiage entre 1997 et 2001, suivi d'une tendance à la baisse de 2001 à 2007.

La composante saisonnière des fluctuations piézométriques est présente à Moisville et Marcilly-sur-Eure mais presque absente à Allainville et Crucey-village. Ceci peut s'expliquer notamment par la proximité des piézomètres à un axe drainant, qu'il s'agisse d'une vallée humide (Marcilly-sur-Eure) ou d'un thalweg (Moisville).

A première vue, les chroniques ne semblent pas présenter de composante qui pourrait être liée à des écoulements rapides, de type karstiques. Ceci sera confirmé par la modélisation.

Pour la modélisation hydrologique globale, c'est le piézomètre de Moisville qui a été retenu. Il dispose d'une chronique de données allant de 1982 à 2009. Le pas d'acquisition de la donnée devient quotidien à partir de décembre 1993.

Champs captant de Montreuil et Vert-en-Drouais (28)
délimitation des bassins d'alimentation de captages et des zones vulnérables

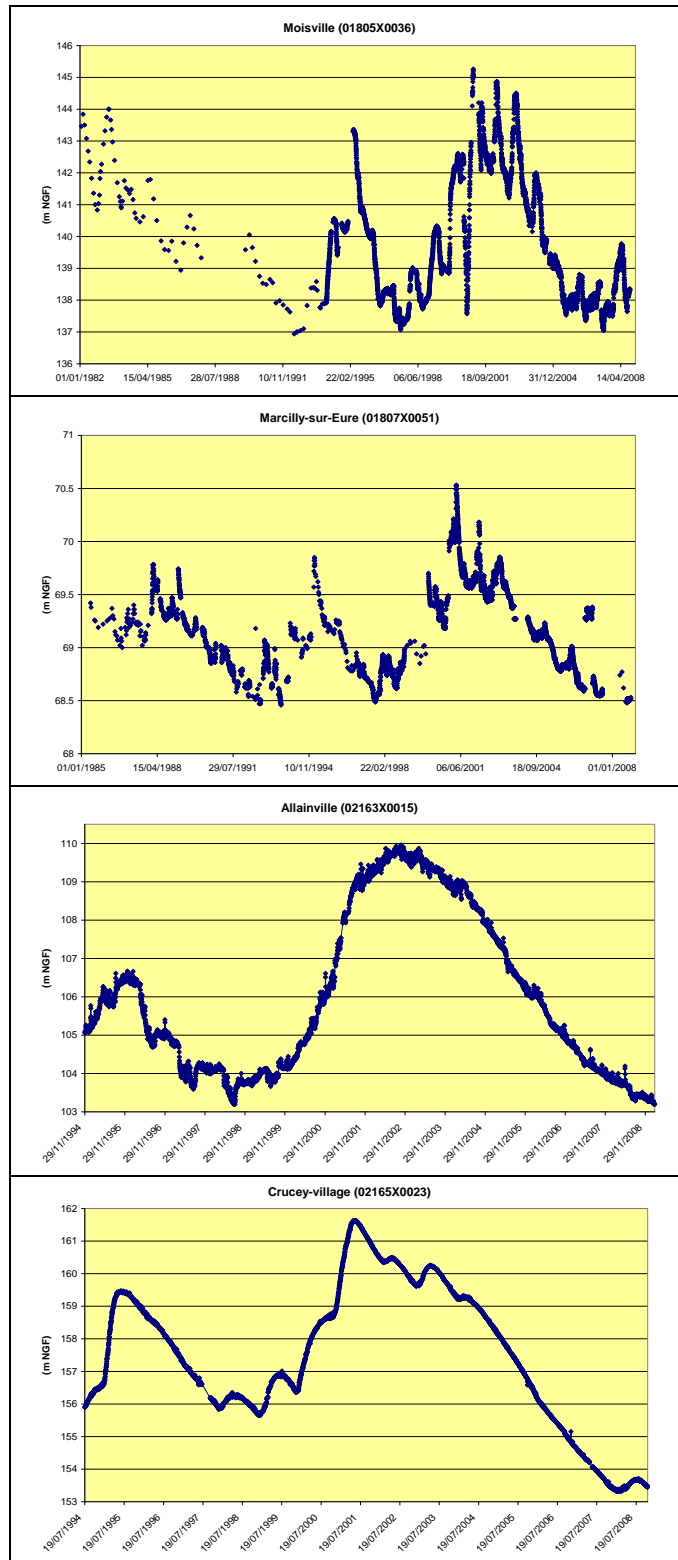


Figure 25 : Chroniques de piézomètres situés au voisinage des deux champs captants

2.4.6. Cartes piézométriques

a) Cartes piézométriques existantes et objectifs des nouvelles cartographies

On dénombre principalement trois cartes piézométriques couvrant au moins une partie du secteur d'étude :

- une carte piézométrique représentant une situation de moyennes eaux de la nappe de la craie dans le département de l'Eure-et-Loir (Conseil Général de l'Eure-et-Loir). De fait, la cartographie ne prend pas en compte la rive gauche de l'Avre. Les isopièzes sont fournies tous les 5 m d'altitude ;
- une carte piézométrique représentant une situation de moyennes eaux de la nappe de la craie dans le département de l'Eure, réalisée dans le cadre de l'Atlas hydrogéologique de ce département (2004). Les isopièzes sont espacées de 10 m en altitude et la cartographie ne couvre que les rives gauches de l'Avre et de l'Eure à partir de la confluence avec l'Avre. A noter qu'il existe aussi une version antérieure de cet atlas, paru en 1990, et proposant une cartographie du niveau de la nappe de la craie (isopièzes tous les 10 m également) ;
- une carte piézométrique de la nappe de la craie établie par le CRECEP en 1997. Le contexte piézométrique n'est pas précisé (hautes eaux ? basses eaux ?) et la carte comporte peu d'éléments de localisation (pas d'échelle, seules les villes et les cours d'eau principaux sont indiqués), rendant délicate son utilisation. Néanmoins, cette carte donne une vision du niveau de la nappe de la craie à la fois dans les départements de l'Eure et de l'Eure-et-Loir. Les isopièzes sont espacées de 10 m en altitude.

La réalisation de cartes piézométriques complémentaires aux environs des champs captant vise donc :

- à confirmer le comportement de la nappe de la craie dans le département de l'Eure-et-Loir dans deux situations piézométriques différentes de celle prise en compte pour la cartographie disponible. Il s'agit notamment de vérifier les limites des bassins versants hydrogéologiques ;
- à confirmer le caractère drainant des principaux cours d'eau (Avre, Blaise, Eure) au voisinage des champs captants, en établissant une cartographie de la nappe sur les deux départements concernés ;
- à préciser la piézométrie en rive gauche de l'Avre, au voisinage du champ captant de Vert-en-Drouais ;
- à disposer de points de mesure du niveau de la nappe en fond de vallée et à proximité immédiate des champs captant.

b) Inventaire des points de mesure disponibles

Une identification des points susceptibles d'être mesurés a été effectuée en préalable aux campagnes de terrain. Ce travail a bénéficié du « carnet de tournée » déjà utilisé par Eau de Paris pour la réalisation de mesures piézométriques au voisinage des deux champs captants. Une première liste d'environ 25 points mesurés en 2004 était ainsi disponible. Des fiches par ouvrage avaient été réalisées pour la plupart d'entre eux.

Des recherches complémentaires ont été effectuées dans la Banque du Sous-Sol pour compléter cette première liste d'ouvrage et le cas échéant pallier à des difficultés d'accès (absence ou refus du propriétaire, ouvrage partiellement ou totalement obstrué, ouvrage en cours de pompage).


Plus de 450 ouvrages ont été identifiés dans un périmètre allant de Bû à Prouais à l'Est et de Droisy à Brezerolles à l'Ouest, soit sur une superficie de 450 km² environ. Plus de 180 ouvrages ont pu être visités durant la campagne du mois de mars. Parmi ces ouvrages, seuls 36 ont pu être mesurés, les autres étant soit inaccessibles, soit non mesurables. Pour chacun des ouvrages mesurés, une fiche de présentation a été rédigée (cf. Figure 26).

Durant la seconde campagne piézométrique, 29 des 36 points mesurés durant la première campagne ont à nouveau été mesurés. En complément, 32 autres mesures ont été effectuées, portant à 61 le nombre de points mesurés lors de cette seconde campagne.

Pour la première comme pour la seconde campagne, les cartes piézométriques ont été réalisées en prenant en compte les mesures disponibles au niveau de 7 piézomètres situés dans le secteur, ce qui porte respectivement le nombre de mesures disponibles à 43 et 68.

**Délimitation des bassins d'alimentation des champs captant de
Montreuil-sur-Eure et Vert-en-Drouais
Campagne de relevés piézométriques
Mars 2009**

Identification de l'ouvrage : Puits

| |
|--|
| Adresse éventuelle : 6 RN154 à BURAY. |
| - Conditions d'accès : se présenter au propriétaire |
| - Indice BSS : 01806X0001 |
| - Coordonnées GPS Lambert 2 étendu métrique : |
| o X : 515860.577 (+/- 2 à 5m) |
| o Y : 2422198.895 (+/- 2 à 5m) |
| - Référence de la photo : |
|  |

Identification du repère :

- description du repère : sol.
- hauteur du repère par rapport au sol (à exprimer en négatif si le repère se situe sous le niveau du sol) :

Mesure du niveau de la nappe :

- date de la mesure : 12/03/2009
- profondeur du niveau de la nappe par rapport au repère : 17.55 m
- remarques éventuelles (pompages, arrivée d'eaux pluviales, pompe installée dans l'ouvrage...) : Ancien pompage, pas utilisé depuis quelques années.

Mesure de la profondeur de l'ouvrage (en mètres par rapport au repère) : environ 25 m.

Figure 26 : Fiche d'un ouvrage mesuré durant la campagne piézométrique de mars 2009

c) Contexte de réalisation des deux cartes piézométriques

Le contexte des deux campagnes piézométriques est présenté en Figure 27.

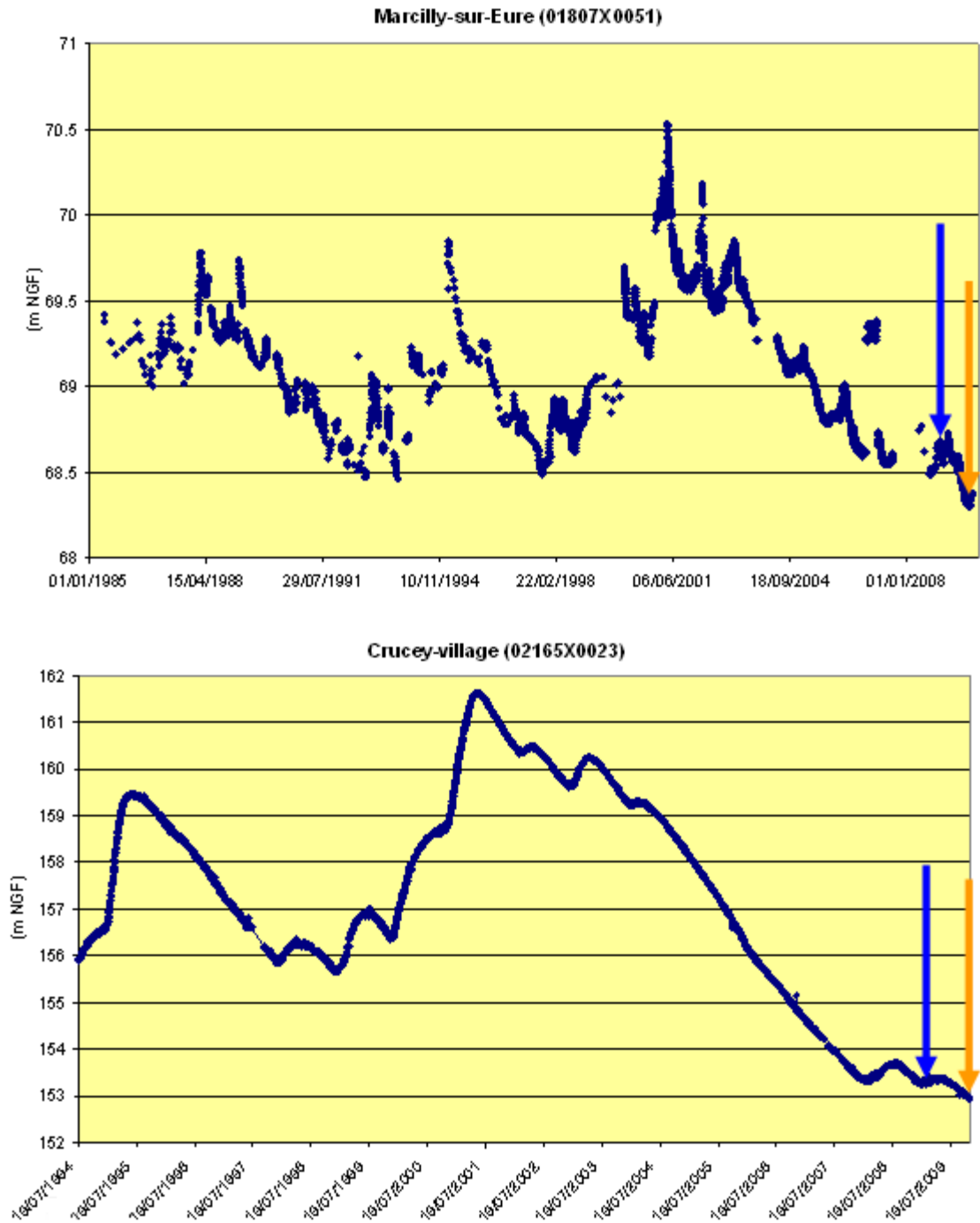


Figure 27 : Contexte des campagnes de hautes eaux (en bleu) et des basses eaux (en orange) sur deux chroniques piézométriques issues de piézomètres du secteur

La première campagne a été réalisée en mars 2009, entre le 9 et le 19 du mois. Il s'agit d'une période de hautes eaux saisonnières mais réalisé dans un contexte interannuel de basses eaux. Il s'agit donc d'une situation de hautes eaux à des niveaux particulièrement bas.

La seconde campagne a été réalisée entre le 12 et le 16 octobre 2009. Il s'agit d'une période de basses eaux saisonnières mais aussi interannuelles : les niveaux mesurés sont donc particulièrement bas, les plus bas mesurés depuis 1985 si on en juge d'après la chronique du piézomètre de Marcilly-sur-Eure (cf. Figure 27).

d) Cartes piézométriques de hautes eaux et de basses eaux

Les cartes piézométriques ont été établies par interpolation des données à l'aide du logiciel ArcMap (ESRI ©), en contrôlant les altitudes obtenues à l'aide du MNT de l'IGN au pas de 50 m. Compte tenu de la contribution des eaux souterraines aux débits de l'Avre, de la Blaise et de l'Eure (cf. hydrogrammes et modélisation du débit de l'Avre), le niveau piézométrique a aussi été contrôlé par le niveau des cours d'eau dans les fonds de ces vallées.

Dans la partie SE de la zone cartographiée, la craie se situe sous couverture de formations géologiques du Tertiaire. Après vérification sur des logs validés du secteur (02177X0007, 02177X0028 et 02553X0014), il apparaît que la craie est directement en contact avec la formation des sables et grès de Fontainebleau. Cette dernière ne constitue pas un écran imperméable pour la craie sous-jacente : la limite d'affleurement des sables et grès ne peut donc pas être considérée comme une limite pour la délimitation des isopièzes.

Il est bien entendu que les isopièzes ne sont valables que dans la zone d'interpolation des données, soit dans les limites définies par le polygone englobant l'ensemble des points utilisés pour la cartographie.

Ces cartes confirment nettement le drainage de la nappe par les cours d'eau, à commencer par l'Avre, ainsi que l'existence d'un dôme piézométrique là où a été construite la ville de Dreux. Les limites du bassin versant hydrogéologique du champ captant de Vert-en-Drouais et de Montreuil sont très similaires d'une carte à l'autre.

L'erreur médiane entre les niveaux mesurés et les niveaux interpolés est de 0,6 m en hautes eaux et de 0,4 m en basses eaux (amélioration liée notamment à l'augmentation du nombre de points de mesures).

Les écarts observés dans l'allure des isopièzes sur un secteur donné sont liés à la densité de mesures disponibles : c'est par exemple le cas dans le secteur couvrant la rive droite de la Blaise et la rive gauche de l'Eure, dans lequel un dôme piézométrique est relevé lors de la campagne de basses eaux.

Champs captant de Montreuil et Vert-en-Drouais (28)
délimitation des bassins d'alimentation de captages et des zones vulnérables

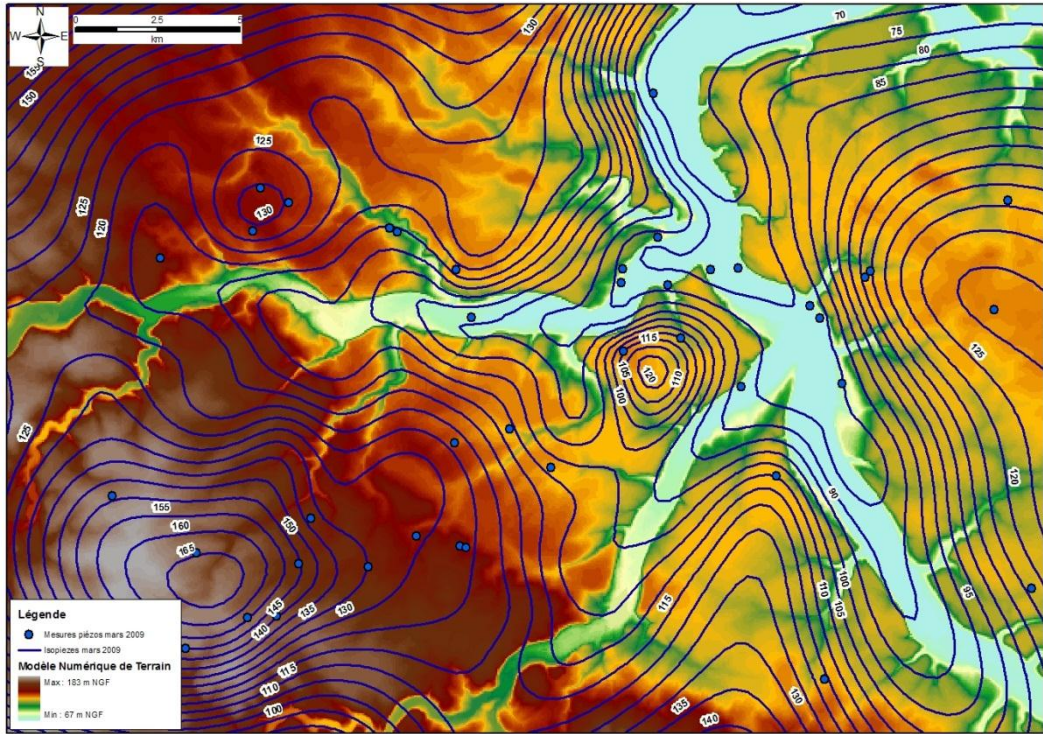


Figure 28 : Carte piézométrique de hautes eaux 2009 et points de mesure

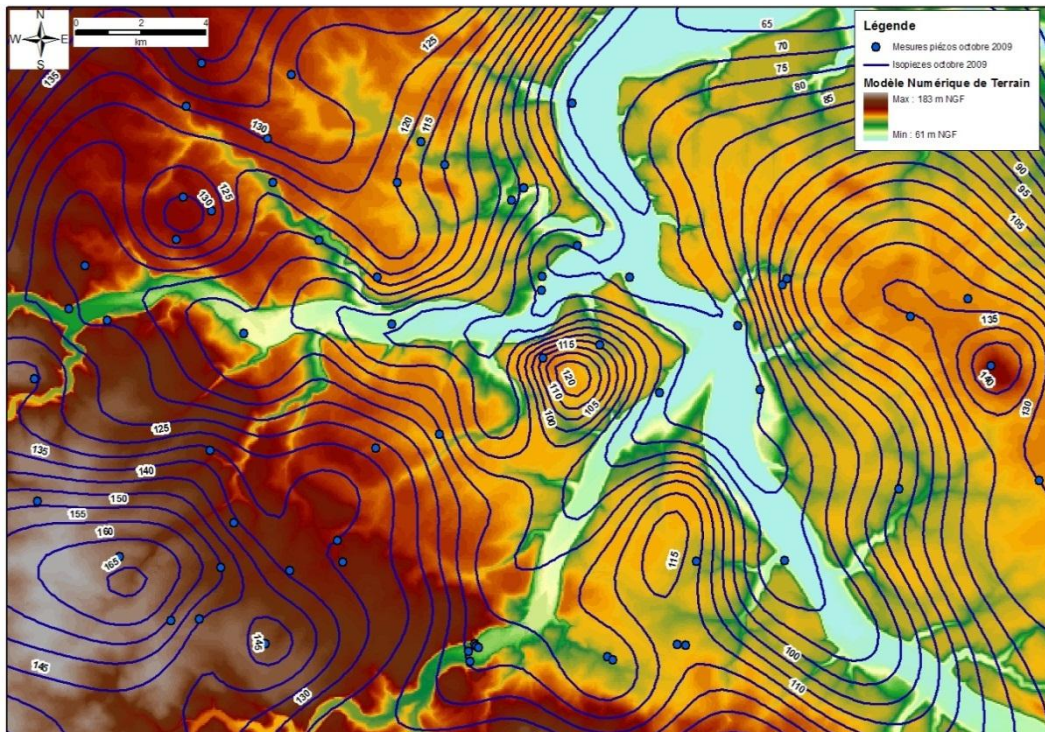


Figure 29 : Carte piézométrique de basses eaux 2009 et points de mesure

Les 29 mesures effectuées en hautes eaux et en basses eaux permettent de quantifier la baisse du niveau piézométrique. Celle-ci va de quelques centimètres à un peu plus de 1,8 m. En classant la baisse constatée selon l'altitude du niveau de la nappe, il apparaît que la première augmente avec la seconde. Ceci est cohérent avec la connaissance de l'amplitude des fluctuations piézométriques dans ce secteur, à savoir qu'elle est plus importante au droit des plateaux qu'en fond de vallée, c'est-à-dire qu'elle augmente avec l'éloignement à un exutoire.

| Altitude de la nappe (en m) | Nombre de mesures | Baisse moyenne (en m) | Baisse médiane (en m) |
|-----------------------------|-------------------|-----------------------|-----------------------|
| 70 à 100 m | 8 | 0.11 | 0.10 |
| 101 à 125 m | 9 | 0.84 | 0.79 |
| > 125 m | 12 | 1.01 | 0.98 |

Tableau 4 : Baisse de l'altitude de la nappe entre mars et octobre 2009 et en fonction de celle-ci

Une délimitation du bassin versant hydrogéologique de la rive droite de l'Avre aval (cf. Figure 30) a été effectuée à partir de la carte piézométrique de « moyennes eaux » (situation moyenne du niveau de la nappe de la craie – les deux autres cartographies indiquant une délimitation très similaire) établie à l'échelle du département de l'Eure-et-Loir. Ce bassin versant souterrain a été délimité en fond de vallée par la rivière de l'Avre.

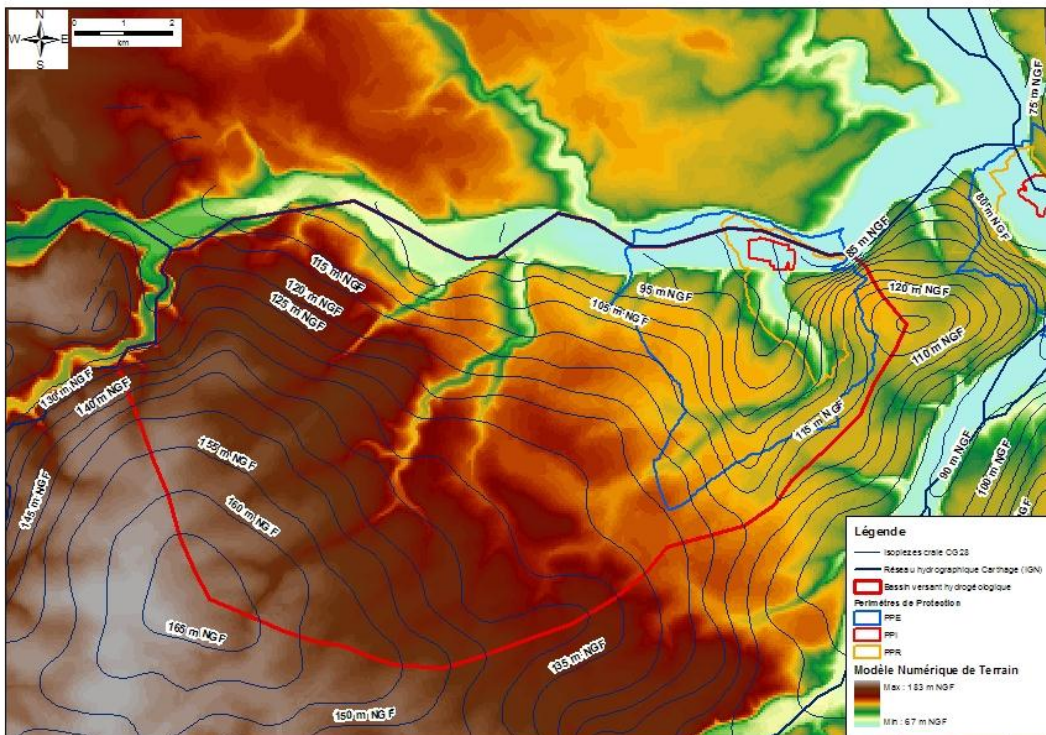


Figure 30 : Délimitation du bassin versant hydrogéologique de la rive droite de l'Avre aval d'après la carte piézométrique établie à l'échelle de l'Eure-et-Loir

2.5. QUALITE DE LA NAPPE DE LA CRAIE VIS-A-VIS DES NITRATES

La carte ci-dessous (Figure 31) est extraite du rapport concernant les captages de Vernouillet (SAFEGE, 2009). Les mesures ponctuelles montrent que des teneurs élevées en nitrates sont observées au niveau des plateaux, ainsi qu'en fond de vallée.

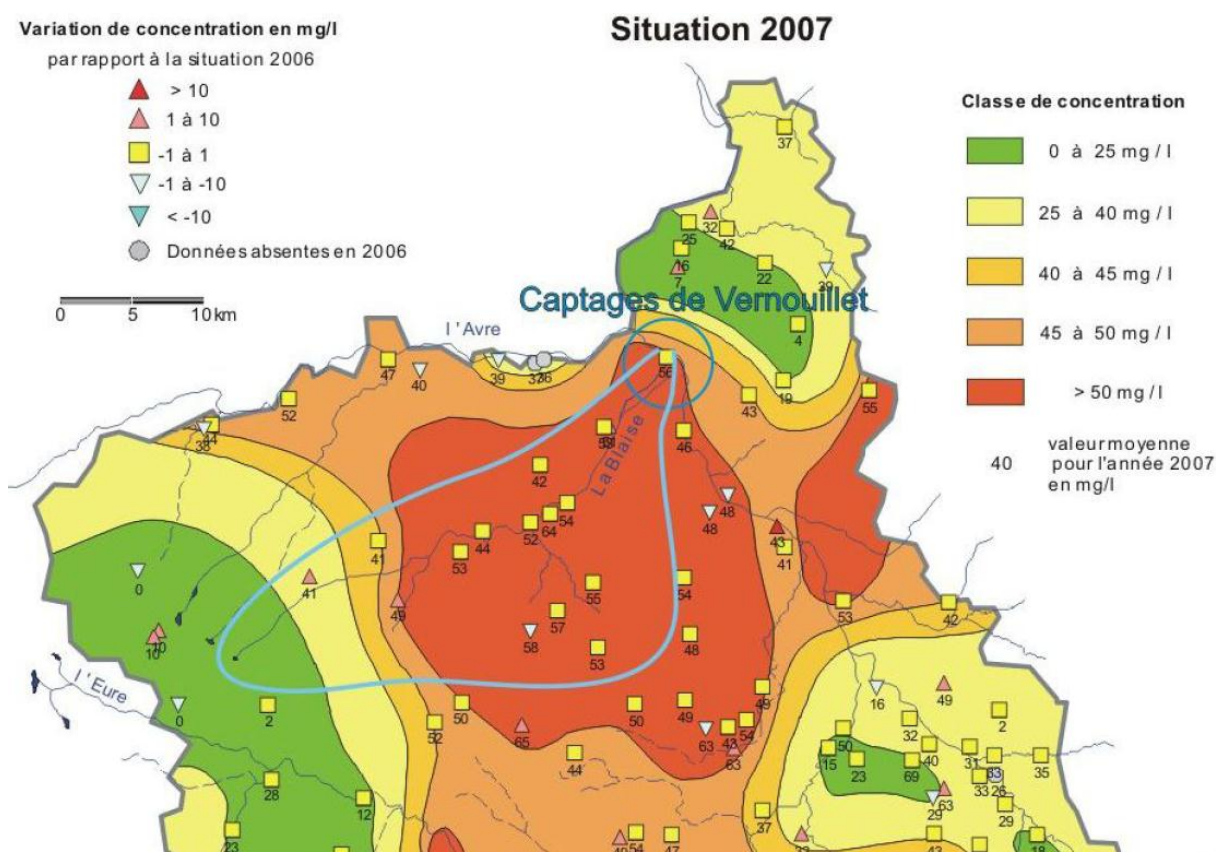


Figure 4-8 : Cartographie des nitrates sur les eaux souterraines de l'Eure-et-Loir (CG28, 2007)

Figure 31 : Cartographie des nitrates dans les eaux souterraines de l'Eure-et-Loir (source CG28)

Nous avons également exploité les données d'Eau de Paris et celles disponibles dans ADES (Figure 32). Entre l'Avre et la Blaise, au sud-ouest de Dreux, les points de suivi d'Eau de Paris indiquent des concentrations entre 50 et 150 mg/L. Entre Blaise et Eure on trouve un point à 170 mg/L alors que les points proches de la rivière sont moins

concentrés (40 à 90 mg/l). Dans ADES on trouve un point à 80 mg/l au centre du secteur Avre-Blaise et le reste des points en bordure de rivière montre des concentrations comprises entre 25 et 56 mg/l.

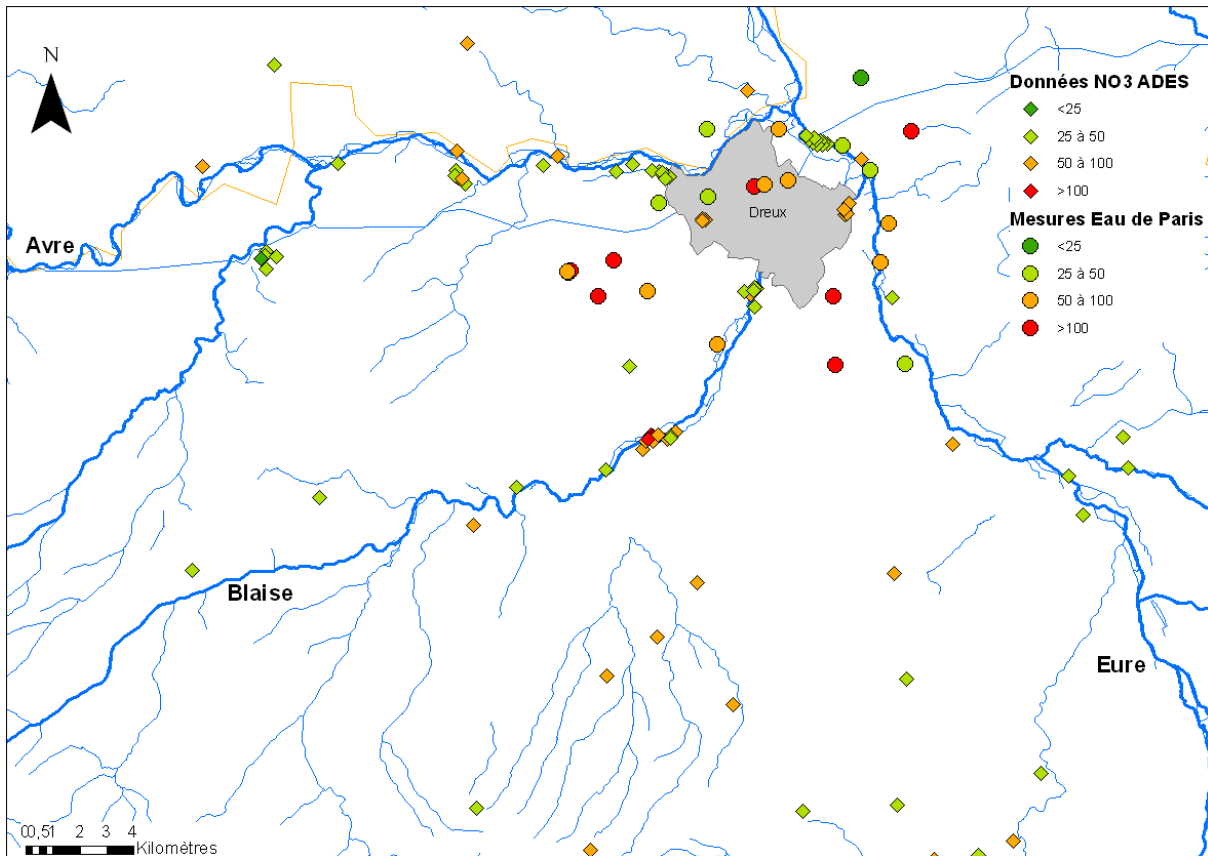


Figure 32- Teneurs en nitrates dans les eaux souterraines (données récentes issues d'Eau de Paris et d'ADES)

3. Modélisation hydrologique globale du bassin versant de l'Avre

Une modélisation hydrologique globale a été mise en œuvre sur le bassin versant de l'Avre afin d'évaluer la contribution des eaux souterraines (nappe de la craie) aux débits de la rivière.

Dans le cadre de la présente étude, le logiciel de modélisation hydrologique développé par le BRGM (GARDENIA) a été utilisé. Son principe de fonctionnement est présenté ci-dessous. Le calage du modèle nécessite de disposer d'une chronique de débits du cours d'eau ou de niveaux piézométriques sur une station représentative du bassin. Nous disposons sur le bassin de l'Avre d'une station hydrométrique (Muzy) permettant de réaliser ce calage. Par contre nous ne disposons pas d'une telle station sur l'Eure (les stations existantes étant soit trop en amont, soit trop en aval), c'est la raison pour laquelle nous n'avons pas réalisé de modélisation hydrologique globale sur le bassin de l'Eure.

3.1. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DU MODELE GARDENIA

3.1.1. Principes et objectifs

Le modèle GARDENIA (modèle Global A Réservoirs pour la simulation des DEbits et des Niveaux Aquifères), développé par le BGRM, est un modèle hydrologique global de bassins versants. Il simule par une succession de réservoirs, le cycle de l'eau (cf. Figure 33) dans un bassin versant, depuis les précipitations jusqu'au débit à l'exutoire d'une rivière (ou d'une source) (modélisation pluie-débit) et/ou au niveau ponctuel d'un aquifère (niveau piézométrique) (modélisation pluie-niveau piézométrique) (Thiéry, 2003).

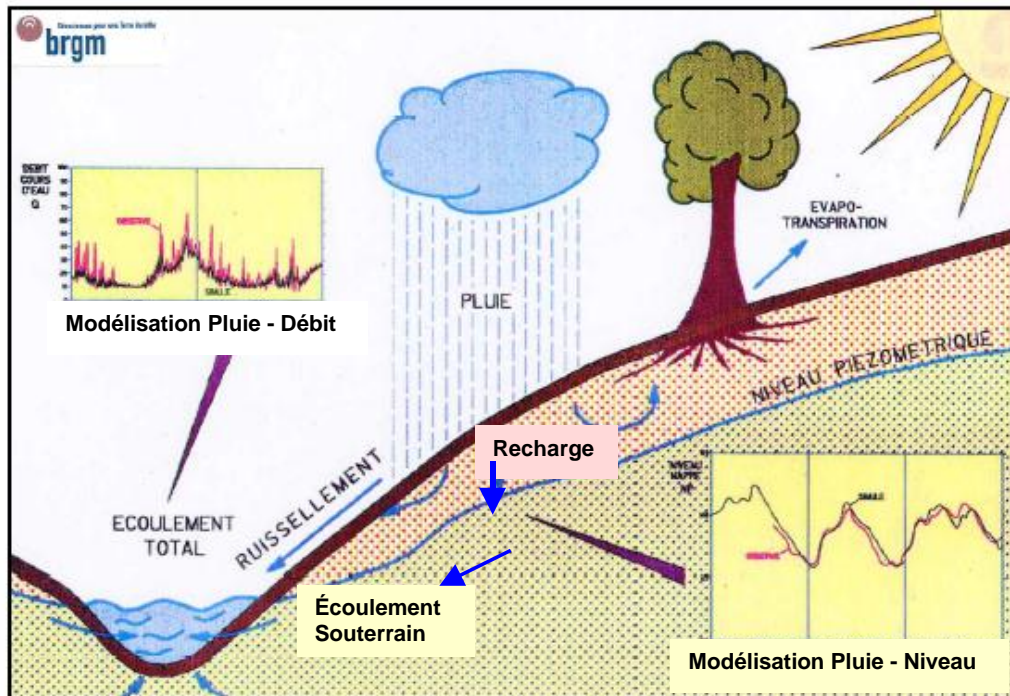


Figure 33 : Représentation schématique des éléments du bilan hydrologique d'un bassin versant

La modélisation des relations pluie-débit ou pluie-niveau fait intervenir 4 à 6 paramètres globaux (réserve utile, temps de tarissement...) définis pour un bassin versant ou une entité homogène au sein d'un bassin versant. Ces paramètres doivent être ajustés sur une période d'observation commune des pluies et des débits (et/ou niveau). Cette phase de calage est réalisée automatiquement par le logiciel sous contrôle de l'utilisateur.

A l'issue du calage, GARDENIA permet (Thiéry, 2003) :

- > d'établir un bilan hydrologique sur le bassin : évapotranspiration réelle, ruissellement, infiltration, recharge ; ce bilan peut contribuer à l'évaluation de la recharge naturelle d'un aquifère
- > de réaliser une extension de données de débits, de niveaux piézométriques ou de recharge pendant une longue période pendant laquelle les précipitations et l'évapotranspiration potentielles sont connues. Ces longues séries de débits ou de niveaux peuvent ensuite être utilisées :
 - pour effectuer des prévisions de débits et de niveaux pour le dimensionnement d'ouvrages
 - pour l'étude de phénomènes particuliers, tels que remontées de nappe, occurrence d'inondations ou de sécheresses.

