

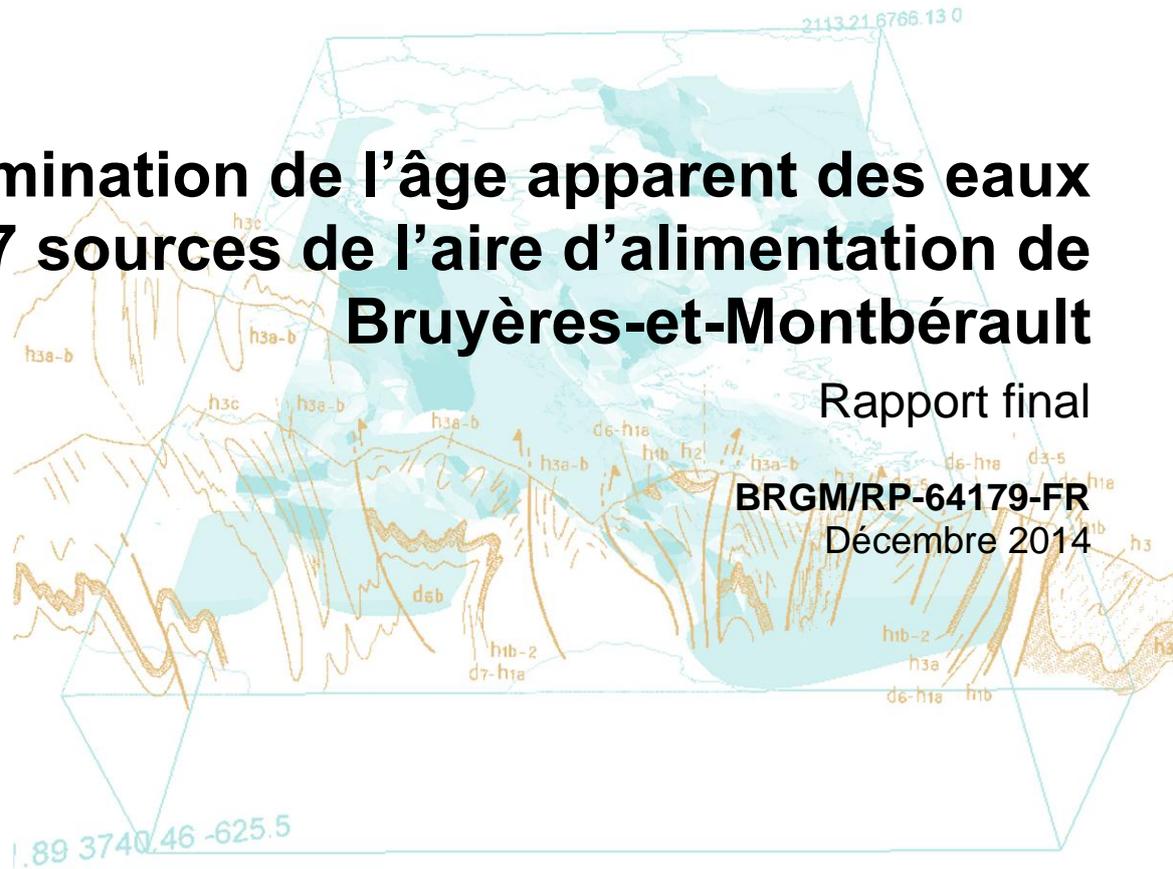


Détermination de l'âge apparent des eaux de 7 sources de l'aire d'alimentation de Bruyères-et-Montbérault

Rapport final

BRGM/RP-64179-FR

Décembre 2014



Détermination de l'âge apparent des eaux de 7 sources de l'aire d'alimentation de Bruyères-et- Montbérault

Rapport final

BRGM/RP-64179-FR

Décembre 2014

Étude réalisée dans le cadre du projet
de Service public PSP13PIC37

Gourcy L., Picot J., Surdyk N.

Vérificateur :

Nom : A. Winkel

Fonction : Hydro-géo-chimiste

Date : 11 décembre 2014

Signature :



Approbateur :

Nom : D. Maton

Fonction : Directeur régional :

Date : 15 décembre 2014

Signature :



Le système de management de la qualité et de l'environnement
est certifié par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.

Mots-clés : eaux souterraines, nitrate, datation, Aisne, Picardie

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

Gourcy L., Picot J. Surdyk N. (2014) – Détermination de l'âge apparent des eaux de 7 sources de l'aire d'alimentation de Bruyères-et-Montbérault. Rapport final. BRGM/RP-64179-FR, 44 p., 22 ill., 1 ann.

© BRGM, 2014, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

L'INRA, la mairie de Bruyères-et-Montbérault, la Chambre d'agriculture de l'Aisne et le BRGM se sont associés pour proposer une étude permettant de mieux comprendre les vitesses d'écoulements de l'eau dans l'aire d'alimentation (AAC) du captage de Bruyères-et-Montbérault (Aisne, Picardie). Cette information permettra ensuite aux acteurs locaux de mieux expliquer l'évolution des concentrations en nitrates au niveau des sources de l'AAC dont la qualité est suivie régulièrement par l'INRA.

L'objectif de l'étude est le prélèvement, l'analyse et l'interprétation des analyses de CFC-11, CFC-12, CFC-113 et SF₆ des eaux des 7 sources situées au sud de la commune de Bruyères-et-Montbérault dans l'Aisne. Des données physico-chimiques complémentaires et une synthèse des informations géologiques disponibles ont été collectées afin de compléter l'information.

Au vue des cartes géologiques à l'échelle au 1/50 000^{ème}, de la carte géologique harmonisée de l'Aisne, des données issues de la Banque du Sous-Sol du BRGM (BSS) et de la thèse de N. Beaudoin (2006), l'eau de 6 des 7 sources prélevées a pour origine la nappe du Lutétien inférieur et moyen. Seule la source du lavoir de Montbérault a une origine différente ; l'aquifère des sables de Beauchamp du Bartonien.

Il apparaît que la nappe des calcaires lutétiens peut, par endroit, être en contact avec la nappe des sables de Beauchamp (Bartonien inférieur) et la nappe des sables de Cuise (Yprésien supérieur). Ainsi, d'un point de vue géologique et hydrogéologique, certaines sources pourraient provenir d'un mélange d'eau de deux nappes, mais les cartographies régionales et le peu de sondages référencés en BSS ne permettent pas de le préciser.

Après avoir regardé les différents facteurs potentiels de contamination et de dégradation et validé les hypothèses sur les conditions de recharge (température, altitude, excès d'air, modèles) des aquifères, il est possible d'estimer les âges apparents des eaux captées.

Les eaux souterraines des 7 points échantillonnés ont des âges apparents relativement similaires. Il semble néanmoins que les eaux à Zezin et Fontaine-Notre-Dame soient légèrement plus anciennes. Pour ces eaux, le modèle de recharge le plus adapté est le modèle exponentiel qui considère une recharge sur l'ensemble de la surface de recharge. On obtient pour ces deux sources un temps moyen de résidence de 17 à 18 ans. Toutefois, la datation des eaux de ces points ne peut se faire qu'avec 2 traceurs.

Pour toutes les autres sources, le modèle piston, qui correspond à une recharge localisée sur un secteur puis un transfert d'eau par advection semble convenir à l'estimation des âges apparents. On obtient une date moyenne de recharge de 1990.

Il est important de noter que la présence d'eau très jeune (moins de 5 ans), attendue pour un système karstique) n'a pas été démontrée. Le système hydrogéologique a donc une importante inertie.

Pour chacune des eaux analysées, la chimie évolue faiblement entre les deux campagnes de prélèvement. Les eaux souterraines sont donc relativement protégées d'une recharge directe et une certaine inertie est notée, en accord avec l'âge apparent de l'eau estimé.

Ainsi on peut relever 3 familles chimiques principales correspondant à i) la source de Montbérault (et, dans une moindre mesure Saint-Pierre Nord), ii) les sources de Fontaine-Notre-Dame et Zézin et iii) les sources de Bélier et Saint-François.

Les eaux de Montbérault sont plus faiblement enrichies en éléments majeurs provenant majoritairement de la roche encaissante comme le calcium, le magnésium et les bicarbonates. Cette différence de faciès chimique est à mettre en relation avec l'origine des eaux pour cette source (sables de Beauchamp du Bartonien).

Les sources de Fontaine-Notre-Dame et Zézin ont un chimisme similaire reflétant les circulations d'eau au sein de formations carbonatées avec influence des niveaux géologiques sus-jacents composés de sables et d'argiles.

Sommaire

1. Introduction	9
2. Cadre géologique et hydrogéologique de l'aire d'alimentation de captage de Bruyères-et-Montbérault	11
2.1. CONTEXE	11
2.2. DESCRIPTION DES FORMATIONS GEOLOGIQUES TERTIAIRES ET QUATERNAIRES.....	13
2.3. AQUIFERES ET EAUX SOUTERRAINES	15
2.4. ORIGINE DES SOURCES	16
3. Méthode de datation utilisée	19
3.1. PRINCIPE	19
3.2. PRESENTATION DE LA METHODE DE DATATION PAR GAZ DISSOUS	19
3.3. ECHANTILLONAGE ET MESURES	21
3.4. ANALYSES CHIMIQUES	22
3.5. CAMPAGNES D'ECHANTILLONNAGE	22
4. Interprétation des résultats	26
4.1. METHODE D'ESTIMATION DES AGES APPARENTS.....	26
4.2. IMPACT DES CARACTERISTIQUES DU SITE D'ETUDE	29
4.3. DATATION DES EAUX DES SOURCES CAPTEES.....	29
4.4. CHIMIE DES EAUX	31
5. Conclusions.....	37
6. Bibliographie	39