3.1.2. Schématisation du bassin versant

Le modèle GARDÉNIA simule le cycle de l'eau, depuis les précipitations sur un bassin versant jusqu'au débit à l'exutoire et/ou au niveau aquifère en un point. Ce modèle est global, car il considère une "entrée" globale (une « lame d'eau » sur le bassin et une évapotranspiration potentielle) et une "sortie" unique qui est, suivant le cas, le débit à l'exutoire et/ou le niveau piézométrique en un point de la nappe sous-jacente. L'analogie entre l'allure exponentielle de la vidange d'un réservoir et celle du tarissement d'une rivière ou d'une source, ou encore de la baisse des niveaux d'une nappe souterraine, permet de représenter le comportement hydraulique d'un bassin versant par un ensemble de réservoirs se vidant les uns dans les autres. Des fonctions de transfert non linéaires sont utilisées pour améliorer cette schématisation.

GARDÉNIA simule le cycle de l'eau par un système de 3 à 4 réservoirs en cascade (Figure 34) qui représentent globalement respectivement (Thiéry, 2003) :

- > les premières dizaines de centimètres du sol, siège des phénomènes d'évapotranspiration (zone d'influence des racines de la végétation) ;
- > une zone intermédiaire d'écoulement rapide ;
- > une ou deux zones aquifères d'écoulement souterrain lent et retardé.

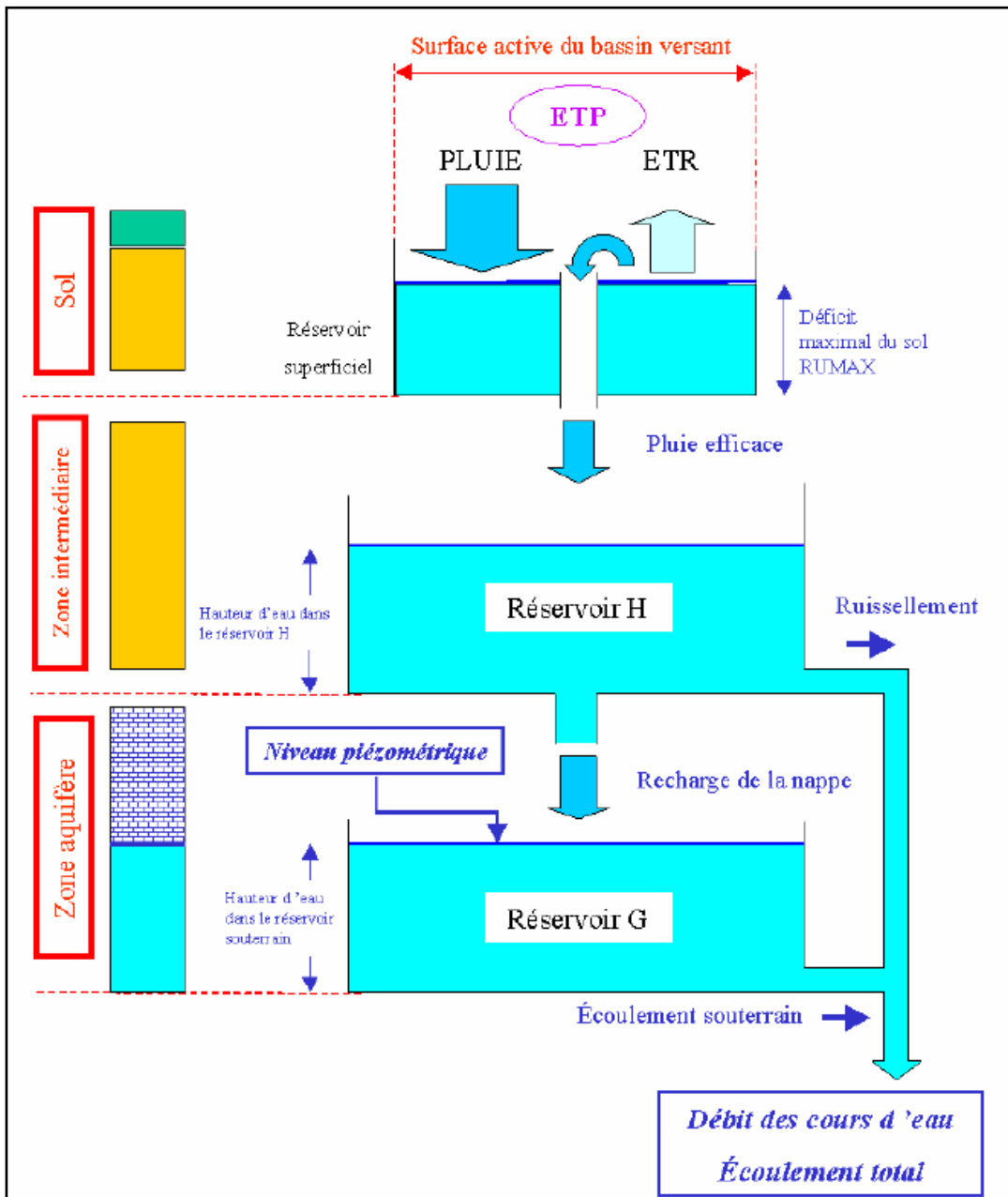


Figure 34 : Principe du modèle hydrologique global GARDENIA pour la simulation du débit d'un cours d'eau ou d'un niveau piézométrique

3.2. DONNEES COLLECTEES

Les modélisations doivent être réalisées à pas de temps constants. La durée du pas de temps est quelconque, toutefois on utilise généralement les pas de temps journalier, décadaire ou mensuel.

Dans le cadre de cette étude, les modélisations ont été conduites aux pas de temps décennaires. Les données utilisées proviennent de stations de Météo France (pluie et ETP), de stations hydrométriques gérées par le MEEDDAT (débit) et de piézomètres suivis par le BRGM.

Les différentes stations météorologiques retenues pour la modélisation sont présentées dans le chapitre 2.2.3. Elles ont été choisies en fonction de leur proximité avec la zone d'étude et de la longueur de la série de données disponibles. La station hydrométrique utilisée pour la modélisation est décrite dans le chapitre 2.3.1. Les piézomètres identifiés dans le secteur d'étude sont présentés dans le chapitre 2.4.3.

3.3. MODELISATION DU BASSIN VERSANT

3.3.1. Données utilisées

La réalisation d'une modélisation avec le logiciel GARDENIA suppose d'identifier un contexte météorologique représentatif du bassin versant. Si les variations de l'évapotranspiration sont faibles dans un secteur géographique peu accidenté, les variations de la pluviométrie (en quantité et en intensité) sont plus fortes. A partir des stations pluviométriques sélectionnées, il a donc été nécessaire d'identifier une pluie représentative (ou pluie optimale) du bassin versant à la station de débit modélisée (l'Avre à Muzy).

Cette pluie optimale a été estimée à l'aide du logiciel TEMPO, développé par le BRGM. Ce logiciel, qui est dédié au traitement de signaux temporels (la pluie, le débit ou un niveau piézométrique qui varie en fonction du temps), permet d'identifier la ou les chroniques de pluie qui est (sont) la (les) mieux corrélée(s) avec la chronique de débit. La pluie optimale est alors égale à une somme pondérée des pluies proposées en entrée.

Pour la station hydrométrique de l'Avre à Muzy, la pluie optimale (« Popt ») obtenue à partir des cinq stations pluviométriques présentées précédemment (cf. 2.2.3) est égale à celle de Moussonvillers ($P_{opt} = 100\% P_{Moussonvillers}$).

L'évapotranspiration utilisée est celle d'Evreux-Huest.

La chronique piézométrique retenue est celle de Moisville (indice national : 01805X0036/S1).

Enfin, les prélèvements réalisés sur le bassin versant ont été pris en compte sur la période 1998-2008. Ils ont été estimés à 36 millions de m³ pour l'AEP, 730 000 m³ pour l'industrie et à 700 000 m³ pour l'irrigation (cf. rapport BRGM RP-56690-FR, voir bibliographie). La localisation des forages de prélèvements étant connue par commune d'implantation, une certaine imprécision demeure sur l'exactitude des volumes pris en compte.

3.3.2. Résultats

Comme indiqué précédemment, la modélisation a été effectuée au pas de temps décadaire. Il a été nécessaire d'introduire deux réservoirs souterrains pour reproduire la composante souterraine des écoulements de surface. Le calage a été effectué sur la période 01/1998-12/2008. La Figure 35 permet de comparer les débits simulés et observés.

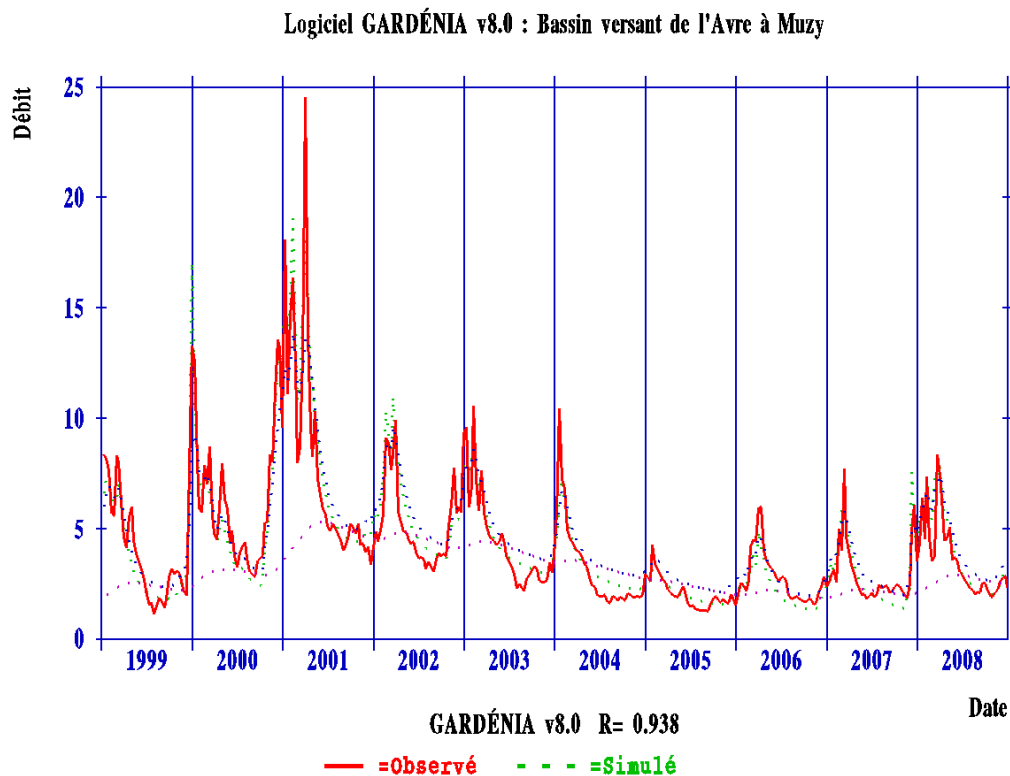


Figure 35 : Simulation du débit de l'Avre à Muzy

Avec un coefficient d'ajustement de 0,938 et une analyse visuelle permettant de constater une bonne reproduction des fluctuations générales, on peut considérer que le calage est satisfaisant. Le tableau ci-dessous présente les principaux résultats et le bilan obtenu par modélisation sur la période 1998-2008. On notera la part importante des écoulements lents, ce qui traduit une forte participation des eaux souterraines au débit de l'Avre dans cette partie du bassin versant.

| Pluie (mm) | ETR (mm) | Pluie efficace (mm) | Écoulement rapide (mm) | Écoulement lent (mm) | Débit moyen observé (mm) (m ³ /s) | Débit moyen simulé (mm) (m ³ /s) |
|------------|----------|---------------------|------------------------|----------------------|--|---|
| | | | | | | |

| | | | | | | |
|-----|-----|-----|----|-----|------|------|
| 840 | 668 | 178 | 10 | 165 | 4,23 | 4,28 |
|-----|-----|-----|----|-----|------|------|

Tableau 5 : Bilan de la modélisation de l'Avre à Muzy sur la période 1998-2008

On peut constater que la simulation surestime très légèrement le débit moyen.

La modélisation a été effectuée en prenant en compte deux réservoirs souterrains, qui ont été nécessaires afin de simuler un comportement de nappe présentant un cycle pluriannuel (présentant un temps de demi-décroissance de plus de 20 mois) et un cycle saisonnier (présentant un temps de demi-décroissance de 3 mois environ). Cette double composante confirme bien la diversité des comportements qui ont été observés dans le secteur, avec des piézomètres présentant :

- un comportement fortement pluriannuel (Crucey-villages et Allainville notamment) ;
- un comportement mixte, avec une composante saisonnière et une composante pluriannuelle (Moisville, Bu, Marcilly-sur-Eure).

Dans le cadre du rapport BRGM RP-56690-FR, une modélisation du débit de l'Avre à Muzy a été réalisée à l'aide du logiciel TEMPO (qui base la modélisation sur le traitement du signal). Cette modélisation confirme la prépondérance de la composante lente dans le débit de l'Avre.

La modélisation globale GARDENIA entreprise sur le bassin versant de l'Avre montre que la rivière est essentiellement alimentée par la nappe de la craie.

4. Outils hydrochimiques pour l'estimation des relations eau de surface-eau souterraine

Une série d'outils hydrochimiques a été mise en œuvre afin d'une part de caractériser la variabilité hydrochimique dans le secteur d'étude (p.ex. existence de réservoirs ayant des caractéristiques chimiques distinctes), de déterminer si des traceurs hydrochimiques permettaient de distinguer eaux de surface et eaux souterraines, et le cas échéant, évaluer la contribution des eaux de surface aux débits des captages.

4.1. METHODOLOGIE

4.1.1. Méthodes de mesures

Toutes les techniques de prélèvement, d'échantillonnage et de conservation ont été validées au BRGM afin de répondre à trois objectifs : représentativité du milieu, caractérisation des phénomènes et limitation des transformations, et font l'objet d'un mode opératoire spécifique qui permet de garantir la non contamination des échantillons.

Les différentes méthodes mises en œuvre sont les suivantes :

- Analyses physico-chimiques classiques
- Terres rares
- Isotopes ($^{16}\text{O}/^{18}\text{O}$, $^2\text{H}/^1\text{H}$, $^{37}\text{Sr}/^{36}\text{Sr}$) et gaz dissous (CFC, SF_6)

Ces différentes méthodes sont détaillées en annexe 1.

4.1.2. Qualité des eaux aux champs captants de Montreuil et Vert-en-Drouais

Eau de Paris effectue un suivi régulier de la qualité des eaux aux divers forages des deux champs captants. Les valeurs disponibles depuis 1990 montrent une certaine variabilité des concentrations en éléments dissous tant du point de vue spatial au sein de chaque champ captant que du point de vue temporel. La Figure 36 montre les variations des concentrations en nitrates aux forages P6 et P10 de Montreuil et V1 et V3 de Vert-en-Drouais.

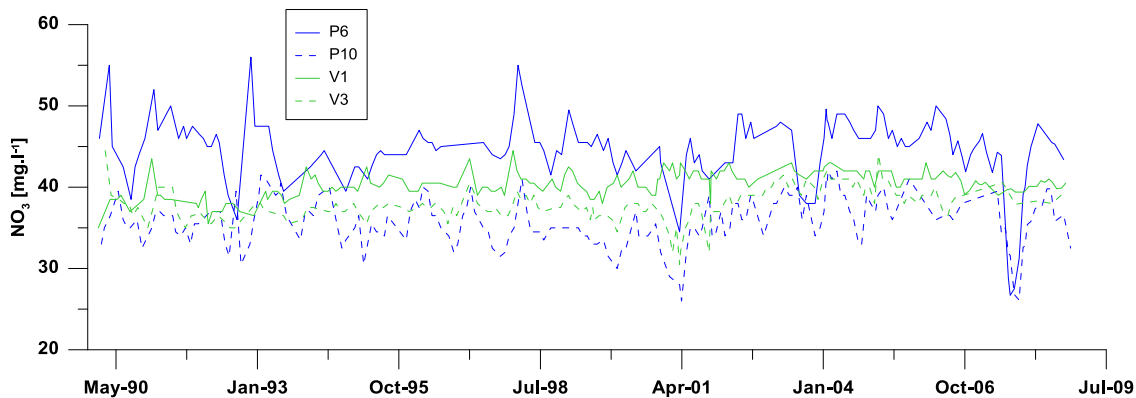


Figure 36 : Concentrations en nitrates des eaux souterraines aux forages P6 et P10 de Montreuil et V1 et V3 de Vert-en-Drouais sur la période 1990-2008

La moyenne des concentrations aux forages sur la période 1990-2008 varie de 37,9 mg.l⁻¹ au V3 à 43 mg.l⁻¹ au V6 sur le champ captant de Vert-en-Drouais et de 35,7 mg.l⁻¹ au P10 à 48,6 mg.l⁻¹ au P5 du champ captant de Montreuil.

4.1.3. Choix des points de prélèvement

Pour la première phase de l'étude et afin de caractériser les eaux souterraines des deux champs captants de Montreuil et Vert-en-Drouais, des points d'eaux de l'aquifère alluvial et de l'aquifère de la craie ont été recherchés parmi les points inventoriés dans la Banque du sous-sol (BSS) et ceux utilisés pour le suivi régulier de la qualité des eaux effectué dans le passé par Eau de Paris. Les profils géologiques des puits et forages ont été analysés afin de vérifier l'origine des eaux analysées.

Sur chacun des champs captants 4 forages ont également été sélectionnés en fonction de la différence de concentration des éléments analysés et des différences de variabilité de chacun des éléments. Il s'agit des forages V1 (02163X0003/P1AEP), V3 (02163X0043/P3AEP) et V5 (02163X0045/P5AEP) de Vert-en-Drouais et P1 (02164X0092/P1AEP), P6 (02164X0097/P6AEP), P9 (02164X0100/P9AEP) et P10 (02164X0100/P10AEP) de Montreuil.

Au final 12 points ont été sélectionnés (Figure 37) y compris deux prélèvements sur les rivières Avre Eure. Le puits captant l'aquifère alluvial à proximité de Vert-en-Drouais est localisé à Saint-Germain sur Avre (02163X2005/P). Le point captant l'alluvial de l'Eure est un puits privé de Montreuil (sans code BSS). Au sud de la zone d'étude, à Luat-Claret, a été prélevé un point d'eau ne captant a priori que l'aquifère de la craie (02164X0024/P).

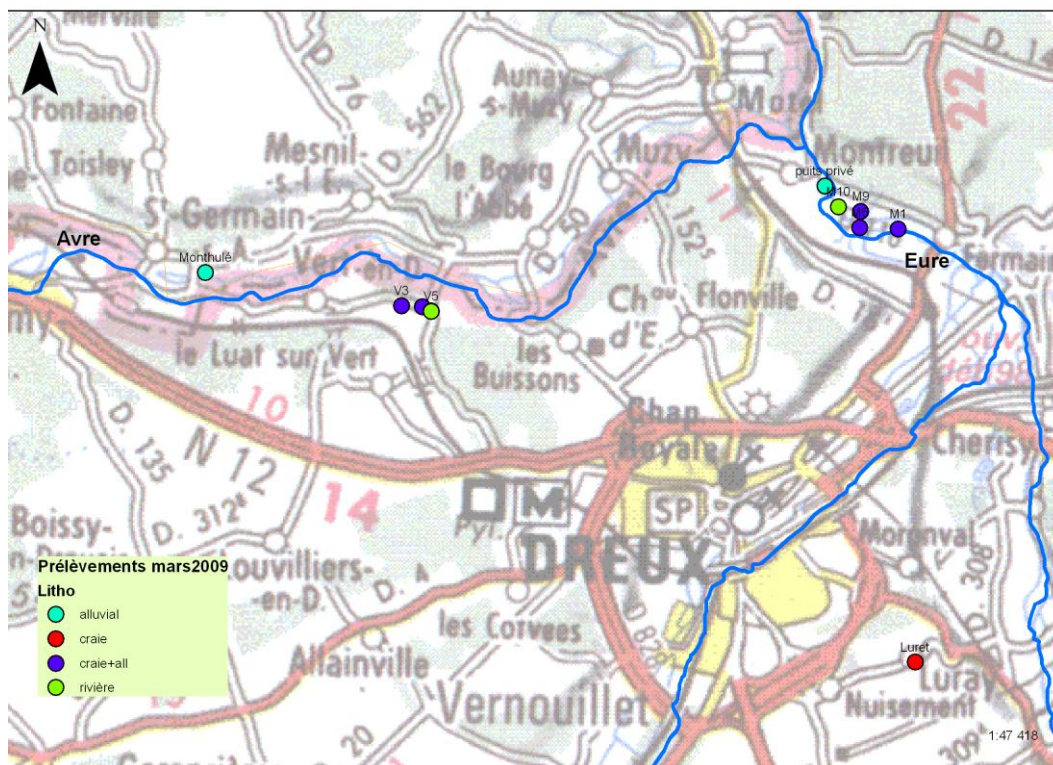


Figure 37 : Localisation des points de prélèvement pour la campagne de mars 2009

La première campagne de mesures s'est déroulée les 17 et 18 mars 2009 et la deuxième campagne les 11 et 12 novembre 2009. Des campagnes partielles ont également été réalisées le 14 mai ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ et Sr), le 14 août (terres rares), le 20 octobre (éléments traces et SF_6).

La première campagne (mars 2009) correspond à une période de hautes eaux alors que la deuxième campagne (novembre 2009) correspond à une situation d'étiage (Figure 27).

4.2. LES RESULTATS DE LA CAMPAGNE DE PRELEVEMENT DE MARS 2009

4.2.1. Diagramme de Piper : faciès chimique des eaux

Le diagramme de Piper (Figure 38) indique que toutes les eaux prélevées en mars 2009 présentent un faciès bicarbonaté-calcaïque avec une faible variabilité chimique. Comme attendu on observe une grande similitude entre le chimisme des eaux des champs captants et de l'aquifère alluvial.

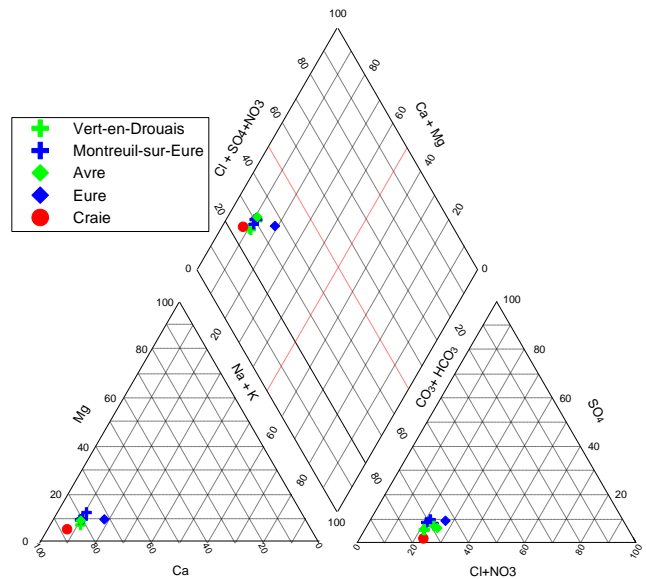


Figure 38: Diagramme de Piper pour les eaux de l'Avre et de l'Eure et des eaux souterraines (alluvions + craie) prélevées sur la zone d'étude en mars 2009

4.2.2. Relation inter-éléments

Les paramètres physico-chimiques mesurés in-situ, pH, température, Eh, O₂ dissous et conductivité permettent une première compréhension du fonctionnement du système. Les eaux de rivière ont des pH proches de 8,4 ce qui est attendu pour des eaux en équilibre avec le CO₂ atmosphérique. Les eaux souterraines ont des pH variant peu, de 7,13 à 7,33 (Figure 39). La campagne de prélèvements a été effectuée en fin d'hiver et les eaux des aquifères alluviaux sont donc relativement plus froides que celles de la craie, des forages des champs captants et des rivières.

Les eaux du secteur de Vert-en-Drouais sont moins minéralisées que celles de Montreuil avec des conductivités moyennes respectivement de 595 et 682,5 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. Cette différence se retrouve également pour les eaux de surface.

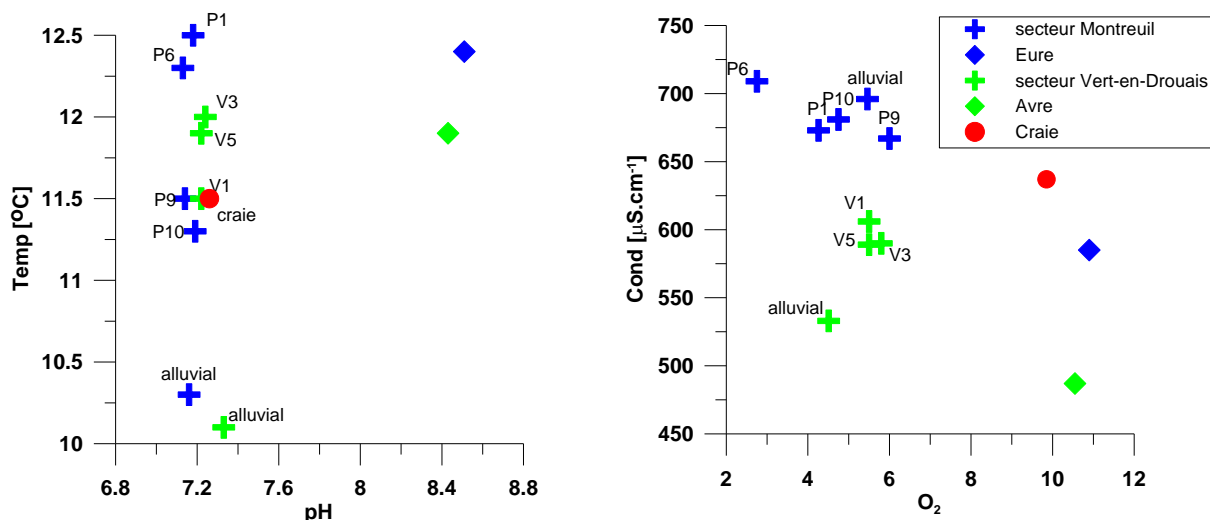


Figure 39: Température vs. pH et conductivité vs. oxygène dissous pour les eaux de rivières et les eaux souterraines (craie et alluvial) du secteur d'étude

Les concentrations en calcium et en bicarbonates sont fortement corrélées (Figure 40), les eaux circulant dans des formations calcaires de type CaCO_3 . Ces deux éléments sont largement majoritaires dans la chimie des eaux collectées. Les formations sédimentaires sont peu riches en magnésium, les concentrations en cet élément étant faibles dans toutes les eaux ($<10,5 \text{ mg.l}^{-1}$).

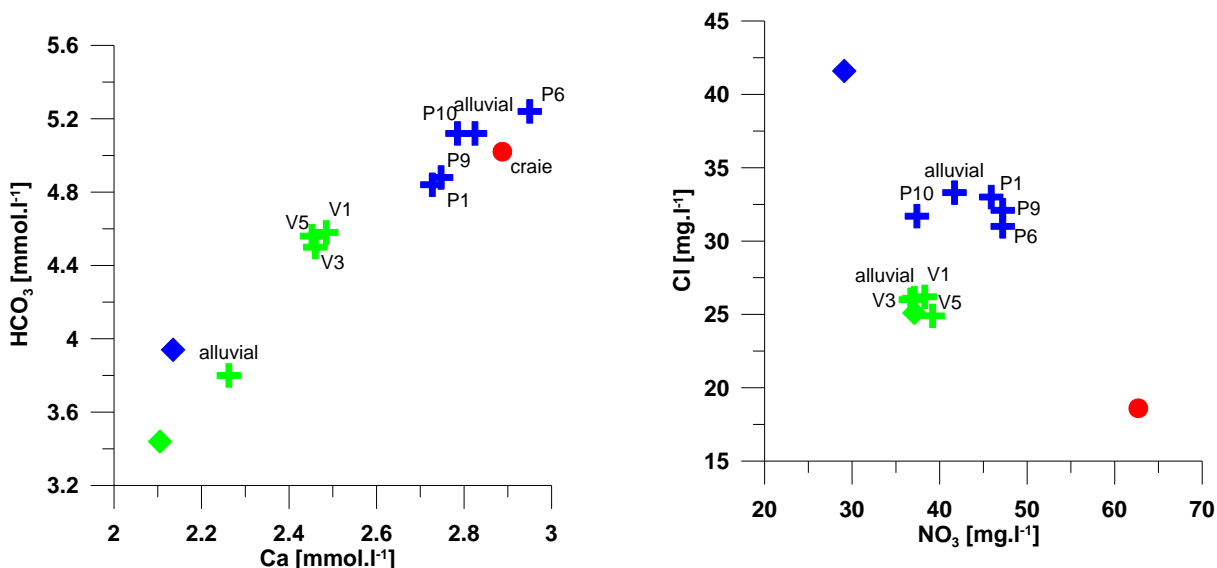


Figure 40: HCO_3^- vs. Ca et Cl vs. NO_3^- pour les eaux de rivières et les eaux souterraines (craie et alluvial) du secteur d'étude (en bleu points dans le bassin versant de l'Eure, en vert points dans le bassin versant de l'Avre)

Les concentrations en nitrates atteignent jusqu'à $62,7 \text{ mg.l}^{-1}$ pour l'aquifère de la craie et $47,2 \text{ mg.l}^{-1}$ pour le forage P6 de Montreuil. Les eaux de l'Avre ont des concentrations

de $39,2 \text{ mg.l}^{-1}$ alors que celles de l'Eure sont inférieures à 30 mg.l^{-1} (Figure 40). La relation entre les chlorures et les nitrates laisse envisager une origine anthropique différente des éléments azotés pour les eaux de l'Eure (Cl fort, NO_3 moyen) et les eaux de la craie (NO_3 fort, Cl moyen). Les données montrent que les eaux de l'aquifère de la craie présentent une qualité chimique vis-à-vis des nitrates inférieure à celle des eaux de l'aquifère alluvial et eaux de surface.

Les deux sources naturelles principales de chlorures dans les eaux naturelles sont les aérosols marins et l'halite. La proportion d'aérosols marins contenus dans les eaux de pluies augmente au fur et à mesure que l'on se rapproche de la mer. A Paris les concentrations en chlorures sont de 5 mg.l^{-1} au maximum (Mégny, 1979). En l'absence de dépôts évaporitiques dans les niveaux lithologiques drainés, les eaux souterraines et les eaux de surface intègrent uniquement des chlorures provenant de l'eau de pluie qui les alimente (Meybeck, 1986, Berner et Berner, 1987). Les eaux de Vert-en-Drouais et Montreuil ont des concentrations supérieures à cet apport naturel supposé et une influence des engrais, par ailleurs riche en nitrates est sans doute responsable de ces teneurs.

Dans la Figure 41 sont présentées sous la forme de diagrammes binaires les concentrations en élément majeur en fonction des concentrations en chlorures mesurées pour les campagnes de prélèvements de hautes eaux (mars 2009) en distinguant les eaux de surface, les eaux souterraines du secteur de Vert-en-Drouais et celles du secteur de Montreuil. La droite de dilution de l'eau de mer, correspondant aux concentrations en éléments dissous apportés uniquement par l'eau de pluie (influencée par les aérosols marins), est représentée comme référence à partir des données synthétisées par Berner et Berner (1987). Sur le diagramme sodium versus chlorures (Figure 41), les points sont majoritairement légèrement en-dessous de la droite de dilution de l'eau de mer représentant les apports de chlorures et de sodium amenés par les aérosols marins via les eaux de pluie. En l'absence de dépôts évaporitiques sur la zone d'étude, seule une origine anthropique des chlorures permet d'expliquer cet enrichissement par rapport au sodium. Les eaux du secteur de Vert-en-Drouais sont légèrement moins riches en chlorures et sodium que les eaux de Montreuil. Les eaux de la rivière Eure sont les plus riches en ces deux éléments.

Sur le diagramme sulfates versus chlorures (Figure 41), tous les points sont enrichis en sulfates par rapport à la droite de dilution de l'eau de mer. La présence de sulfates dans les lithologies locales n'est pas documentée mais reste possible sous la forme de minéraux évaporitiques (gypse, anhydrite) au sein des formations carbonatées. Cependant il est également possible, comme pour les chlorures, que les sulfates proviennent du lessivage d'engrais amendés sur les surfaces agricoles.

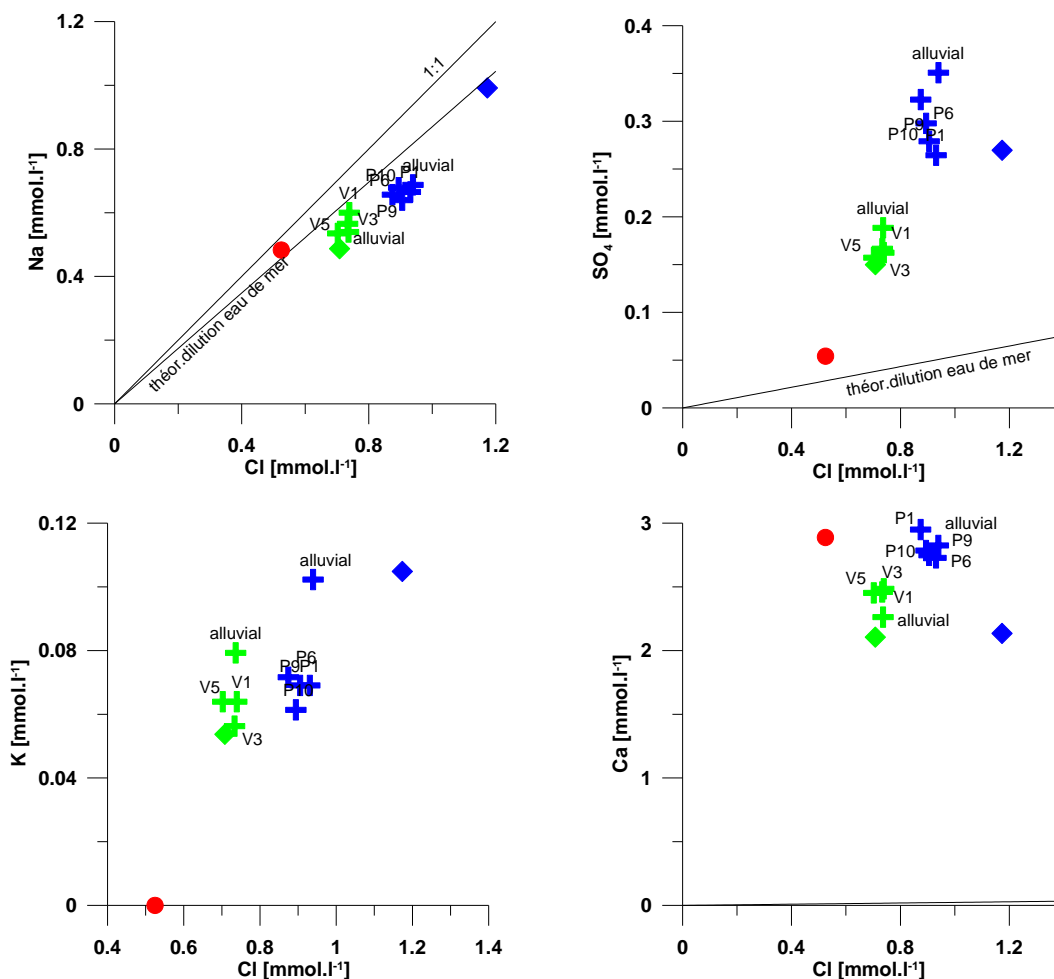


Figure 41: Na vs. Cl (a), SO_4 vs. Cl (b), K vs. Cl (c) et Ca vs. Cl (d) pour les eaux de rivières et les eaux souterraines (craie et alluvial) prélevées sur la zone d'étude en mars 2009 (en bleu points dans le bassin versant de l'Eure, en vert points dans le bassin versant de l'Avre)

De manière générale, les eaux de l'Eure et de l'aquifère de la craie présentent des concentrations élémentaires contrastées. Les eaux souterraines exploitées sur le champ captant de Vert-en-Drouais ont une composition chimique très proche de celle de l'aquifère alluvial et des eaux de la rivière Avre. Cette similitude hydrochimique s'explique par une origine souterraine dominante pour les eaux de l'Avre (cf. § 3.3). Les eaux du champ captant de Montreuil sont chimiquement différentes des eaux de la rivière Eure et de son aquifère alluvial.

4.2.3. Rapports élémentaires

Pour une même lithologie, en fonction du temps de transit qui conditionne le temps d'interaction eau-roche, du volume d'eau au contact des roches, et de l'évaporation éventuelle, un effet dilution-concentration peut aboutir à des compositions chimiques

très différentes. Afin de s'affranchir de ces effets, de nombreux auteurs proposent de normaliser les différents éléments chimiques par rapport au sodium (Négré et al., 1993 ; Gaillardet et al., 1997 et 1999). Ainsi sur un diagramme binaire, la droite de dilution correspondant à une lithologie donnée se rapporte à un point. Le sodium, couramment utilisé comme élément de référence, provient essentiellement de la dissolution d'aluminosilicates sodiques et avec un degré moindre de la dissolution d'évaporites. Le ratio Mg/Na est reporté en fonction du ratio Ca/Na sur la Figure 42. Sur un tel diagramme, le mélange entre 2 pôles source d'éléments dissous est représenté par une droite car le même élément (Na) est utilisé pour la normalisation. Sur la base d'une compilation des compositions disponibles dans la littérature pour 60 des plus grandes rivières mondiales, Gaillardet et al. (1999) attribue les rapports molaires moyens suivant : $Ca/Na=0,35\pm 0,15$, $Mg/Na=0,24\pm 0,12$ pour le pôle correspondant à l'altération des roches silicatées et $Ca/Na=50$, $Mg/Na=10$ pour le pôle correspondant à l'altération des roches carbonatées. Sur la Figure 42, les points du champ captant de Montreuil et de Vert-en-Drouais sont proches. Seuls les eaux des aquifères alluviaux diffèrent le long de l'axe Mg/Na. Cette répartition des points est donc compatible avec un mélange d'éléments dissous provenant de ces 2 pôles. Les eaux de la craie ont logiquement un rapport Ca/Na plus élevé. La rivière Avre est alimentée en amont principalement par les eaux souterraines de la craie, ce qui explique la forte similitude entre la chimie des eaux de surface et celle des eaux souterraines à Vert-en-Drouais. L'Eure recevrait en partie une eau circulant sur des horizons lithologiques différents de ceux captés à Montreuil.