Liste des illustrations

Illustration 1 - Grands ensembles géologiques et régions naturelles de la Picardie et de la Champagne	11
Illustration 2 - Coupe stratigraphique des formations tertiaires de la Picardie	12
Illustration 3 - Extrait de la carte géologique harmonisée de l'Aisne centrée sur l'AAC de Bruyères-et-Montbérault	14
Illustration 4 - Extraits des cartes géologiques au 1/50 000 ^{ème} de Laon au nord et de Craonne au sud, centrée sur l'AAC de Bruyères-et-Montbérault	15
Illustration 5 – Correspondance entre les sources étudiées et les nappes phréatiques d'après les cartes géologiques, les données BSS et la thèse de N. Beaudoin	17
Illustration 6 - Echelle de datation pour quelques éléments stables, radioactifs et gazeux	19
Illustration 7 - Chronique des concentrations dans l'air des CFC et SF ₆ mesurées à Mace Head.....	21
Illustration 8 - Système de prélèvement utilisé pour les CFC et SF ₆	21
Illustration 9 - Schéma du système de prélèvement de l'eau pour analyses de CFC et SF ₆	22
Illustration 10 : Schéma des limites du bassin et de la localisation des sources et des stations de mesures météorologiques et piézométriques. Sources : 1 = Zézin; 2 = Fontaine ND; 3 = St-Pierre; 4 = St-François; 5 = Bélier. Sources de l'Auversien =s, piézomètres =P	23
Illustration 11 : Prélèvement d'eau à Saint-Francois	24
Illustration 12 : Prélèvement d'eau à Bélier	24
Illustration 13 : Lavoir à Montbérault	24
Illustration 14 : Fontaine Notre-Dame.....	24
Illustration 15 : Source Zezin	25
Illustration 16 : Schéma des modèles empirique d'écoulement (piston, exponentiel, mélange).....	28
Illustration 17 : Comparaison des concentrations dans l'eau (en pptv) des CFC-113 vs CFC-12, CFC-11 vs CFC12, CFC-113 vs CFC-11 et modèles de recharge piston, modèle de mélange binaire et modèle exponentiel	28
Illustration 18 : Résultats des concentrations en CFC et SF ₆ dans l'air et dans et estimation des âges apparents selon le modèle piston (PF), exponentiel (EM) ou binaire (BM)	30
Illustration 19 : Concentrations en CFC-12 et CFC-113 et incertitudes analytiques pour les 7 points d'eau et les deux campagnes de prélèvement	30
Illustration 20 : Diagramme de Schoeller pour les eaux de l'AAC de Bruyères-et-Montbérault prélevées en janvier 2014.....	32
Illustration 21 : Relations inter éléments majeurs dissous pour les eaux de Bruyères-et-Montbérault collectées en 2014	33
Illustration 22 : Différents rapports élémentaires permettant une différenciation chimique des eaux des sources du bassin de Bruyères-et-Montbérault	35

1. Introduction

Un des objectifs de la directive cadre sur l'eau (2000/60/CE) est d'atteindre le « bon état » vis-à-vis de plusieurs paramètres chimiques dont le paramètre « nitrate ». D'ores et déjà, la qualité des eaux souterraines en Picardie est considérée comme assez dégradée puisque seules trois masses d'eau souterraines sur vingt-sept ont été évaluées en « bon état chimique » en 2006-2007.

C'est dans ce cadre qu'en 2013, l'Agence de l'eau Seine-Normandie (AESN), la DREAL Picardie, la DRAAF Picardie, les DDT(M), les Chambres d'agriculture des départements de l'Aisne et de l'Oise, la Chambre régionale d'agriculture de Picardie et le BRGM ont souhaité s'associer autour d'un projet démonstrateur visant à déterminer les vitesses de circulation de l'eau et des nitrates dans la zone non saturée (sol, sous-sol) et les aquifères captés localement au droit de plusieurs aires d'alimentation de captage (AAC).

En complément à l'étude, l'INRA, la mairie de Bruyères-et-Montbérault, la Chambre d'Agriculture de l'Aisne et le BRGM se sont associés pour l'estimation des vitesses d'écoulements de l'eau dans l'aire d'alimentation du captage de Bruyères-et-Montbérault. Cette information permettra ensuite aux acteurs locaux de mieux comprendre l'évolution des concentrations en nitrates des eaux des points du suivi effectué par l'INRA au sein de l'AAC. Les résultats de cette étude sont présentés dans le présent rapport.

L'objectif de l'étude est le prélèvement, l'analyse et l'interprétation des analyses de CFC-11, CFC-12 et CFC-113 et SF₆ de 7 sources situées au sud de la commune de Bruyères-et-Montbérault dans l'Aisne. Une analyse complète des éléments majeurs dissous et une synthèse des informations géologiques disponibles ont été réalisées afin de compléter l'information.

2. Cadre géologique et hydrogéologique de l'aire d'alimentation de captage de Bruyères-et-Montbérault

2.1. CONTEXTE

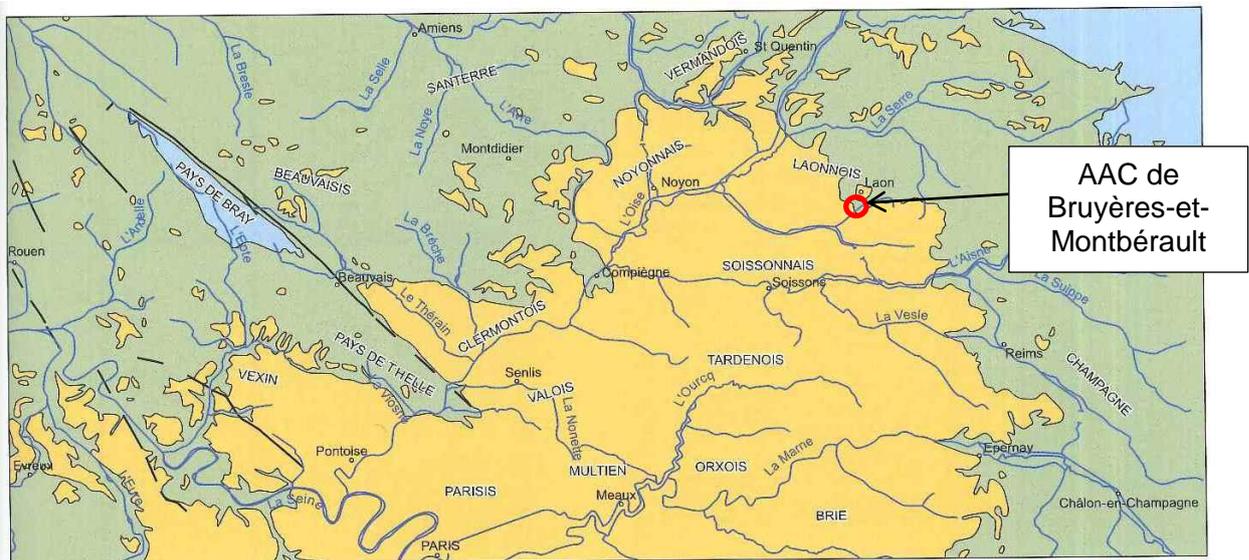
2.1.1. Contexte météorologique

Les précipitations sur le site varient fortement d'une année sur l'autre, pour la période récente de 586 mm (2004-2005) à 1097 mm (2000-2001). Le total annuel des pluies efficaces varie ainsi également fortement avec une moyenne sur la période 1973-2002 de 234 mm. La température moyenne de l'air à Bruyères-et-Montbérault est d'environ 10°C.

2.1.2. Contexte hydrogéologique

L'entité BDLISA niveau 3 concernée est celle des calcaires et sables du Lutétien du bassin de l'Oise amont et de l'Aisne (113AQ05). Le site d'étude s'étend sur la masse d'eau FRHG106 « Lutétien-Yprésien du Soissonnais-Laonnais ». L'aquifère tertiaire du Lutétien est presque isolé hydrogéologiquement. C'est une nappe libre à double porosité ; matricielle et de fissure.

L'aire d'alimentation de captage (AAC) de Bruyères-et-Montbérault est, d'un point de vue géologique, localisée à la bordure nord des plateaux tertiaires de l'Ile-de-France (Illustration 1). Le pendage général des formations géologiques tertiaires est très léger (1,5‰) et est orienté vers le sud-ouest, c'est-à-dire vers le centre du Bassin de Paris.



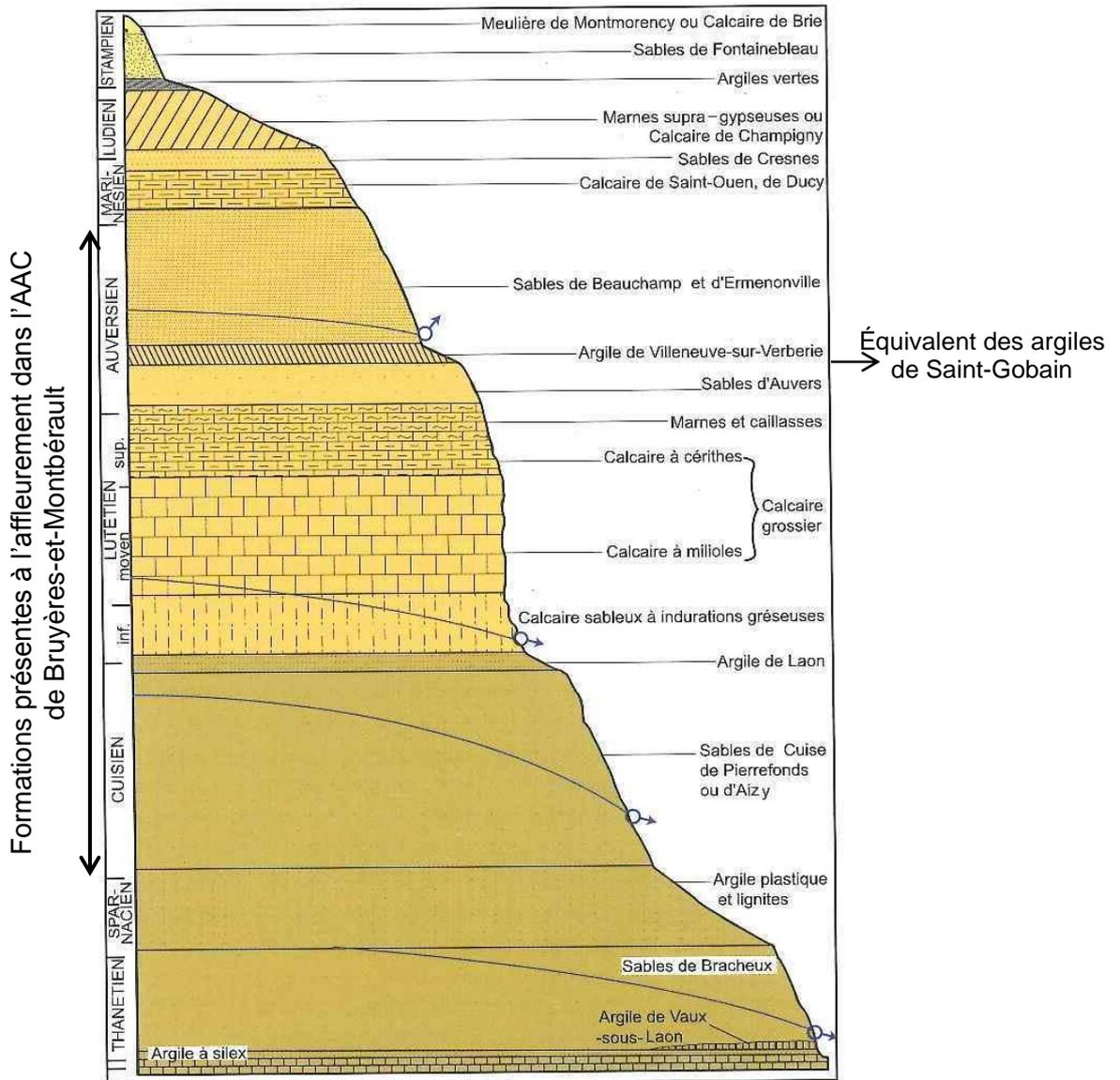
Source : Caudron, 2006

Illustration 1 - Grands ensembles géologiques et régions naturelles de la Picardie et de la Champagne (le bleu représente les formations jurassiques, le vert les formations crétacées et l'orange les formations tertiaires)

À Bruyères-et-Montbérault, ces plateaux tertiaires sont représentés par les calcaires lutétiens, couverts de minces placages de sables de Beauchamp et d'argiles de Saint-Gobain bartoniens. Les calcaires lutétiens façonnent des falaises ou des escarpements rocheux dans le paysage,

tandis que les faciès argilo-sableux du Bartonien forment des reliefs plus doux. Le ru de Polton et ses affluents ont incisé ces formations tertiaires mettant à l'affleurement une forte diversité géologique au sein de l'aire d'alimentation de captage de Bruyères-et-Montbérault.