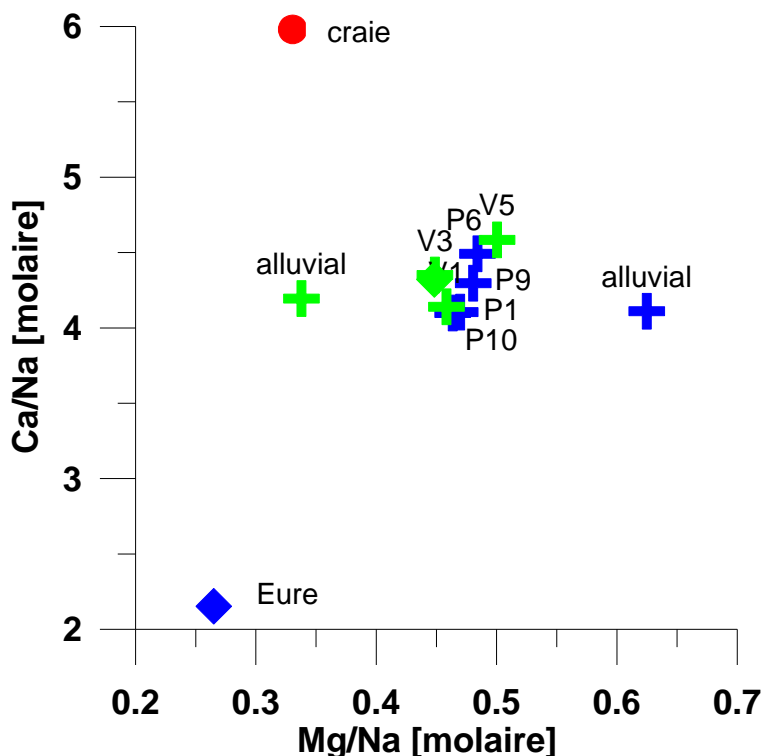


Figure 42 : Ca/Na vs. Mg/Na pour les eaux de rivières et les eaux souterraines (craie et alluvions) prélevées sur la zone d'étude en mars 2009

4.2.4. Approche isotopique

Les compositions isotopiques $\delta^2\text{H}$ et $\delta^{18}\text{O}$ des eaux prélevées lors de la campagne de prélèvement de mars 2009, sont comprises dans la gamme -47,7 à -45,2‰ et -7,2 à -6,9‰ respectivement. Considérant que l'incertitude sur la mesure est de 0,8‰ pour $\delta^2\text{H}$ et 0,1‰ pour le $\delta^{18}\text{O}$, les valeurs mesurées ne présentent pas de différences significatives. Ceci est dû au fait que les eaux de l'aquifère de la craie, l'aquifère alluvial et les rivières ont une origine similaire du point de vue altitude et période moyenne de recharge. Sur le diagramme représentant $\delta^2\text{H}$ vs. $\delta^{18}\text{O}$ (Figure 43), la majorité des points se répartissent suivant la droite météorique locale (LMMWL) pour les précipitations collectées à Orléans (IAEA/WMO, 2005). Ceci traduit une origine majoritairement météorique pour ces eaux en l'absence d'évaporation significative. Les valeurs de l'Avre et de l'aquifère alluvial sont systématiquement légèrement plus positives que les valeurs de Vert-en-Drouais du fait d'une variation saisonnière faiblement marquée. En effet les eaux de pluie varient en composition isotopique durant l'année le long de la ligne météorique locale (LML).

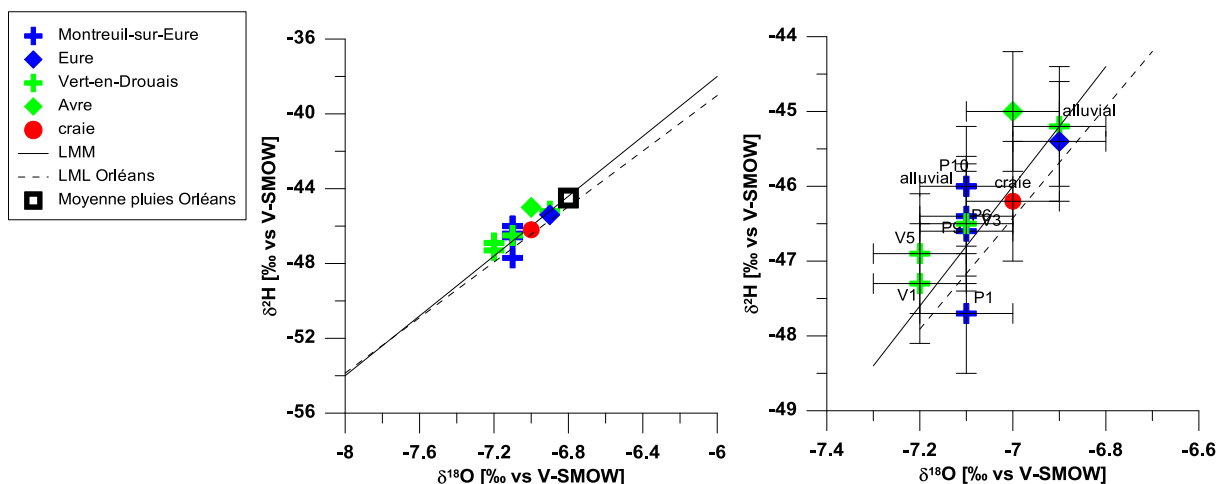


Figure 43 : $\delta^2\text{H}$ vs. $\delta^{18}\text{O}$ ‰ vs VSMOW et ligne météorique régionale à Orléans et zoom sur les données du site d'étude

Du fait de cette très faible variabilité, les isotopes stables de l'eau ne sont pas un outil adapté à la détermination des apports des rivières et eaux de l'alluvial au niveau des captages de Vert-en-Drouais et Montreuil.

4.2.5. Datation des eaux

Les résultats bruts des concentrations en CFC dans les eaux indiquent une très forte contamination pour tous les gaz. Cette contamination est sans doute due à une ou des activités industrielles locales entraînant le relargage dans l'air de quantités importantes de ces gaz. De ce fait les concentrations en CFC dans l'air sont supérieures aux concentrations atmosphériques actuelles mesurées à des stations de références (la plus proche étant en Irlande, Mace Head). Ces rejets forts de CFC rendent la méthode de datation par mesure des gaz dissous inopérante sur le secteur d'étude. Ceci

concerne les eaux qui présentent une composante de recharge actuelle comme l'aquifère alluvial ou les forages d'exploitation. On constate que les eaux de l'aquifère de la craie sont peu affectées par ce problème de contamination du fait de l'absence d'apports d'eau récente (1960-2009) contaminée par les rejets de CFC. En appliquant un modèle de recharge de type piston on obtient pour cette eau au point Luat-Clairnet un âge moyen de la recharge de 1972.

Un autre échantillon des eaux du puits 9 de Montreuil a été prélevé le 20 octobre 2009 pour l'analyse du SF₆. La concentration en gaz mesurée indique également une concentration supérieure à la concentration de l'atmosphère non contaminée mesurée à Mace Head (Irlande).

4.3. SELECTION DES OUTILS ET DES POINTS D'ECHANTILLONNAGES

La campagne d'échantillonnage de mars 2009 avait comme but de faire un premier état des lieux de la qualité eaux et de la variabilités des paramètres chimiques et isotopiques afin de sélectionner les outils qui permettraient de pouvoir évaluer la contribution respective des eaux de surface, des eaux de la nappe alluviale et des eaux de la nappe de la craie aux débits des forages des deux champs captant de Eau de Paris. Malheureusement il est montré que ni les éléments majeurs dissous, ni les isotopes stables de la molécule d'eau ni les concentrations en gaz dissous ne peuvent être utilisés dans le cadre de cette étude. D'autres outils ont donc été testés sur un nombre restreint de forages. Seuls des forages de Montreuil ont été sélectionnés en fonction des résultats des analyses physico-chimiques (plus de variabilité que sur Vert-en-Drouais). Les températures des eaux aux points P6 et P9 sont les plus contrastées. Ces deux points ont été choisis en plus de la rivière Eure pour des prélèvements et analyses complémentaires.

4.3.1. Isotopes du strontium

Les compositions isotopiques mesurées lors de la campagne de prélèvements de mai 2009 présentent une variabilité non significative entre les 2 eaux des captages P6 et P9. Les valeurs de la rivière Eure sont par contre significativement différentes. Ces gammes de composition isotopique sont légèrement plus élevées que la gamme attendue pour les alluvions majoritairement carbonatées d'âge jurassique ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0,7067$ à $0,7078$) et pour la craie d'âge crétacé ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0,7072$ à $0,7080$) (Koepnick et al., 1985, 1990). Par ailleurs les valeurs mesurées pour l'aquifère de la craie dans la Somme (Négrelet et Petelet-Giraud, 2005) sont également inférieures aux valeurs du rapport isotopique des eaux aux captages de Montreuil et reportées sur la Figure 44.

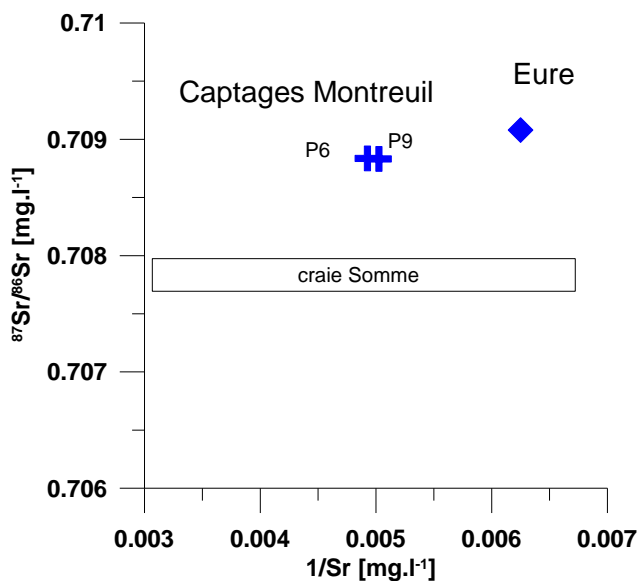


Figure 44 : $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ vs. $1/\text{Sr}$ pour les eaux collectées en mai 2009

Dans le contexte de l'étude, cet outil pourrait donc être utilisé mais il est nécessaire de mieux connaître le contexte et les pôles possibles de mélange d'eau au niveau du champ captant.

4.3.2. Terres rares

Les terres rares pouvant être de bons indicateurs de processus et d'origine (Rabiet et al., 2005), ils ont été analysés sur les eaux échantillonnées le 14 août 2009 aux puits 6 et 9 de Montreuil et sur les eaux de la rivière Eure.

Le profil des éléments dont la concentration a été normalisée par rapport à un matériau géologique de référence (NASC) indique un fort contraste entre les eaux souterraines et les eaux de surface (Figure 45).

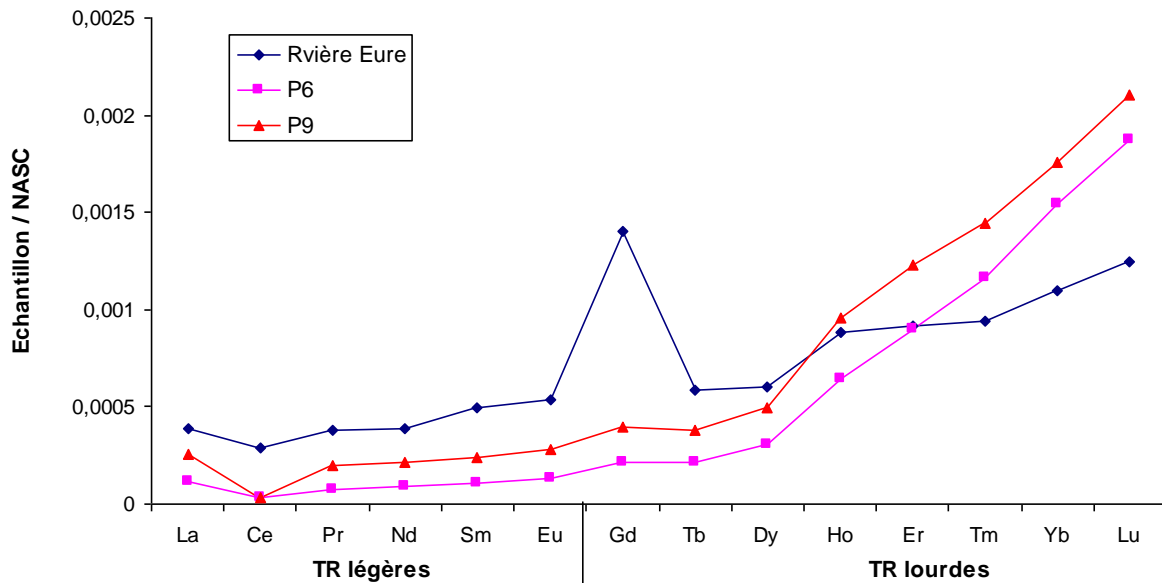


Figure 45 : Profil des terres rares normalisées pour les points prélevés sur le secteur de Montreuil

On note pour toutes les eaux un enrichissement en terres rares les plus lourdes qui se traduit par un rapport Lu/La (normalisés) de 15 pour les eaux au P6. Cet enrichissement est commun pour les eaux souterraines car les TR lourdes sont préférentiellement mises en solution lors du lessivage de roches mères. Pour la rivière Eure il existe un fort enrichissement en gadolinium. Pour cet élément on peut définir l'anomalie en gadolinium (Gd^*) qui correspond une normalisation de cet élément par

rapport aux deux éléments voisins selon la formule : $Gd^* = \frac{Gd_n}{0,33 * Sm_n + 0,67 * Tb_n}$ (ou

n indique la normalisation de l'élément considéré). Une « anomalie » en Gd traduit un apport anthropique de cet élément. La source la plus importante de Gd dans les eaux de surface et souterraines est l'acide gadopentétique et autres sels de gadolinium qui sont utilisés pour les diagnostics médicaux comme agent de contraste en IRM (Bau et Dulski, 1996). Les rejets à l'environnement par les patients traités se font donc par les effluents de STEP ou systèmes d'assainissement individuels. L'anomalie en gadolinium est un bon indicateur des eaux usées.

Les eaux de la rivière Eure sont donc impactées par des rejets d'eau usées.

Si l'on calcule le gadolinium d'origine anthropique suivant la formule

$Gd_{anthropique} = Gd_n - \frac{Gd_n}{Gd^*}$ on peut estimer un apport d'eau de surface au P9 inférieur à

1%. Toutefois il faut considérer que cet échange rivière-nappe est lent et que le gadolinium est stable dans le milieu un temps limité (au moins 6 mois) et peut subir des transformations notamment en présence de matière organique. Ce n'est donc pas

un élément conservatif. L'anomalie en gadolinium n'est pas, dans ce cas d'étude, un bon traceur de l'influence des eaux de surface.

4.3.3. Eléments traces

Lors de la campagne d'octobre 2009 les eaux aux points P6, P9 et de la rivière Eure ont été collectées pour une analyse chimique plus complète incluant nombre d'éléments traces (Ag, Al, As, B, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, F, Fe, Li, Ni, Pb, Sr et Zn) afin d'évaluer la possibilité d'un traceur chimique des interactions eaux de surface-eaux souterraines.

Les éléments Ag, Be, Cd, Co, Cr, Fe et Ni sont proches ou inférieurs à la limite de détection (variable selon les éléments de 0,01 à 1 $\mu\text{g.l}^{-1}$).

Les éléments traces comme les éléments majeurs indiquent une plus forte influence des eaux de l'Eure sur les eaux souterraines au forage 9 (Figure 46). Les meilleurs indicateurs sont le bore, le baryum, le calcium, les chlorures, le nitrate et les bicarbonates.

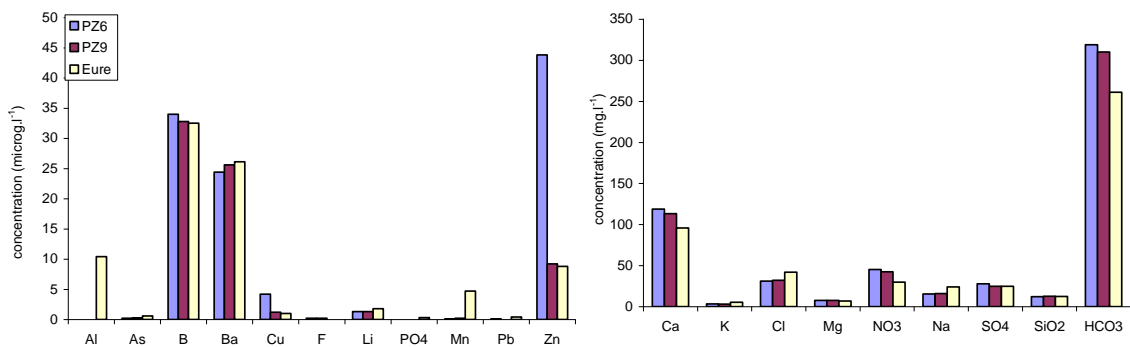


Figure 46 : Résultats des analyses des éléments majeurs et traces des eaux prélevées aux forages 6 et 9 et dans l'Eure à Montreuil en octobre 2009

4.3.4. Variations des paramètres in-situ

Lors de chaque campagne de prélèvement les mesures in situ, température, conductivité, pH et O₂ dissous sont mesurés aux trois points de prélèvement P6, P9 et Eure. On constate pour la température et la conductivité des variations de comportement (Figure 47). Une forte variation annuelle de la température des eaux souterraines (2,8°C au niveau du P9 en 8 mois et 2°C pour P6) indiquerait une influence (plus importante au niveau du P9) des eaux de surface au niveau des champs captants. Il n'existe pas de chroniques de température de l'eau disponible à un pas de temps mensuel (ou bimestriel) pour l'aquifère de la craie qui permettrait de confirmer que les variations de température au niveau de Montreuil ou Vert-en-Drouais

sont dues à un pompage, en partie, d'eau relativement superficielle (aquifère alluvial ou rivière).

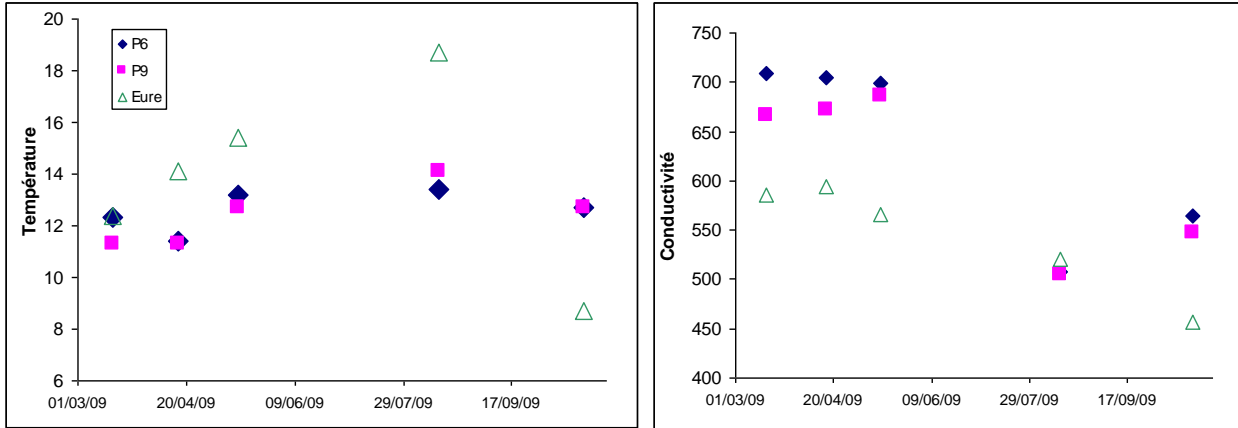


Figure 47 : Variations de température et conductivité aux points P9, P6 et rivière Eure sur la période mars – octobre 2009

Les données existantes (Eau de Paris) confirment une importante amplitude annuelle des variations de température à Montreuil et Vert-en-Drouais avec un maximum fin août - début septembre et un minimum autour de février. Les variations de conductivité ne suivent pas ce modèle mais montrent des variations non saisonnières.

Un suivi plus dense (1 à 6 jours) de la température a été effectué à partir du 6 janvier 2010 par Eau-de-Paris sur les points 6, 9 et la rivière Eure (Figure 48).

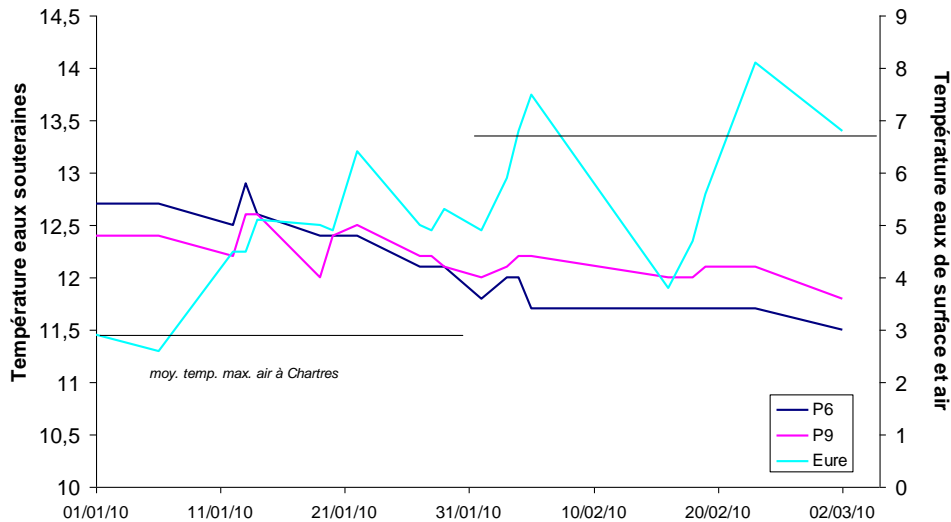


Figure 48 : suivi de la température aux forages 6 et 9 de Montreuil et la rivière Eure de janvier à mars 2010 et moyenne des température maximales de l'air à Chartres en janvier et février 2010

La période d'observation est courte mais il apparaît que les eaux au forage P6 sont faiblement influencées par les changements de température de la rivière Eure (et/ou de l'atmosphère). Un suivi sur une plus longue période serait toutefois nécessaire pour valider l'utilisation de paramètres simples comme la température ou la conductivité pour comprendre sans ambiguïté les relations nappes-rivières.

4.4. RESULTATS DE LA CAMPAGNE DE PRELEVEMENTS DE NOVEMBRE 2009

4.4.1. Traitement des données existantes

Vue la nécessité d'étendre la zone d'étude pour mieux estimer les apports d'eau souterraine qui pourraient influencer la chimie des eaux aux deux champs captants la deuxième campagne de prélèvements programmée en novembre a intégré des points autres que les points mesurés en mars 2009. Afin de choisir ces points un traitement des données locales existantes a été réalisé à partir des informations collectées dans la base de données nationale des eaux souterraines, ADES (www.ades.eaufrance.fr). Les données les plus récentes (2004, 2005, 2006, 2007 ou 2008) disponibles ont été rassemblées et traitées afin de conserver les données des mois de janvier à mai représentant une période hydrologique unique. Un traitement similaire a été réalisé pour les données d'août à novembre. Moins de points de mesure sont disponibles pour cette période et les résultats étant similaires, les eaux de la période hivernale sont traitées ici.

Un regroupement des points de mesure a été réalisé à partir de secteurs délimités par les cours d'eau principaux (Figure 49) du secteur d'étude et la spécificité de la craie (craie argileuse du Turonien dans le sud du secteur et au nord-est craie du Campanien/sénonien). Ces secteurs sont :

- Secteur nord de la craie du Sénonien
- Vallée de l'Avre
- entre Avre et Blaise / craie du Turonien (2)
- Entre Blaise et Eure / craie du Turonien (3)
- Rive droite de l'Eure (4)

Champs captants de Montreuil et Vert-en-Drouais (28)
 délimitation des bassins d'alimentation de captages et des zones vulnérables

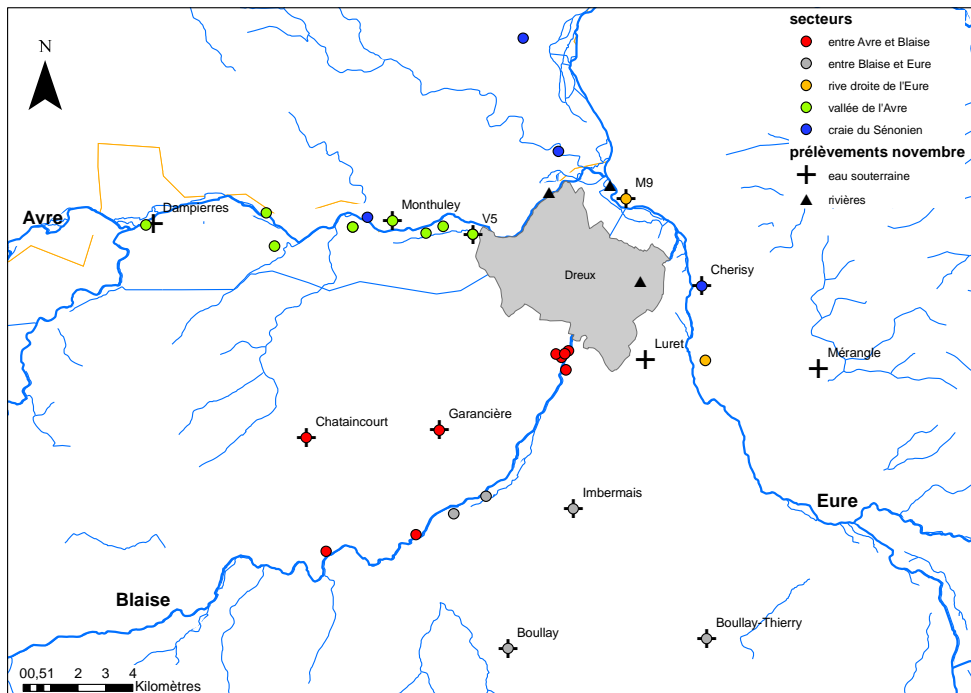


Figure 49 : Localisation des points retenus pour l'étude régionale de la chimie des eaux souterraines et de la campagne de novembre 2009

On retrouve sur le secteur des eaux de type Ca-Mg-HCO_3 . La chimie des eaux ne semble se distinguer que sur quelques points captant la craie du Sénonien (Figure 50).

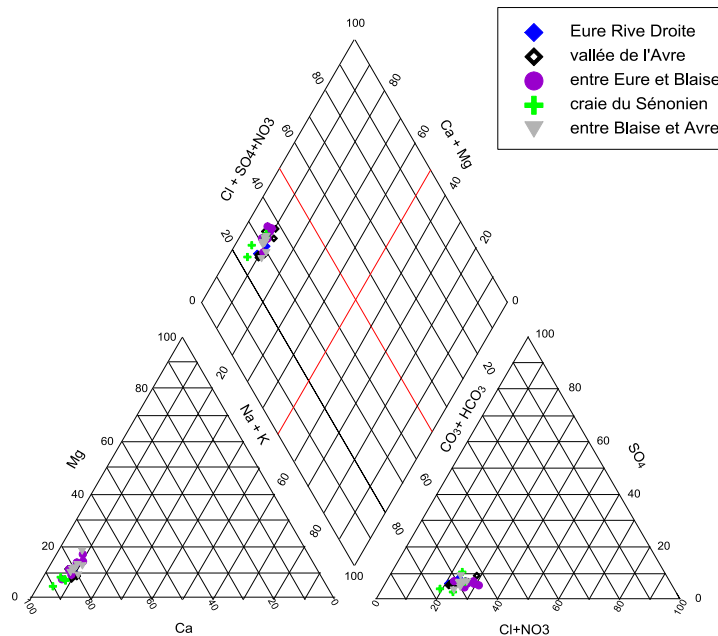


Figure 50 : Diagramme de Piper pour les données extraites de ADES sur la période janvier-mai de 2004 à 2008 ainsi que V5 et P9 d'avril 2009

Sur les diagrammes binaires (Figure 51) les eaux captant la craie du Sénonien se détachent chimiquement des eaux des autres points d'eau localisés au cœur de la zone d'étude avec des concentrations en calcium et bicarbonates plus élevées et proportionnellement de plus faibles concentrations en magnésium. Les eaux de la vallée de l'Avre, à l'exception d'un point situé en amont le long de la rivière à Dampierres-sur-Avre, sont relativement homogènes. Aucun élément ne permet de distinguer les eaux de la craie du Turonien entre Eure et Blaise et entre Blaise et Avre. Ces eaux présentent cependant une certaine hétérogénéité chimique. Certains points d'eau présentent un net enrichissement en potassium, sulfate et nitrate, dû à des apports anthropique de type engrais. Excepté cinq prélèvements de la vallée de l'Avre (dont le forage 5 de Vert-en-Drouais), les points d'eau du secteur présentent une concentration en nitrate supérieure à 40 mg.l⁻¹.

Champs captants de Montreuil et Vert-en-Drouais (28)
 délimitation des bassins d'alimentation de captages et des zones vulnérables

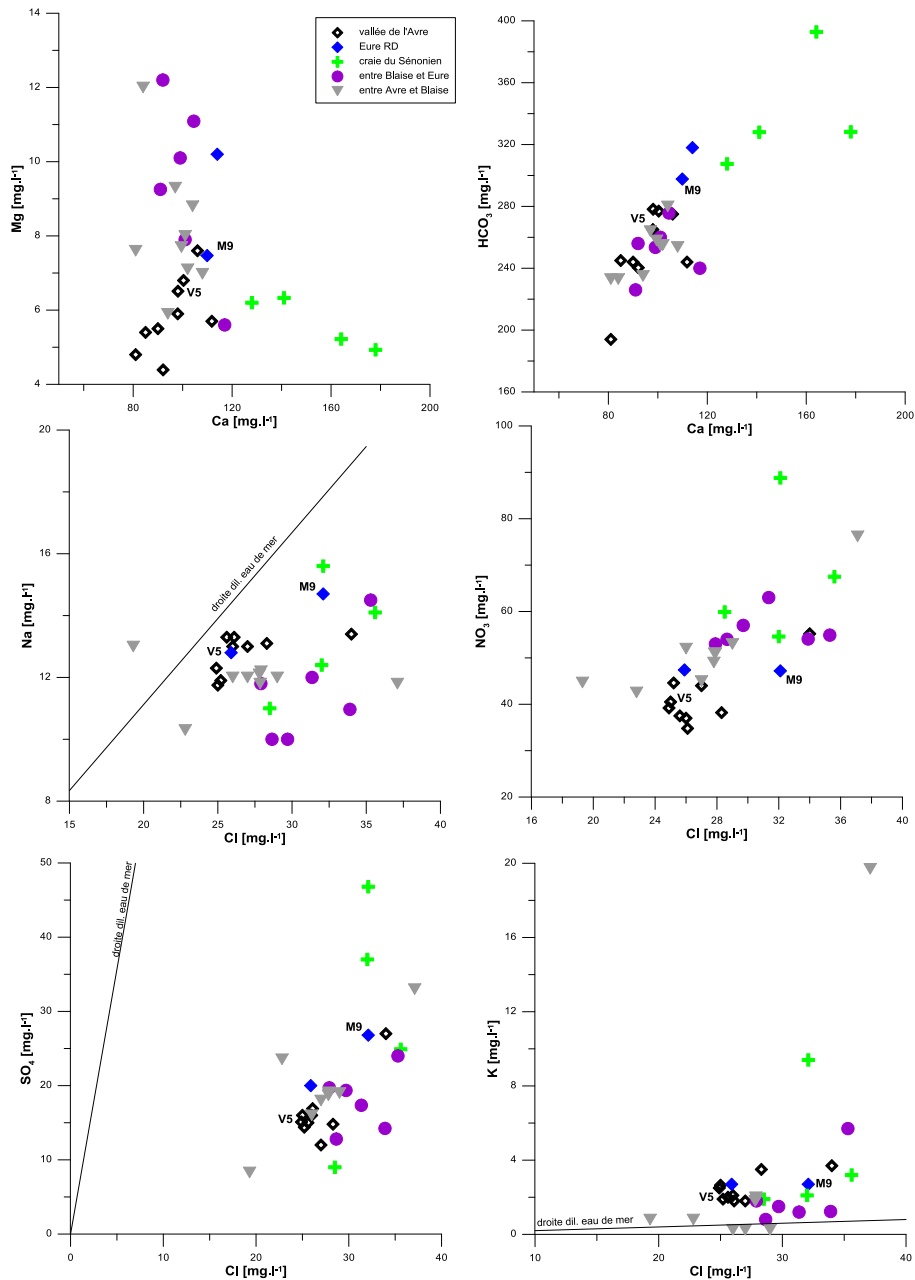


Figure 51 : Diagrammes binaires pour les eaux extraites de la base ADES prélevées entre janvier et mai sur la période 2004-2008

4.4.2. Approche statistique

Une analyse factorielle discriminante a été effectuée en utilisant comme variable qualitative les secteurs discutés et en prenant en compte 8 paramètres (Ca, Mg, K, Na, HCO₃, NO₃, SiO₂, Cl, SO₄) et 27 points d'observations. Les points désignés a priori appartenant à un secteur sont tous considérés statistiquement a posteriori dans leur

secteur respectif sauf le point 02167X0031/PF sur la Blaise et proche de Dreux. Sur le diagramme des observations et des variables (Figure 52) on note que les eaux de la craie du Sénonien sont caractérisées par leurs concentrations en calcium et bicarbonates. Les eaux de la craie du Turonien (entre Blaise et Eure et Blaise et Avre) sont plus riches en magnésium. Les eaux captant les aquifères de la craie (Sénonien et Turonien) présentent de fortes concentrations en nitrates. Les eaux de la vallée de l'Avre drainent, en plus des eaux de l'aquifère de la craie, des eaux plus faiblement impactées par les apports anthropiques (eaux de surface).

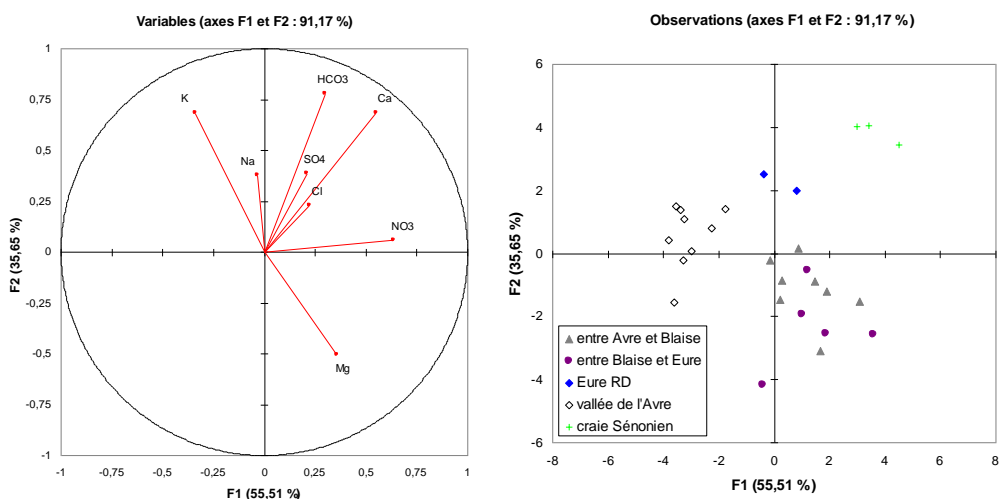


Figure 52 : Résultats de l'AFD : diagramme des variables et des observations

4.4.3. Sélection des points de prélèvements

Les résultats de l'étude des données régionales existantes a permis de mieux sélectionner les points de la campagne de novembre 2009. Le choix des points a été arrêté de manière à représenter chacun des secteurs délimités auparavant (voir chapitre ci-dessus). A ces points d'eau souterraine de chacun des secteurs ont été ajoutés les points M9 et V5 des deux champs captants, les trois rivières, l'Eure, la Blaise et l'Avre et le point représentant l'aquifère alluvial du secteur de Vert-en-Drouais, Monthulé (celui de Montreuil prélevé en mars 2009 n'est plus utilisable). Au total, 14 points d'eau ont été échantillonnés (Figure 53).

Rivière : Eure à Montreuil, Avre à Muzy, Blaise à Fermaincourt

Secteur vallée de l'Avre : Forage 5 de Vert-en-Drouais (02163X0045/P5AEP), Dampierres-sur-Avre (02161X0008/P) et puits de Monthulé (02163X2005/P – alluvial)

Secteur entre Avre et Blaise : Chataincourt (02162X0018), Garancière-en-Drouais (02163X0027/FAEP)

Secteur entre Blaise et Eure : Boullay –Thierry (02168X0002/FAEP), Le Boullay-les-deux-Eglises (02167X0003/PF) et Imbermais (02168X0007)

Secteur Eure Rive Droite : forage 9 de Montreuil (02164X0100/P9AEP)

Secteur craie du Sénonien : Mérangle (sans BSS), Chérisy (02164X0024)

Les mesures de T, C, Eh, O₂, pH et les prélèvements pour l'analyse des éléments majeurs dissous et du strontium ont été réalisées les 12 et 13 novembre. A partir des résultats obtenus une sélection sera effectuée pour l'analyse du rapport isotopique ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr sur quelques eaux collectées en novembre 2009. Les analyses de la chimie des eaux ont été effectuées par Eau de Paris, et les concentrations en strontium et ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr par le BRGM.

Afin de compléter l'information sur la chimie des eaux de la craie du Sénonien (Campanien) les données du forage de Luat-Claret captant uniquement l'aquifère de la craie au sud de la zone d'étude ont été repris de la campagne de mars 2009 et une analyse complémentaire ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr a été réalisée.

Les données *in situ* révèlent deux points à forte conductivité (1178 et 2000 μS.cm⁻¹). Ces valeurs sont exceptionnelles pour la région. Les eaux collectées à Dampierres-sur-Avre sont de type chloruré calcique et sodique peu représentatives des eaux du bassin hydrogéologique de l'Avre (et très différentes du point 02161X0001/PAEP de Dampierres-sur-Avre également utilisé pour le traitement des données régionales).

Les eaux souterraines et de surface ont un faciès chimique nettement de type bicarbonaté calcique. Sur le diagramme de Piper (Figure 53) on observe que les eaux au point de Dampierres-sur-Avre sont de type chloruré calcique et sodique peu représentatives des eaux du bassin hydrogéologique de l'Avre. Les eaux de Chataincourt et Mérangle présentent une légère particularité chimique du fait de fortes concentrations en nitrate dans les eaux (>70 mg.l⁻¹).

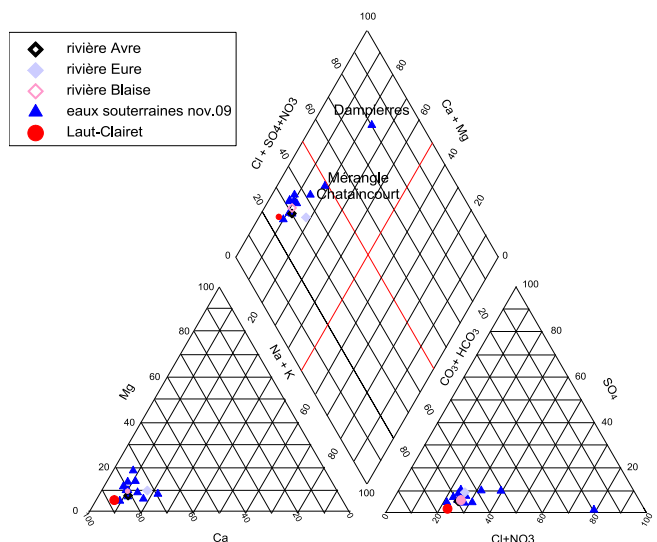


Figure 53 : Diagramme de Piper pour les eaux collectées en novembre 2009

Parmi les points échantillonnés en novembre 2009, cinq ont fait l'objet d'une analyse chimique en mars 2009 : les rivières Eure et Avre, le puits captant l'aquifère alluvial à Monthuley et les forages 5 de Vert-en-Drouais et 9 de Montreuil. Pour les eaux souterraines, les concentrations en éléments majeurs varient très peu d'une saison à l'autre (Figure 54) y compris pour les éléments où une variation est plus importante entre les deux époques pour les eaux de surface comme le calcium, le bicarbonate ou le sodium.

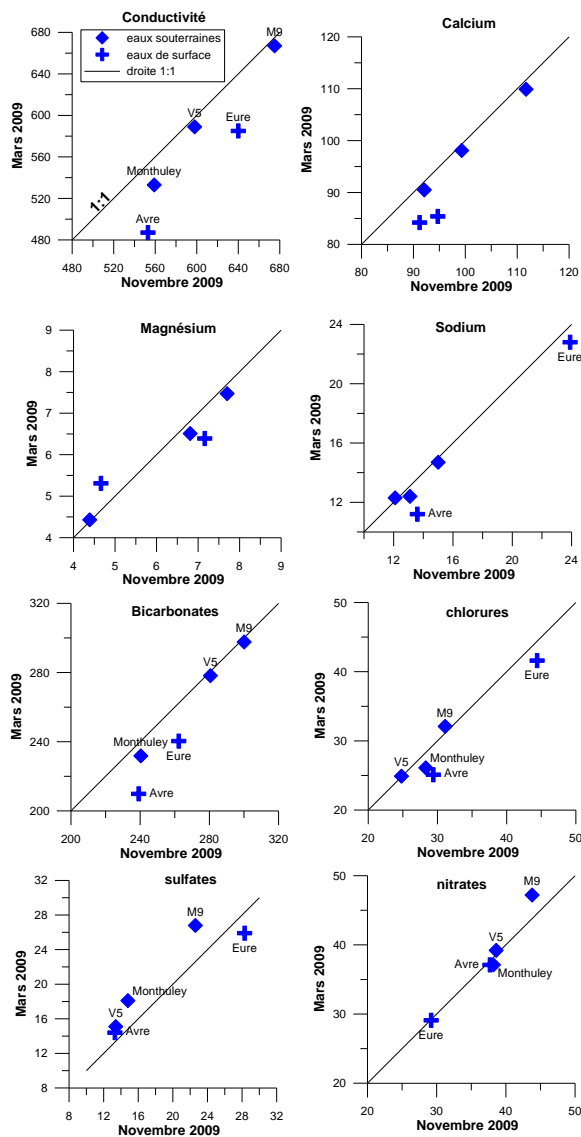


Figure 54 : Comparaison des concentrations en éléments majeurs et in situ pour les eaux collectées en mars et novembre 2009

Les diagrammes binaires (Figure 55) confirment les tendances observées : i) point de composition exceptionnel pour Dampierres-sur-Avre (non repris dans les graphiques d, e et f), ii) concentrations élevées en Ca, HCO₃, SO₄, K, Cl, NO₃ pour Méréglise, iii)

point de Chérisy riche en bicarbonates, calcium et sulfate, iv) points de Monthuley et rivière Avre similaires chimiquement et v) aquifère de la craie à Luat-Clairét appauvri en sulfate et chlorures.

On observe, à l'exception de Dampierres-sur-Avre, une relation entre bicarbonate et calcium, classique pour des eaux circulant sur des formations carbonatées (craie principalement).

Les eaux du secteur entre Avre et Blaise et entre Blaise et Eure sont les plus riches en magnésium.

Environ à 100 km de la mer, la concentration en chlorures attendue pour les eaux de pluie est d'environ $70 \mu\text{mol.l}^{-1}$ (Meybeck 1986). Si l'on considère un facteur d'enrichissement d'environ 2 (bassin de la Somme, Négrel et Petelet, 2005) ceci représente une concentration dans les eaux souterraines de $140 \mu\text{mol.l}^{-1}$.

Les eaux souterraines et de surface prélevées en novembre 2009 montrent une variation de la concentration en chlorures de 660 à $1290 \mu\text{mol.l}^{-1}$ si l'on ne tient pas compte du point d'eau échantillonné à Dampierres-sur-Avre ($14240 \mu\text{mol.l}^{-1}$). Il semble donc que cet élément soit amené dans les eaux par les pluies mais également par la lithologie locale ou plus sûrement d'origine anthropique au vu des concentrations en nitrates dans les eaux. Ainsi la figure Na vs Cl indique un enrichissement systématique en chlorure sauf pour les eaux de l'Eure, Mérangle et de la craie (Luat-Clairét).

Les eaux sont également enrichies en sulfate par rapport à la droite théorique de mélange de l'eau de mer. Ces sulfates pourraient être d'origine anthropique (engrais) ou lithologique (formations évaporitiques). La relation NO_3 vs Cl fait ressortir le point de Mérangle riche en ces deux éléments d'origine animale ou chimique (engrais) probable et le point de la rivière Eure plus enrichie en chlorures ce qui confirmerait une origine eaux usées des produits azotés à ce point. Ceci a été montré précédemment avec l'utilisation des terres rares.

Champs captant de Montreuil et Vert-en-Drouais (28)
 délimitation des bassins d'alimentation de captages et des zones vulnérables

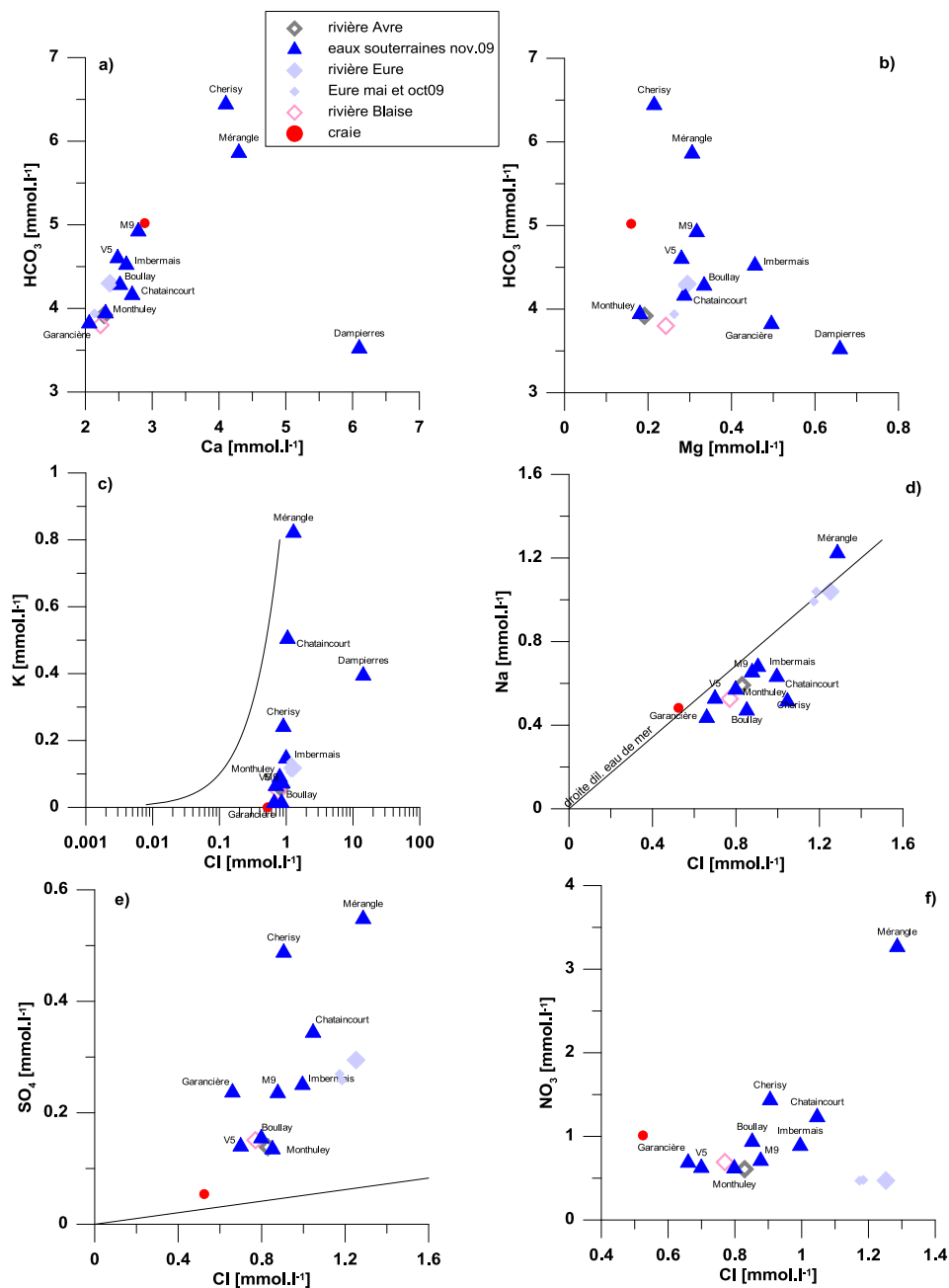


Figure 55 : Diagrammes binaires pour les eaux collectées en novembre 2009 et les eaux de la craie à Luat-Clairot (mars 2009)

Sur la Figure 56 on constate une bonne corrélation entre le calcium et le strontium indiquant les formations carbonatées comme origine principale pour ces éléments. La craie apporte principalement aux eaux des ions Ca, Sr et HCO₃. Pour le point de Mérange la corrélation NO₃ vs Sr s'expliquerait par une origine anthropique (engrais) d'une partie du strontium.

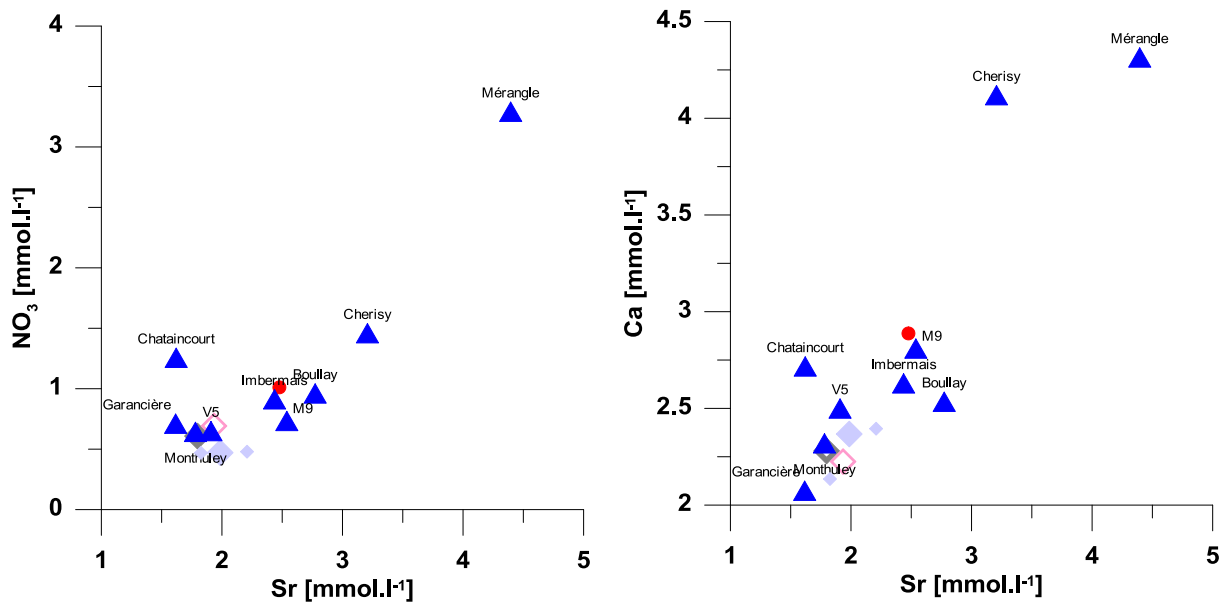


Figure 56 : NO₃ vs Sr et Ca vs Sr des eaux prélevées en novembre 2009

Divers rapports molaires permettent une interprétation plus fine des données obtenues. Pour ces diagrammes, le point de Dampierres-sur-Avre n'a pas été incorporé.

Sur le diagramme Mg/Na vs Ca/Na (Figure 57) sont reportés les données pour les domaines des roches carbonatées, silicatées et évaporitiques rencontrés dans la littérature.

Champs captant de Montreuil et Vert-en-Drouais (28)
 délimitation des bassins d'alimentation de captages et des zones vulnérables

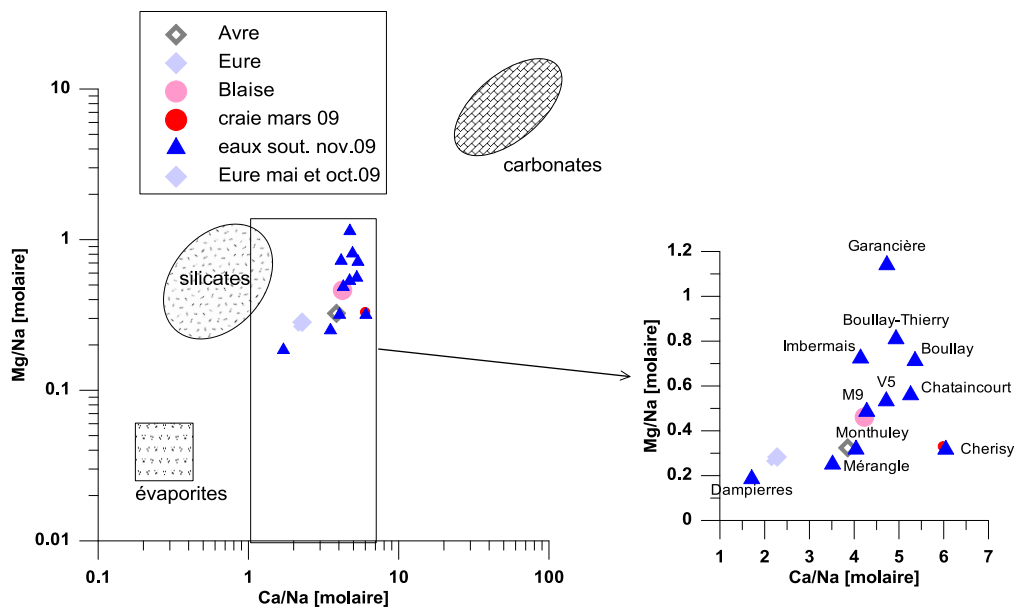


Figure 57 : Rapports molaires Mg/Na vs Ca/Na pour les eaux collectées en novembre 2009 et Luat-Clairet (mars 2009)

On note une évolution régulière des rapports NO_3/Na vs Cl/Na (Figure 58) sauf pour les eaux de la craie à Luat-Clairet, Mérange et Chérisy. Sur ces points un apport anthropique d'origine similaire est possible. Mérange et Chérisy les deux points de la craie en secteur rive droite de l'Eure et la craie à Luat-Clairet présentent une forte concentration en nitrate et plus faible en chlorures.

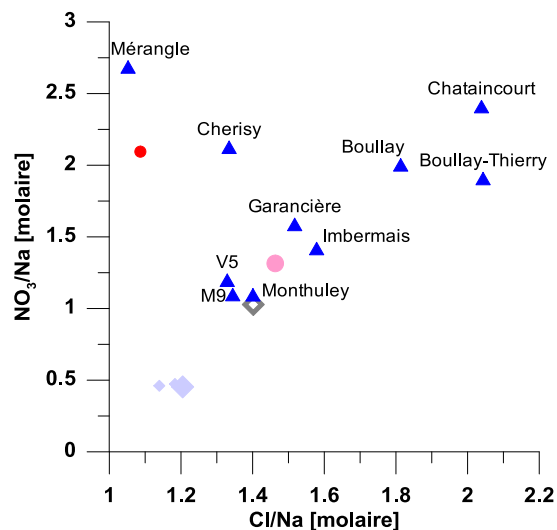


Figure 58 : Rapports molaires NO_3/Na vs Cl/Na pour les eaux collectées en novembre 2009 (et point rouge : Luat-Clairet, mars 2009)

Les rivières non polluées drainant des formations carbonatées montrent des rapports molaires Ca/Sr de 500 à 3500 et des rapports Mg/Sr de 25 à 150 (Meybeck, 1986). Par comparaison les valeurs générales des formations carbonatées (Négreil et al., 1993) sont de Ca/Sr 1500 ± 500 et Mg/Sr 750 ± 300 . Les eaux des bassins versants de l'Avre et de l'Eure montrent un rapport Mg/Sr légèrement plus élevé que ces eaux et celles de la craie du Sénonais et pays d'Othe (masse d'eau 3209) échantillonnées dans la plaine de la Bassée (Gourcy et al., 2007).

Sur le secteur d'étude on retrouve en rive droite de l'Eure la craie du Campanien supérieur (Sénonien) et en rive gauche une craie argileuse du Turonien.

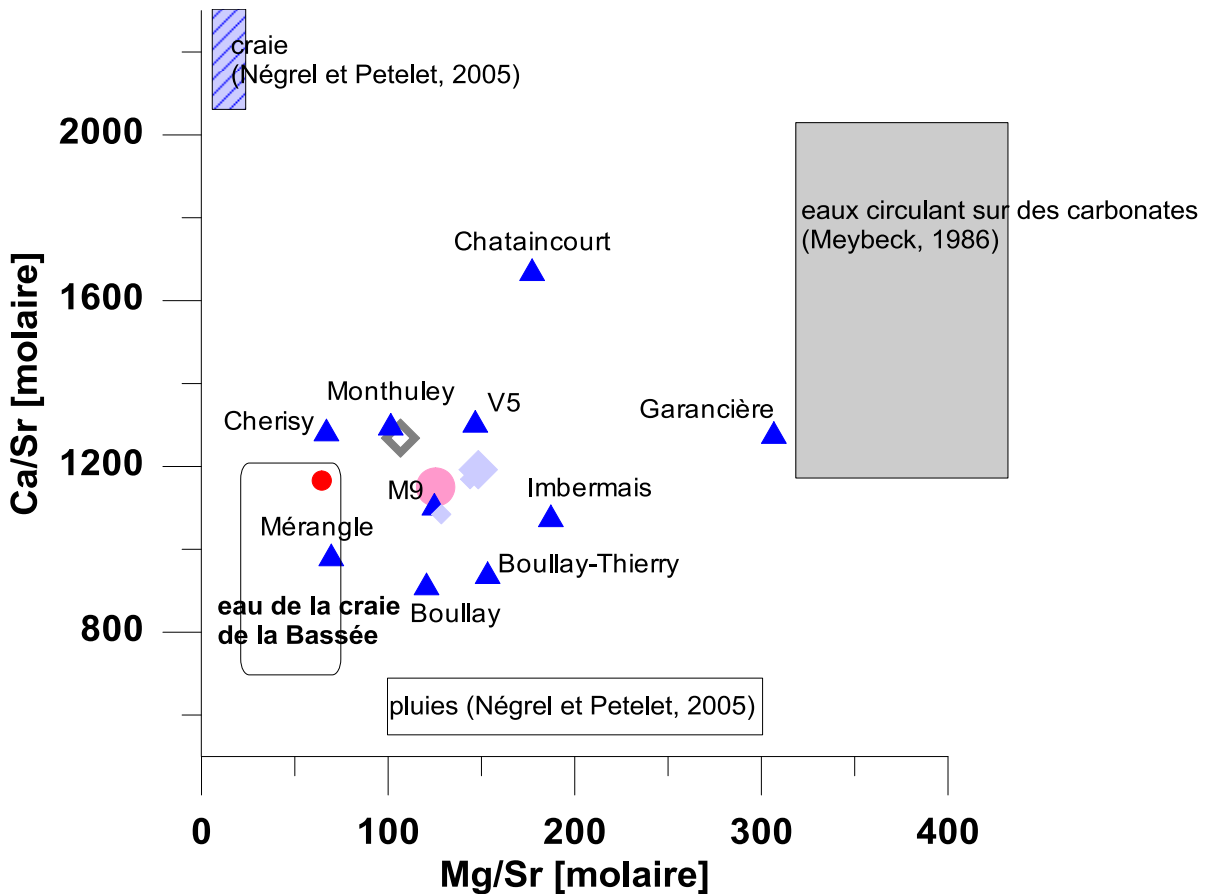


Figure 59 : Rapports molaires Ca/Sr vs Mg/Sr pour les eaux collectées en novembre 2009

La masse d'eau 3211 (craie altérée du Neubourg /Iton/Plaine de Saint André) est localement d'âge Turonien en rive gauche de l'Eure et du crétacé sup. (Campanien ou Sénonien) pour les points localisés en rive droite, Mérange et Chérisy. Le champ captant de Montreuil capte à la fois la craie du Sénonien et les alluvions.

Le rapport isotopique $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ pour les formations carbonatées du Crétacé supérieur varie de 0,7073 à 0,7078 (Koepnick et al., 1985). Ces valeurs correspondent aux données de la plaine de la Bassée. Les points d'eau du secteur de Montreuil

présentent un rapport isotopique plus élevé. Les variations du rapport isotopique dépendent de l'âge de la formation géologique sédimentaire et de sa lithologie. Ainsi la craie du Turonien et celle du Sénonien présentent sans doute une variation du rapport isotopique. La craie du Turonien est une craie argileuse. Les argiles sont des formations plus radiogéniques que les formations sédimentaires carbonatées et un $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ plus élevé est donc attendu pour les eaux captant la craie du Turonien à Luat-Clairet par rapport au point d'eau de Chérisy captant les formations du Campanien. Mérangle n'a pas été analysé du fait de l'impact anthropique fort à ce point d'eau. Des études antérieures indiquent des valeurs de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ des formations du crétacé supérieur du bassin de Paris dans la Somme allant de 0,7077 à 0,7081 (Négre et Petelet, 2005) et au niveau de Montreuil-sur-Epte (Brenot et al., 2009) un rapport isotopique variant de 0,70792 à 0,70850 pour les eaux de la craie sans influence anthropique et pour les eaux de la craie de la Bassée (sud-ouest de Paris) des valeurs de 0,7078 à 0,7086 (Gourcy et al., 2007). Les valeurs mesurées à Chérisy se rapprochent de celles mesurées dans l'aquifère de la craie dans la Somme (Négre et Petelet, 2005), ce qui confirmerait pour ce point une origine de craie non ou peu influencée par les formations plus superficielles (Figure 60). Le secteur rive droite de l'Eure est donc caractérisé par la composition isotopique des eaux au point de Chérisy.

Les eaux de la craie du secteur rive gauche de l'Eure, représentée par le point de Luat-Clairet sont isotopiquement différentes de celles du secteur est. Ce point représenterait les eaux de la craie du Turonien non influencées par les formations alluviales, colluvions ou eaux de surfaces.

Les pluies locales ont un rapport isotopique relativement variable (0,70846-0,70895) et une concentration en strontium faible (Négre et al., 2008).

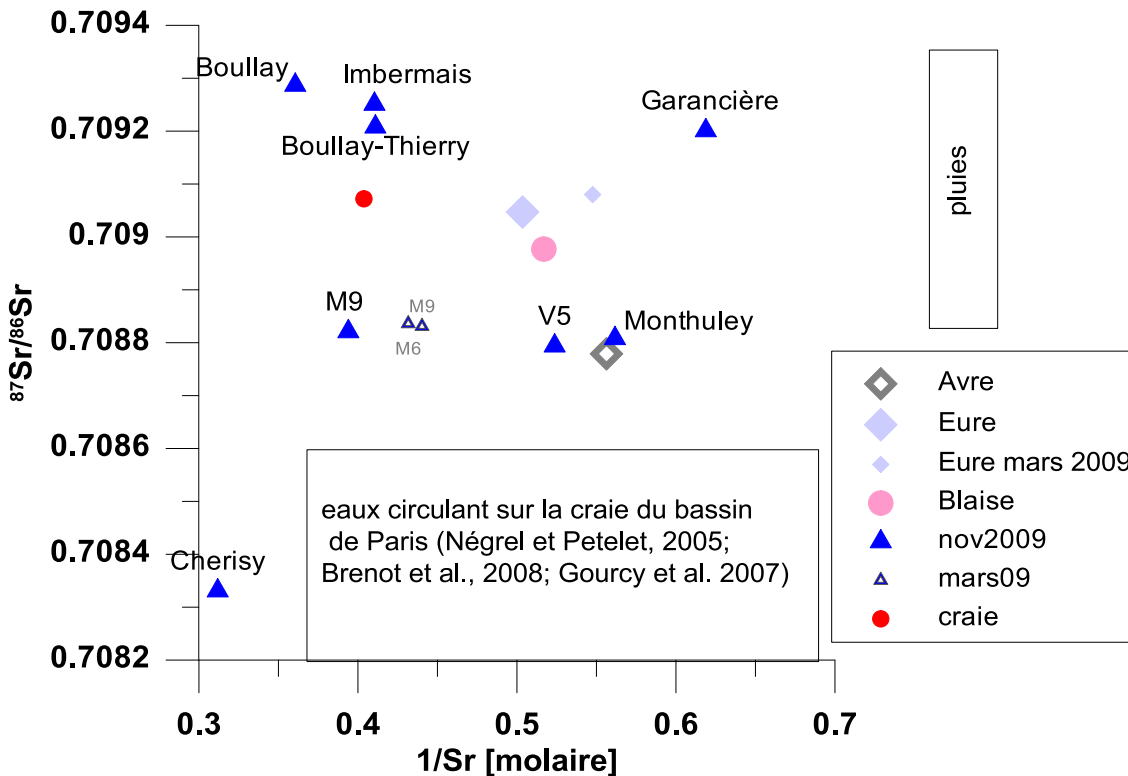


Figure 60 : $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ vs $1/\text{Sr}$ (molaire) pour les eaux collectées en novembre 2009 et références de la littérature pour les eaux circulant sur la craie du bassin de Paris

Deux prélèvements ont été réalisés sur le rivière Eure en mai et en novembre 2009. Les rapports isotopiques à ces deux périodes sont très similaires ($0,70908 \pm 7.10^{-6}$ et $0,709047 \pm 6.10^{-6}$).

Les eaux de l'Avre, de Monthuley (alluvial de l'Avre) et de Vert-en-Drouais forage 5 sont de composition chimique et isotopique similaire indiquant une même origine de l'eau à ces points. Rien n'indique donc une influence des eaux de l'aquifère local de la craie. Les eaux de l'Avre sont rechargées en amont par l'aquifère de la craie de composition isotopique peut-être différente de la craie de Luat-Clairêt. Ainsi les eaux de la craie amont et de la rivière Avre sont les mêmes hors période de ruissellement. Ceci est montré par ailleurs dans ce rapport à l'aide des relevés piézométriques ou de la modélisation globale.

Le forage de Montreuil est de composition isotopique similaire à celle des eaux de Vert-en-Drouais mais de concentration en strontium légèrement plus forte. Les eaux de la rivière Eure sont de rapport isotopique plus élevé, proche de celui de la rivière Blaise. Une hypothèse est que les eaux du forage 9 (et 6 analysé en mai 2009) soient influencées par les eaux de surface et par les eaux de la craie du Sénonien de composition chimique différente de celle du Turonien. En considérant cette hypothèse un calcul de proportion de mélange au niveau du forage 9 de Montreuil indique 22% d'eau provenant de la nappe de la craie et 78% eau provenant de l'Eure et de sa nappe alluviale en mai et novembre 2009. La proportion de mélange de semble pas

varier sur l'année. Cette proportion de mélange donnerait une concentration en nitrate dans les eaux du champ captant de Montreuil au niveau du forage 9 de 42 à 43 mg.l⁻¹ pour les périodes où ces concentrations ont été mesurées dans la rivière Eure (mai, octobre et novembre 2009). Le nitrate est d'apport anthropique et ne subit pas de processus de dissolution/précipitation /adsorption/désorption qui pourrait changer sa concentration au sein des aquifères comme c'est le cas pour les autres éléments majeurs comme le Ca, HCO₃, Mg, Na... Une dénitrification pourrait changer les concentrations de NO₃ par transformation de cet élément en gaz N₂ mais les conditions physico-chimiques locales (milieu oxydant) ne semblent pas favorables à ce processus.

Ces valeurs sont en accord avec les calculs effectués à l'aide du modèle spatial (chapitre 5). Au sein de la craie la zone alimentant en partie les captages de Montreuil serait localisée en rive droite de l'Eure, ce qui correspond à la région délimitée par le modèle MARTHE.

Les trois points d'eau ayant les rapports isotopiques les plus élevés sont situés dans le même secteur, entre l'Eure et la Blaise que le point de Luat-Clairêt. Boulley les 2 Eglises et Boulley-Thierry captent également les niveaux du Turonien composés de craie argileuse. La chimie de ces eaux est également similaire.

Garancière, le seul point du secteur compris entre la Blaise et l'Avre (Sr et isotopes du Sr n'ont pas été mesurés à Chataincourt) présente un rapport isotopique proche de celui des points du secteur entre Eure et Blaise.

4.4.4. Résumé des informations obtenues par les outils géochimiques

a) Secteur de Vert-en-Drouais

Le secteur de Vert-en-Drouais est chimiquement très homogène et l'absence de différenciation entre les eaux de surface (Avre) les eaux de l'aquifère alluvial et les eaux souterraines captant les niveaux de la craie et l'alluvial le long de la rivière ne permet pas l'utilisation des outils géochimiques comme traceur des mélanges entre les différentes masses d'eau. Cette homogénéité des concentrations en éléments majeurs et traces, $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$ et $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ est due au fait qu'en amont du site d'étude la rivière Avre draine les eaux de la craie qui est la même eau que l'on retrouve dans l'aquifère capté par les forages d'Eau de Paris à Vert-en-Drouais. Ceci est d'ailleurs montré sur les cartes piézométriques et les modèles hydrologiques utilisés dans le cadre de cette étude. Les eaux de pluies circulent aux travers de formations similaires d'un point de vue lithologique et sans contraste altimétrique. Ce fort soutien des débits de la rivière par les eaux souterraines de l'aquifère de la craie en amont du champ captant se reflète d'ailleurs par de fortes concentrations en nitrates dans les eaux de surface (37 mg.l⁻¹ en mars 2009). En effet l'aquifère de la craie (masse d'eau 3211 – craie altérée de Neubourg-Iton-Plaine de St.André) est défini comme à risque de non atteinte du bon état vis à vis des nitrates par l'Agence de l'eau Seine-Normandie (Etat des lieux pour la DCE, 2004).

On observe toutefois que les points d'eau autour du champ captant de Vert-en-Drouais ont les plus faibles concentrations en nitrates (proche de 40 mg.l^{-1}) parmi les points d'eau situées dans la vallée de l'Avre entre Courteilles et St. Georges Motel indiquant une dilution par des eaux moins contaminées ou l'effet d'une possible dénitrification.

b) Secteur de Montreuil

Le secteur de Montreuil est plus contrasté chimiquement avec des eaux de la rivière Eure qui diffèrent de celles mesurées aux forages P1, P6, P9, P10 du champ captant et dans la nappe alluviale. Ce contraste, chimiquement toutefois peu marqué, a permis d'envisager une étude plus fine des échanges entre l'Eure et les forages P6 et P9. Divers outils géochimiques ont été utilisés. Les terres rares ont permis de mettre en évidence pour les eaux de la rivière Eure des apports d'eaux usées. L'anomalie en gadolinium nette sur la rivière ne permet toutefois pas d'évaluer l'importance de l'impact des eaux de surface sur les eaux souterraines. Les éléments majeurs et traces indiquent une recharge des eaux de rivière plus importante au niveau du P9 que du P6. Le suivi de la température à un pas de temps de quelques jours confirme cela mais ne permet pas d'aller plus loin dans la compréhension des échanges nappes-rivières. Un suivi à pas de temps fin de la température et de la conductivité sur une plus longue période pourrait renseigner sur l'existence d'échanges rapides entre les eaux de surface et les eaux souterraines mais ne serait d'aucune utilité pour évaluer l'importance à différentes périodes des apports des eaux de surface, de l'alluvial ou de l'aquifère de la craie au niveau du champ captant de Montreuil.

L'étude régionale restreinte a permis de mettre en évidence, à cette échelle de travail, une certaine spécificité géochimique des eaux souterraines. Les eaux captant majoritairement la craie du Sénonien (Campanien principalement) diffèrent des eaux de la craie du Turonien. Cette différence chimique se note sur les concentrations en magnésium et le rapport isotopique $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$. Cette différenciation est due à la présence importante d'argiles dans la craie du Turonien donnant aux eaux une signature plus radiogénique que les eaux circulant dans les niveaux supérieurs du Crétacé. Une des explications possible à la différenciation chimique des eaux de Montreuil et de la rivière Eure serait un apport plus ou moins important des niveaux sous-jacent de la craie du sénonien. En considérant le rapport isotopique $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ d'un seul point d'eau captant la craie du Sénonien (Chérisy) et les rapports isotopiques mesurés dans les eaux souterraines du champ captant de Montreuil et de la rivière Eure en mai et novembre 2009, un calcul de mélange entre deux pôles indiquerait au forage P9 pour ces deux périodes un apport des eaux de la craie du Sénonien de 22%, le reste venant de la rivière Eure. Cette proportion de mélange coïncide avec celle qui serait obtenue en considérant les concentrations en nitrates dans les eaux. Il faut rester toutefois prudent sur ce résultat qui nécessiterait une étude plus complète pour être confirmée. Ces résultats sont toutefois en accord avec ceux obtenus par la modélisation utilisant la méthode des différences finies.

Une contamination de l'air atmosphérique ces dernières années par les gaz CFC et SF_6 rend ces traceurs inutilisables dans le secteur pour la datation des eaux ayant un apport d'eau de surface important. Aux alentours de Dreux les eaux de la craie du Turonien (non influencé par les eaux de surface ni par des infiltrations directes rapides

de type karstique) indiquent une recharge moyenne d'environ 35 ans. La composante lente des circulations dans le secteur d'étude peut être représentée par les eaux de la craie « non influencée » comme celles au point de Luat-Clairét. Ces eaux sont de concentrations élevées en nitrates ($62,7 \text{ mg.l}^{-1}$). Ainsi, pour ce seul aquifère, sans apport direct et rapide par les eaux de pluie ou infiltration des eaux de ruissellement et de rivière, si toutes les actions sont mises en œuvre pour réduire les pressions anthropiques, une amélioration de la qualité des eaux ne pourra se faire que lentement. Il serait intéressant de procéder également à la datation des eaux de la craie du Sénonien qui influencerait le champ captant de Montreuil et d'évaluer l'importance des eaux à circulation lente sur les deux BAC.

La qualité des eaux de l'Eure, comme celle de la rivière Avre, est actuellement mauvaise du point de vue des nitrates (concentration en nitrates de $29,1$ et $29,7 \text{ mg.l}^{-1} \text{ NO}_3$ en mars et octobre 2009) depuis leur source jusqu'à St. George Motel (DIREN, 2008) ne permettant pas une forte dilution des eaux souterraines très contaminées ($\text{NO}_3 > 60 \text{ mg.l}^{-1}$ pour la craie du Sénonien à Chérisy et du Turonien à Luat-Clairét).

5. Délimitation des bassins d'alimentation des captages

5.1. ESSAI DE DELIMITATION DE LA ZONE D'APPEL A PARTIR D'UNE APPROCHE ANALYTIQUE SIMPLE

5.1.1. Champ captant de Vert-en-Drouais

Une délimitation de la zone d'appel des pompages au voisinage du champ captant est testée à l'aide d'un outil développé sous Excel (cf. Vernoux et al., 2007). Cette délimitation repose sur des hypothèses simplificatrices : l'écoulement est uniforme et unidirectionnel. Compte tenu de ces hypothèses, le calcul ne serait valable qu'au voisinage du champ captant et en supposant que le cours d'eau n'impacte pas l'orientation des écoulements. Cette dernière assertion reste à confirmer.

Les paramètres considérés pour le calcul sont les suivants :

- transmissivité comprise entre 0,02 et 0,06 m²/s. Cette gamme de valeur a été estimée à partir du débit spécifique ;
- gradient : 2,5 ‰ ;
- débit de pompage : 25 000 m³/j, soit 1040 m³/h en moyenne ;
- la productivité des ouvrages semble augmenter vers l'Est du champ captant (débit d'exploitation de 100 m³/h au puits P1, de 200 m³/h aux puits P2, P3, P4 et P6, et de 400 m³/h au puits P5). Le barycentre des prélèvements se situe légèrement à l'ouest du puits P4. Afin de rendre compte de l'impact du prélèvement vers l'aval, le point fictif représentant les pompages a été positionné au niveau du puits P4 ;
- angle fait par l'écoulement par rapport à un axe Est-Ouest de référence : 175° en comptant dans le sens inverse des aiguilles d'une montre. L'écoulement se fait en direction de l'Est.

Le choix des gammes de valeurs est effectué sur la base de la connaissance locale (cf. chapitre 2.4.2).

La délimitation obtenue par cette méthode pour la courbe enveloppe de la zone d'appel est présentée en Figure 61 (triangles noirs). Elle s'étend sur un peu moins d'un km vers l'aval et occupe une largeur « à l'infini » de l'ordre de 5,8 km. Cette délimitation est théorique et non valide en réalité compte tenu du rôle joué par exemple par le cours d'eau ou par la vallée sèche située à l'aplomb du champ captant en rive droite de l'Avre. Une modélisation maillée simple a été mise en œuvre en complément afin de rendre compte de ces deux aspects.

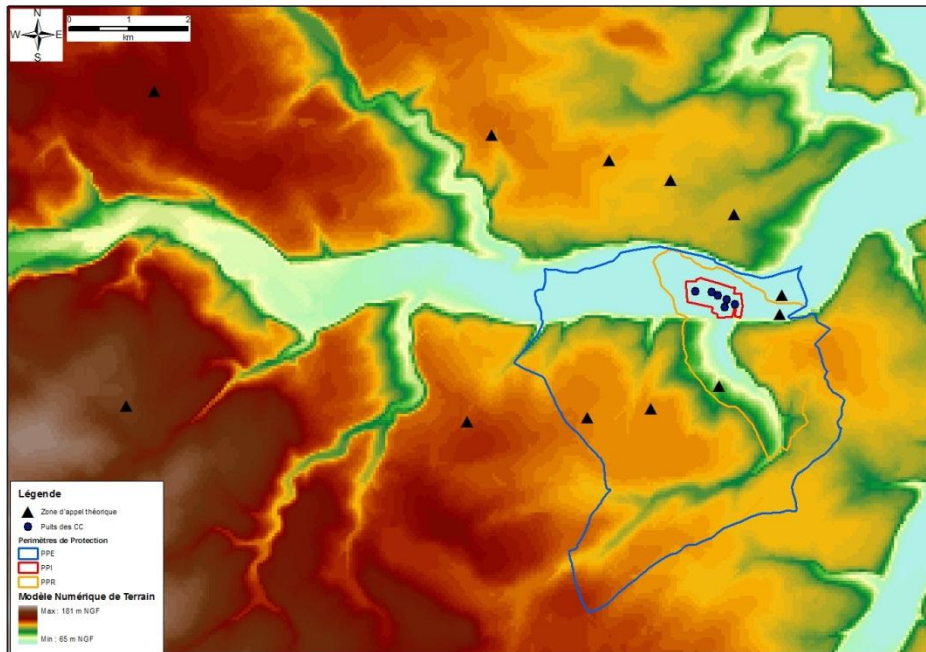


Figure 61 : Essai de délimitation de la zone d'appel du champ captant de Vert-en-Drouais

5.1.2. Champ captant de Montreuil

La même méthode a été appliquée pour le champ captant de Montreuil.