Cette succession de formations géologiques tertiaires (Illustration 2) renferme quelques nappes phréatiques. Sur les versants, ces nappes jaillissent sous forme de sources (symbole ♂, Illustration 2) aux toits des horizons argileux.



Source : Caudron, 2006

Illustration 2 - Coupe stratigraphique des formations tertiaires de la Picardie

2.2. DESCRIPTION DES FORMATIONS GEOLOGIQUES TERTIAIRES ET QUATERNAIRES

Yprésien supérieur (Cuisien)

La formation géologique la plus ancienne présente à l'affleurement sur le périmètre de l'AAC de Bruyères-et-Montbérault est représentée par les sables de Cuise (e4b). Ces sables sont très fins, argileux à peu argileux, glauconieux et micacés, de couleur souvent grisâtre à verdâtre et jaunâtre à rousse par altération. Ces sables constituent le fond du vallon du ru de Polton et de ses affluents et peuvent atteindre 50 m à 60 m d'épaisseur.

L'argile de Laon (e4b(2)) repose sur les sables de Cuise. C'est une argile grisâtre à verdâtre, où s'intercalent des lits de sables glauconieux. Cette formation atteint au maximum 7 m d'épaisseur. En bordure de plateau, comme c'est le cas sur le périmètre de l'AAC de Bruyères-et-Montbérault, l'argile de Laon est un niveau humide marqué par des sources et une végétation hygrophile.

Lutétien

Le lutétien inférieur et moyen (e5a-b) est majoritairement calcaire, en bancs épais de couleur crème à jaunâtre, peu cohérents et friables. Dans le paysage, il constitue des escarpements et des plateaux.

Dans le détail, la base est constituée d'un faciès transgressif fait de sable grossier très glauconieux ou de calcaire tendre à gros grains de quartz anguleux et esquilles de silex noirs. On retrouve ensuite le « calcaire grossier », beige et peu glauconieux, alternant avec des couches de sables calcaires. La partie sommitale montre une transition vers le Lutétien supérieur avec des calcaires marneux tendres et des grès calcaires friables. Le tuffeau de Damery est un calcaire sableux et tendre du Lutétien moyen.

Le Lutétien supérieur (e5cMC) est représenté par une formation marno-calcaire d'environ 12 m à 15 m d'épaisseur (calcaire à Cérithes, marnes et caillasses). Il constitue la surface structurale des plateaux tertiaires et peut être divisé en deux parties :

- à la base une alternance de calcaires et de marnes blanches ou vertes d'un mètre d'épaisseur,
- au sommet, des calcaires blancs à grains fins, à débit en plaquette (caillasses) et à cassure d'aspect sublithographique.

Bartonien inférieur (Auversien)

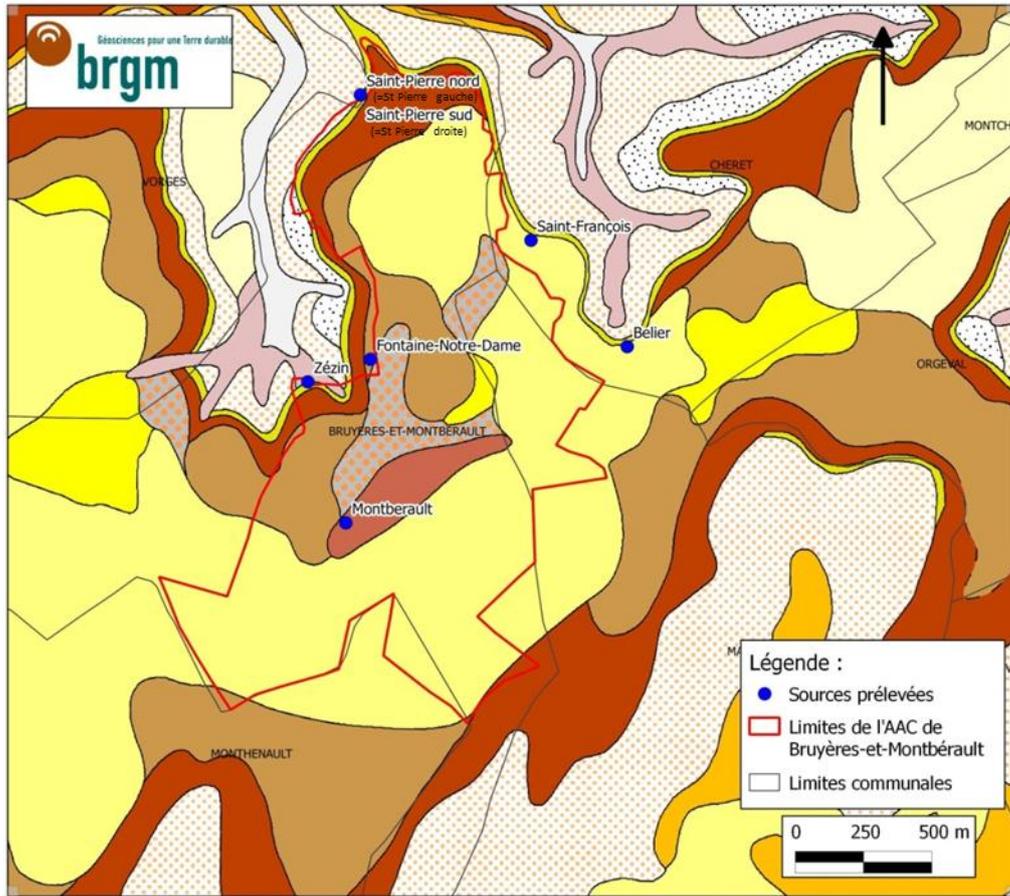
L'argile de Saint-Gobain (e6aG) est d'âge Bartonien inférieur. C'est une argile gris-vert, très plastique, peu épaisse (2 à 3 mètres), montrant localement des intercalations sableuses.

Les sables et grès de Beauchamp (e6aB), également d'âge Bartonien inférieur, sont des sables blancs, jaunes ou roux, bien classés, assez fins, renfermant de nombreux galets de silex gris et de quartz. À Montbérault, ils sont conservés dans des poches karstiques des calcaires lutétiens.

Quaternaire

Les limons loessiques (OEy) d'âge Quaternaire, sont légèrement sableux sur les plateaux tertiaires comme c'est le cas dans le périmètre de l'AAC de Bruyères-et-Montbérault. Ils sont peu épais (environ 5 mètres).

Lorsque leur épaisseur est inférieure à 1 m, les limons sont figurés par une surcharge laissant apparaître le substratum. Ce qui est le cas sur l'extrait de la carte géologique harmonisée ci-après (Illustration 2), où ils recouvrent des calcaires lutétiens indifférenciés (LP/e5cMC).



E		Eboulis	Quaternaire
C		Colluvions indifférenciées	
Fz		Alluvions fluviales actuelles et récentes (Holocène)	
LP		Limons des plateaux, limons indifférenciés	
OEy		Limons loessiques	
LP/e5cMC		Limons des Plateaux, limons indifférenciés sur les calcaires lutétiens indifférenciés	
e6ab		Sables et grès de Beauchamp	Bartonien inférieur (Auversien)
e6aG		Argiles de Saint-Gobain	
e5cMC		Calcaires lutétiens, Marnes et caillasses	Lutézien
e5ab		Sable, calcaire, tuffeau de Damery	
E4b(2)		Sables de Cuisse: Argile de Laon	Yprésien supérieur (Cuisien)
e4b		Sables de Cuisse (sables, grès et conglomérats)	

Illustration 3 - Extrait de la carte géologique harmonisée de l'Aisne centrée sur l'aire d'alimentation de Bruyères-et-Montbérault

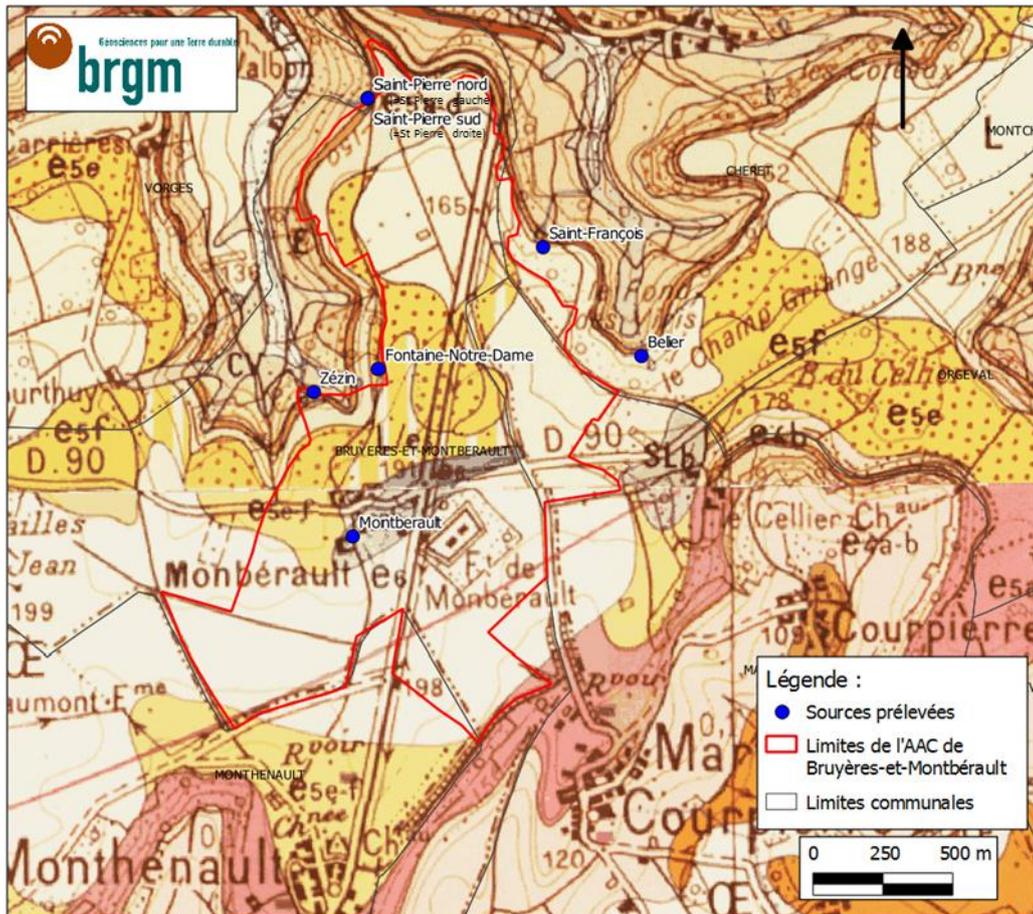


Illustration 4 - Extraits des cartes géologiques au 1/50 000^{ème} de Laon au nord et de Craonne au sud, centrée sur l'AAC de Bruyères-et-Montbérault

2.3. AQUIFERES ET EAUX SOUTERRAINES

L'aquifère cuisien

La nappe du Cuisien se trouve dans les sables de Cuise. Elle repose sur les formations imperméables des argiles du Sparnacien (non présentes à l'affleurement sur le périmètre de l'AAC). Les sources de cette nappe sont plus diffuses et les venues d'eau sous des affleurements déterminent des zones humides et marécageuses.

L'alimentation de la nappe se fait via les zones d'affleurements et via les calcaires lutétiens sus-jacents lorsque l'argile de Laon n'existe pas ou a disparu par érosion.

La nappe des sables de Cuise est ici drainée par le ru du Polton et ses affluents. C'est un aquifère à perméabilité d'interstices. D'après la bibliographie (notice de la carte géologique au 1/50 000^{ème} de Laon), cette nappe présente une forte minéralisation et une alcalinité élevée ; les eaux sont cependant moins carbonatées que celles de la nappe lutétienne. La forte teneur en sulfates ou en sulfures (issus de l'altération de la glauconie) les rend peu propices à la consommation.

L'aquifère lutétien

Dans le périmètre de l'aire d'alimentation de captage de Bruyères-et-Montbérault, les calcaires lutétiens renferment une nappe suspendue qui repose sur les argiles de Laon, moins perméables. Le contact entre ces deux formations est le siège de sources sur les versants des buttes et des plateaux.

Cependant, sur la carte géologique de Craonne, au sud de l'AAC de Bruyères-et-Montbérault, sur les communes de Martigny-Courpierre et Monthenault, les argiles de Laon ne sont pas cartographiées entre les calcaires lutétiens et les sables cuisiers. Sans cette information, il n'est pas possible de dire s'il y a une continuité hydraulique entre les deux aquifères.

L'eau circule dans les fissures des calcaires. Cependant, ces calcaires montrent des transitions lithologiques non progressives aussi bien latérales que verticales. Ces hétérogénéités lithologiques influent sur le trajet de l'eau et sur la perméabilité du réservoir (transmissivité de $10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ dans les bancs marneux à plus de $10^{-2} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ dans les calcaires fissurés d'après la bibliographie).

Dans cette configuration, la nappe lutétienne semble en régime libre. Les précipitations influencent directement son niveau dans les zones d'affleurements (recharge directe) et indirectement dans les zones sous couvertures limoneuses et argileuses qui sont ici peu épaisses.

Le drainage est favorisé par la topographie et les cours d'eau (Polton, St-Pierre et affluents). D'après la bibliographie, cette nappe fournit une eau fortement minéralisée, carbonatée et magnésienne, souvent chargée en sulfates provenant vraisemblablement de petits niveaux ligniteux présents dans le Lutétien. La vulnérabilité de la nappe semble forte.

L'aquifère bartonien (Auversien)

Les sables de Beauchamp renferment une nappe libre dans le cas de l'AAC de Bruyères-et-Montbérault. Au vue de la faible surface d'affleurement et de l'absence de données de sondages, il est difficile de déterminer l'étendue de cet aquifère. Mais il est probablement de faible extension et de faible épaisseur.

L'alimentation se fait par l'impluvium directement sur les surfaces affleurantes et à travers les limons là où ils affleurent. La base de cet aquifère est constitué par l'argile de Saint-Gobain (de 2 à 3 mètres d'épaisseur d'après la bibliographie) ou par les niveaux moyennement perméables du Lutétien supérieur (marnes et caillasses). En effet, d'après la carte géologique harmonisée de l'Aisne, l'argile de Saint-Gobain peut parfois être absente entre l'ensemble du Lutétien et les sables de Beauchamp. D'autre part, la carte géologique au 1/50 000^{ème} de Laon stipule qu'à Montbérault, ces sables sont préservés de l'érosion dans des poches karstiques des calcaires lutétiens. En conclusion, cet aquifère bartonien vient probablement alimenter l'aquifère lutétien.

2.4. ORIGINE DES SOURCES

D'après les cartes géologiques à l'échelle au 1/50 000^{ème} et la carte géologique harmonisée de l'Aisne, l'eau de la source de Fontaine-Notre-Dame a pour origine la nappe du Lutétien inférieur et moyen.

Les sources de Saint-Pierre (nord et sud), localisées au droit d'affleurements du Lutétien, émergent au contact entre un calcaire d'âge Lutétien et l'argile de Laon (ces sources sont référencées 00845X0056/HY dans la Banque de données du Sous-Sol, BSS). D'après l'examen hydrogéologique de décembre 1951 (présent dans le dossier BSS), l'épaisseur de

l'argile de Laon oscille entre 0,8 et 1,75 m. Ces sources ont fait l'objet d'un aménagement afin d'en accroître le débit.

Quant à la source Zézin, ses eaux proviennent de la nappe du Lutétien inférieur et moyen (source référencée 00845X0051/HY dans la BSS). Cette émergence se trouve en limite d'un affleurement d'argile de Laon imperméable.

Les sources de Saint-François et de Bélier proviennent également de niveaux géologiques du Lutétien et émergent en limite supérieure d'affleurements d'argile de Laon.

La source du lavoir de Montbérault provient de l'aquifère des Sables de Beauchamp du Bartonien.

L'illustration 5 rassemble les nappes supposées des sources étudiées selon les cartes géologiques, les données de la BSS et la thèse de N. Beaudoin (2006).

Nom de la source	Nappe correspondante sur les cartes géologiques et données BSS
Montbérault	nappe du Bartonien (Auversien)
Zézin	nappe du Lutétien
Fontaine-Notre-Dame	nappe du Lutétien
Saint-Pierre gauche	nappe du Lutétien
Saint-Pierre droite	nappe du Lutétien
Saint-François	nappe du Lutétien
Bélier	nappe du Lutétien

Illustration 5 – Correspondance entre les sources étudiées et les nappes phréatiques d'après les cartes géologiques, les données BSS et la thèse de N. Beaudoin

Au vu des cartographies géologiques existantes sur l'AAC de Bruyères-et-Montbérault, il apparaît que la nappe des calcaires lutétiens peut parfois, par endroit, être en contact avec la nappe des sables de Beauchamp (Bartonien inférieur) et la nappe des sables de Cuise (Yprésien supérieur).

En effet, l'argile de Saint-Gobain (Bartonien inférieur) est ici de faible épaisseur (2 à 3 m) et parfois discontinue, mettant ainsi en contact les sables de Beauchamp (Bartonien inférieur) et les formations marno-calcaires du Lutétien supérieur. Cependant, l'aquifère existe bien dans le périmètre de l'AAC de Bruyères-et-Montbérault où il alimente le lavoir de Montbérault et la source Mory.

D'autre part, l'argile de Laon (Yprésien supérieur) est ici aussi de faible épaisseur (1 m) et parfois discontinue. Sur la carte géologique de Craonne (moitié sud de l'AAC de Bruyères, Illustration 4), cette formation n'a pas été cartographiée. Ce manque d'information a été repris dans la carte géologique harmonisée de l'Aisne, qui montre donc de manière erronée un biseau de ces argiles. À partir de la carte géologique disponible à l'échelle du 1/50 000^{ème}, il n'est pas possible d'apprécier la continuité ou la discontinuité de l'argile de Laon. D'autre part, les quelques sondages recensés en BSS ne fournissent pas cette information (absence de coupes géologiques). Il n'est pas improbable que, par endroit, les calcaires lutétiens reposent directement sur les sables de Cuise. Les cartographies géologiques disponibles à l'échelle du 1/50 000^{ème} ne sont pas assez précises pour confirmer ce point.

En conclusion, d'un point de vue géologique et hydrogéologique, certaines sources pourraient provenir d'un mélange d'eau de deux nappes, mais les cartographies régionales et le peu de sondages référencés en BSS ne permettent pas de le préciser.

3. Méthode de datation utilisée

3.1. PRINCIPE

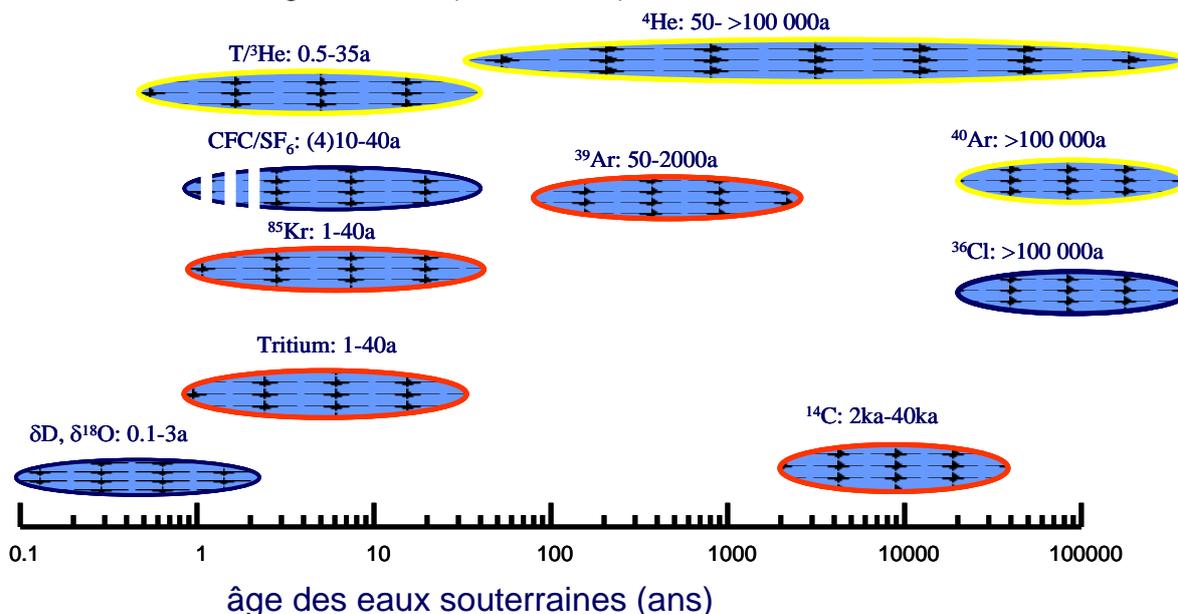
La méthode utilisée pour la datation des eaux se base sur la mesure des gaz dissous conservatifs à l'état de trace, les composés halogénés CFC-11 (trichlorofluorométhane), CFC-12 trichlorodifluorométhane), et CFC-113 (trichlorotrifluorométhane). L'intérêt de l'utilisation de ces composés repose principalement 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, d'origine uniquement anthropique,
- bonne stabilité chimique dans le sol et dans l'eau.