Les paramètres considérés pour le calcul sont les suivants :

- transmissivité comprise entre 0,025 et 0,33 m²/s ;
- gradient : 1,5 ‰ ;
- débit de pompage : 25 000 m³/j, soit 1040 m³/h en moyenne ;
- les puits qui sont situés au pied de la falaise de craie (P1, P2, P4 et P9) sont ceux dont le débit d'exploitation est le plus élevé (200 m³/h). Leur transmissivité est en règle générale plus élevée aussi que celle des puits situés plus au centre de la vallée. Le barycentre des prélèvements dans le champ captant se situe à proximité du puits P8. Néanmoins, afin de rendre compte de l'impact du prélèvement vers l'aval, le point fictif utilisé pour représenter les pompages a été positionné plus au nord, au niveau du puits P7 ;
- angle fait par l'écoulement par rapport à un axe Est-Ouest de référence : -60° en comptant dans le sens inverse des aiguilles d'une montre. L'écoulement se fait en direction du Nord-Nord-Est.

Le choix des gammes de valeurs est effectué sur la base de la connaissance locale (cf. chapitre 2.4.2).

La délimitation obtenue par cette méthode pour la courbe enveloppe de la zone d'appel est présentée en Figure 62 (triangles noirs). Elle s'étend sur 1,2 km environ vers l'aval et occupe une largeur « à l'infini » de l'ordre de 7,7 km. Cette délimitation est théorique et non valide en réalité car elle ne peut rendre compte par exemple des changements d'orientation du cours d'eau, du rôle éventuel de ce dernier dans l'alimentation du réservoir crayeux ou de celui de la vallée de la Blaise. Une modélisation maillée simple est donc nécessaire et a été mise en œuvre pour identifier le rôle joué par ces différents aspects.

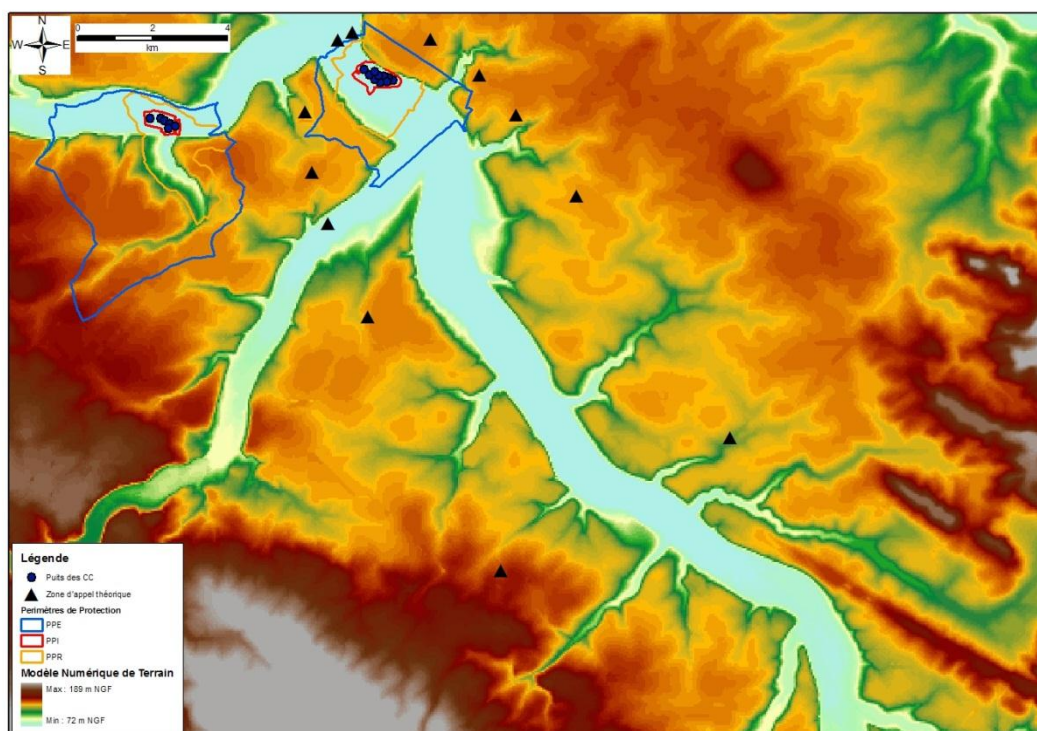


Figure 62 : Essai de délimitation de la zone d'appel du champ captant de Montreuil

5.2. ELEMENTS DE DELIMITATION DES BASSINS D'ALIMENTATION DE CAPTAGE PAR MODELISATION MAILLEE

L'approche analytique présentée dans le paragraphe précédent a permis de délimiter une zone d'appel des pompages qui s'étend vers l'aval piézométrique de 1 à 1,2 km et large de 5,8 km pour le champ captant de Vert-en-Drouais, et de 7,7 km pour celui de Montreuil.

Les débits d'exploitation élevés de ces champs captant peuvent toutefois amener à un « décrochement » de la nappe de la craie des cours d'eau qui la drainent. En particulier les cônes d'appel des forages peuvent s'étendre sous les rivières de l'Avre et de l'Eure; ayant une influence plus vaste que ne le suggère la seule approche analytique.

Un modèle maillé a été mis en œuvre pour affiner la représentation des écoulements de la nappe de la craie au niveau des deux champs captant, étudier l'impact de leurs exploitations sur les relations nappe/rivière et apprécier leurs zones d'appel.

5.2.1. Méthodologie

Les campagnes piézométriques menées par le BRGM en hautes-eaux et basses-eaux en 2009 ont montré le caractère homogène des écoulements de la nappe de la craie, cette dernière étant drainée par les principaux cours d'eau : l'Avre, la Blaise, l'Eure.

Dans un premier temps, le modèle sera calé en régime permanent pour représenter la surface piézométrique en basses-eaux. Les perméabilités de la craie seront ajustées au cours de cette phase.

Dans un deuxième temps, l'exploitation des champs captants sera simulée en régime permanent, pour plusieurs perméabilités de colmatage des rivières (pour simuler des situations allant d'un colmatage inexistant à un fort colmatage). A partir des écoulements simulés, des trajectoires inverses seront tracées pour apprécier la zone d'appel des forages.

5.2.2. Modèle conceptuel

Le modèle MARTHE, développé depuis 30 ans au BRGM est mis en œuvre, utilisant la méthode des différences finies.

a) Structure du modèle

L'ensemble alluvions-craie est modélisé par une couche dont le substratum est fixé à la cote 50 m NGF. Cette couche est surmontée d'une couche de faible épaisseur, qui représente les alluvions en fond de vallée et permet de simuler un éventuel colmatage des rivières.

b) Extension du modèle et conditions aux limites

Le modèle est centré sur les deux champs captants. Les limites sont choisies suffisamment loin des champs captants pour ne pas introduire de biais dans le calcul des écoulements. Au nord, l'isopièze 125 m NGF est choisie comme limite à potentiel imposé, de la même manière les isopièzes 130, 115 et 140 m NGF sont choisies au sud. Les autres limites, perpendiculaires aux isopièzes, sont des limites à flux nul. La Figure 63 présente l'emprise du modèle et les conditions aux limites choisies.

Une infiltration moyenne de 133 mm/an a été imposée sur l'ensemble du modèle.

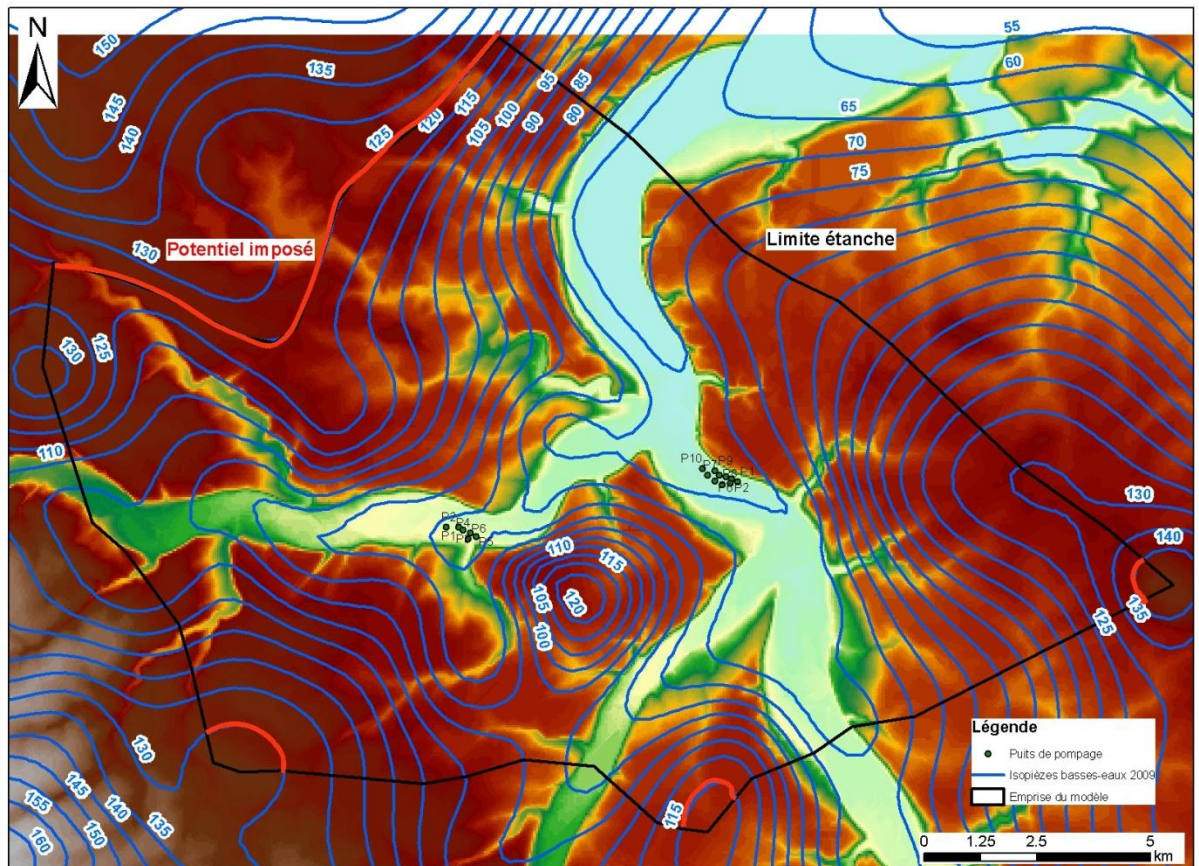


Figure 63 - Emprise du modèle et conditions aux limites

Le modèle s'étend sur 17,5 km du nord au sud et 24 km d'ouest en est. Le maillage est composé de maille carrée de 50 m de côté. Il y a 426 400 mailles actives.

Le modèle conceptuel choisi ne prend pas en compte d'éventuelles circulations d'eau liées à une karstification du milieu crayeux. Celles-ci peuvent exister mais trop peu de données et d'observations sont disponibles sur ce phénomène dans le secteur pour être incluses de manière plausible dans le modèle.

5.2.3. Calage du modèle en régime permanent

Dans les vallées, la fissuration de la craie est plus importante que sur les plateaux. En conséquence, l'aquifère y est plus perméable.

La transmissivité des terrains étant connue au niveau des puits du champ captant de Montreuil (cf. 2.4.2), on peut approcher les perméabilités à partir de la profondeur des ouvrages. Les perméabilités obtenues varient entre 0,001 et 0,02 m/s. On ne dispose pas de valeurs de transmissivité pour le champ captant de Vert-en-Drouais mais les débits spécifiques disponibles indiquent que cette dernière doit être supérieure à 0,013 m²/s, ce qui laisse envisager une perméabilité minimale de l'ordre de 0,001 m/s.

La distribution de perméabilité présentée Figure 64, permet de représenter au mieux la piézométrie basses-eaux observée en 2009 (Figure 65). Au niveau des champs captant on a une perméabilité de $5 \cdot 10^{-3}$, ce qui est cohérent avec les résultats des essais de pompage.

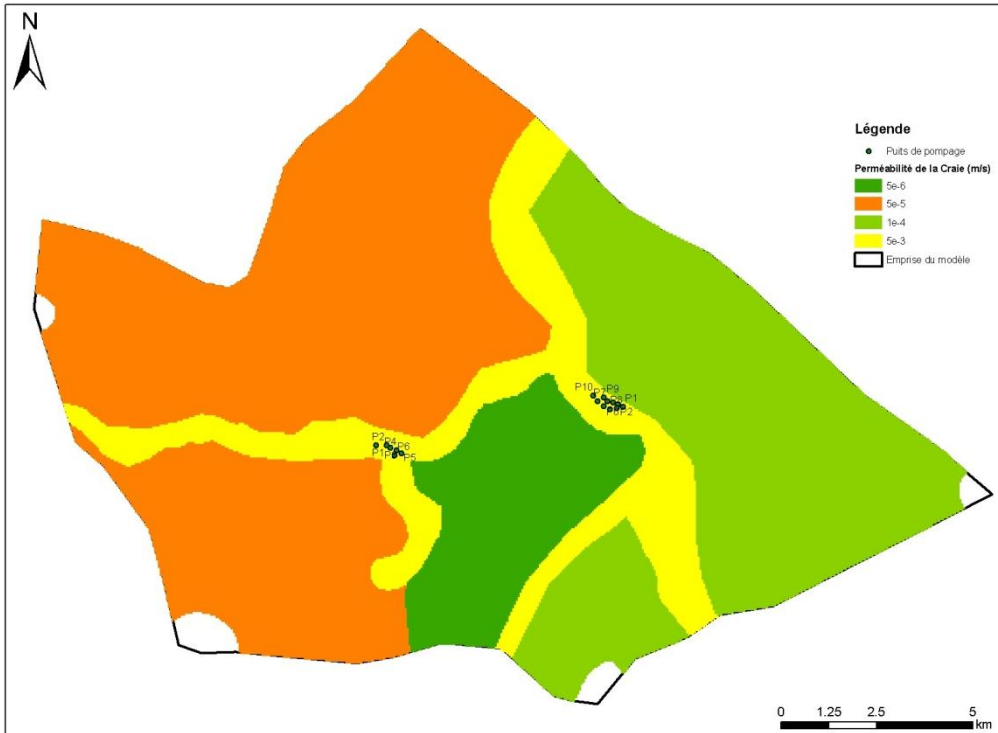


Figure 64 - Distribution des perméabilités simulées

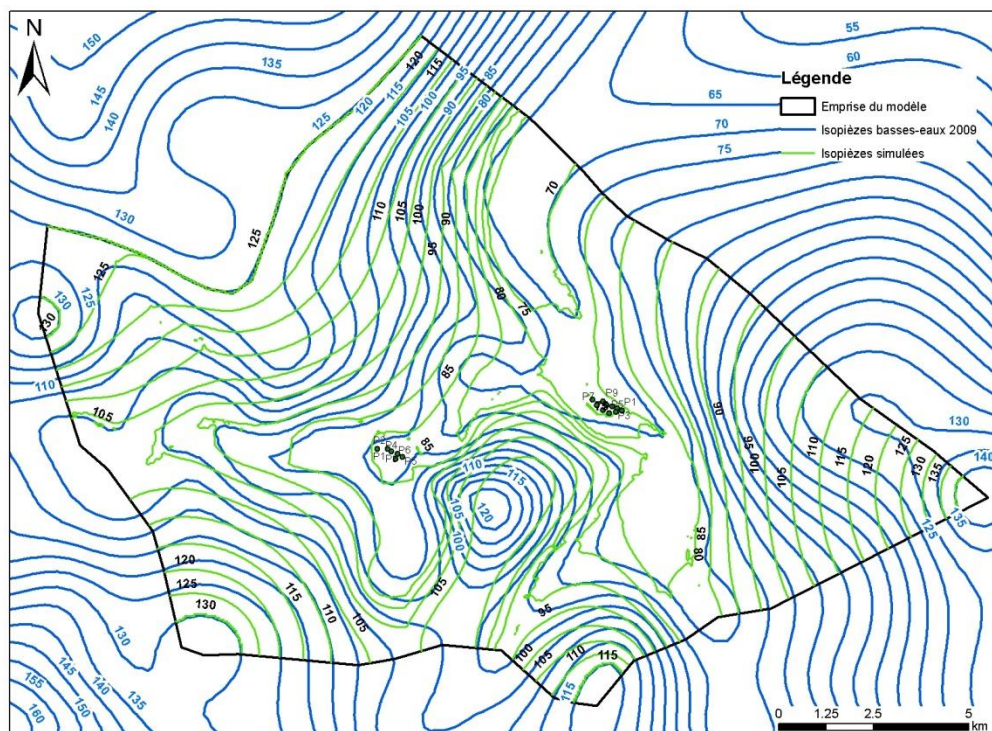


Figure 65 - Comparaison des isopièzes simulés et mesurés

5.2.4. Rabattements modélisés

A partir de l'état piézométrique basses-eaux simulé, une simulation est menée en régime permanent en intégrant l'exploitation des champs captants. L'Avre et l'Eure, situées à proximité des champs captants, sont modélisées comme des limites à potentiel imposé dans la couche supérieure à perméabilité plus ou moins faible pour simuler un colmatage éventuel du lit des rivières. L'exploitation des champs captants sollicite ces limites avec plus ou moins d'amplitude selon le colmatage du lit.

Les rabattements induits par l'exploitation des champs captants sont présentés Figure 66. Plus le colmatage des rivières est important, plus les rabattements sont élevés, l'alimentation par les rivières étant moins importante. Ces rabattements sont compris entre 10 cm et 1,5 m suivant les configurations. Ils s'étendent des deux côtés de l'Eure pour le champ captant de Montreuil tandis qu'ils restent confinés à la rive droite de l'Avre pour Vert-en-Drouais. L'influence du champ captant de Vert-en-Drouais est bien plus étendue ; ceci est en partie lié à l'action drainante de la vallée sèche, qui propage les rabattements vers l'amont piézométrique.

Rappelons qu'aux mailles de pompage, il faut ajouter deux facteurs de correction :

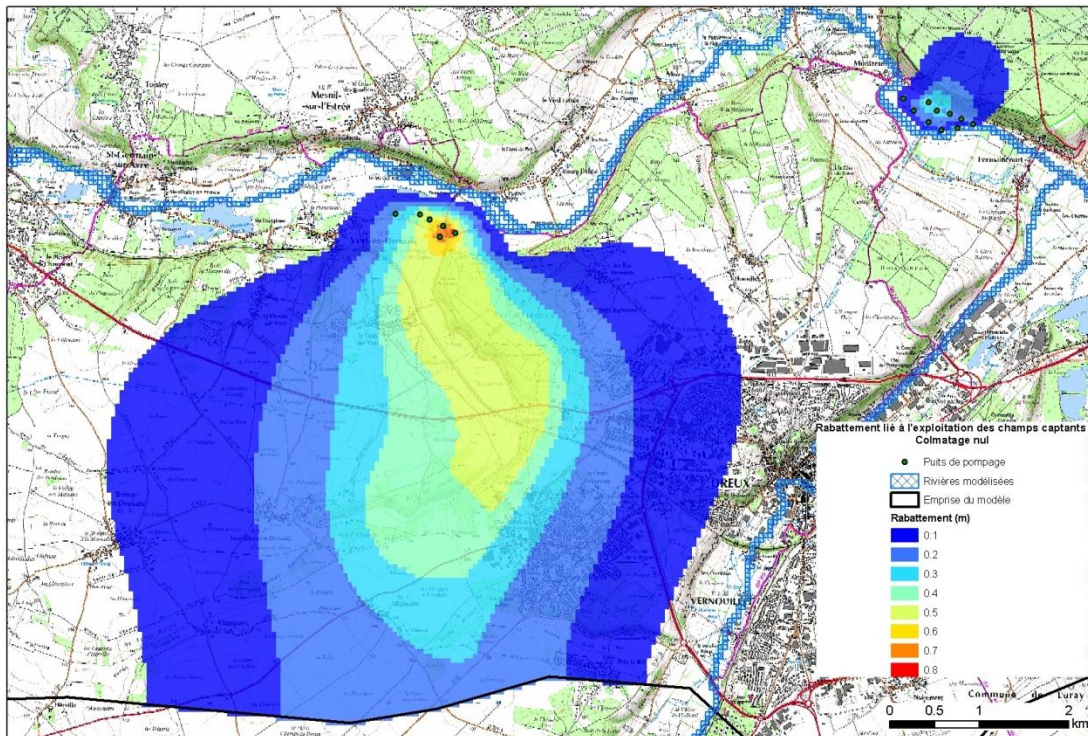
- le rabattement lié à la perte de charges quadratique, provoquée par l'écoulement turbulent dans l'ouvrage, crépine et tubage ;

- le rabattement additionnel tenant compte du rapport entre le diamètre du forage et le côté de la maille du modèle (10 m). Le terme correcteur est donné par l'équation suivante :

$$\text{COR} = \frac{Q}{2\pi T} \left[\text{Ln} \left(\frac{a}{r_p} \right) - \frac{\pi}{2} \right]$$

avec :

| | |
|----------------------|-----------------------------|
| COR | rabattement supplémentaire |
| Q | débit pompé |
| r_p | rayon du puits |
| a | côté de la maille |
| T | transmissivité de la maille |
| Ln | logarithme népérien |
| π | 3.1416 |



Champs captant de Montreuil et Vert-en-Drouais (28)
délimitation des bassins d'alimentation de captages et des zones vulnérables

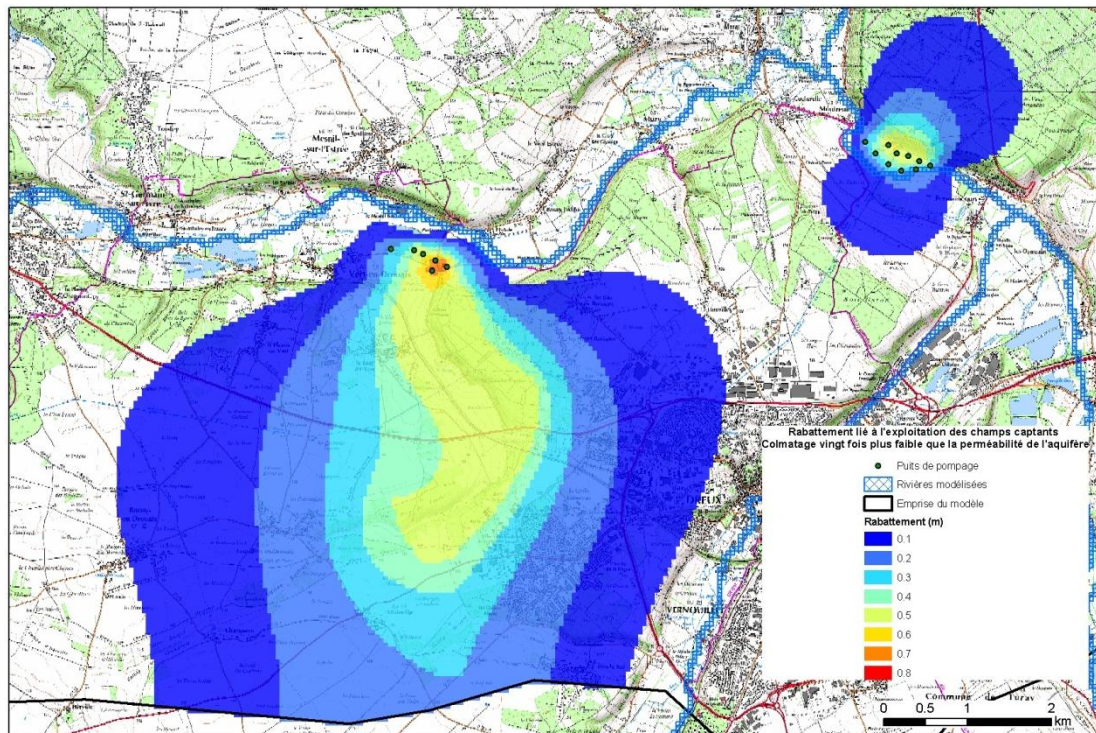
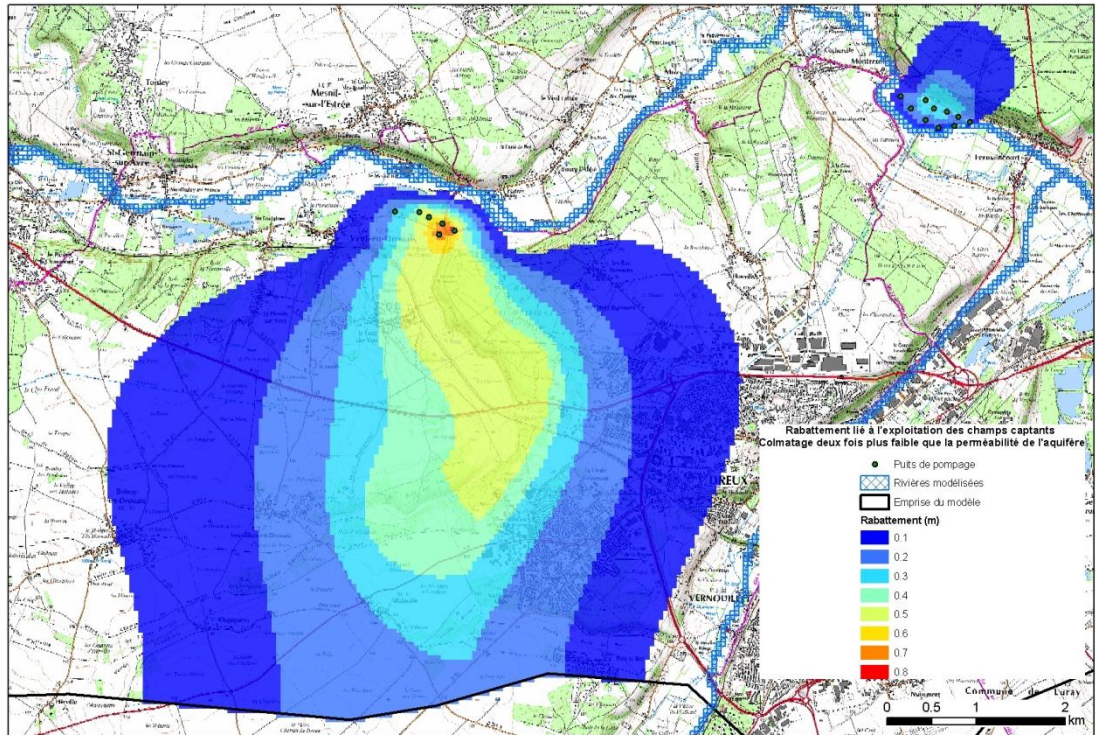


Figure 66 - Rabattements induits par l'exploitation des champs captants dans plusieurs cas de colmatage des rivières [perméabilité du colmatage identique à celle de l'aquifère dans le

premier cas (pas de colmatage), perméabilité du colmatage 2 fois plus faible que l'aquifère (cas 2), 20 fois plus faible (cas 3)]

5.2.5. Zone d'appel des captages

Afin de représenter les cônes d'appel des captages, les trajectoires des particules pompées sont tracées autour de chaque puits (« Backward particle tracking »), dans plusieurs configurations de perméabilité de fond de rivière (Figure 67).

L'analyse de ces trajectoires montre qu'une partie de l'eau pompée provient des rivières (trajectoires prenant naissance directement dans le lit de l'Avre ou de l'Eure), tandis que les autres proviennent des conditions aux limites amont du modèle.

L'emprise des trajectoires est d'autant plus grande que la perméabilité de colmatage est faible. Pour un colmatage nul, les champs captants sollicitent directement la rivière ; quand le colmatage devient important, la rivière ne suffit plus à alimenter les captages, et les cônes d'appel s'élargissent.

5.2.6. Débits provenant des rivières

La Figure 67 présente un zoom sur les captages : le départ des trajectoires permet de délimiter la portion de rivière sollicitée par l'exploitation des champs captants. Il est possible d'évaluer avec le modèle quelle quantité d'eau provient de cette zone. Elle dépend de l'importance du colmatage entre la rivière et la nappe (Tableau 6).

| Perméabilité de colmatage des rivières | Débit provenant de l'Avre (champ captant de Vert-en-Drouais) en m ³ /h | Débit provenant de l'Eure (champ captant de Montreuil) en m ³ /h |
|--|---|---|
| 5.10⁻³ | 352 | 960 |
| 10⁻⁴ | 319 | 966 |
| 10⁻⁵ | 231 | 965 |
| 10⁻⁶ | 101 | 633 |

Tableau 6 - Débits pompés provenant des rivières

Les débits provenant de la rivière diminuent avec l'intensification du colmatage. Pour Vert-en-Drouais, le débit issu de la rivière correspond environ à un tiers du débit exploité (1 300 m³/h) sans colmatage, pour atteindre environ 8% si le colmatage est important. Rappelons qu'à la station hydrométrique de l'Avre à Acon, situé une dizaine de kilomètres en amont de Vert-en-Drouais, le Q_{MNA5} est de 3350 m³/h. L'exploitation du champ captant en prend donc 10% environ.

Sur le champ captant de Montreuil, il existe un seuil de colmatage au-delà duquel l'alimentation par la rivière chute. Tandis que cette alimentation reste constante, de l'ordre de 70% du débit exploité, pour des perméabilités de colmatage jusqu'à 20 fois inférieure à la perméabilité de la Craie, elle décroît à 45% du débit exploité pour un colmatage plus important. De la même façon, la station de l'Eure à Charpont située à quelques kilomètres en amont donne un Q_{MNA5} de 6516 m³/h dont l'exploitation du champ captant de Montreuil prend environ 15%.

Champs captants de Montreuil et Vert-en-Drouais (28)
 délimitation des bassins d'alimentation de captages et des zones vulnérables

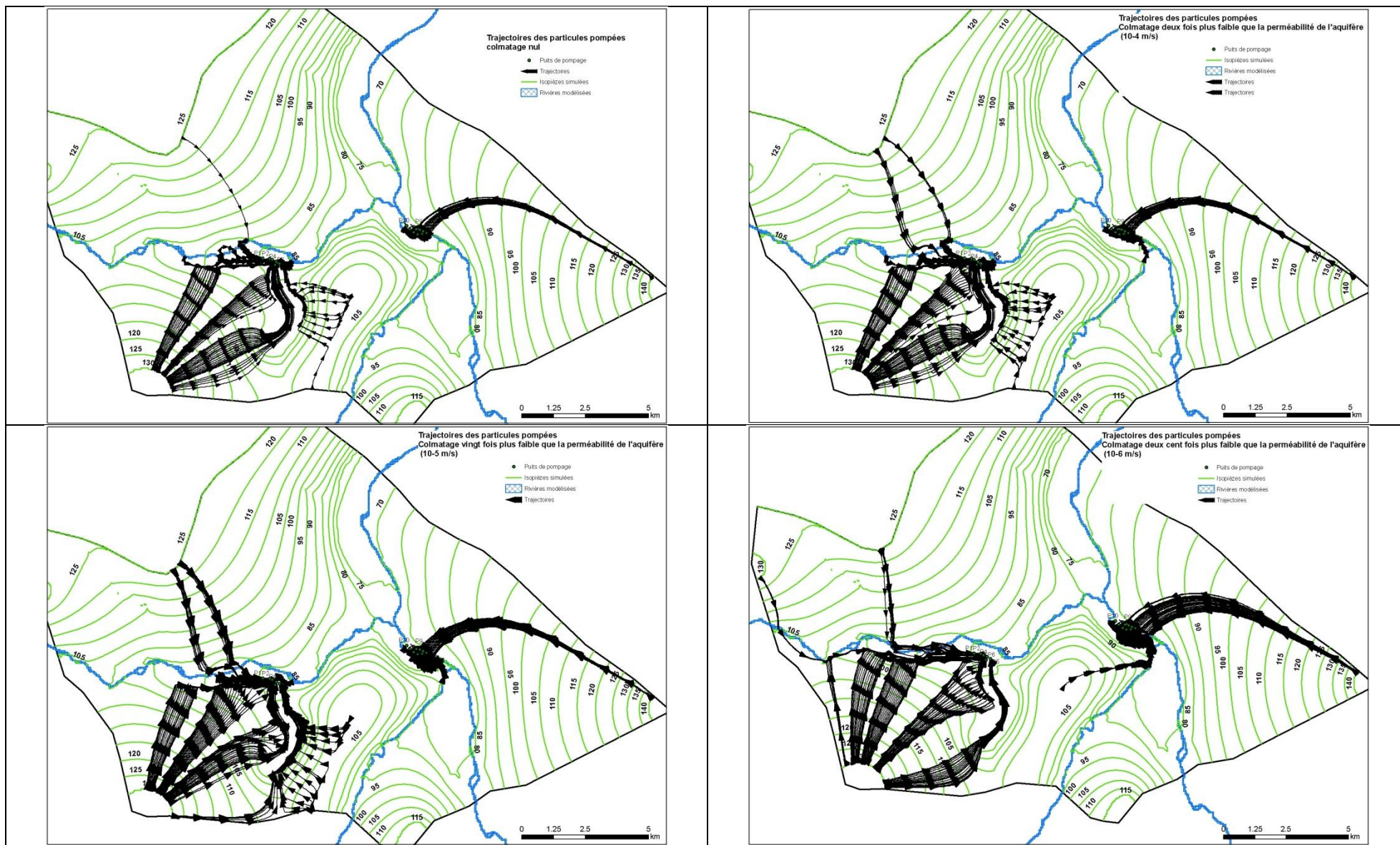


Figure 67 - Trajectoires des particules d'eau pompées pour plusieurs configurations de colmatage de rivière

Champs captant de Montreuil et Vert-en-Drouais (28)
délimitation des bassins d'alimentation de captages et des zones vulnérables

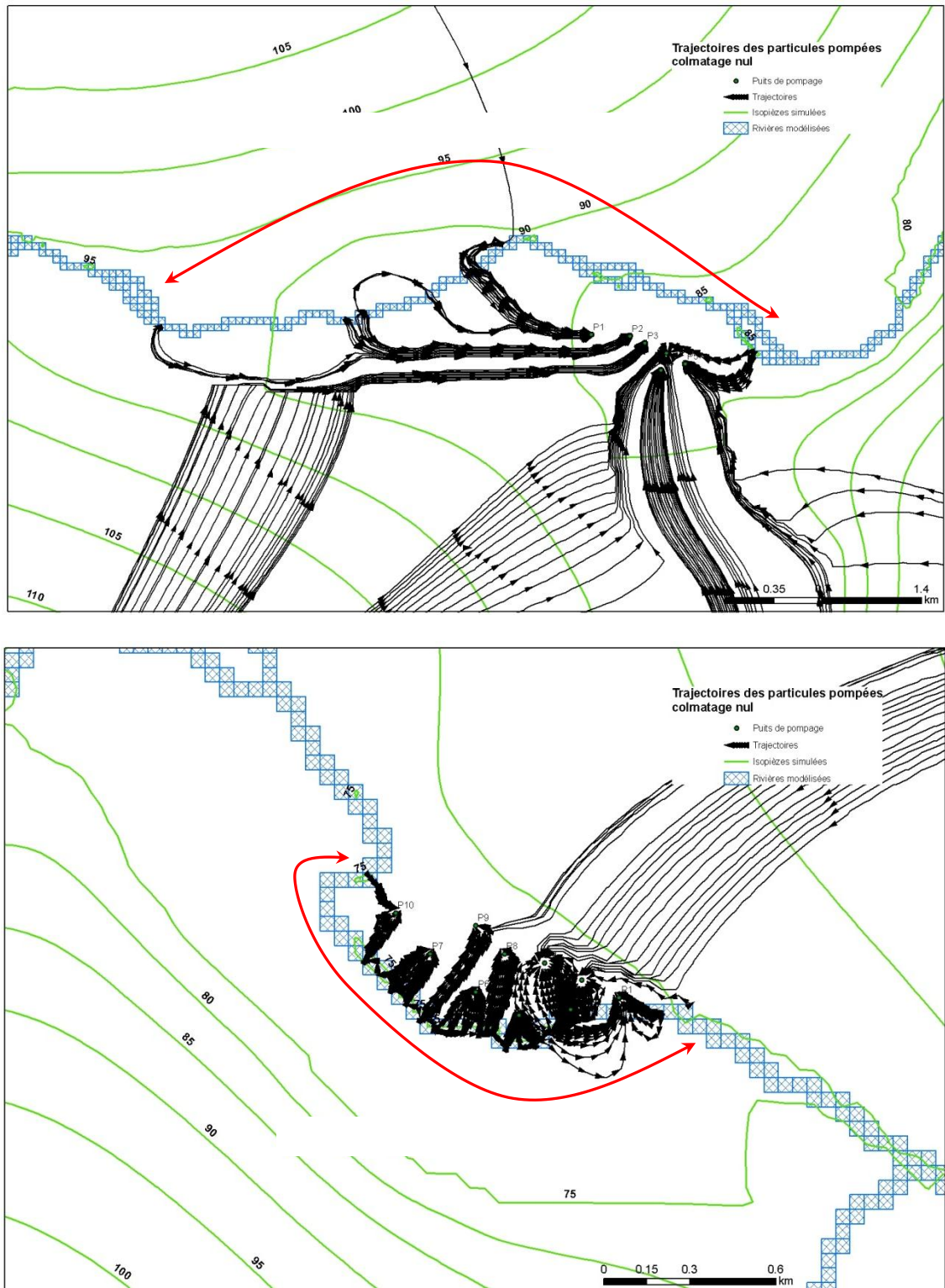


Figure 68 - Relations nappe-rivière pour un colmatage deux fois inférieur à la perméabilité de l'aquifère. Champs captants de Vert-en-Drouais (haut) et Montreuil (bas).

5.2.7. Temps de parcours des particules dans la nappe

La vitesse réelle des particules d'eau dépend de la perméabilité du milieu aquifère, du gradient hydraulique et de la porosité efficace. La porosité totale de la craie est grande (environ 40%) mais la finesse de ses pores induit des forces de rétention élevées. L'eau y circule très mal et seule 0,5 % à 2% de l'eau contenue dans la craie peut circuler librement (Megnier, 1979). La porosité efficace retenue est donc très faible (choisie dans le modèle à 0,5%), et les vitesses de circulations sont alors relativement grandes, environ 7 km/an.

Le calcul des trajectoires permet de tracer le temps de parcours des particules d'eau (Figure 69). L'isochrone à 50 jours peut être tracée. Elle est étendue dans les vallées, dont on sait que la perméabilité y est bien plus élevée que sur les plateaux, y compris dans la vallée située juste au sud du champ captant de Vert-en-Drouais et qui, bien que sèche, draine les écoulements dans cette zone.