La mesure des concentrations en gaz dissous ne donne qu'une information relative de l'âge d'une eau. L'âge « CFC » 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).

3.2. PRESENTATION DE LA METHODE DE DATATION PAR GAZ DISSOUS

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 radioactives ou chimiques pour calculer ou estimer l'âge des eaux souterraines selon les âges estimés (Illustration 6).



La méthode suggérée pour l'étude actuelle se base sur l'utilisation de certains gaz produits industriellement au 20^{ème} siècle.

Les CFC (chlorofluorocarbones appelés également fréons), CFC-11, CFC-12 et CFC-113, ne sont pas présents naturellement dans l'atmosphère. Leur première synthétisation a été effectuée en 1928 mais ce n'est qu'au début des années 30 que leur commercialisation a commencé. Entre les années 1950 et 1960, ces gaz ont été largement diffusés et de nombreuses utilisations ont été développées. Les CFC se diffusent alors dans l'atmosphère et l'hydrosphère.

L'hexafluorure de soufre (SF_6) est utilisé principalement pour ses capacités isolantes par l'industrie d'énergie électrique, dans les accélérateurs et la production du double vitrage. La production industrielle du SF_6 a débuté en 1953. Le SF_6 est principalement d'origine anthropique mais, contrairement aux CFC, il existe également une production géogénique de ce gaz, estimé à 1% à l'échelle mondiale mais qui peut représenter, localement, un apport important.

Les traceurs gazeux 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. Pour connaître la fonction d'entrée, i.e. le taux de traceur qui s'infiltré (dépendant du temps), on utilise des chroniques de référence (Illustration 7) parfaitement connues car mesurées en routine à plusieurs stations localisées dans les hémisphères nord et sud. Les premières mesures de CFC dans l'atmosphère ont été effectuées en 1971 et 1974 et un suivi systématique de ces gaz a été instauré à partir du milieu des années 1970 dans le cadre du réseau ALE/GAGE/AGAGE et à partir de 1976 par le laboratoire de suivi et diagnostic du climat de la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration, USA). Les données de concentrations de CFC rejetés dans l'atmosphère avant 1970 ont été estimées à partir des informations sur la production de ces gaz (McCarthy *et al.*, 1977).

Dans cette étude, les chroniques d'entrées pour les CFC sont celles de Mace Head (UK) données par le « Climate Monitoring Diagnostics Laboratory / National Oceanic and Atmospheric Administration » (CMDL/NOAA, Prinn *et al.*, 2000).

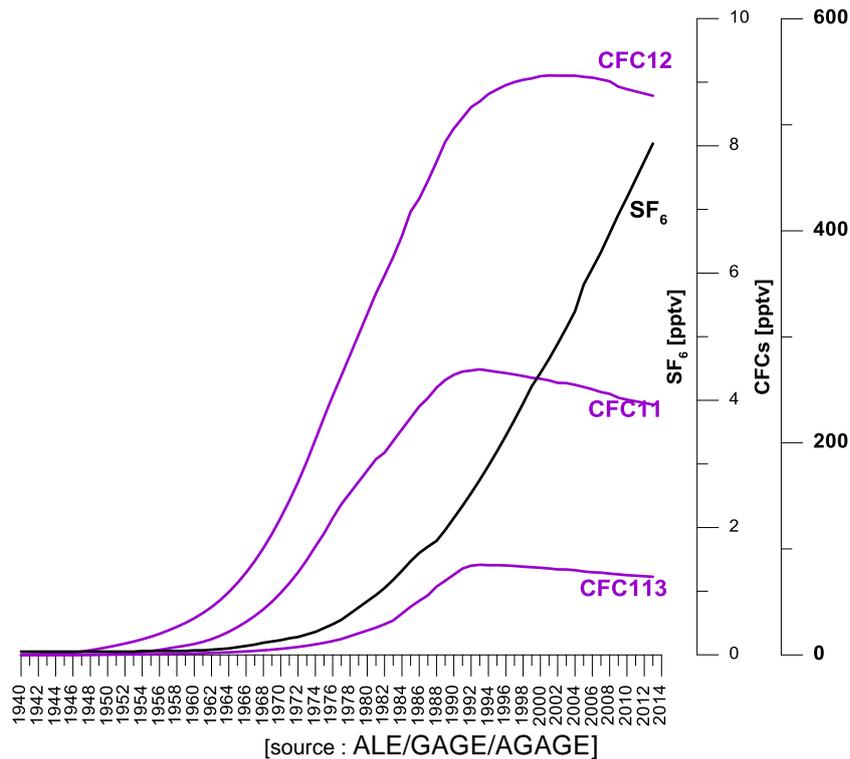


Illustration 7 - Chronique des concentrations dans l'air des CFC et SF₆ mesurées à Mace Head (Irlande)

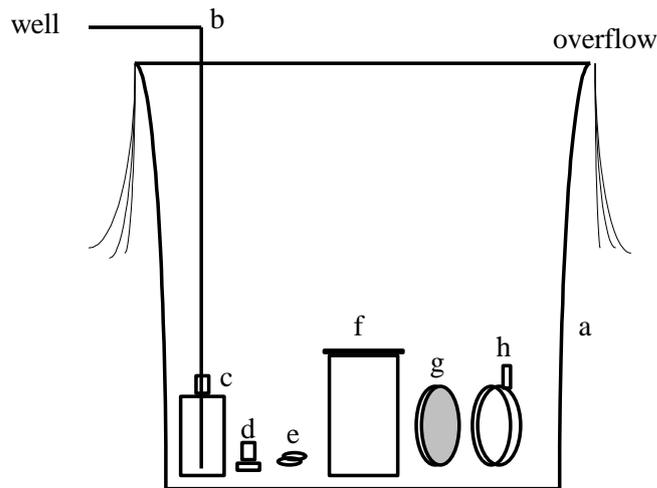
3.3. ECHANTILLONAGE ET MESURES

Les prélèvements pour mesure de CFC dissous dans l'eau suivent le protocole développé par Oster *et al.* (1996).

Le prélèvement se fait dans un flacon en verre de 500 ml lui-même placé dans un récipient métallique (Illustration 8) qui sera également rempli d'eau prélevée en évitant les mélanges avec l'air ambiant. La fermeture de la bouteille en verre et du récipient métallique se fait impérativement sous l'eau (Illustration 9).



Illustration 8 - Système de prélèvement utilisé pour les CFC et SF₆



Source : IAEA, 2006

Illustration 9 - Schéma du système de prélèvement de l'eau pour analyses de CFC et SF₆

a) récipient en métal, b) tuyau de prélèvement, c) flacon de verre, d) bouchon de verre, e) clip métallique pour bloquer le bouchon, f) récipient métallique, g) couvercle du récipient métallique, h) bloqueur couvercle métallique

Les analyses des gaz dissous (CFC) ne font pas l'objet de normes ISO, inexistantes pour ces éléments mais suivent un contrôle continu (utilisation de standards internes et participation à des exercices de calibration inter-laboratoires) qui permettent de garantir l'obtention de faibles incertitudes.

Les CFC sont mesurés à l'aide de la chromatographie en phase gazeuse équipée d'un capteur à détecteur d'électron. L'incertitude analytique est de $\pm 5\%$. Les analyses des CFC et SF₆ par chromatographie gazeuse ont été réalisées par le laboratoire Spurenstofflabor (Allemagne).

3.4. ANALYSES CHIMIQUES

En complément des analyses de gaz dissous, les éléments majeurs et traces dissous ont également été mesurés dans les eaux souterraines lors des deux campagnes de prélèvement.

Les analyses chimiques, réalisées au laboratoire du BRGM, concernent le dosage des éléments majeurs Ca, Mg, Na, K, SO₄, Cl, NO₃, SiO₂ et les éléments traces Ag, Al, As, B, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, F, Fe, Li, Mn, NH₄, NO₂, Ni, PO₄, Pb, Sr, Zn. L'échantillonnage des CFC et SF₆ dissous dans l'eau exige l'application d'une procédure spécifique de prélèvement pour garantir la non contamination des échantillons avec l'air ambiant.

3.5. CAMPAGNES D'ÉCHANTILLONNAGE

Les prélèvements ont été réalisés de façon à obtenir des échantillons représentatifs de l'eau étudiée et non contaminée par l'air atmosphérique. Deux campagnes de mesures ont été réalisées, le 29 janvier et le 13 mai 2014. La réalisation de deux campagnes d'échantillonnage permet d'avoir une évaluation de l'évolution temporelle des âges apparents en lien avec les concentrations en éléments chimiques dissous majeurs et de mettre en avant d'éventuels problèmes d'échantillonnage/analyses.

Dans le cas de Bruyères-et-Montbérault, les contraintes de réalisation de l'étude ne permettaient pas de choisir les périodes idéales de prélèvement correspondant à des hautes et basses eaux. Les variations de débit des sources enregistrées plus ou moins régulièrement indiquent des débits plus importants au printemps et minimum en fin d'été (Baudoin, 2006). Pour 2014, les données de débit disponibles (comm.perso. N. Baudoin) indiquent une très faible variation des débits entre janvier et mai 2014.

Les points de prélèvement sélectionnés (Ill. 10 à 15) correspondent à 6 sources importantes issues de l'aquifère calcaire ; source du Zézin, source du Béliier, source Fontaine Notre Dame, source Saint-Pierre Sud et Nord et source Saint-François. Un point au lavoir de Montbérault a également été prélevé pour un total de 7 points d'eau.



Source : INRA sur photo aérienne de l'IGN

Illustration 10 : Schéma des limites du bassin et de la localisation des sources et des stations de mesures météorologiques et piézométriques. Sources : 1 = Zézin; 2 = Fontaine ND; 3 = St-Pierre; 4 = St-François; 5 = Béliier. Sources de l'Auversien =s. piézomètres =P



Illustration 11 : Prélèvement d'eau à Saint-François



Illustration 13 : Lavoir à Montbérault



Illustration 12 : Prélèvement d'eau à Béliér



Illustration 14 : Fontaine Notre-Dame



Illustration 15 : Source Zezin

Des mesures physico-chimiques de terrain incluant température, conductivité, potentiel d'oxydo-réduction, pH et oxygène dissous ont été faites systématiquement lors des campagnes de prélèvements.

4. Interprétation des résultats

4.1. METHODE D'ESTIMATION DES AGES APPARENTS

Pour « dater » une eau, il est nécessaire, à partir des concentrations en gaz mesurées dans les eaux souterraines, d'estimer la concentration en gaz dans l'air au moment de la recharge. Pour cela, il faut connaître les paramètres susceptibles d'influencer la diffusion des gaz dans l'eau comme l'altitude et la température moyenne de la recharge, les paramètres agissant directement sur les gaz comme le potentiel Redox et les caractéristiques du transfert des gaz de l'atmosphère jusqu'à l'exutoire (épaisseur de la zone non saturée, types de circulations).

Pour cela, on dispose des paramètres mesurés in situ (O_2 dissous, Eh, température) et de la description du site de prélèvement (altitude du point). Il est également nécessaire de déterminer le mode de recharge de l'aquifère.

4.1.1. Altitude et température de la recharge

La température et l'altitude de la recharge sont nécessaires pour convertir la pression partielle atmosphérique des CFC en concentrations d'éléments dissous et ainsi permettre la comparaison entre les données mesurées dans l'eau et les chroniques aux stations de mesure des gaz dans l'air.

La température de la recharge, qui correspond à la température d'équilibre air-air au moment où l'échantillon d'eau est isolé de l'atmosphère, est importante dans le calcul des âges CFC (IAEA, 2006). La température de recharge peut être considérée comme la température moyenne annuelle de l'air dans le cas d'une zone non saturée importante (Mazor, 1972). Dans cette étude, la température de la recharge est estimée d'après la température moyenne annuelle pour le secteur d'étude soit 10°C . La température de l'eau des sources à la date du prélèvement est comprise entre $7,4$ et $10,7^\circ\text{C}$ ce qui confirme que la température utilisée pour le calcul est correcte.

L'altitude moyenne de la recharge est considérée ici comme l'altitude aux points de mesure (env. 200 m). Si l'altitude moyenne des bassins d'alimentation des aquifères est beaucoup plus élevée, une erreur sera introduite dans le calcul. L'altitude maximale du secteur d'étude n'étant que peu supérieure à celle des sources (env. 200m), l'incertitude sur cette valeur est inférieure à la demi-année en termes d'âge apparent.

4.1.2. Contamination par l'air ambiant

Le plus commun est une contamination par l'air ambiant à fortes concentrations en gaz CFC ou SF_6 par rapport à l'eau souterraine lors de l'échantillonnage. Toutes les précautions ont été prises pour éviter ce problème mais les conditions de terrain ne permettent pas toujours de se protéger totalement de ce risque. Le fait que les concentrations en CFC soient similaires entre les 2 campagnes de prélèvements indique qu'il n'y a pas eu de mauvaise manipulation ayant entraîné une contamination des échantillons par l'air ambiant.

4.1.3. Contamination locale de l'atmosphère

Le deuxième problème fréquent est celui de la contamination locale de l'atmosphère par un ou plusieurs gaz du fait notamment de la proximité d'une source ancienne ou actuelle de ce(s) gaz. C'est le cas dans un milieu urbain (Busenberg et Plummer, 1992 ; Ho *et al.*, 1998 ; MacDonald *et al.*, 2003 ; Santella *et al.*, 2003 ; Darling and Goody, 2007) ou à proximité des sites de rejets des eaux usées ou décharges (Schultz *et al.*, 1976 ; Busenberg et Plummer, 1992 ; Cook et Salomon, 1997). Le site d'étude ne se situant pas en contexte urbain ni proche de sites industriels, une contamination de l'air est peu probable. Toutefois, on note de manière relativement systématique une contamination en CFC-11. Les matériaux (matières plastiques) utilisés pour capter les sources pourraient être responsables de ces contaminations.

4.1.4. Excès d'air

Le phénomène d'excès d'air (concentration en gaz dissous dans l'aquifère plus importante que celle attendue, Heaton et Vogel, 1981) peut être important surtout pour le SF₆. Il est quasiment négligeable dans le cas du CFC-11 du fait de la haute solubilité de ce gaz (Plummer et Busenberg, 2000 ; IAEA, 2006). Du fait de l'existence d'une porosité de fissure (karstification) des formations dans lesquelles circulent les eaux captées aux sources, un excès d'air est probable. Dans un contexte de craie du sud de l'Angleterre (Darling *et al.*, 2012) l'excès d'air est estimé à 2,8 cm³.l⁻¹. Cette valeur a été testée pour l'estimation des âges apparents dans cette étude.

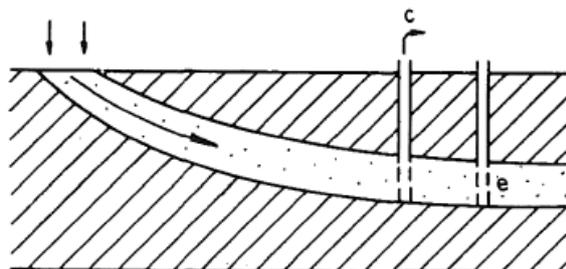
4.1.5. Dégradation microbienne

La dégradation microbienne affecte les concentrations en CFC sous milieu anaérobie. Les eaux étudiées présentent un taux d'oxygène largement supérieur à 5 mg.l⁻¹ et des potentiels d'oxydo-réduction confirmant les conditions oxydantes dominantes. La dégradation microbienne devrait donc être très faible ou négligeable.

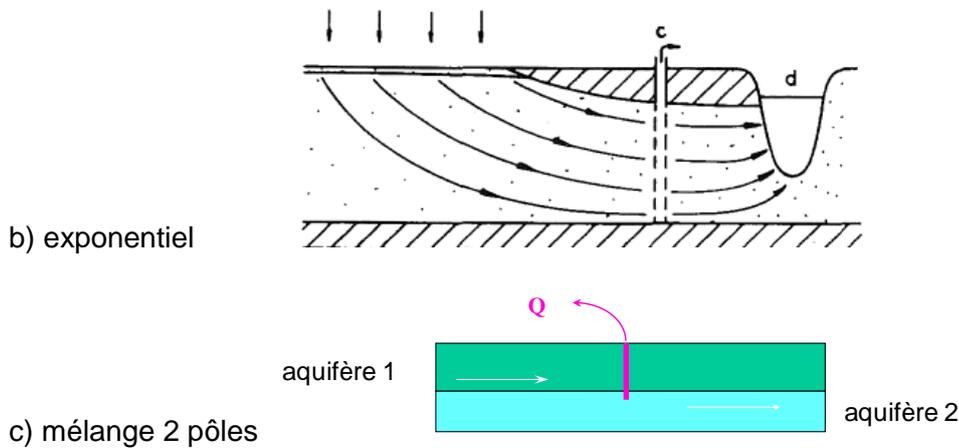
4.1.6. Détermination des modes de recharge de l'aquifère

Trois modèles empiriques peuvent être testés pour estimer les âges apparents :

- Le modèle piston (considérant qu'il n'y a pas de mélange et aucune modification des activités par dispersion, diffusion ou échange direct ; Illustration 16-a),
- le modèle exponentiel (une eau récente se mélange parfaitement à une eau ancienne, il y a échange et écoulement) pouvant correspondre à un aquifère homogène d'épaisseur négligeable pour lequel la recharge se fait sur toute la surface (Illustration 16- b),
- le modèle de type mélange (à deux pôles) est également possible (Illustration 16-c).



a) piston



(source : Maloszewski et Zuber, 1982)

Illustration 16 : Schéma des modèles empirique d'écoulement (piston, exponentiel, mélange)

4.1.7. Validation des modèles de recharge et traceurs à utiliser

Dans le but de valider les outils utilisés (contamination/dégradation d'un ou plusieurs gaz) et les modèles de recharge sélectionnés, les données de chacun des traceurs sont comparées deux par deux sur des graphes représentant les courbes calculées pour les 3 modèles de recharge théorique (Illustration 17).

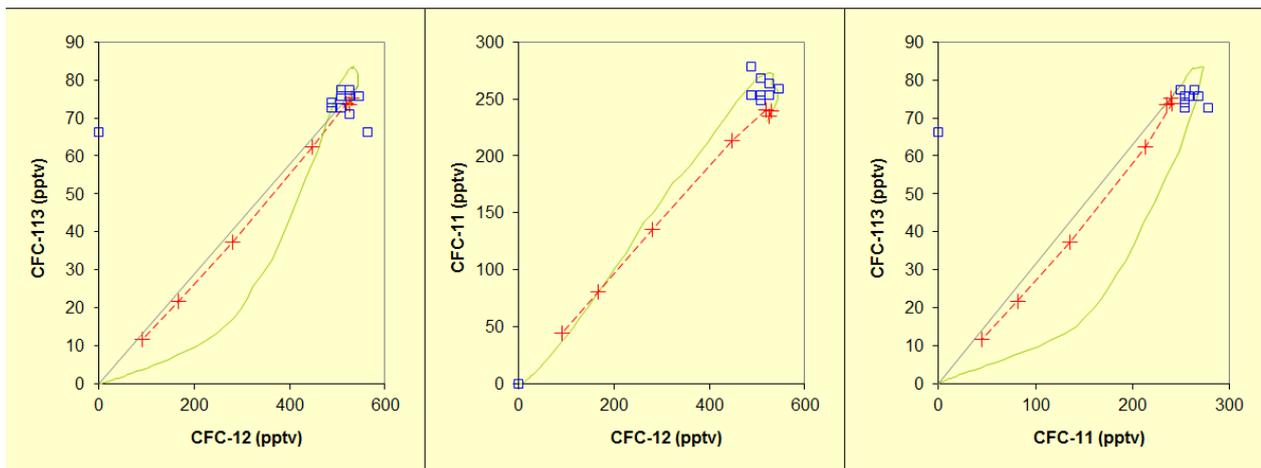


Illustration 17 : Comparaison des concentrations dans l'eau (en pptv) des CFC-113 vs CFC-12, CFC-11 vs CFC12, CFC-113 vs CFC-11 et modèles de recharge piston (ligne verte continue), modèle de mélange binaire (droite noire) et modèle exponentiel (ligne discontinue rouge).

Il est difficile de déterminer le modèle de recharge qui s'adapte le mieux au cas d'étude car les eaux sont relativement jeunes et se situent donc à l'extrémité des courbes théoriques. Le modèle de mélange binaire (droite noire) ne semble toutefois pas être adapté au cas d'étude. Une étude plus fine sera nécessaire.