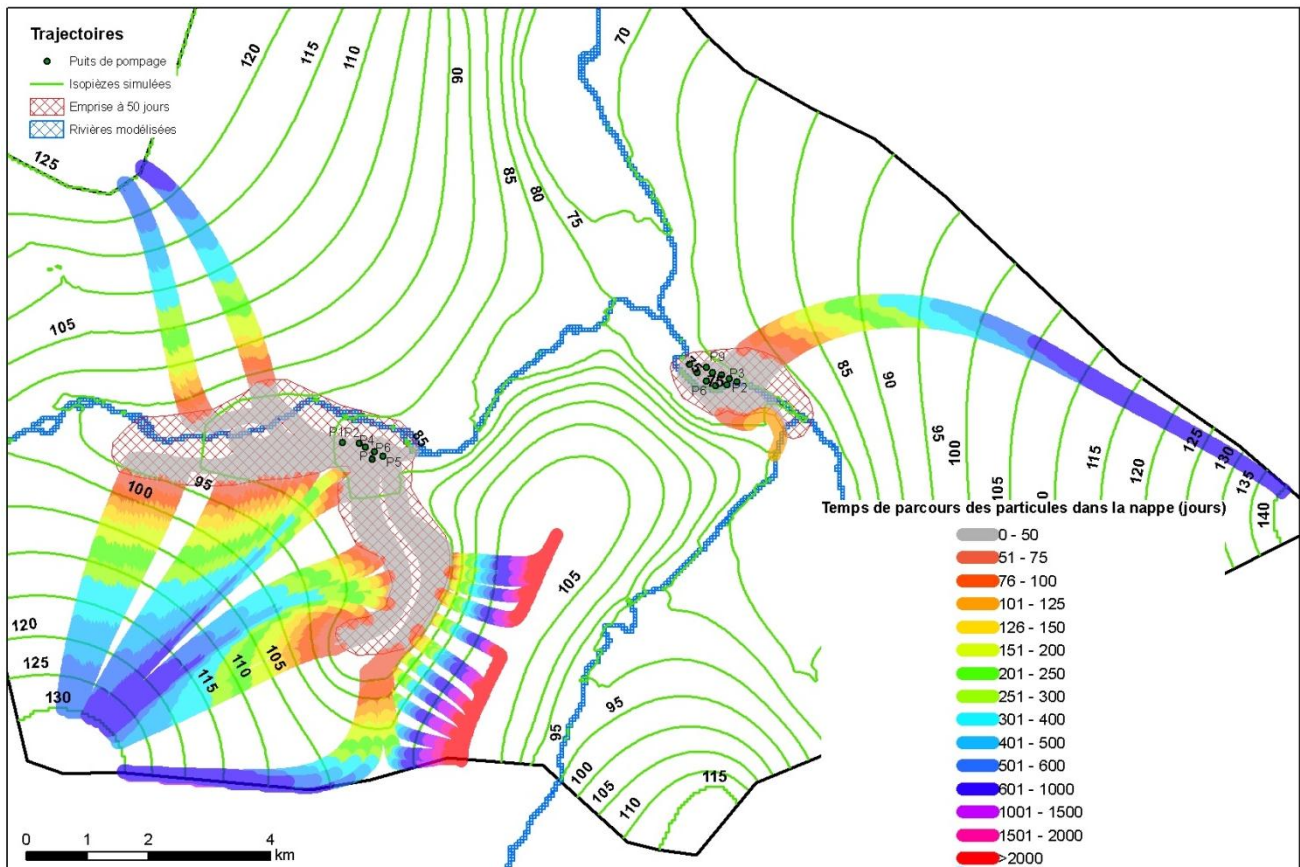


Figure 69 - Temps de parcours des particules d'eau pompée dans le cas d'une perméabilité de colmatage des rivières à 10^{-5} m/s.

5.3. CHOIX FINAL DE DELIMITATION DU BAC

La délimitation du BAC s'appuie en premier lieu sur les résultats de la modélisation mais aussi sur les résultats de l'étude hydrochimique et la compréhension générale du fonctionnement des hydrosystèmes.

5.3.1. Champ captant de Vert-en-Drouais

On peut récapituler le contexte hydrogéologique et de fonctionnement du système :

- les modélisations globales faites sur le bassin versant, ainsi que les analyses au strontium montrent qu'il existe une forte composante de nappe dans le fonctionnement du cours d'eau (l'Avre) ;
- la modélisation maillée fait apparaître une forte alimentation des captages d'eau potable par la nappe de la craie, la contribution du cours d'eau et de la nappe alluviale étant évaluée à 10 à 30%.

La nappe de la craie constitue donc le moteur de l'alimentation en eau de la zone alluviale et, de façon majoritaire, des captages de Vert-en-Drouais.

On retient ainsi la prédominance d'une alimentation des captages par la nappe de la craie, ce qui conduit à rechercher une délimitation basée sur les écoulements souterrains dans ce réservoir.

La méthode de « Backward particle tracking » permet de proposer un zonage pour la portion de nappe qui alimente le captage. Compte tenu de l'absence de formations géologiques imperméables en surface et d'absence d'alimentation par les bordures, ce zonage est retenu pour proposer une délimitation du BAC (projection en surface de la portion de nappe alimentant le captage).

Cette approche montre l'existence d'une contribution de la rive gauche à l'alimentation du champ captant. Celle-ci se cantonne d'après la simulation à une crête topographique située entre la vallée du Ruet et celle de la Coudanne plus à l'Est. Les autres limites du BAC sont (cf. Figure 70) :

- au sud, la crête piézométrique séparant le bassin versant de l'Avre de celui de la Blaise ;
- au sud-ouest, le dôme piézométrique présent dans le secteur de Laons et Vitray-sous-Brezolles ;
- à l'ouest, la crête piézométrique séparant les axes drainant de la vallée de Crampeau et de celle débouchant sur le champ captant ;
- à l'est, le dôme piézométrique situé sous la ville de Dreux.

Le BAC occupe une superficie de 59 km² environ.

Champs captants de Montreuil et Vert-en-Drouais (28)
délimitation des bassins d'alimentation de captages et des zones vulnérables



Figure 70 : Délimitation des BAC des champs captant de Vert-en-Drouais et de Montreuil

5.3.2. Champ captant de Montreuil

Les résultats de la modélisation montrent que l'alimentation en eau du champ captant est principalement assurée par le cours d'eau et la nappe d'accompagnement, elle-même en continuité hydrodynamique avec la nappe de la craie. Ceci est confirmé par l'étude hydrochimique qui montre une prépondérance de la contribution des eaux de l'Eure et de sa nappe alluviale au niveau de ce champ captant.

Cette prépondérance d'une alimentation par des eaux issues des alluvions de l'Eure, soit du fond de la vallée, conduit à rechercher une délimitation du BAC qui prenne en compte des écoulements superficiels, et donc du bassin versant topographique de la vallée au voisinage du champ captant.

La méthode de « Backward particle tracking » (cf. Figure 69) montre par ailleurs l'existence d'une contribution de la nappe de la craie en rive droite et légèrement en rive gauche, au niveau de la vallée de la Blaise. L'assez bonne coïncidence entre crêtes topographiques et piézométriques permet de proposer une délimitation qui tienne compte de cette double composante.

La délimitation retenue pour le BAC est la suivante (cf. Figure 70) :

- à l'est, le dôme topographique et piézométrique situé vers Broué ;
- au sud-ouest, le dôme topographique et piézométrique situé vers Blainville et Nuisement ;
- à l'ouest, le dôme topographique et piézométrique situé sous la ville de Dreux ;
- toujours à l'ouest, la limite du BAC contourne le bassin versant topographique de la vallée Vaubreu qui débouche dans la vallée de l'Avre.

Compte tenu de la contribution du cours d'eau et de la nappe alluviale à l'alimentation des captages, le BAC est supposé prendre en compte le bassin versant du cours d'eau. La délimitation amont du BAC dans la vallée de l'Eure est donc un choix arbitraire contraint par la nécessité de limiter son extension.

Le BAC occupe une superficie de 78 km² environ.

6. Vulnérabilité

6.1. CHOIX DE LA METHODE

La méthode retenue découle du guide méthodologique publié par le BRGM sur le sujet (Vernoux et al., 2007). Le choix de celle-ci se fait en fonction de la typologie du système aquifère : s'agit-il d'un milieu :

- continu ou apparenté continu, à savoir un milieu qui se comporte comme un milieu continu à l'échelle du BAC bien que des comportements discontinus puissent intervenir dans le détail ;
- discontinu, c'est-à-dire que les écoulements prédominants se produisent en fonction de la fissuration / fracturation en grand du milieu ;
- karstique ?

Pour répondre à cette interrogation, on va s'intéresser à l'ensemble des informations disponibles permettant de comprendre le comportement prédominant du système aquifère (cf. guide méthodologique).

La craie, qui constitue le réservoir aquifère capté par les champs captants, est une formation connue pour présenter un comportement qui peut être continu ou karstique, selon les secteurs.

Si des éléments bibliographiques font état d'une karstification de la craie dans au moins une partie du bassin versant de l'Avre (pertes karstiques dans la partie centrale du bassin versant de l'Avre, circulations karstiques dans la vallée sèche orientée nord-sud et débouchant sur le champ captant de Vert-en-Drouais d'après le rapport de l'hydrogéologue agréé), celle-ci n'a pu être confirmée (continuité des signaux piézométriques par exemple) et surtout cartographiée de manière homogène dans la zone d'étude (un seul indice karstique relevé sur le terrain, absence de localisation précise du traçage effectué lors de l'établissement des périmètres de protection).

Par ailleurs, la nappe de la craie joue un rôle majeur dans le soutien des débits de l'Avre, de la Blaise et de l'Eure au voisinage des deux champs captant, en présentant en particulier une composante pluriannuelle (cf. 3.3.2), peu présente dans des milieux purement karstiques.

On retient donc une caractérisation de la vulnérabilité basée sur la méthode proposée pour les milieux continus. Celle-ci prend en compte les paramètres suivants :

- pluie efficace ;
- nature, épaisseur et pierrosité du sol ;
- capacité d'infiltration de la zone non saturée (indice IDPR) ;
- épaisseur de la zone non saturée ;

- perméabilité de l'aquifère.

Une classification de 4 de ces 5 paramètres est obtenue à partir du Tableau 7 ; plus l'indice est élevé plus la vulnérabilité est forte.

| Valeur de l'indice | Pluie efficace (P, en mm) | IDPR | Epaisseur Zone Non Saturée (H, m) | Perméabilité (K, m/s) |
|--------------------|---------------------------|-------------|-----------------------------------|-----------------------|
| 4 | > 300 | 0 – 400 | < 2 | $> 10^{-3}$ |
| 3 | 200 à 300 | 400 – 800 | 2 à 5 | $10^{-4} – 10^{-3}$ |
| 2 | 100 à 200 | 800 – 1200 | 5 à 20 | $10^{-5} – 10^{-4}$ |
| 1 | 50 à 100 | 1200 – 1600 | 20 à 50 | $10^{-7} – 10^{-5}$ |
| 0 | < 50 | 1600 – 2000 | >50 | $<10^{-7}$ |

Tableau 7 : Classification de 4 des 5 paramètres utilisés pour l'évaluation de la vulnérabilité

La méthode d'obtention des classes du dernier paramètre – celui qui est lié au sol – est décrite par la suite.

La caractérisation de chacun de ces paramètres est présentée dans le chapitre suivant.

Pour certains d'entre eux, celle-ci s'est effectuée à l'aide « d'unités fonctionnelles », élaborées à partir de polygones de :

- géologie ;
- pédologie ;
- bassin versant.

Un sous-découpage de ces polygones a été effectué à l'aide des limites de communes. Ceci a permis de diminuer artificiellement la taille des polygones les plus grands.

Ces unités fonctionnelles – de taille restreinte (en moyenne 0,2 km²) – sont supposées présenter un fonctionnement homogène vis-à-vis de la vulnérabilité des eaux souterraines. Elles sont présentées en Figure 71.

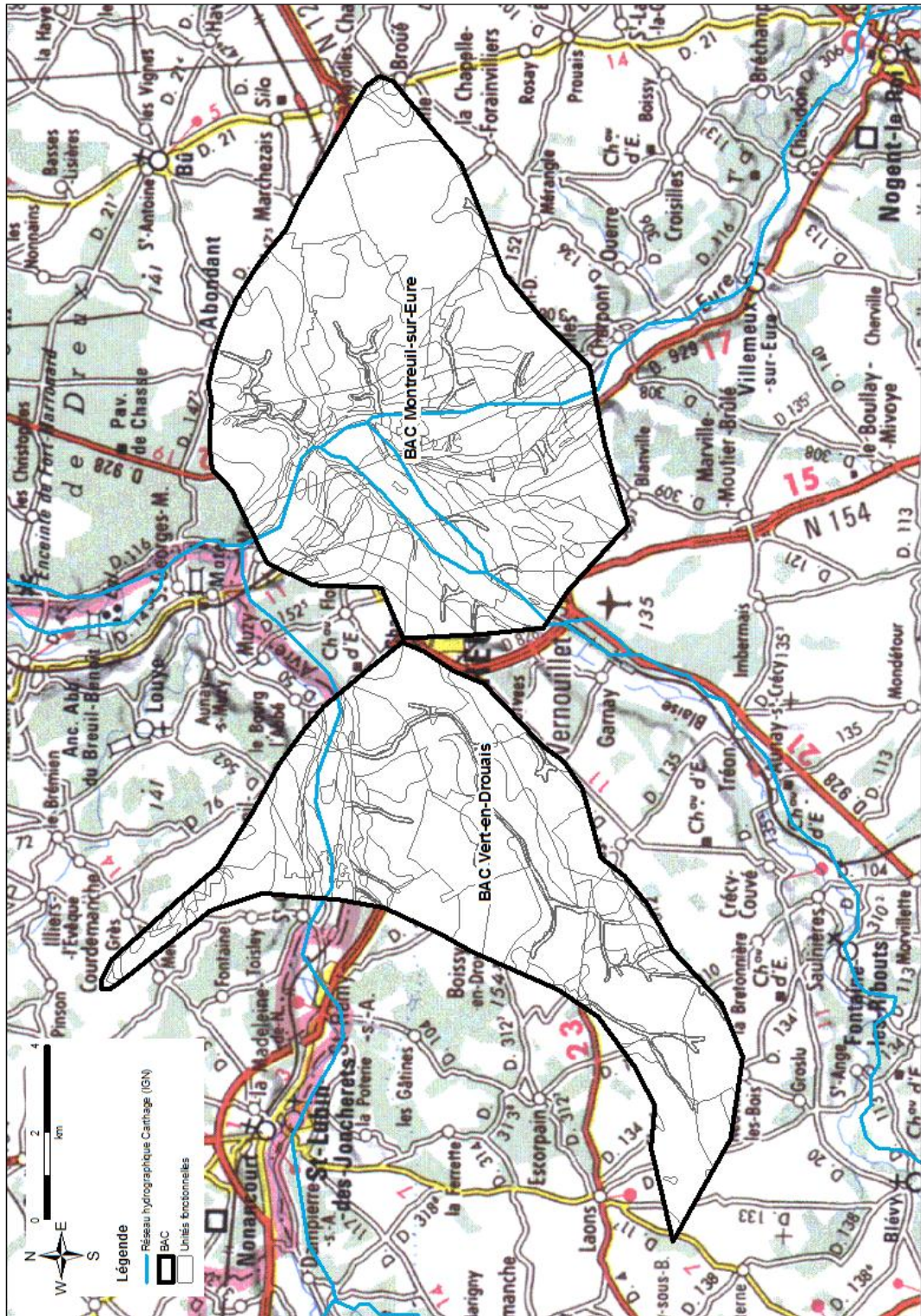


Figure 71 – Découpage des BAC en « unités fonctionnelles »

6.2. CARACTERISATION DES DIFFERENTS PARAMETRES

6.2.1. Pluie efficace (P)

Un calcul de pluie efficace a été effectué à partir des chroniques pluviométriques disponibles sur trois stations : Marville-Moutiers-Brûlé, Marcilly-la-campagne et Bu (cf. Figure 8 pour la localisation des différentes stations). La chronique d'ETP utilisée est celle d'Evreux-Huest et la RFU du sol a été prise égale à 100 mm.

Le calcul a été conduit par décade et par année hydrologique sur la période allant du 01/09/1982 au 31/08/2008. La moyenne interannuelle calculée sur cette période est respectivement de 98, 114 et 139 mm.

Le calcul par décade sous-estimant légèrement la valeur réelle de la pluie efficace, ceci nous conduit à considérer une classe unique de pluie efficace sur la zone d'étude, d'indice égal à 2 (pluies efficaces comprises entre 100 et 200 mm).

Rappelons par ailleurs que la pluie efficace moyenne pour le bassin versant de l'Avre à Muzy a été estimée à 180 mm environ lors de la modélisation globale effectuée. Cette valeur, supérieure à celles obtenues pour les stations pluviométriques proches de la zone d'étude, est due aux apports pluviométriques plus élevés qui sont rencontrés dans la partie amont du bassin versant (et qui contribuent à augmenter la valeur moyenne obtenue dans la modélisation du bassin versant).

6.2.2. Sol (S)

Les classes de sol sont définies en fonction de sa nature, de sa pierrosité (teneur en cailloutis) et de son épaisseur. L'indice de vulnérabilité du sol, compris entre S1 et S4 (Tableau 8) est calculée en déterminant d'abord la nature du sol (par le croisement texture et % de cailloux, tableau de gauche) puis en croisant nature du sol et épaisseur (tableau de droite).

| | | Texture | | |
|------------|---------------|---------------|--------------|--------------|
| | | 1 (argile) | 2 (limon) | 3 (sable) |
| % cailloux | 1 (0-15%) | 1 | 1 | 2 |
| | 2 (15-60%) | 1 | 2 | 3 |
| | 3 (>60%) | 2 | 3 | 3 |

| | | Nature du sol | | | |
|-----------|------------------|---------------|----|----|----|
| | | inconnue | 1 | 2 | 3 |
| Epaisseur | 1 (>100cm) | S1 | S1 | S2 | S3 |
| | 2 (20-100 cm) | S2 | S2 | S3 | S4 |
| | 3 (0-20cm) | S3 | S3 | S4 | S4 |
| | 4 nulle | S4 | S4 | S4 | S4 |

Tableau 8 : Matrices de détermination de l'indice de vulnérabilité du sol (compris entre S1 et S4)

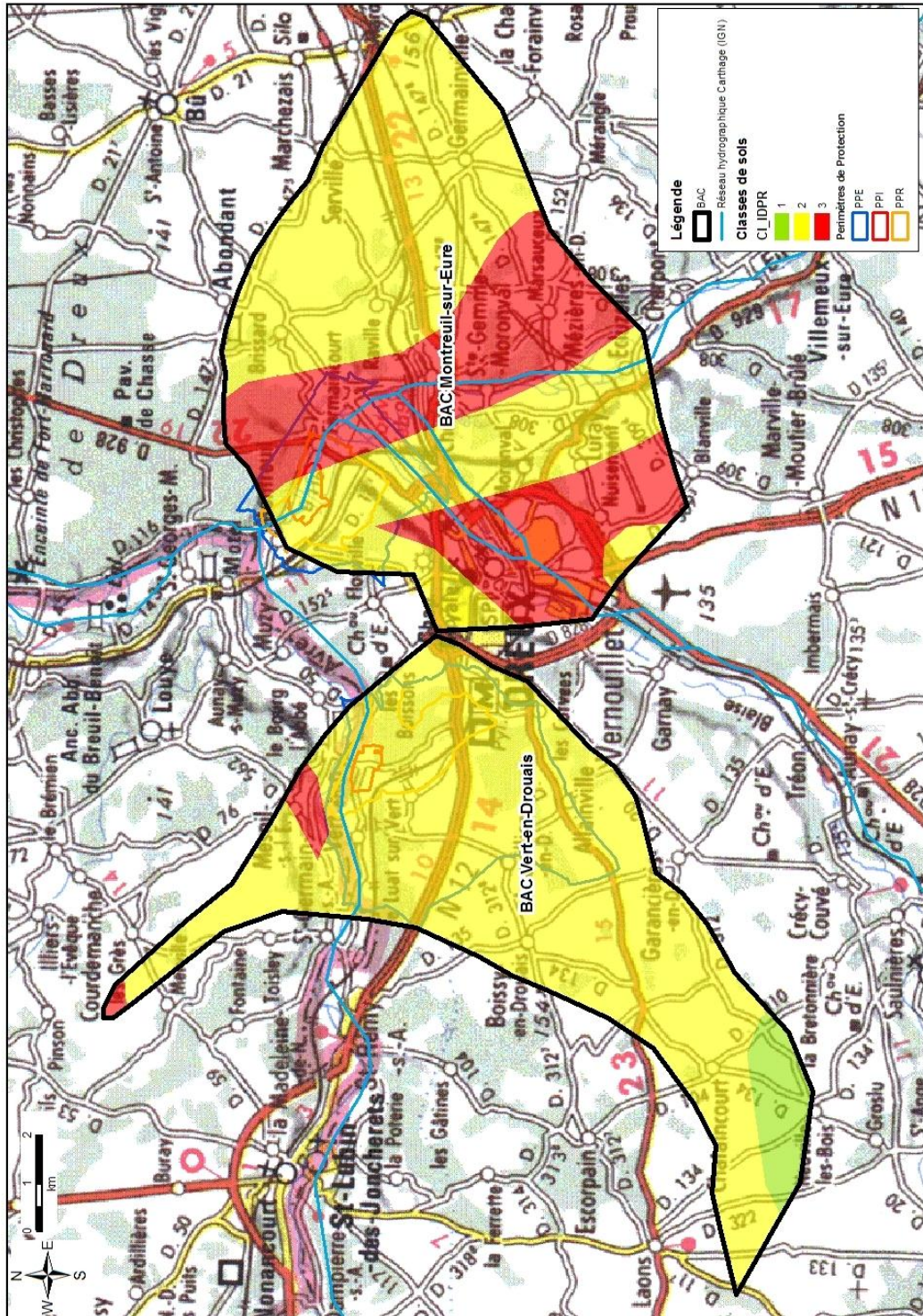


Figure 72 – Caractérisation du paramètre « sol » sur les BAC de Montreuil et de Vert-en-Drouais

Suite aux échanges avec l'INRA, il apparaît que la cartographie pédologique n'est disponible dans ce secteur qu'à l'échelle du millionième, la cartographie au 1/250 000^{ème} étant en cours de réalisation par la Chambre d'Agriculture de l'Eure-et-Loir.

La description des sols est effectuée de façon qualitative, ce qui nécessite une certaine interprétation dans l'attribution de chaque type de sol à une classe donnée. A titre d'exemple, la teneur en cailloutis des sols est rarement disponible.

La carte délimitant les classes de sol telles que prises en compte dans l'estimation de la vulnérabilité est présentée en Figure 72.

6.2.3. Capacité d'infiltration des formations constituant la zone non saturée (I)

Cette capacité est décrite au travers de l'indice IDPR (Figure 73). Les valeurs médianes de cet indice ont été calculées par unité fonctionnelle et les classes ont été définies selon la classification proposée dans le Tableau 7 (Figure 74).

On note que, dans cette approche, les formations de fond de vallée apparaissent majoritairement comme principalement ruisselantes. Ceci est dû au fait qu'elles contiennent une nappe sub-affleurante (proche de la surface du sol) qui limite les possibilités d'infiltration. Dans la pratique, on observe néanmoins une infiltration en zone de vallée dans la mesure où les formations alluviales sont plutôt perméables. Pour éviter un biais dans la cartographie de la vulnérabilité nous avons choisi de ne pas prendre en compte l'IDPR en zone alluviale.

A l'inverse les zones de plateau montre une forte capacité d'infiltration en contradiction avec les cartes de vulnérabilités établies à l'échelle départementale (Martin et al., 2005). La divergence vient essentiellement du fait que ces cartes prennent en compte parmi les critères la présence ou non d'une couverture imperméable qui peut être vu comme un critère d'absence d'infiltration. L'argile à silex étant considérée dans cette étude comme imperméable, les zones correspondantes apparaissent de fait comme peu vulnérables.

Les éléments présentés dans le paragraphe 2.4.22.4.2 montrent qu'en fait cette formation est très hétérogène et si elle peut apparaître localement imperméable, elle ne l'est pas à l'échelle régionale. De même les fortes quantités de nitrates observés dans la nappe de la craie ne peuvent s'expliquer sans infiltration directe dans la zone non saturée.

Ces éléments montrent que les eaux météoriques s'infiltrent à travers les argiles à silex même si les vitesses d'infiltration sont lentes (cf. en annexe 2, une évaluation des vitesses de transfert de l'eau et des nitrates dans le système craie + argile à silex en Normandie). Ils nous apparaissent en conformité avec les résultats de l'indice IDPR qui qualifie une capacité d'infiltration et non pas une vitesse.

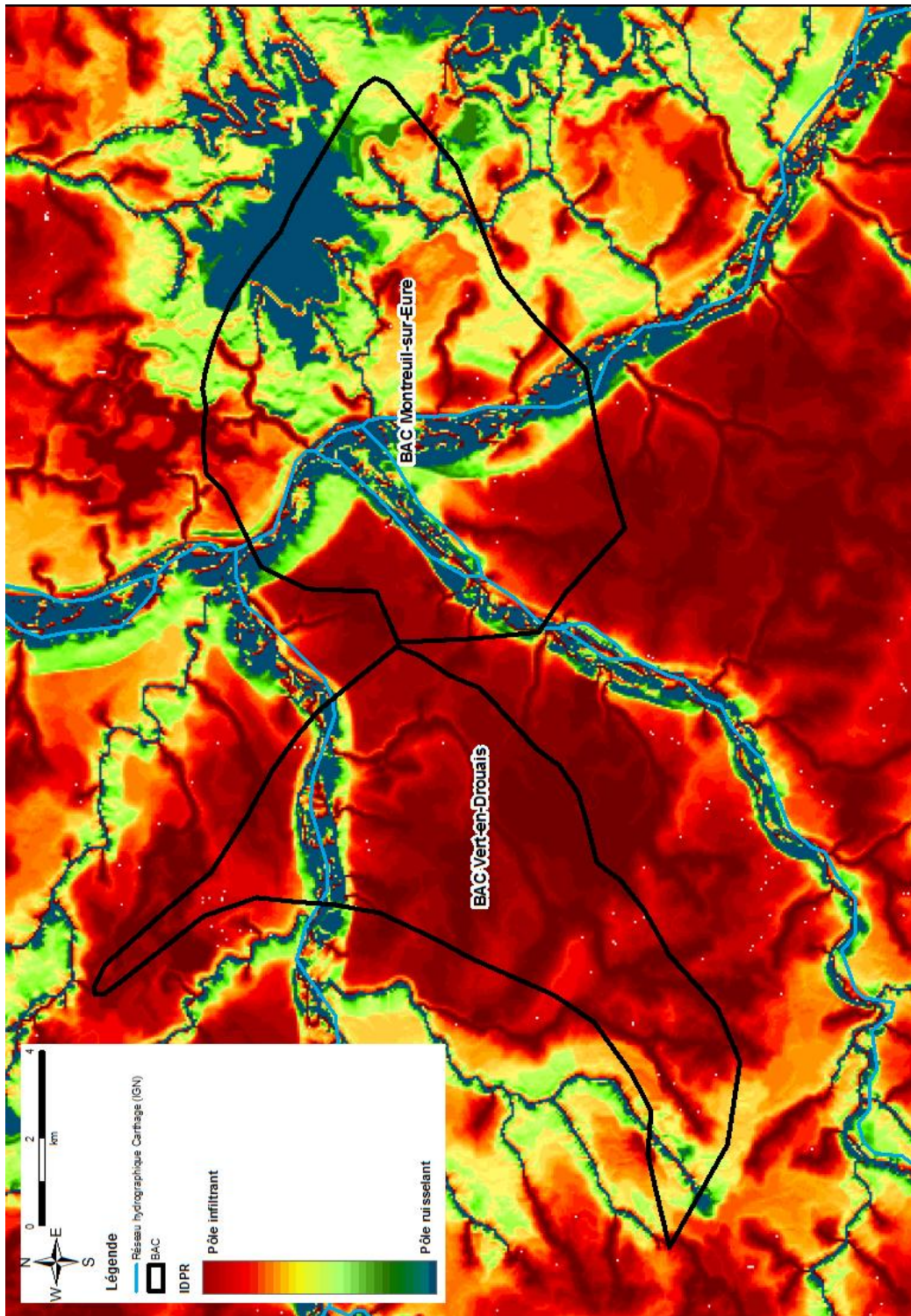


Figure 73 – Carte de l'IDPR sur les BAC de Montreuil et de Vert-en-Drouais

Champs captants de Montreuil et Vert-en-Drouais (28)
 délimitation des bassins d'alimentation de captages et des zones vulnérables

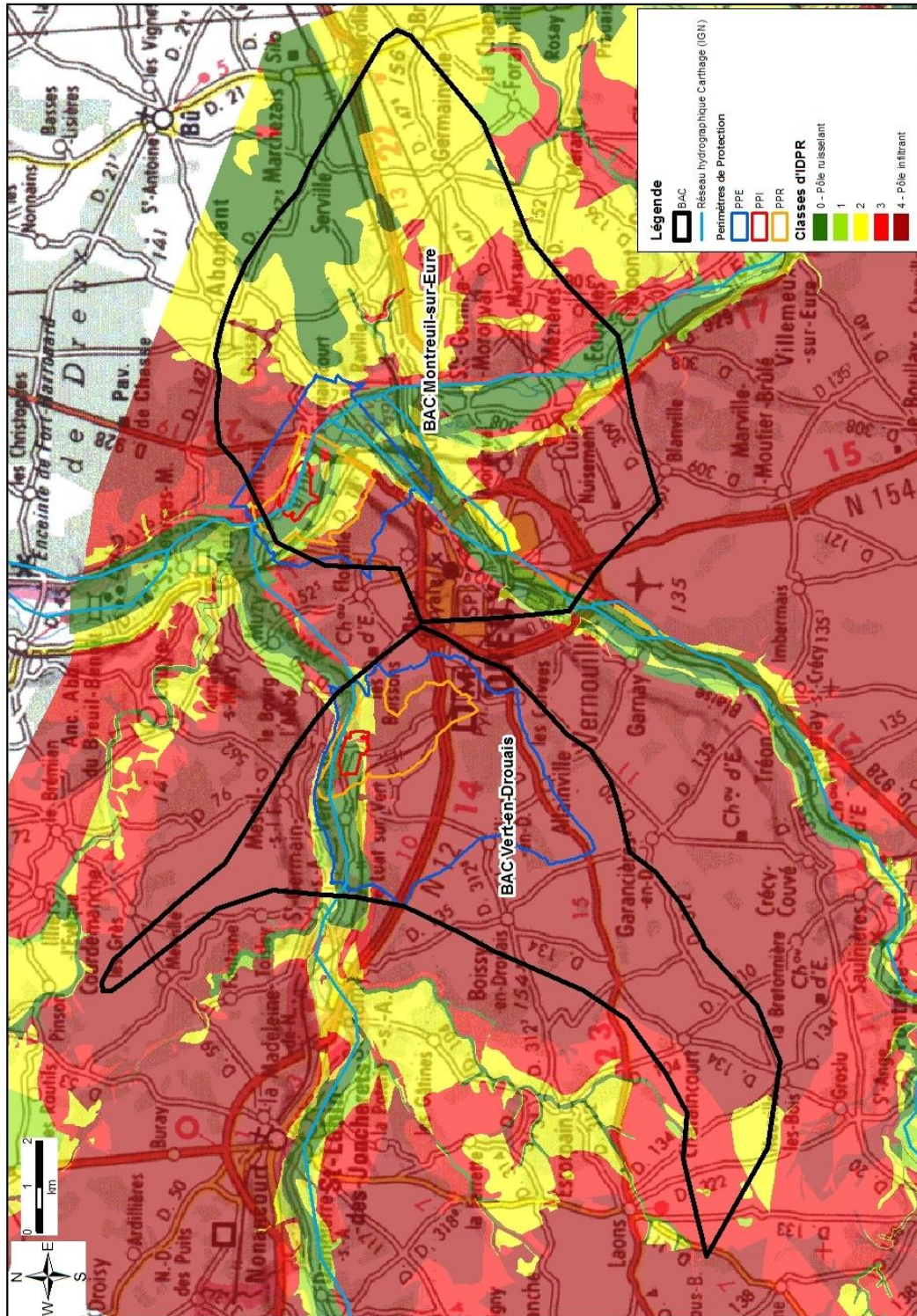


Figure 74 – Caractérisation de la capacité d'infiltration des formations constituant la zone non saturée sur les BAC de Montreuil et de Vert-en-Drouais

6.2.4. Epaisseur de la zone non saturée (H)

L'épaisseur de la ZNS est décrite à partir de la carte piézométrique de basses eaux (octobre 2009). Une valeur moyenne a été calculée par unité fonctionnelle et les classes d'épaisseur ont dans un premier temps été définies selon la classification proposée dans le Tableau 7.

Néanmoins, compte tenu du contexte de très basses eaux rencontré lors des mesures d'octobre 2009, les bornes des classes ont été légèrement modifiées. L'utilisation du canevas initial aurait en effet conduit à sous-estimer la vulnérabilité de la zone d'étude. Ces modifications ont été effectuées sur la base des chroniques piézométriques disponibles dans le secteur : Moisville, Marcilly-sur-Eure, Crucey-village et Allainville. Ces piézomètres sont situés à des altitudes et présentent donc des niveaux piézométriques à des profondeurs s'étageant de 6 à 30-35 m. Ceci a permis d'ajuster la modification des classes en fonction de la profondeur.

Ainsi, sur la base de la comparaison du niveau piézométrique d'octobre 2009 avec le niveau piézométrique moyen pour chacun des piézomètres, les classes d'épaisseur de la ZNS ont été réajustées de la façon suivante :

| Valeur de l'indice | Epaisseur Zone Non Saturée (H, m) |
|--------------------|-----------------------------------|
| 4 | < 2 |
| 3 | 2 à 6 |
| 2 | 6 à 22 |
| 1 | 22 à 53 |
| 0 | >53 |

Tableau 9 : Valeur de indice lié à l'épaisseur de la zone non saturée selon des classes réajustées compte tenu du contexte de très basses eaux

La carte présentant les classes retenues pour le paramètre « épaisseur de la zone non saturée » est présentée en Figure 75.

Champs captants de Montreuil et Vert-en-Drouais (28)
 délimitation des bassins d'alimentation de captages et des zones vulnérables

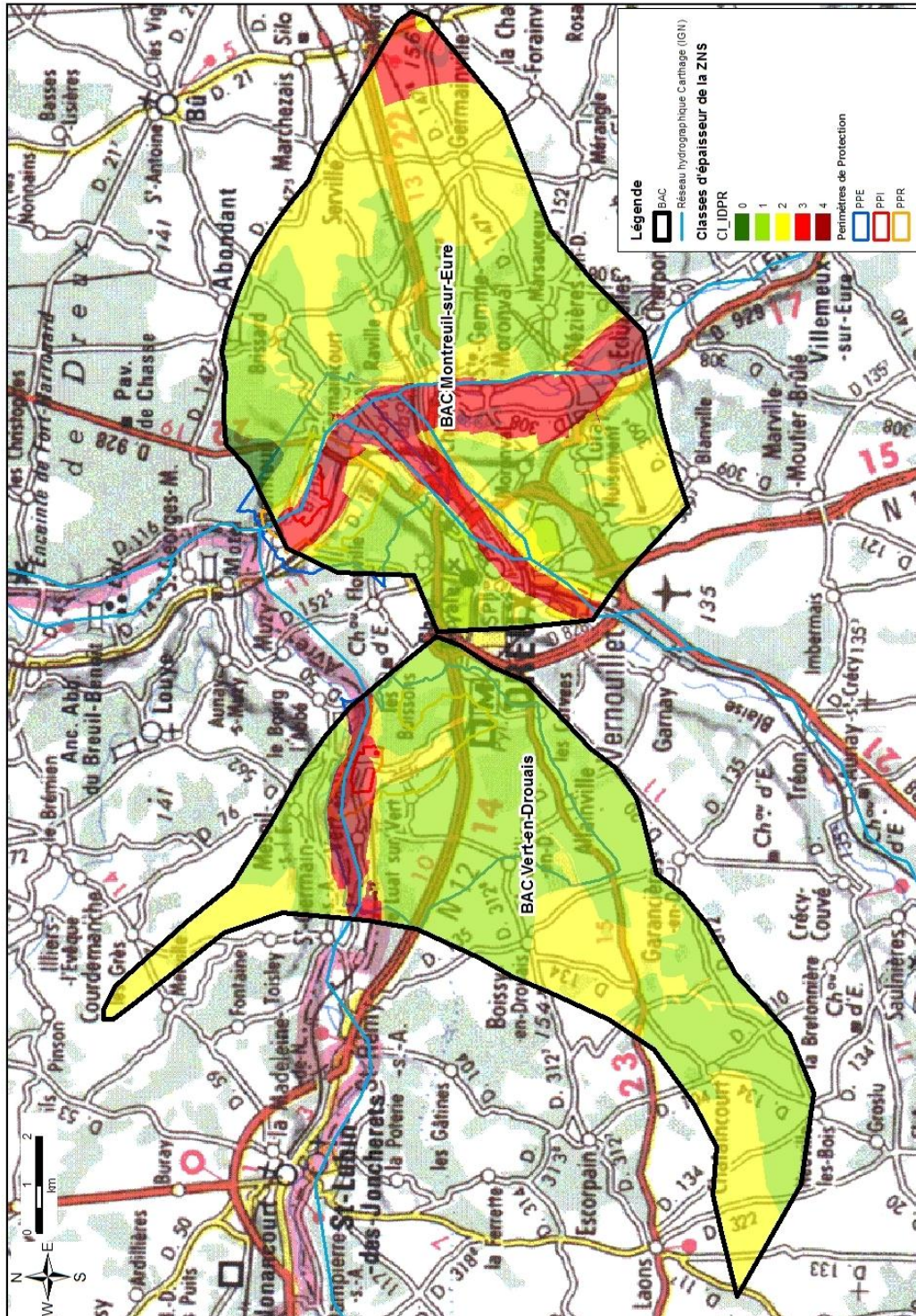


Figure 75 – Caractérisation du paramètre « épaisseur de la zone non saturée » sur les BAC de Montreuil et de Vert-en-Drouais

6.2.5. Perméabilité de l'aquifère (K)

D'après les cartes piézométriques du secteur, l'espacement entre les isopièzes est plus important en fond de vallée qu'au niveau des plateaux. Le gradient de la nappe semble ainsi être de l'ordre de 1,5 ‰ dans la vallée de l'Eure et 2,5 ‰ dans celle de l'Avre (au voisinage des champs captant), alors qu'il atteint 10 ‰, voire 15 ‰ au niveau des plateaux. Dans des vallées secondaires comme celle du Ruet, le gradient avoisine 5 ‰. Le gradient de la nappe étant un indicateur de la perméabilité de l'aquifère, on obtient une évolution de cette dernière selon la morphologie des terrains : la perméabilité est plus élevée dans les vallées principales que dans les vallées secondaires, elles-mêmes présentant une perméabilité supérieure à celle des zones de plateaux. Cette approche correspond à la connaissance de l'évolution de la perméabilité des terrains en domaine crayeux.