Les 4 traceurs semblant vraisemblablement fiables (peu de contamination ni de dégradation observée), il est possible de considérer que ces 4 gaz devraient permettre d'obtenir un même âge. D'après les informations sur le fonctionnement hydrogéologique disponible (Beaudoin, 2006), on favorisera l'utilisation d'un modèle de type exponentiel. Une hypothèse de mélange entre une eau plus ancienne ($<$ âge des traceurs CFC) et plus jeune n'est toutefois pas à exclure. Ceci est une simplification de la réalité puisque le fonctionnement hydrogéologique est généralement complexe mais sans modèle hydrodynamique maillé à disposition, cette simplification du modèle de recharge est nécessaire.

4.1.8. Tests de sensibilité à quelques facteurs

Comme indiqué précédemment, il est nécessaire pour la datation des eaux de poser quelques hypothèses de travail. Ces hypothèses peuvent être testées une par une ou en les combinant. L'altitude moyenne de recharge peut varier d'une centaine de mètres au maximum. Une telle variation entraînerait un changement d'âge largement inférieur à une année. Il en est de même pour une variation de température moyenne de recharge de 2°C.

Le troisième facteur qu'il est possible de tester est l'existence d'un excès d'air. Un excès d'air de 1 à 3 cm³.l⁻¹ a été testé. Un excès d'air de 3 cm³.l⁻¹ a été utilisé. Seule une analyse de gaz Ne ou N₂/Ar permettrait une estimation précise de l'excès d'air dans l'échantillon d'eau. Si un excès d'air est présent et non pris en compte dans les estimations, l'âge donné serait trop jeune.

4.2. IMPACT DES CARACTERISTIQUES DU SITE D'ETUDE

Au-dessus des formations calcaires, la présence de marnes, caillasses et argiles de Saint-Gobain pourrait permettre localement l'existence de conditions réductrices (et donc réduction partielle des nitrates possible). Le modèle de recharge devrait correspondre, schématiquement, à un modèle exponentiel.

L'épaisseur de la zone non saturée est comprise entre 3 et 10 m environ. Aucun effet retard dans l'estimation des âges CFC ne devrait être noté.

4.3. DATATION DES EAUX DES SOURCES CAPTEES

Après avoir regardé les différents facteurs potentiels de contamination et dégradation et validé les hypothèses sur les conditions de recharge (température, altitude, excès d'air, modèles) des aquifères, il est possible de passer à l'estimation des âges apparents des eaux captées.

Du fait de la contamination de plusieurs points d'eau en CFC-11 et CFC-12, il est difficile de valider avec certitude le modèle de recharge le mieux adapté au cas d'étude.

La synthèse des données se trouve en Illustration 18.

Date	pH	Temp	Cond	Eh	O ₂	CFC12	CFC11	CFC113	SF6	modèles utilisés	
						0,2	0,6	0,05	0,3	PF	EM
		°C	μS.cm ⁻¹	mV	%	pmol/l	pmol/l	pmol/l	fmol/l		
29/01/2014	7,05	9,4	812	241,3	90,9	cont.	cont.	0,42	2,2		18
29/01/2014	6,98	9,2	793	255,5	88	cont.	cont.	0,42	1,9		18
29/01/2014	7,28	9,5	784	224,5	92,3	2,7	cont.	0,46	2,9	1989	13
29/01/2014	7,11	7,40	700	244,2	87,8	2,9	cont.	0,48	3	1992	
29/01/2014	7,04	8,70	761	238	93,7	2,7	5,1	0,49	2,6	1990	
29/01/2014	6,65	7,80	446	254,2	77,8	2,8	cont.	0,45	2,9	1991	12
29/01/2014	7,45	8,7	720	237	94	2,8	5,2	0,48	3,2	1990	
13/05/2014	7,17	10,7	815	198	85,7	cont.	cont.	0,43	1,5		17
13/05/2014	7,18	10,6	799	183	84,1	cont.	cont.	0,42	1,4		18
13/05/2014	7,45	10,3	717	115	91,6	2,6	cont.	0,46	1,7	1989	14
13/05/2014	7,17	9,9	695	199	78,7	2,8	5,4	0,49	2,5	1990	
13/05/2014	7,34	10,2	745	205	89	2,6	5,2	0,47	1,6	1989	
13/05/2014	7,07	11,3	386	191	82,6	2,7	5,2	0,46	1,9	1990	13
13/05/2014	7,22	10,7	792	118	88	2,7	cont.	0,48	1,9	1990	

Illustration 18 : Résultats des concentrations en CFC et SF₆ dans l'air et dans l'eau (CFC/SF₆ dans l'air en picomol.l⁻¹ et femtomol.l⁻¹ et dans l'eau en partie par trillion en volume, pptv) et estimation des âges apparents selon le modèle piston (PF), exponentiel (EM) ou binaire (BM)

Il faut noter que les incertitudes analytiques sont importantes comparées aux variations d'âges estimées (Illustration 19) sur l'ensemble des sources de l'AAC.

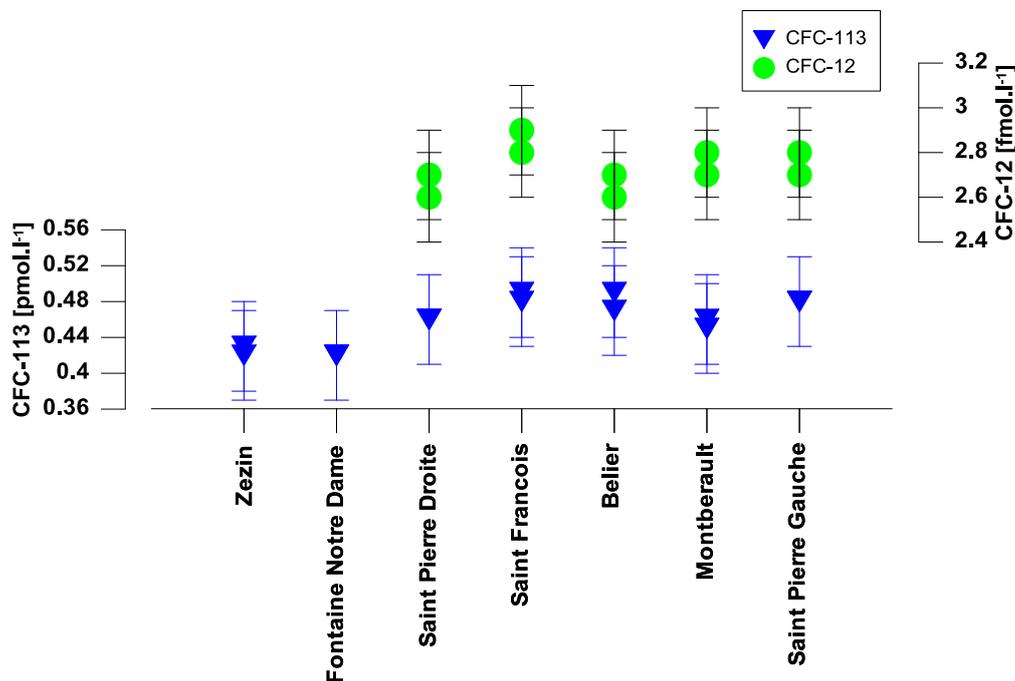


Illustration 19 : Concentrations en CFC-12 et CFC-113 et incertitudes analytiques pour les 7 points d'eau et les deux campagnes de prélèvement

On constate, de même, que les concentrations mesurées dans les eaux en janvier et en mai ont une variation non significative au regard des incertitudes analytiques. On peut donc considérer un âge unique pour chacun des points d'eau.

Les eaux souterraines aux 7 points échantillonnés ont des âges apparents relativement similaires. Il semble que les eaux à Zezin et Fontaine-Notre-Dame soient légèrement plus anciennes. Pour ces eaux, le modèle de recharge le plus adapté est le modèle exponentiel. On obtient pour ces deux sources un temps moyen de résidence de 17 à 18 ans. Toutefois, la datation à ces points d'eau ne peut se faire qu'avec 2 traceurs, rendant l'incertitude d'estimation supérieure que pour les autres points d'eau.

Pour toutes les autres sources, le modèle piston semble convenir à l'estimation des âges apparents. On obtient une date moyenne de recharge de 1990. Il est également possible d'utiliser un modèle de mélange. Dans ce cas on obtient une proportion d'eau jeune (ayant entre 6 et 15 ans) comprise entre 90 et 96%. Un modèle exponentiel est également possible pour Montbérault et Saint-Pierre Droite. Les eaux ont alors un temps moyen de résidence de 12 à 14 ans.

Des études antérieures (citées dans : Baudoin 2006) ont montré, à l'aide du tritium, un autre outil géochimique, que les temps moyens de résidence (TMR) des eaux à Zézin, Fontaine-Notre-Dame, Saint-Pierre Sud et Saint-François allaient de 16 à 35 ans selon les hypothèses utilisées et les temps moyen de résidence à Saint-Pierre nord étaient compris entre 20 et 26 ans. Les eaux de Saint-Pierre nord seraient donc de TMR légèrement supérieur (quelques années) à ceux de Saint Pierre sud.

Il est important de noter qu'il n'a pas été montré la présence d'eau très jeune (moins de 5 ans), attendue pour un système karstique. Le système hydrogéologique a donc une importante inertie.

4.4. CHIMIE DES EAUX

La chimie des eaux peut apporter des indications quant aux temps de résidence des eaux dans le système (interactions eaux-roches) et à la compréhension des circulations de l'eau dans les aquifères. Dans cet objectif, les concentrations en éléments majeurs et traces dissous ont été mesurées lors des deux campagnes de prélèvement (Annexe 1).

Les Illustration 20, Illustration 21, Illustration 22 mettent en évidence certaines différences de fonctionnement entre les sources échantillonnées.

Pour chacune des eaux analysées, la chimie n'évolue que de manière très faible entre les deux campagnes de prélèvement. Les eaux souterraines sont donc relativement protégées d'une recharge directe et une certaine inertie est notée, en accord avec l'âge apparent de l'eau estimé.

Les eaux de Montbérault présentent un faciès chimique différent des eaux des autres sources (Illustration 20 et Illustration 21). Les eaux sont plus faiblement enrichies en éléments majeurs provenant majoritairement de la roche encaissante comme le calcium, le magnésium et le bicarbonate. Ainsi, les temps moyens de résidence et donc d'interaction entre les eaux et les roches pourraient être plus faibles pour ces eaux ou une dilution par des eaux de surface/pluies pourraient avoir permis une dilution au niveau de la résurgence.