La transmissivité des terrains étant connue au niveau des puits du champ captant de Montreuil (cf. 2.4.2), on peut approcher les perméabilités à partir de la profondeur des ouvrages. Les perméabilités obtenues varient entre 0,001 et 0,02 m/s. on ne dispose pas de valeurs de transmissivité pour le champ captant de Vert-en-Drouais mais les débits spécifiques disponibles indiquent que cette dernière doit être supérieure à 0,013 m²/s, ce qui laisse envisager une perméabilité minimale de l'ordre de 0,001 m/s.

D'après le Tableau 7, ceci correspond à un indice de 4. Cet indice sera appliqué aux zones alluviales de l'Eure, de l'Avre et de la Blaise.

Le principe d'une valeur dégressive de l'indice selon le contexte morphologique est proposé pour cartographier l'ensemble de la zone. Ceci paraît cohérent compte tenu de la taille réduite des classes d'indices 3 et 2 (un facteur 10 pour chacune).

On retiendra donc pour la perméabilité des vallées secondaires un indice de 3 et pour celle des plateaux un indice de 2.

Dans le détail, la délimitation des vallées secondaires a été effectuée sur la base de la présence d'alluvions en fond de vallée, en prenant en compte une zone tampon de 20 m.

La carte présentant les classes retenues pour le paramètre « perméabilité » est présentée en Figure 76.

Champs captants de Montreuil et Vert-en-Drouais (28)
 délimitation des bassins d'alimentation de captages et des zones vulnérables

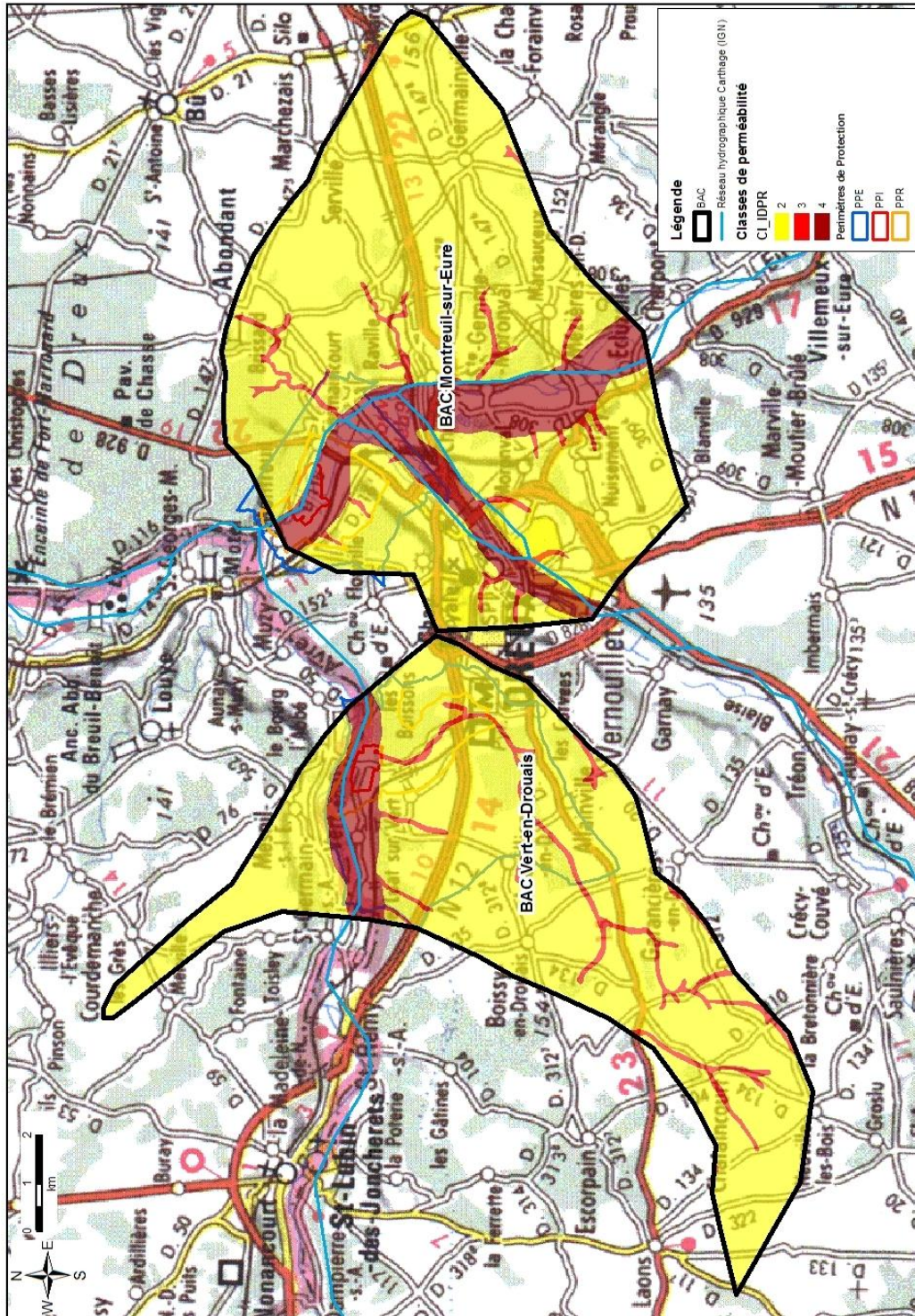


Figure 76 – Caractérisation du paramètre perméabilité sur les BAC de Montreuil et de Vert-en-Drouais

6.3. CARTOGRAPHIE DE LA VULNERABILITE SUR LES BAC

La vulnérabilité est calculée par le biais d'une somme pondérée des cinq paramètres caractérisés précédemment :

$$\text{Vulnérabilité} = 0,1 P + 0,25 S + 0,3 I + 0,2 H + 0,15 K$$

Cette somme pondérée est appliquée sur l'ensemble du territoire en dehors des zones alluviales (ZA) pour lesquelles le poids du paramètre IDPR est mis à 0. Le poids des autres paramètres est réajusté de façon proportionnelle afin que la somme des poids soit égale à 1. Dans ces zones, l'équation devient donc :

$$\text{Vulnérabilité(ZA)} = 0,14 P + 0,36 S + 0,29 H + 0,21 K$$

La carte obtenue est présentée par classes de vulnérabilité en Figure 77 et par classes de valeurs en Figure 78. Ces cartes font apparaître une vulnérabilité importante des eaux souterraines dans les fonds de vallée mais aussi, bien que généralement dans une moindre mesure, au niveau des plateaux qui dominent les fonds de vallée, notamment dans la zone comprise entre l'Avre et l'Eure. Les thalwegs apparaissent en vulnérabilité plus importante par rapport aux terrains les environnants, compte tenu de la bonne perméabilité de la craie dans ces zones.

La partie Est du BAC de Montreuil présente une vulnérabilité moindre compte tenu de la nature moins infiltrante des formations géologiques rencontrées.

Concernant le BAC de Vert-en-Drouais, il convient de garder à l'esprit que l'essentiel de l'alimentation des eaux souterraines se fait au niveau des plateaux, comme le montrent notamment l'absence de réactivité forte de l'Avre et de la Blaise (cf. hydrogrammes) et le sens d'écoulement de la nappe de la craie (cf. cartes piézométriques).

Enfin, on rappelle que cette vulnérabilité s'applique aux eaux souterraines captées par les ouvrages d'eau potable. Une cartographie de la vulnérabilité des eaux de surface serait toute autre.

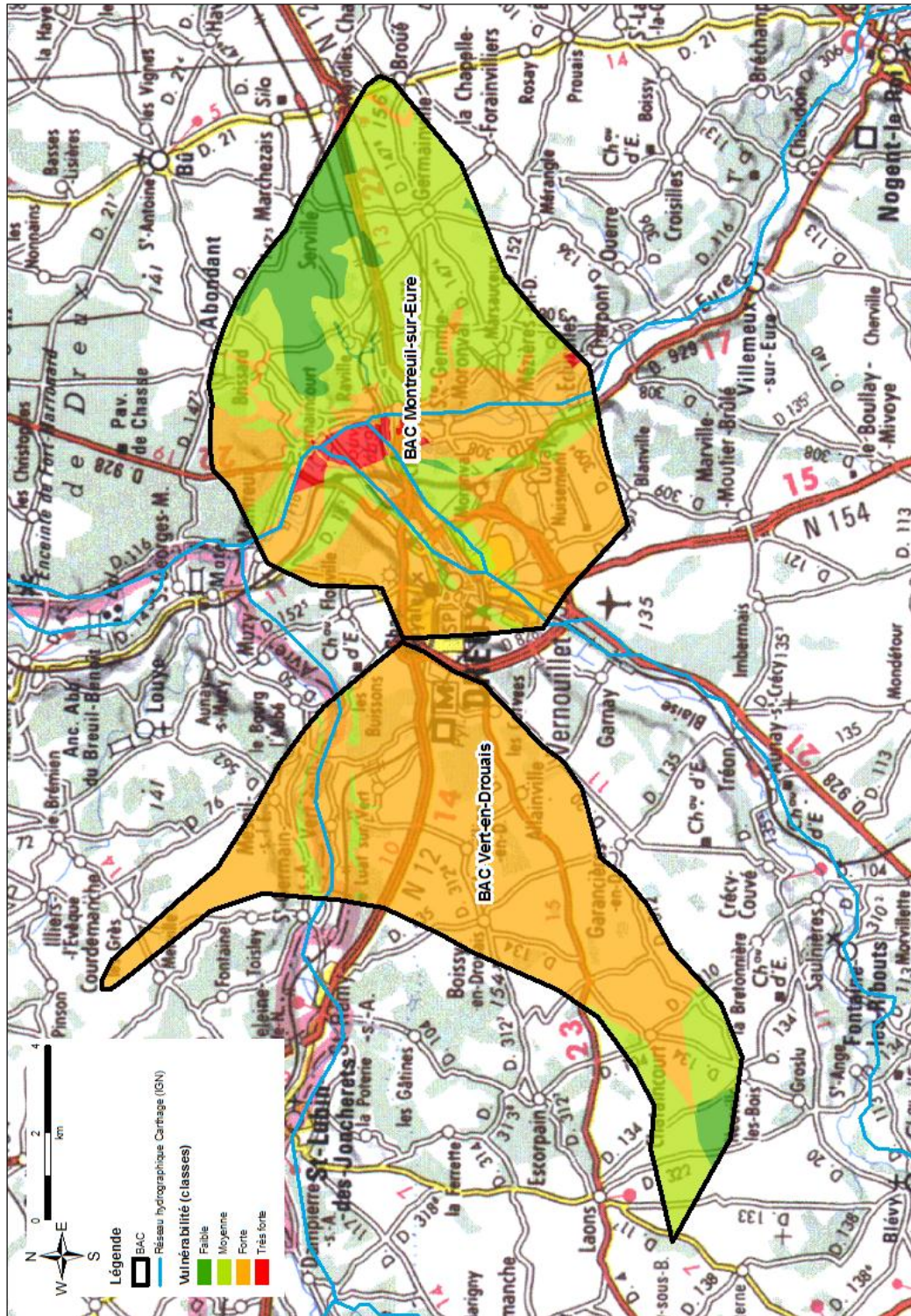


Figure 77 – Vulnérabilité des eaux souterraines captées par les captages de Montreuil et de Vert-en-Drouais (présentation par classes)

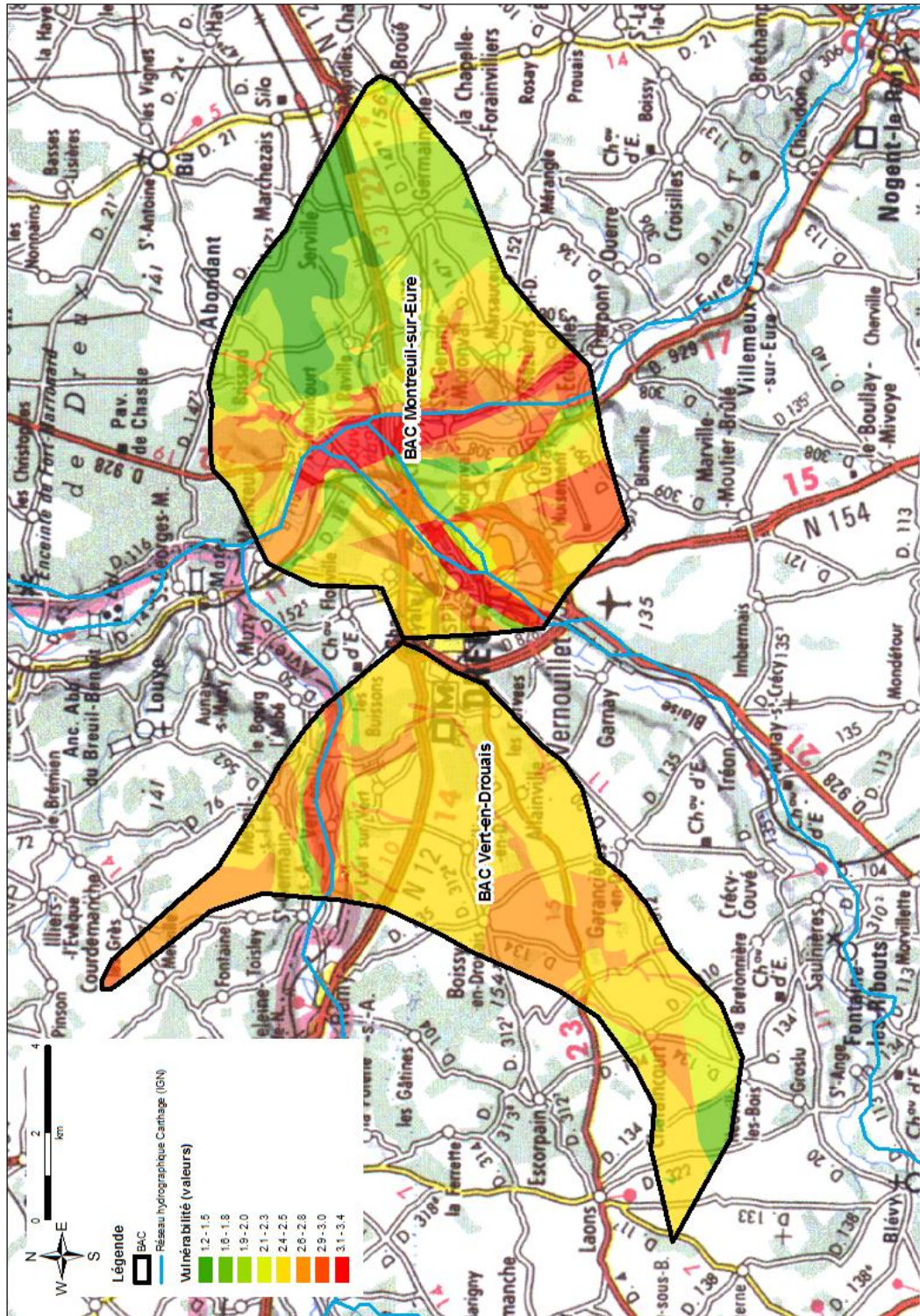


Figure 78 – Vulnérabilité des eaux souterraines captées par les captages de Montreuil et de Vert-en-Drouais (présentation par valeurs)

7. Conclusion

Les résultats de l'étude hydrogéologique, de l'étude géochimique et de la modélisation ont permis d'évaluer pour chaque champ captant la part d'alimentation par la nappe alluviale et par la nappe de la craie, de définir le bassin d'alimentation des captages et d'établir une cartographie de la vulnérabilité intrinsèque de la nappe de la craie à l'intérieur de chacun des bassins d'alimentation de captages.

L'étude hydrogéologique, la modélisation globale (avec GARDENIA) et la modélisation hydrodynamique (avec le modèle maillé MARTHE) sont concordantes avec l'étude géochimique : les deux champs captant ont un comportement sensiblement différent en terme d'alimentation. Le champ captant de Vert-en-Drouais est majoritairement alimenté par de l'eau souterraine provenant de la nappe de la craie (80 à 90 %) tandis que le champ captant de Montreuil est majoritairement alimenté par de l'eau provenant du cours d'eau et de la nappe alluviale, elle-même en continuité hydraulique avec la nappe de la craie. Par ailleurs, la modélisation maillée a permis de mettre en évidence pour le champ captant de Vert-en-Drouais une contribution de la nappe de la craie en rive gauche de l'Avre, cette contribution étant toutefois nettement moins importante qu'en rive droite. La délimitation des deux bassins d'alimentation de captage a donc été réalisée selon des approches différentes : pour le champ captant de Vert-en-Drouais, nous avons pris en compte exclusivement les écoulements souterrains principaux délimités par des dômes et des lignes de crête piézométriques. Pour le champ captant de Montreuil, nous avons pris en compte à la fois les écoulements superficiels et souterrains sur la base d'une bonne concordance entre bassin versant de surface et bassin versant souterrain. Pour éviter de prendre en compte l'ensemble du bassin versant de l'Eure, nous avons opté pour une délimitation arbitraire en amont à partir des deux dômes piézométriques situés en rive gauche et en rive droite de l'Eure. Sur un plan méthodologique, cette étude confirme l'intérêt d'utiliser plusieurs outils complémentaires pour des captages situés en vallée alluviale.

Pour la cartographie de la vulnérabilité, nous avons appliqué la méthode proposée pour les milieux continus, qui nous paraît le mieux convenir aux caractéristiques hydrogéologiques de la zone d'étude. Cette méthode prend en compte la pluie efficace, la nature, l'épaisseur et la pierrosité du sol, la capacité d'infiltration des formations géologiques de la zone non saturée, l'épaisseur de la zone non saturée et la perméabilité de l'aquifère. Ces paramètres ont été évalués à partir des données existantes et des cartes piézométriques réalisées dans le cadre de l'étude. Les données utilisées apparaissent suffisantes pour classer les différents paramètres, à l'exception des données de sol qui sont issues de la carte pédologique au millionième. Pour déterminer la capacité d'infiltration dans la zone non saturée, l'IDPR (Indice de Développement et de Persistance des Réseaux) a été prise en compte sur l'ensemble du bassin à l'exception des zones alluviales, pour lesquelles il s'avère mal adapté.

Le critère sol s'avère peu discriminant, en particulier pour le BAC de Vert-en-Drouais, et combiné à une capacité d'infiltration importante sur les plateaux crayeux, cela conduit à une vulnérabilité forte pour la majeure partie du BAC à l'exception des

coteaux de la vallée de l'Avre et de la partie amont du bassin. Le paramètre sol nécessiterait d'être amélioré par une campagne d'échantillonnage de sols. Pour le BAC de Montreuil, la carte montre des zones peu vulnérables à l'est du bassin liées à la présence de formations tertiaires surmontant la craie. Il faut noter pour ce BAC que la vulnérabilité s'applique à la nappe de la craie alors que celle-ci ne concerne qu'une faible part de l'alimentation des captages. Il pourrait être intéressant de produire une carte de vulnérabilité vis-à-vis des eaux de surface basée, naturellement sur d'autres critères que la carte actuelle, par exemple le ruissellement de surface et de sub-surface, le fonctionnement hydrique des sols, le drainage agricole.

Ces cartes de vulnérabilité, une fois combinées au diagnostic des pressions agricoles permettront d'élaborer des cartes de sensibilité pour la mise en œuvre de plans d'action de lutte contre les pollutions diffuses. Les caractéristiques hydrogéologiques du site de Vert-en-Drouais laissent à penser que le délai entre la mise en œuvre effective des plans d'actions et une baisse significative des nitrates au droit des captages sera important (plusieurs années voire dizaines d'années). Par contre le fait d'avoir bien circonscrit le BAC fait que l'efficacité des actions devrait être réelle à la condition que les actions soient conduites de façon pérenne. A l'inverse pour des actions entreprises sur le BAC de Montreuil, le délai devrait être plus rapide mais avec une efficacité moindre. Pour une efficacité totale, il faudrait prendre en compte l'ensemble du bassin versant de l'Eure en amont des captages.

8. Bibliographie

ADES (2007) – Portail national d'accès aux données sur les eaux souterraines. Accessible sur ades.eaufrance.fr

Albouy L., Bavouzet F., Debrand-Passard S., Giot D., Maget P., Studer H., Ravot N. : Contribution à la recherche de sites pour l'implantation d'un centre de stockage de déchets ultimes stabilisés -CSDUS- en région Centre. Cartographie des zones géologiques potentiellement favorables (Rapport BRGM/RR-38233-FR, 1994)

Archambault Conseil (2001) – Diagnostic du champ captant de Montreuil (28)

Asfirane F., Wuilleumier A., Allier D., Verjus P. (2009) – Bassin Seine Normandie : estimation des volumes disponibles pour les prélèvements. Rapport final. Rapport BRGM/RP-56690-FR. 467 pages, 393 illustrations, 15 tableaux, 3 annexes

Bau M., Dulki P. (1996) – Anthropogenic origin of positive gadolinium anomalies in river waters. *Earth and Planetary Science Letters*, 143, 245-255.

Berner E.K., Berner R.A. (1987) - *The Global water cycle*. Geochemistry and environment- Prentice-Hall. 397 p.

BET SOGETI (1990) – Champ captant de Montreuil. Recensement et évaluation des risques de pollution. Rapport référencé MONTR199001 à EAUDEPARIS.

BET SOGETI (1990) – Champ captant de Vert-en-Drouais. Recensement et évaluation des risques de pollution.

Bouchut J., Giot D., Vincent M., avec la collaboration de Leprêtre JP., Demelemestre F. (2003) – Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des argiles dans le département d'Eure-et-Loir. Rapport BRGM/RP-52519-FR. 129 p., 16 fig., 13 tab., 5 ann., 3 cartes h.-t..

Brenot A., Baran N., Petelet-Giraud E. *et al.* (2008) - Interaction between different water bodies in a small catchment in the Paris basin (Bréville, France): Tracing of multiple Sr sources through Sr isotopes coupled with Mg/Sr and Ca/Sr ratio. *Applied Geochemistry* 23, 58-75.

Callier L., Martin J-C. (2004) – Réflexions sur les origines possibles des pollutions constatées dans le champ captant de Montreuil au nord de Dreux (28) exploité par la SAGEP – BRGM/RP-53219-FR, 17 p., bibliographie.

EAUDEPARIS (2008) – Carnet de tournée – Région Drouaise. Révision 1.

Equibey E., Normand M., Schomburgk S. (2004) – Atlas hydrogéologique numérique de l'Eure. Volet bilan quantitatif de l'aquifère de la craie. Rapport BRGM/RP-52988-FR, 148 p., 44 fig., 17 tab., 3 ann.

Gaillardet J., Dupre B., Allegre C.J. (1997).- Chemical and physical denudation in the Amazon river basin. *Chemical Geology* 142, 141-173.

Gaillardet J., Dupre B., Louvat P. *et al.* (1999).- Global silicate weathering and CO₂ consumption rates deduced from the chemistry of large rivers. *Chemical Geology* 159, 3-30.

Gourcy L., Winckel A., Baran N. *et al* (2007) - Impact sur la qualité de la ressource en eaux souterraines du surstockage dans la plaine alluviale de la Bassée. Rapport intermédiaire. Rapport BRGM/RP-55918-FR, 55p, 96 ill., 3 ann.

Haskin L.A., Haskin M.A., Frey F.A., Wideman T.R. (1968) - Relative and absolute terrestrial abundances of the rare earths. Origin and distribution of the elements, *Internat. Ser. Monog. Earth Sci.* 30, 889–912.

IAEA (2006) - Use of Chlorofluorocarbons in hydrology: A guidebook. STI/PUB 1238, IAEA, Vienna. 277p.

IAEA/WMO (2005) - Global Network of Isotopes in Precipitation. The GNIP Database. <http://isohis.iaea.org>.

Journé V. (2003) – Transfert de solvants chlorés dans le bassin versant de l'Eure : conséquences sur le champ captant de Montreuil. Mémoire de DEA « Hydrogéologie, Hydrologie, Géostatistique et Géochimie », Faculté des sciences d'Orsay.

Kloppmann W., Dever L., Edmunds W.M. (1998) - Residence time of Chalk groundwaters in the Paris Basin and the North German Basin: a geochemical approach. *Applied Geochemistry*, 13:593-606.

Koepnick R.B., Burke W.H., Denison R.E. *et al.* (1985) - Construction of the seawater ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr curve for the Cenozoic and Cretaceous: Supporting data. *Chemical Geology* 58:55-81.

Koepnick R.B., Denison R.E., Burke W.H. *et al.* (1990) - Construction of the Triassic and Jurassic portion of the Phanerozoic curve of seawater ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr. *Chemical Geology* 80, 327-349.

Kuntz G., Dewolf Y., de la Querriere P., Lavergne D., Bock C. et Verron G. (1977) – Notice explicative, Carte géol. France (1/50000), feuille de Saint-André-de-l'Eure (180). Orléans : BRGM, 44 p. Carte géologique par DEWOLF Y *et al.* (1977)

Laignel B. : Les altérites à silex de l'ouest du bassin de Paris. Caractérisation lithologique, genèse et utilisation potentielle comme granulats (Thèse, document BRGM n°264, 1997)

Martin J.C., Moulin M., Noel Y., Viriot D., Seguin J.J. : Vulnérabilité intrinsèque des aquifères et des zones humides de la région Centre. Départements du Loir-et-Cher, de l'Indre, du Loiret et de l'Eure-et-Loir. (Rapport BRGM/RP-54150-FR, 2005)

Mégnyen C. (1979) – Hydrogéologie du centre du bassin de Paris. Mém. BRGM n°98, 456 p

Menillet F., avec la collaboration de Duguey E., Frobert L., Havlicek P., Isambert M., Monciardini C, Maget P., Pierret A. (1994) — Notice explicative, Carte géol. France (1/50000), feuille de Dreux (216). Orléans : BRGM, 67 p. Carte géologique par F. Menillet et al. (1994).

Meybeck M. (1986) - Composition chimique des ruisseaux non pollués de France. Sciences Geologiques Bulletin 39:3-77.

Négrel P., Allegre C.J., Dupré B. et al. (1993) - Erosion sources determined by inversion of major and trace element ratios in river water: The Congo case. Earth Planetary Science Letters, 120:59-76.

Négrel P., Petelet-Giraud E. (2005) - Strontium isotopes as tracers of groundwater-induced floods: the Somme case study (France). Journal of Hydrology 305:99-119.

Négrel P; Guerrot C., Millot R., (2008) – Chemical and strontium isotope characterization of rainwater in France: influence of sources and hydrogeochemical implications. Isotopes in Environmental and Health Studies 43(3), 179-196.

Pinault J-L., Allier D., Verjus P. (2006) - Bassin Seine Normandie : estimation des volumes disponibles aux prélèvements de 45 petits bassins versants. Rapport final. Rapport BRGM/RP-55232-FR, 98 p.

Quesnel F. : Cartographie numérique en géologie de surface. Application aux altérites à silex de l'ouest du bassin de Paris. (Thèse, document BRGM n°263, 1997)

Rabiet M., Brissaud F., Seidel J.L., et al. (2005) – Deciphering the presence of wastewater in a medium-sized Mediterranean catchment using a multitracer approach. Applied Geochemistry, 20, 1587-1596.

SAFEGE (2009) – Etude des bassins d'alimentation des captages de Vernouillet, phase 1 : caractérisation de la ressource, rapport 09DRE015, version n°3, décembre 2009

SAGEP (1990) – Enquête préalable à la déclaration d'utilité publique des périmètres de protection rapproché et éloigné du champ captant de Vert-en-Drouais. Rapport SAGEP Unité Ouest référencé VERT199001

SAGEP (1990) – Enquête préalable à la déclaration d'utilité publique des périmètres de protection rapproché et éloigné du champ captant de Montreuil. Rapport SAGEP Unité Ouest référencé MONTR199002.

Souchet G. (1997) – Le champ captant de Montreuil (Eure-et-Loir). Rapport CRCEP

Suisse C.Y. (2004) – Etude sur les concentrations en nitrates dans la nappe de la craie de la région drouaise. Conséquences sur le champ captant de Montreuil. Rapport de fin d'études de DEUST « Biologie Santé Environnement », option praticien de l'eau. Rapport référencé MONTR200401 à EAUDEPARIS.

Vernoux J.F., Wuilleumier A., Dörfliger N. (2007) - Délimitation des bassins d'alimentation des captages et de leur vulnérabilité vis-à-vis des pollutions diffuses. Guide méthodologique, rapport BRGM/RP-55874-FR, 75 pages, 14 illustrations

Vernoux J.F., Wuilleumier A., Dörfliger N. (2008) - Délimitation des bassins d'alimentation des captages et de leur vulnérabilité vis-à-vis des pollutions diffuses.

Application du guide méthodologique sur des bassins test, BRGM/RP-55875-FR, 174 pages, 112 illustrations, 6 annexes

Vernoux J.F., Wuilleumier A., Seguin J.J., Dörfliger N. (2007) - Méthodologie de délimitation des bassins d'alimentation des captages et de leur vulnérabilité vis-à-vis des pollutions diffuses. Rapport intermédiaire : synthèse bibliographique et analyse des études réalisées sur le bassin Seine-Normandie, rapport BRGM/RP-55332-FR, 121 pages, 123 illustrations, 8 annexes

ANNEXE 1

Formation résiduelle à silex : description du faciès du Drouais

(source : thèse de Florence Quesnel (1997), pp. 166-172)

I - 2 Faciès Drouais

Extension géographique et géologique - type de substrat

Ce faciès se localise sur les plateaux autour de Dreux (Fig. IV - 1), de part et d'autre de l'Eure et à l'est de la Plaine de St-André. Leur altitude moyenne est de 130 à 140m, et leur modelé est très plan, en dehors de l'incision par le réseau hydrographique. Le faciès Drouais est séparé au SW du faciès Thimerais par un **talus morphologique** (Fig. III - 1 et 2), composé d'une partie rectiligne orientée NW-SE, prolongée au nord par une partie plus arrondie s'orientant vers l'est. Les RS du faciès Drouais passent vers l'est aux RS de faciès Lozère, sans limite morphologique nette.

Plus à l'est encore, les RS disparaissent pour laisser affleurer les **Sables de Fontainebleau**, d'âge rupélien supérieur (Fig. II - 4). La limite d'affleurement de ces sables marins est ici une limite d'érosion. Ils sont préservés sur 20 à 40m d'épaisseur sur les feuilles de Nogent-le-Roi (MENILLET et CRAHET, 1971) et de Chartres (MENILLET et VERMEIRE, 1971), où se repère même leur paléorivage (cordon de galets) contre quelques dépôts continentaux éocènes. Généralement la base des Sables de Fontainebleau y débute par un lit de silex émoussés à roulés, rarement corrodés, parfois verdis, sur quelques décimètres à 1m. Il repose directement sur la craie non altérée ni durcie par l'intermédiaire d'une surface rigoureusement plane. Il s'agit d'une **plate-forme d'abrasion marine** sur laquelle ont été décapées les formations éocènes antérieures.

Le substrat des RS du faciès-type Drouais est constitué par des **craies à silex** datées du Turonien supérieur au Campanien inférieur à moyen (Fig. II - 3), avec un **pendage général vers l'est, peut-être plus accusé au droit du talus morphologique** évoqué ci-dessus (MONCIARDINI, 1989).

Les affleurements rendant compte des RS appartenant au faciès-type Drouais (Fig. II - 6) sont très superficiels (tranchées de 2m au plus). Il s'agit de Damville, Charpont, Bois des Petits-Ereux, Orval, Forêt de Dreux, Route des Christopes, Maintenon (Annexe 1). Les travaux résultant du lever de la feuille Dreux (MENILLET *et al*, 1994) les complètent, ainsi qu'une coupe levée aux environs d'Auneau dans le poudingue de base des Sables de Fontainebleau.

Géométrie des altérites à silex - morphologie du toit de la craie

Les RS du Drouais sont **peu épaisses** (Fig. III - 16 et 17), 5m en moyenne, jusqu'à 10 à 15m ou plus au droit des poches karstiques. Les vallées incisant les plateaux font largement apparaître la craie sur les versants. Les épaisseurs de RS diminuent vers l'est pour atteindre 2m au plus à l'est de l'Eure. La couverture de RS y devient discontinue et finit par disparaître sous les Sables de Fontainebleau (Fig. IV - 8). Il existe une petite zone plus épaisse au SE d'Evreux, où les sondages ont vraisemblablement traversé des poches karstiques plus nombreuses (Annexe 3).

Le toit de la craie est rugueux dans le Drouais en général et dans cette zone en particulier (Fig. III - 31). Les variogrammes présentent un effet de pépité significatif (Fig. III - 14 et 22), montrant là-aussi les **irrégularités locales au toit de la craie dues à la karstification**.

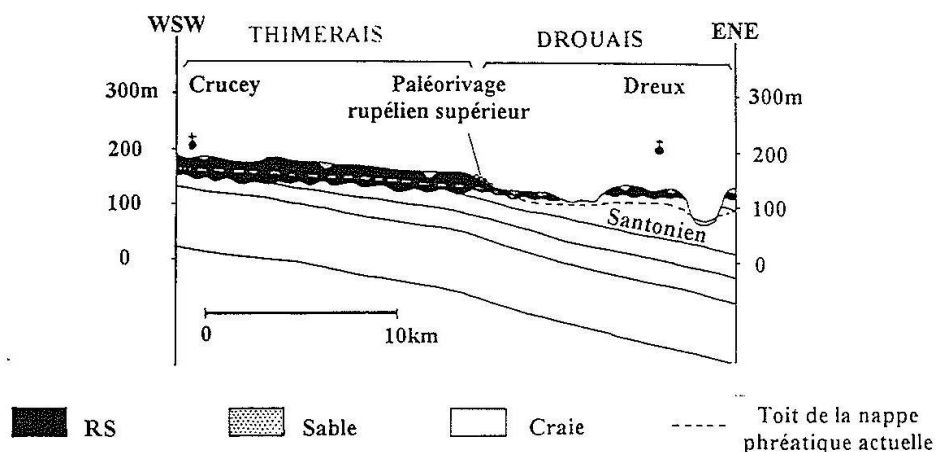


Figure IV - 8 : Coupe synthétique à travers les RS du faciès Drouais

Contenu lithologique et organisation du profil d'altération

- Couleur, granulométrie et minéralogie des matrices

La teinte de la matrice des RS est généralement brun-rouge (2.5 YR 4/4 à 4/6 Munsell), de plus en plus brune vers l'est. Le contact avec la craie se fait toujours par un liseré argileux brun foncé à noir. Les couleurs sont plus ocre à proximité des poches de sable.

La granulométrie des matrices est à dominante argileuse, plus limoneuse au sommet des profils, et plus sableuse en se rapprochant des poches de sables.

Dans la fraction argileuse, **les interstratifiés irréguliers et les smectites dominent**, le reste étant constitué de kaolinite et d'un peu d'illite (DOUILLET *et al*, 1967).

- Teneur, taille, couleur, traces d'oxydation et état d'altération des silex

Les teneurs en silex sont relativement homogènes et proches de 50% sur toute l'épaisseur des profils de RS du Drouais. Les teintes habituelles vont du gris plus ou moins foncé au noir, jamais ocre ni miel, et sans **aucune trace d'oxydation**. Ils ne sont **quasiment pas altérés** : ils paraissent bien souvent aussi frais que ceux de la craie. Leur cortex est peu épais (0 à 1cm) et n'est jamais un cortex d'altération.

Formations cénozoïques résiduelles : amas de galets, poches de sable, grésifications

Elles se présentent sous des faciès différents de ceux du Thimerais. Il s'agit en Drouais d'amas de galets, plus ou moins indurés et de poches de sable, les poches d'argile plastique étant absentes.

B. LAIGNEL (1997) n'a pas malheureusement pas quantifié les apports allochtones de matrice pour ce faciès, mais considérant ses teneurs en silex, celles des craies-mères, ainsi que ses ressemblances avec les autres faciès, on peut évaluer les apports allochtones à environ 30% +/- 10%.

Le lever de la feuille Dreux (MENILLET *et al*, 1994) a permis de découvrir au sommet des RS du Drouais **plusieurs amas de galets de silex jalonnant le pied du talus morphologique** évoqué ci-dessus. Cette ligne de galets, dont certains étaient déjà signalés (DOLLFUS, 1901 ; DENIZOT, 1927 ; FURON, 1934 ; ALIMEN, 1936 ; KLEIN, 1974), se poursuit au nord sur les feuilles de St-André-de-l'Eure (DEWOLF *et al*, 1977), Breteuil-sur-Iton (KUNTZ *et al*, 1982), et Beaumont-le-Roger (KUNTZ *et al*, 1981). Peu visibles à l'est vers Nogent-le-Roi (MENILLET et CRAHET, 1971 ; KLEIN, 1974), ces amas de galets réapparaissent en rive gauche de la vallée de la Voise (MENILLET et VERMEIRE, 1971).

Les galets qui composent ces différents amas résiduels sont presque exclusivement constitués de silex, à l'exception de rares éléments de grès semblables aux ladères (Fig. IV - 4). Leur émoussé est variable, mais atteint souvent un stade évolué, voisin de celui atteint par les galets marins des platiers actuels de la Manche. Il est d'ailleurs assez surprenant de trouver de tels galets, qu'on dirait transportés depuis les plages de Dieppe ou d'Étretat, accumulés sur plusieurs hectares dans les champs, en différents endroits distants entre eux de 5 à 20km, à plus de 100km du rivage actuel de la Manche.

Les silex sont le plus souvent sans cortex et la plupart d'entre eux sont peu altérés ou parfois faiblement cacholonisés. Certains sont toutefois peu usés, rubéfiés et présentent une surface parsemée d'alvéoles de corrosion (LEMAITRE, 1959 ; CAVELIER et DEWOLF, 1967) semblable à celle des silex des RS du Thimerais. **Ce cordon littoral remanie donc des paléo-altérites à silex paléogènes et des grès ladères dont l'âge est attribué à l'Eocène moyen.**

Attribué au Stampien (= Rupélien) par DOLLFUS (1901), puis plus précisément au Stampien supérieur terminal par ALIMEN (1936) qui, à l'instar de DENIZOT (1927) reconnaissait son caractère littoral, **l'âge rupélien supérieur terminal de ce cordon de galets a été argumenté par la découverte des conglomérats fossilifères de Damville** (LEMAITRE, 1959, CAVELIER et DEWOLF, 1967). La faune étudiée est constituée de gastéropodes marins, supportant des eaux saumâtres et semblable à celle du niveau d'Ormoy.

Ce cordon littoral est le plus souvent non induré, les galets étant emballés dans une matrice argileuse dérivée des altérites sous-jacentes. On observe toutefois certains conglomérats, notamment ceux fossilifères des environs de Damville, où ces galets sont consolidés dans une matrice quartzeuse grésifiée (Fig. IV - 4). La porosité de cette matrice gréseuse est relativement élevée, suggérant une dissolution du ciment calcitique initial. Ces amas de galets consolidés ne sont en rien comparables aux perrons ou aux grès ladères dont la porosité est très faible. Ces conglomérats ne présentent aucune coiffe siliceuse, aucune figure d'illuviation, aucun débit colonnaire, aucune matrice quartzitique. Il ne s'agit donc pas de silicification pédologique, mais d'un autre type de grésification.

Les poches de sable sont assez courantes au sommet des RS en Drouais. L'affleurement des Petits-Ereux en fournit un exemple, où l'on constate néanmoins la petite dimension des poches. Au sud de Nonancourt, le seul affleurement conséquent (en superficie) de ces sables avoisine le cordon de galets et s'aligne au pied du talus. Au NE et en contrebas de ce dernier, les sables cénozoïques des poches sont presque exclusivement formés de quartz (grain moyen généralement inférieur à 160 μ m) et présentent un **faciès "Fontainebleau"** bien trié, différent des Sables du Thimerais. Vers l'est, sur les feuilles de Chartres ou de Nogent-le-Roi, ils restent résiduels et peu épais jusqu'à la vallée de l'Eure. Puis ils forment des affleurements plus étendus au NE de la rivière et s'épaississent vers le centre du bassin (30 à 40m en forêt de Rambouillet), où ils sont coiffés d'un résidu à meulière qui les a protégé de l'érosion. Du point de vue sédimentologique et stratigraphique, il est légitime de corréler les Sables de Fontainebleau au cordon résiduel et fossilifère de galets installé le long du talus morphologique séparant Drouais et Thimerais. Ce dernier marque en fait le littoral de la mer du Rupélien supérieur, repoussant vers l'ouest la limite réelle (c'est-à-dire au moment du dépôt) des Sables de Fontainebleau. **Les plateaux situés au NE de ce paléorivage rupélien résiduel constituent donc les vestiges de la plate-forme d'abrasion marine initialement façonnée à la base des Sables de Fontainebleau, et aujourd'hui exhumée après l'érosion mécanique quasi-totale des sables.**

Calages biostratigraphiques des silex creux au sommet et le long des profils de RS

Les échantillons de silex creux destinés aux analyses micropaléontologiques ont été prélevés dans divers contextes :

- au sommet des RS brun-rouge de faciès Drouais, depuis l'amont près du paléorivage rupélien, vers l'aval près de la zone d'affleurement des Sables de Fontainebleau ;
- dans des silex creux du RS au contact avec une poche de Sables de Fontainebleau ;
- dans des silex creux de paléo-RS appartenant à un bloc consolidé du pouédingue fossilifère marquant le paléorivage rupélien à Damville.

Les attributions biostratigraphiques au Campanien inférieur-moyen à supérieur à l'amont et Campanien élevé à Maastrichtien basal à l'aval, montrent que **le pendage des craies est respecté dans les RS du Drouais**. La présence de silex creux du Campanien moyen à supérieur dans le RS au contact avec la poche de Sables de Fontainebleau concorde avec sa position médiane entre les affleurements précédents. Enfin le silex creux issu des paléo-RS

remaniées dans le conglomérat de Damville s'est formé dans l'intervalle Campanien supérieur à Maastrichtien basal. Cet âge est similaire à ceux obtenus au sommet des RS paléogènes des affleurements les plus proches du Thimerais. L'âge campanien inférieur à moyen des silex creux prélevés en Drouais contre le paléo-littoral est donc plus vieux que celui des paléo-RS. **Ce fait confirme l'érosion des paléo-RS en Drouais sur la plate-forme d'abrasion marine, et la reprise postérieure de l'altération de craies plus anciennes mises à l'affleurement sur cette surface d'érosion.**

Interprétation en termes d'âge, d'évolution et de paléosurface continentale

Après l'émersion fini-crétacée, une première génération paléogène d'altérites à silex s'élabore en milieu continental dans le Drouais, semblables et en continuité avec celles du Thimerais (Fig. IV - 9). Les seuls témoins de ces paléo-RS sont les silex corrodés et ferruginisés et les grès ladères repris dans le cordon littoral séparant Drouais et Thimerais. **Ces paléo-altérites étaient vraisemblablement moins épaisses en Drouais qu'en Thimerais, pour des raisons d'intensité de drainage vertical moins accusée à l'aval, où le niveau de base était peu encaissé et les aires de sédimentation continentale proches.** On peut donc estimer qu'environ 10 à 15 m de RS se sont élaborées en Thimerais, ce qui équivaut à la dissolution du Maastrichtien inférieur et du Campanien, et que le profil s'amenuisait doucement vers le Drouais. Les épaisseurs de RS ne devaient pas y excéder 2 à 4m, ce qui correspond à la dissolution de tout le Maastrichtien inférieur et du sommet du Campanien.

Au Rupélien supérieur, une transgression marine vient envahir le Drouais depuis le NE et y déblaie la couverture d'altérites préexistante jusqu'au substrat rocheux (plate-forme d'abrasion marine). Elle dépose sur la craie du Campanien un pavage de galets de silex issus du démantèlement des RS antérieures et des craies mises à nu, puis les Sables de Fontainebleau. Le rivage est limité au SW par un cordon de galets repris des RS et installé sur un talus d'origine structurale possible (cf. Chap. V - 2). Au SW de ce cordon (Thimerais), le manteau d'altérites à silex continue à se former aux dépens des craies sous-jacentes. Au NE du cordon (Drouais), aux Sables de Fontainebleau succède le dépôt de calcaires lacustres miocènes (Calcaire de Beauce).

Au Plio-Pléistocène inférieur, une Pré-Eure se met en place en Drouais, retouchant ainsi la surface sommitale des Sables de Fontainebleau. Tandis qu'à l'est se forment les Argiles à meulières aux dépens des calcaires lacustres (MENILLET, 1993), l'altération du massif crayeux se poursuit en Thimerais. En Drouais, l'altération des craies sénoniennes ne peut reprendre, sous couverture sableuse, qu'une fois le niveau de base suffisamment enfoncé dans le substrat. Une deuxième génération d'altérites à silex, celles qui affleurent actuellement au sommet des plateaux, se développe alors en Drouais. Leur géométrie de type karstique et leur lithologie confèrent à ces profils d'altérites un caractère peu évolué. Ceci suggère une hydrolyse plutôt ménagée des craies à silex, et les place dans le domaine géochimique (Fig. IV - 7) de la bisiallisation (PEDRO, 1966, 1978, 1981). Du Pléistocène moyen à l'Holocène, l'Eure s'enfonce doucement en Drouais et déblaie petit à petit les dépôts de Sables de Fontainebleau. Ils sont conservés à l'est, puisque armés contre l'érosion par la coiffe des meulières. En Drouais l'altération se poursuit de manière hétérogène par karstification au sein du massif crayeux et au toit de la craie, lui conférant une rugosité significative.

Les RS du Drouais se sont donc développées après le Rupélien supérieur, vraisemblablement au Plio-Quaternaire, sous la couverture des Sables de Fontainebleau en cours de démantèlement. Elles sont enrichies d'une part allochtone non négligeable, issue des Sables de Fontainebleau. Elles jalonnent une surface qui correspond à la plate-forme d'abrasion marine du Rupélien supérieur, exhumée elle aussi au Plio-Quaternaire. Cette surface n'est pas une paléosurface continentale à l'équilibre, puisqu'elle est largement incisée par le réseau hydrographique. Pour reconstituer l'état actuel de la paléosurface continentale paléogène virtuelle du Drouais, il faut partir de la plate-forme d'abrasion marine rupélienne et lui ajouter l'épaisseur de craies dissoutes correspondant aux paléo-RS décapées (cf. Chap. V - 2).

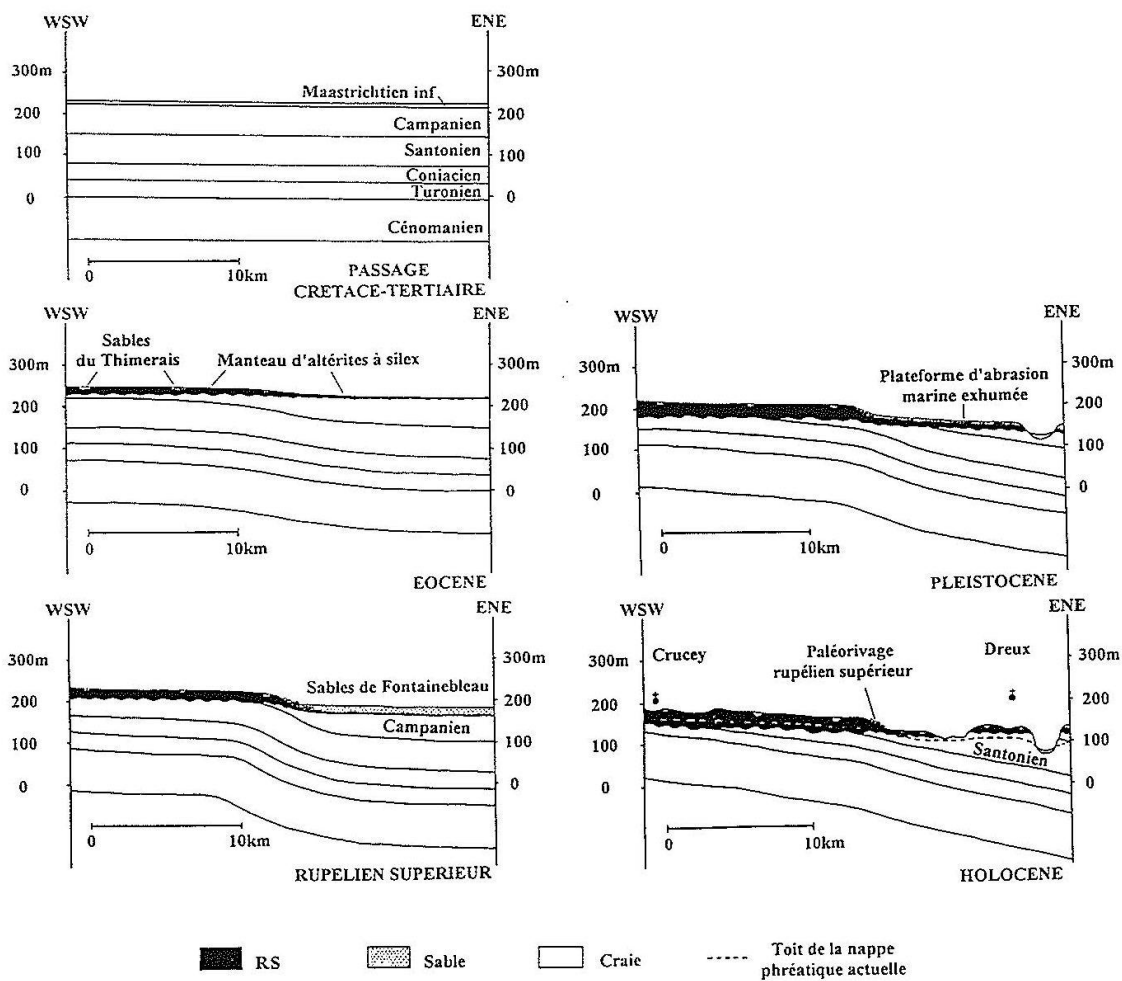


Figure IV - 9 : Evolution schématique des RS et paléo-RS du Drouais

Des poches de sable azoïque de faciès Fontainebleau posent problème en dehors du secteur du Drouais, dans les environs de Brionne, Beaumont-le-Roger, et du Neubourg (BASSOMPIERRE, 1971 ; JUIGNET, 1971 ; KUNTZ *et al*, 1981 ; LAIGNEL, 1993 ; QUESNEL, 1993). Nos observations de terrain et les sondages montrent qu'ils reposent sur des RS de faciès-type Thimerais (Annexes 1 et 3), qui n'ont rien à voir avec les RS récentes du Drouais. De plus, ils sont situés 20 à 40km à l'ouest du littoral du Rupélien supérieur, c'est-à-dire dans un domaine qui était continental au moment du dépôt des Sables de Fontainebleau, et non sur la plate-forme d'abrasion marine rupélienne. Ces poches de sable se situent par ailleurs dans la zone des rides morphologiques (Fig. III - 2 et 3 B) évoquées au Chapitre III - 1.

Tous ces éléments concourent en faveur de l'hypothèse des dunes éoliennes pour expliquer à la fois la présence des rides morphologiques et celle des Sables de Fontainebleau au-delà de leur limite de dépôt. Il semble légitime de supposer qu'ils ont été déplacés par le vent au-delà de leur littoral du Rupélien supérieur à l'intérieur des terres et au sommet de RS préexistantes. La période de ces remaniements éoliens est difficile à préciser : vraisemblablement après le dépôt des sables marins, entre la fin de l'Oligocène et le Quaternaire. Les périodes récentes ont conduit le manteau de RS de ce secteur à s'approfondir par des processus karstiques au toit de la craie, induisant des soutirages des matériaux sus-jacents. Ces derniers se sont répercutés jusqu'au sommet des RS, c'est-à-dire que la couverture sableuse de surface s'est trouvée petit à petit incorporée aux RS, sous forme de poches et d'apport allochtone de matrice dans les RS (*cf.* Thèse B. LAIGNEL).

Cette interprétation (Fig. IV - 10) contredit celle présentée antérieurement (QUESNEL, 1993), qui concluait à un développement des RS postérieur au dépôt des Sables de Fontainebleau sur les feuilles à 1/50 000 de Brionne et Elbeuf. Toutefois elle repose sur de nouveaux arguments qui intègrent une synthèse spatiale plus large. Elle invalide donc la précédente, justifiant au passage la nécessité de travailler à échelle régionale pour mieux envisager le problème des RS.

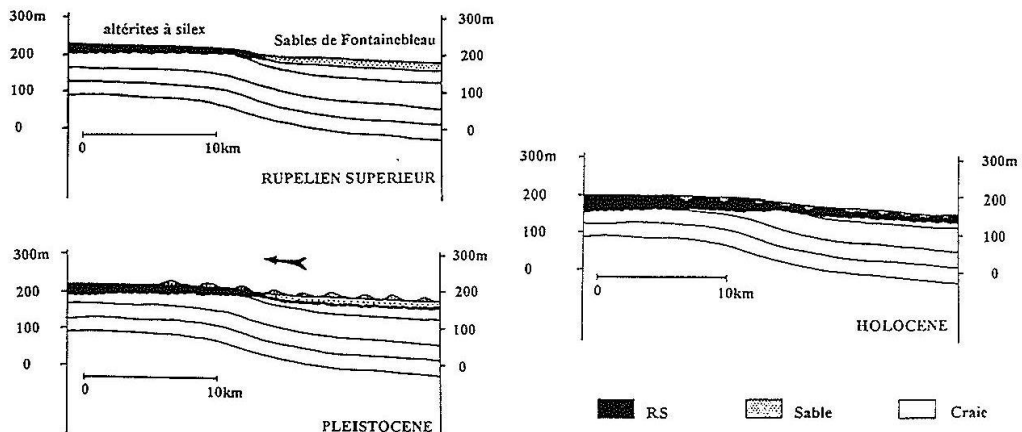


Figure IV - 10 : Evolution schématique des RS des feuilles Brionne et Elbeuf

ANNEXE 2

Vitesses de transfert de l'eau et des nitrates dans le système craie + argile à silex en Normandie

(source : rapport BRGM/RP-57828-FR)

Une étude approfondie a été réalisée par le BRGM en 2008-2009 sur la région Haute-Normandie pour déterminer les stocks de nitrates présents dans la ZNS, identifier les mécanismes d'infiltration de l'eau et des solutés dans la ZNS et à estimer les vitesses de circulation.

Des profils de nitrates par dosage de solides montrent un stock de nitrates important sur toute l'épaisseur de la ZNS (constituée de limons, argile à silex et craie). La vitesse d'infiltration a été estimée à moins d'un mètre par an.

Le profil ci-dessous montre un recouvrement de la craie par 10 m de limons et 15 m d'argile. L'infiltration annuelle calculée est de 160 mm ce qui est du même ordre que dans le secteur de Vert-en-Drouais. Le profil montre des concentrations en nitrates variables dans l'argile à silex, beaucoup plus homogènes dans la craie (entre 40 et 60 mg/l) avec une tendance à la diminution en fonction de la profondeur. Ce profil de teneur en nitrates montre que l'argile à silex n'a aucun effet d'écran protecteur.

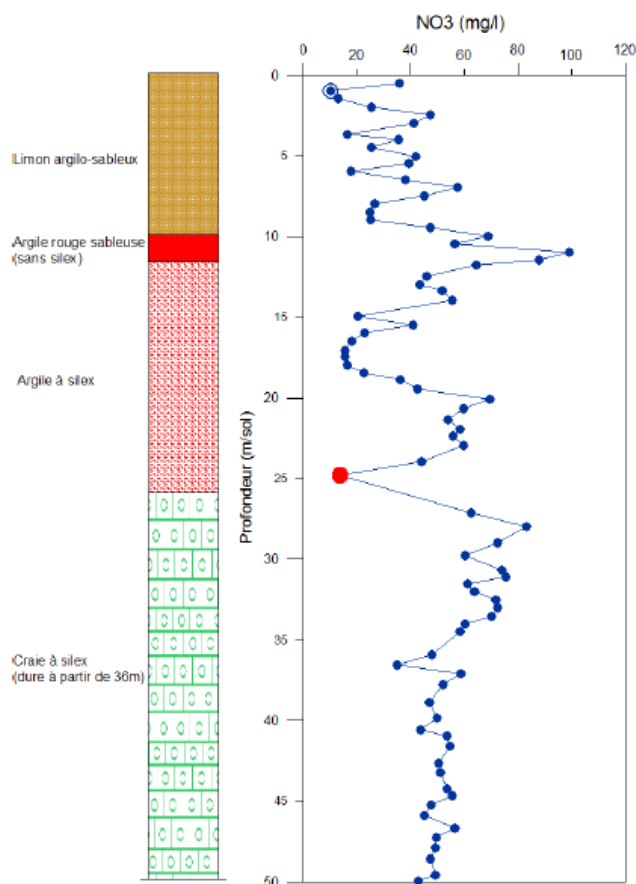
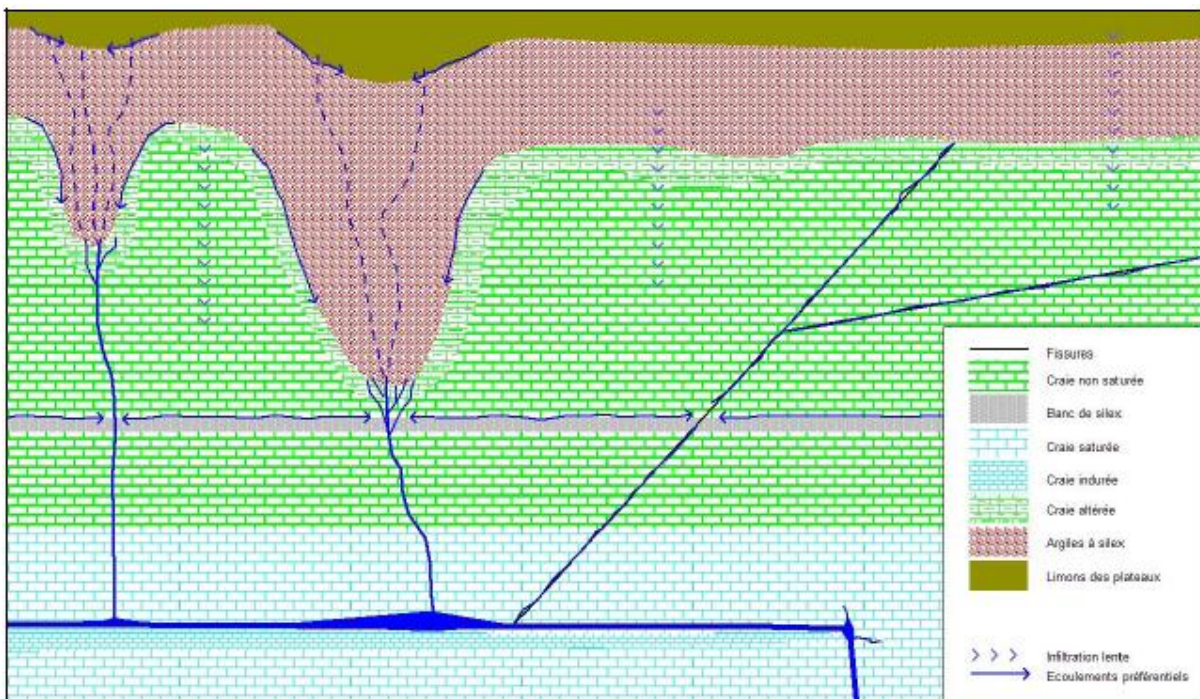


Illustration 32 : Profils des concentrations en nitrates avec report du log géologique simplifié (Goderville)

Un autre élément intéressant est le calcul des vitesses de transfert dans les différents horizons, par différentes approches :

- 0.8 m/an dans les limons
- 0.58 à 0.75 m/an dans les argiles à silex
- 0.58 m/an dans la craie

La craie apparaît comme moins perméable que l'argile à silex,. Le schéma de principe proposé dans l'étude montre que les écoulements verticaux préférentiels se font soit le long de fractures de la craie, soit via les racines d'altération au contact Limons des plateaux / argile à silex et argile à silex / craie (cf. schéma ci-dessous)



Cette étude confirme que l'argile à silex ne doit pas être considérée comme un horizon totalement étanche. L'eau et les nitrates s'infiltrent à travers ce niveau d'argile et à travers la craie, mais avec des vitesses très faibles, qui font que les nitrates pourront se retrouver dans la nappe plusieurs dizaines d'années après avoir été appliqués.

ANNEXE 3

Outils hydrochimiques

Les données physico-chimiques

Les premiers outils utilisés pour essayer de mieux connaître l'origine de l'eau et des sels dissous et les relations entre aquifères et avec les eaux superficielles sont ceux de la géochimie classique. Ils sont utiles pour répondre aux questions suivantes : d'où vient l'eau souterraine ? Quels sont les différents aquifères et interrelations ? Quel est le fonctionnement du système ?

Ainsi, par l'étude des saturations (ou état d'équilibre) des eaux par rapport aux minéraux constitutifs de l'aquifère, on pourra établir l'origine des différents éléments en solution, et voir d'éventuels effets de drainance (ou mélange avec d'autres aquifères et/eaux de surface).

La sélection des analyses prend impérativement en compte les données géologiques, hydrogéologiques avec la nécessité de la connaissance de la chimie du milieu aquatique (eau de surface et eau souterraine) et des différentes phases interagissant avec lui, l'objectif de l'étude étant à terme de comprendre l'origine de l'eau et des sels dissous, son cheminement, son évolution physico-chimique, les mélanges,... Le choix s'est donc porté sur l'ensemble des éléments majeurs dissous (Ca, Mg, Na, K, HCO₃, SO₄, Cl, NO₃) ainsi que la silice (SiO₂). Un grand nombre d'éléments dissous mineurs ou traces a été également analysé afin de renseigner sur les interactions eau-roches et les éventuelles pollutions anthropiques.

Pour interpréter correctement les données recueillies sur la répartition des éléments chimiques dans les eaux, il est nécessaire de connaître leur spéciation, et pour ce faire de posséder la chimie globale de l'eau des différents pôles potentiels d'alimentation, avec en appui des mesures fiables des paramètres physico-chimiques sur le terrain (pH, potentiel redox, alcalinité, température,...). Les paramètres physico-chimiques sont mesurés sur le terrain au moment du prélèvement des eaux souterraines et de surface.

Les analyses physico-chimiques des éléments majeurs dissous sont faites par Eau de Paris.

Les terres rares

Les terres rares (ou lanthanides) sont un ensemble d'éléments chimiques de caractéristiques similaires comprenant Ce, Gd, Sm, Dy, La, Tb, Er, Lu, Tm, Eu, Nd, Y, Ho, Pr, Yb. En l'absence de sources de contamination, les concentrations en terres rares dans les eaux souterraines dépendent des interactions eau-roche et donc de la géologie de l'aquifère. Les terres rares sont de bons traceurs de processus et sources car elles forment un groupe homogène.

L'analyse des terres rares se fait par ICP-MS après un enrichissement nécessaire du fait des faibles concentrations dans les eaux naturelles. Les résultats s'expriment en concentrations (ng.l⁻¹) qui peuvent être comparées à un standard qui est une roche de

composition connue, un schiste d'Amérique du Nord, NASC (Haskin et al., 1968) par exemple. Les valeurs obtenues sont ainsi « normalisées ».

Parmi les terres rares, le gadolinium fait l'objet d'attentions plus particulières du fait que cet élément est un marqueur des apports anthropiques de type eaux usées. En effet le gadolinium est utilisé en médecine pour le traitement de cancers. Le rejet de cet élément dans l'environnement où il se trouve naturellement en très faible quantité se marque par une anomalie positive en gadolinium notée Gd* (Bau et Dulski, 1996) sur le profil normalisé des terres rares.

Les isotopes et gaz dissous

Les analyses isotopiques ($^{16}\text{O}/^{18}\text{O}$, $^2\text{H}/^1\text{H}$, $^{37}\text{Sr}/^{36}\text{Sr}$) et des gaz dissous (CFC, SF_6) ne suivent pas de normes ISO, inexistantes pour ces éléments, mais font l'objet d'un contrôle continu (utilisation de standard internes et participation à des exercices de calibration inter-laboratoires) qui permettent de garantir l'obtention de faibles incertitudes (Tableau 10).

| Analyses isotopiques et de CFC | Méthode | Incertitude |
|---|--|---------------------|
| Rapport $^{16}\text{O}/^{18}\text{O}$ de l'eau | Equilibration avec CO_2 de composition connue | $\pm 0,1 \text{ ‰}$ |
| Rapport $^2\text{H}/^1\text{H}$ de l'eau | Réduction par zinc | $\pm 0,8 \text{ ‰}$ |
| Rapport $^{37}\text{Sr}/^{36}\text{Sr}$ du strontium dissous total dans l'eau | TIMS | $\pm 0,05\%$ |
| CFC113, CFC12, CFC11, SF_6 | Purge and trap et chromatographe en phase gazeuse équipé d'un détecteur à capture d'électron | $\pm 5\%$ |

Tableau 10 : Tableau récapitulatif des méthodes d'analyses d'isotopes et gaz dissous

Toutes les analyses sont effectuées au laboratoire du BRGM à l'exception des analyses des CFC et SF₆ par chromatographie gazeuse (Spurenstofflabor, Allemagne).

• a) Rapport isotopique $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$

Le rapport isotopique du strontium ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) d'une eau est lié à celui du minéral ou des associations minéralogiques avec lequel l'eau a interagi. Les effets de variations du rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ liés à la décroissance radioactive d'un élément père (^{87}Rb) en élément fils (^{87}Sr) ne sont pas significatifs, compte tenu de la courte échelle de temps à laquelle ces processus sont étudiés en géochimie environnementale ainsi que les effets de fractionnements isotopiques liés à la différence de masse qui ne sont pas détectables pour des éléments dont la masse est proche de 80. Les variations du rapport isotopique du strontium dans un hydrosystème donnent ainsi des informations sur l'origine et les proportions de mélange des différents composants naturels (interaction roche-eau) et anthropogéniques.

Lors des phénomènes d'interaction eau-roche, le rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ de la fraction de strontium libéré sera différent de la roche totale et typique du ou des minéraux altérés et ceci en liaison avec la "résistance" des minéraux vis-à-vis de l'agressivité du fluide. Globalement, le strontium solubilisé dans la roche et transporté vers l'extérieur du système formé par la roche est beaucoup moins radiogénique (c'est-à-dire de rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ plus bas) que le strontium dans la roche totale non altérée ; d'autre part, le strontium des argiles résiduelles est beaucoup plus radiogénique. Les variations isotopiques observées dans les fluides peuvent être issues du mélange de Sr de composition isotopique différente provenant de différentes sources. Ainsi, dans le cas simple où deux sources de rapport isotopique ou chimique sont présentes, la composition du mélange peut être déterminée. Les variations du rapport isotopique du strontium dans un hydrosystème donnent ainsi des informations sur (1) l'origine et les proportions de mélange des différents composants fluides ainsi que sur (2) la nature et l'intensité des processus d'interaction roche-eau liés notamment à l'altération et à l'érosion.

Pour l'interprétation des rapports isotopiques une mesure des concentrations des eaux en strontium et rubidium en infratrace (niveaux de quantification très bas) sera effectuée en parallèle.

Le secteur d'étude étant largement cultivée, l'utilisation d'engrais enrichis en strontium est possible. Le strontium d'origine anthropique (engrais) a un rapport isotopique variable.

• b) les isotopes de l'eau ($\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^2\text{H}$)

Les variations de composition isotopique en oxygène et en hydrogène, traceurs intimes de la molécule d'eau obéissent à certaines lois. Lors des changements de phases (condensation, évaporation, passage phase liquide-phase solide), des fractionnements isotopiques entre les diverses molécules se réalisent ; ceux-ci sont dépendants de la température. Ainsi la composition isotopique des eaux météoriques varie en fonction de paramètres géographiques ou paléogéographiques : latitude, altitude, saison,

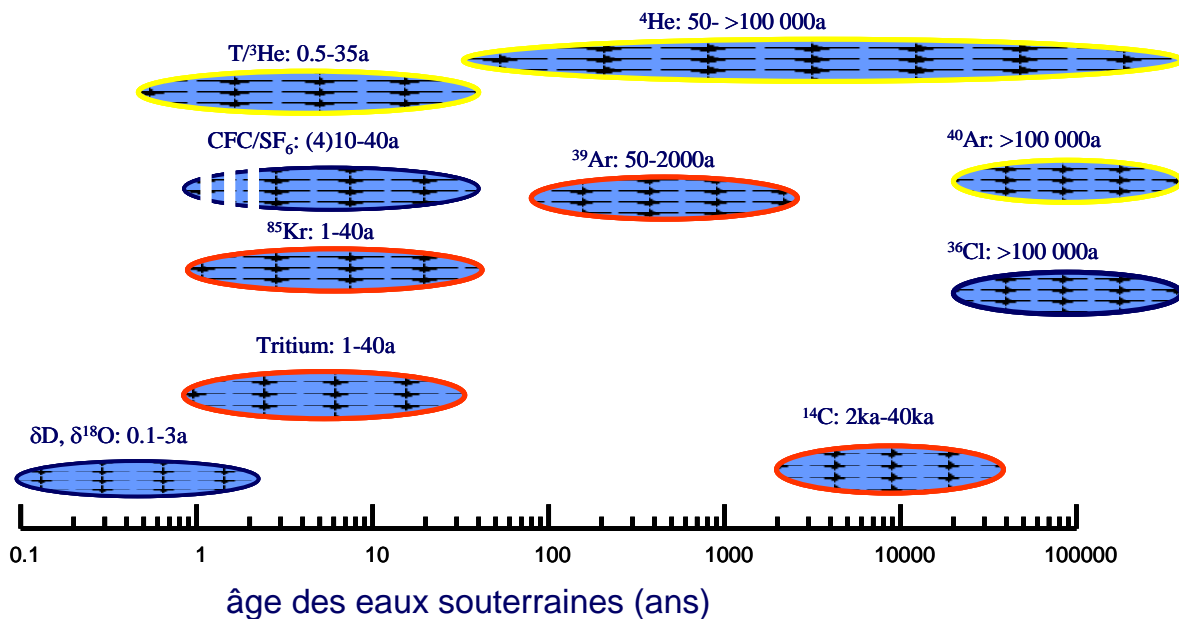
période climatique (nombreux exemples d'eaux anciennes précipitées sous un climat qui n'a plus cours actuellement).

Afin de connaître les relations entre aquifères et les relations aquifères/eaux superficielles, les deux compositions isotopiques $\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^2\text{H}$ seront analysées. La mesure des deux traceurs permet la comparaison par rapport à la fonction entrée, c'est-à-dire par rapport à la droite météorique locale et de voir si les eaux de l'aquifère ont été modifiées par échange ou mélange avec des eaux extérieures au système. La mesure de ces deux traceurs est indispensable pour détecter les phénomènes d'évaporation et déterminer l'origine des eaux.

• c) La datation des eaux jeunes

Dater les eaux souterraines signifie déterminer l'âge de l'eau souterraine, i.e. le temps écoulé à partir du moment où l'eau devient souterraine, en d'autres termes, depuis son infiltration dans le sol à partir des précipitations ou depuis tout autre type d'eau de surface (rivières, lacs). Il existe plusieurs méthodes pour calculer ou estimer l'âge des eaux souterraines. Deux méthodes distinctes ont été suggérées pour l'étude actuelle en fonction du type d'aquifère et de l'état des connaissances, celle qui se base sur l'application de la décroissance radioactive et celle qui se base sur l'utilisation de certains gaz produits industriellement au XXème siècle.

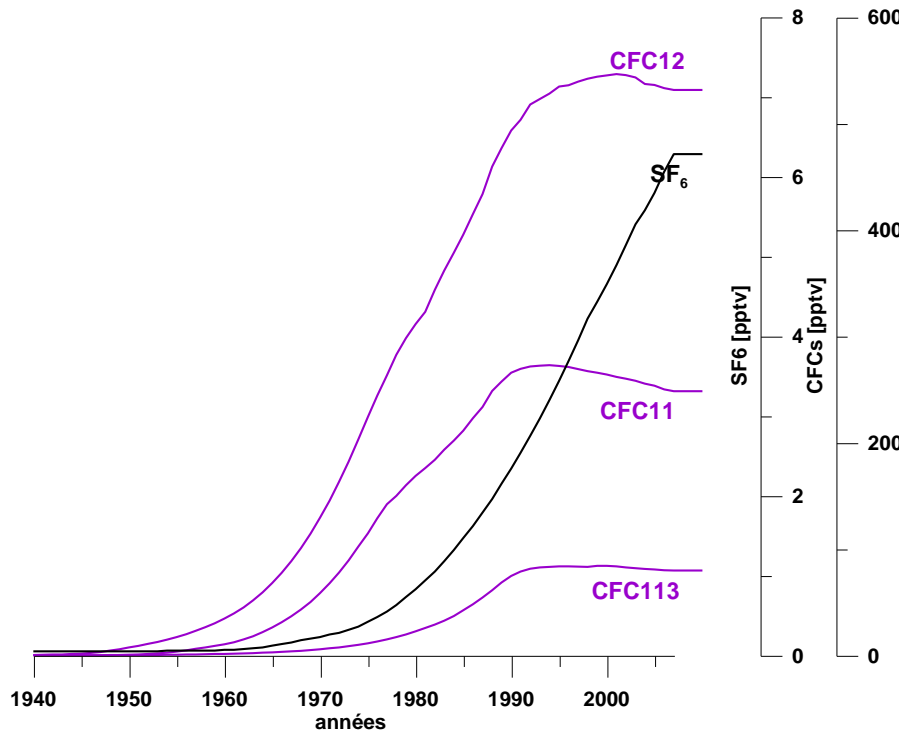
Le processus physique de la décroissance radioactive est la base de la détermination de l'âge des eaux. La décroissance radioactive d'un élément est complètement indépendante des paramètres environnementaux comme la pression, la température, le pH ou les liaisons chimiques, et dépend seulement d'un degré d'instabilité caractéristique, exprimé par une demie vie. De la demi-vie des éléments dépendra la plage de temps d'utilisation des traceurs dans les études hydrogéologiques (cf. figure ci-dessous).



Echelle de datation pour quelques éléments radioactifs et gazeux

L'âge attendu pour les eaux de l'aquifère alluvial est contemporain (moins de 60 ans). D'autre part la datation des eaux a pour but non pas la détermination d'un âge absolu des eaux mais la compréhension des échanges entre nappes alluviales et de la craie et eaux de surface. Ainsi nous nous sommes intéressés uniquement aux outils de datations des eaux jeunes présentes dans les eaux de surface ou l'aquifère superficiel. La méthode de datation retenue est celle utilisant les CFC (>1950) et le SF₆ (>1970).

Cette méthode est basée sur la mesure de gaz conservatif à l'état de trace. Les traceurs gazeux (CFC-11, CFC-12, CFC-113, SF₆) présents dans l'atmosphère passent la zone non saturée selon un transport diffusif avant d'entrer dans l'eau souterraine sous forme de gaz dissous suivant la loi de Henry. La datation des eaux se base sur la comparaison des concentrations en gaz dissous dans les eaux souterraines et les chroniques de concentration des gaz dans l'atmosphère (IAEA, 2006). Ces chroniques (fonction d'entrée, figure ci-dessous) sont parfaitement connues car mesurées en routine à plusieurs stations localisées dans les hémisphères nord et sud. Pour les deux types de traceurs de l'âge des eaux, il est très important de connaître la fonction « entrée », i.e. le taux de traceur qui s'infiltré (dépendant du temps). Dans cette étude, les chroniques d'entrées pour les CFC et le SF₆ sont celles de Mace Head (U.K.) donné par le Climate Monitoring Diagnostics Laboratory / National Oceanic and Atmospheric Administration (CMDL/NOAA, SOI-2005).



Chronique des concentrations dans l'air des CFC et SF₆ (données CMDL/NOAA)

Les composés halogénés CFC-11 (trichlorofluorométhane), CFC-12 (dichlorodifluorométhane), et CFC-113 (trichlorotrifluorométhane) communément appelés fréons sont utilisés principalement comme gaz réfrigérants, propulseurs, solvants et agents d'expansion dans les mousses de matières plastiques. L'intérêt de l'utilisation de ces composés halogénés pour la datation des eaux repose principalement sur leur origine et leurs propriétés physico-chimiques :

- temps de résidence atmosphérique élevé,
- homogénéité des concentrations atmosphériques entre les deux hémisphères,
- pas de source naturelle, origine uniquement anthropique,
- bonne stabilité chimique dans le sol et dans l'eau.

L'hexafluorure de soufre (SF₆) est utilisé principalement pour ses capacités isolantes par l'industrie d'énergie électrique, dans les accélérateurs et la production du double vitrage. Ce gaz est également utilisé dans la production du magnésium et comme traceur pour la détection des transferts de polluants (traçage gazeux). Les CFC et le SF₆ font partie des gaz provoquant l'effet de serre spécifiquement dénoncé par la communauté internationale (protocole de Kyoto).

En 1987 à Montréal, les principaux pays producteurs de CFC décident d'en stopper la production. En Europe, depuis le 1er octobre 2000, les CFC ne peuvent plus être mis sur le marché et doivent être impérativement récupérés et détruits depuis le 1er

janvier 2002. Même si l'utilisation du SF₆ et des CFC est maintenant limitée et les concentrations dans l'air stabilisées ou diminuées, le démantèlement des réfrigérateurs, bombes à aérosols, double vitrage,... entraîne encore des émissions.

La mesure de l'activité (cas des traceurs radioactifs) ou des concentrations (cas des gaz dissous) ne donne qu'une information relative de l'âge d'une eau. L'âge radiométrique d'une eau souterraine est en fait l'âge moyen d'un mélange de nombreux écoulements élémentaires. La datation des eaux souterraines ne peut donc se limiter uniquement à déterminer un âge. C'est toute une répartition des âges qu'il faut déterminer. Pour permettre une datation des eaux souterraines il est essentiel d'obtenir au préalable un modèle conceptuel des circulations souterraines qui permettra notamment la détermination des principaux modes de circulation des eaux (type piston, exponentiel, modèle de mélange).



**Centre scientifique et technique
Service EAU**

3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34