Le diagramme de Schoeller (Illustration 20) indique que les eaux collectées à ce point ne sont pas simplement diluées par rapport aux autres mais sont également enrichies en chlorures. Les eaux à ce point sont également riches en orthophosphates ($2,6 \text{ mg.l}^{-1}$) indiquant une forte pression anthropique et une plus forte vulnérabilité des eaux. On note également des concentrations relativement élevées en arsenic ($2,17$ et $2,62 \text{ } \mu\text{g.l}^{-1}$), cobalt ($0,50$ et $0,51 \text{ } \mu\text{g.l}^{-1}$),

cuivre ($2,36$ et $1,91 \mu\text{g.l}^{-1}$) et nickel ($1,88$ et $1,86 \mu\text{g.l}^{-1}$). Cette différence de faciès chimique est à mettre en relation avec l'origine des eaux à la source (sables de Beauchamp du Bartonien).

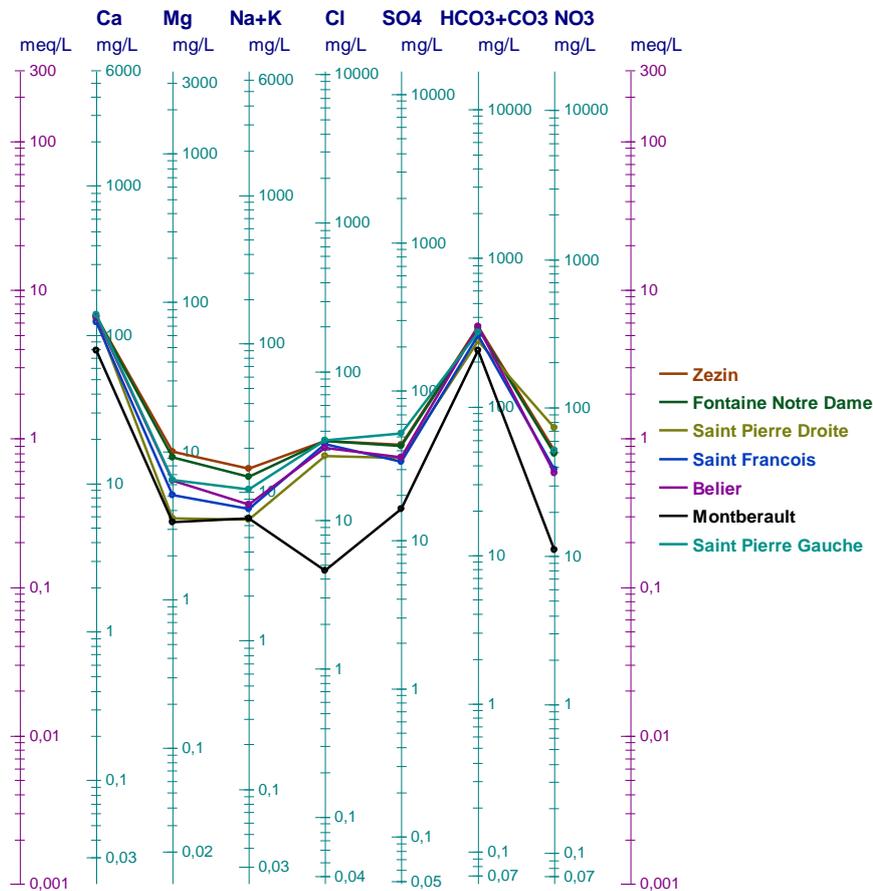


Illustration 20 : Diagramme de Schoeller pour les eaux de l'AAC de Bruyères-et-Montbérault prélevées en janvier 2014

Zezin et Fontaine-Notre-Dame présentent un faciès chimique proche l'un de l'autre. Ces eaux sont plus enrichies en magnésium, potassium, bore, baryum et chrome que les autres eaux de l'AAC (Illustration 21). Ces eaux seraient également les plus anciennes.

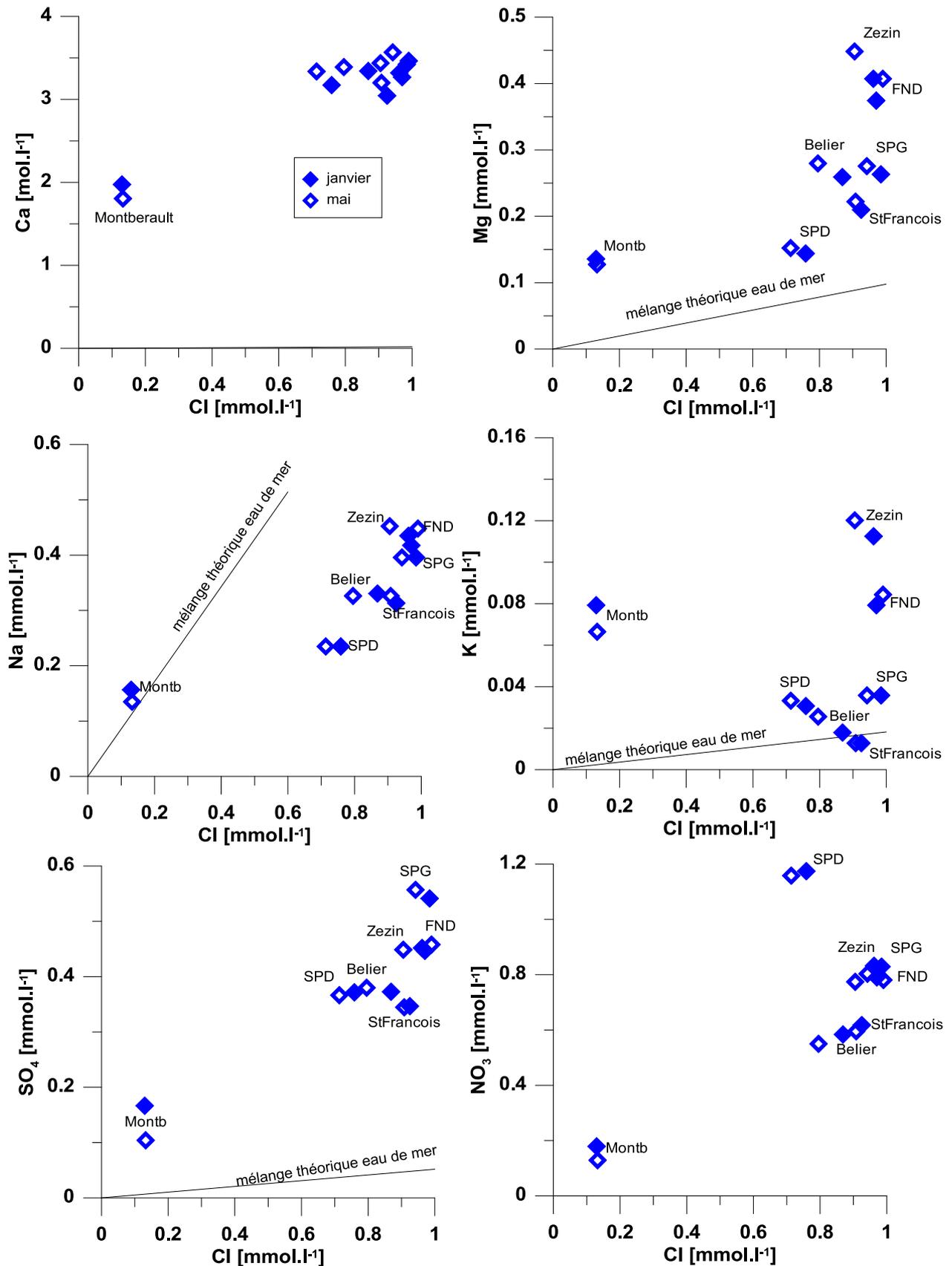


Illustration 21 : Relations inter éléments majeurs dissous pour les eaux de Bruyères-et-Montbérault collectées en 2014

Les eaux présentent toutes un enrichissement en calcium, magnésium, potassium, sulfates et bicarbonates par rapport aux apports théoriques des eaux de pluies. Ceci est dû aux interactions eau-roche calcaire qui permet cet enrichissement. Excepté pour Montbérault, on constate également un enrichissement en chlorures par rapport au sodium et aux eaux de pluies. En l'absence de formations évaporitiques dans le bassin versant, l'enrichissement en chlorures pourrait être associé aux apports anthropiques (fertilisants). En effet, on constate que les eaux enrichies en chlorures sont également riches en nitrates.

Montbérault est une source issue des formations de sables et argiles de l'Auversien. Ainsi, la chimie des eaux diffère de celle des sources issues des formations sous-jacentes. La présence d'argile pourrait permettre localement des conditions réductrices provoquant une dénitrification partielle des nitrates. Si l'on considère une source de pollution identique pour tous les points de l'aire d'alimentation du captage, il est possible de considérer que les chlorures et les nitrates ont une origine commune. Ceci se marque sur l'illustration 21 par une corrélation relativement bonne entre ces deux éléments. Lors d'une dénitrification, les concentrations en nitrates sont fortement diminuées alors que les concentrations en chlorures n'évoluent pas. Ainsi, si une forte dénitrification existait au point de Montbérault, les concentrations en chlorures devraient être plus élevées que celles observées au printemps 2014. De plus, dans les années 1990/2000, les concentrations des sources Montbérault et Mory excédait 100 mg.l^{-1} . Ce sont probablement la mise en place de pratiques raisonnées, la mise en place de jachère, les actions contre les entrées ponctuelles,... qui ont permis la baisse des concentrations en nitrates à Montbérault.

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, il est possible de normaliser les différents éléments chimiques par rapport au sodium ou aux chlorures. Dans le cas présent, l'utilisation des chlorures est délicate du fait d'apports anthropiques sans doute importants. Le sodium provient essentiellement de la dissolution d'aluminosilicates sodiques. Sur de tels diagrammes, 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 (Gaillardet *et al.*, 1999 ; Négrelet et Petelet-Giraud, 2005 ; Meybeck, 1986) on peut attribuer des rapports molaires moyens pour les pôles correspondants à l'altération des roches silicatées, de roches carbonatées ou de marnes (Illustration 22).

Ces illustrations confirment les différences de fonctionnement des sources du fait de caractéristiques hydrogéologiques différentes. Ainsi, les points présentent une composition intermédiaire entre le pôle silicates et le pôle carbonates. Cette répartition des points est donc compatible avec un mélange d'éléments dissous provenant de ces 2 pôles. Les sources de Fontaine-Notre-Dame et Zézin ont un chimisme similaire reflétant les circulations d'eau au sein de formations carbonatées avec influence des niveaux géologiques sus-jacents composés de sables et argiles.

On constate que les deux sources Saint-Pierre, droite et gauche (ou sud et nord) sont de chimismes différents. La source droite a un chimisme proche de celui de la source de Montbérault. Ces deux sources pourraient avoir des cheminements au sein des formations géologiques très différents, les sables de l'Auversien influençant de manière plus importante la source droite. Saint-François et Bélier présentent de fortes similitudes chimiques.

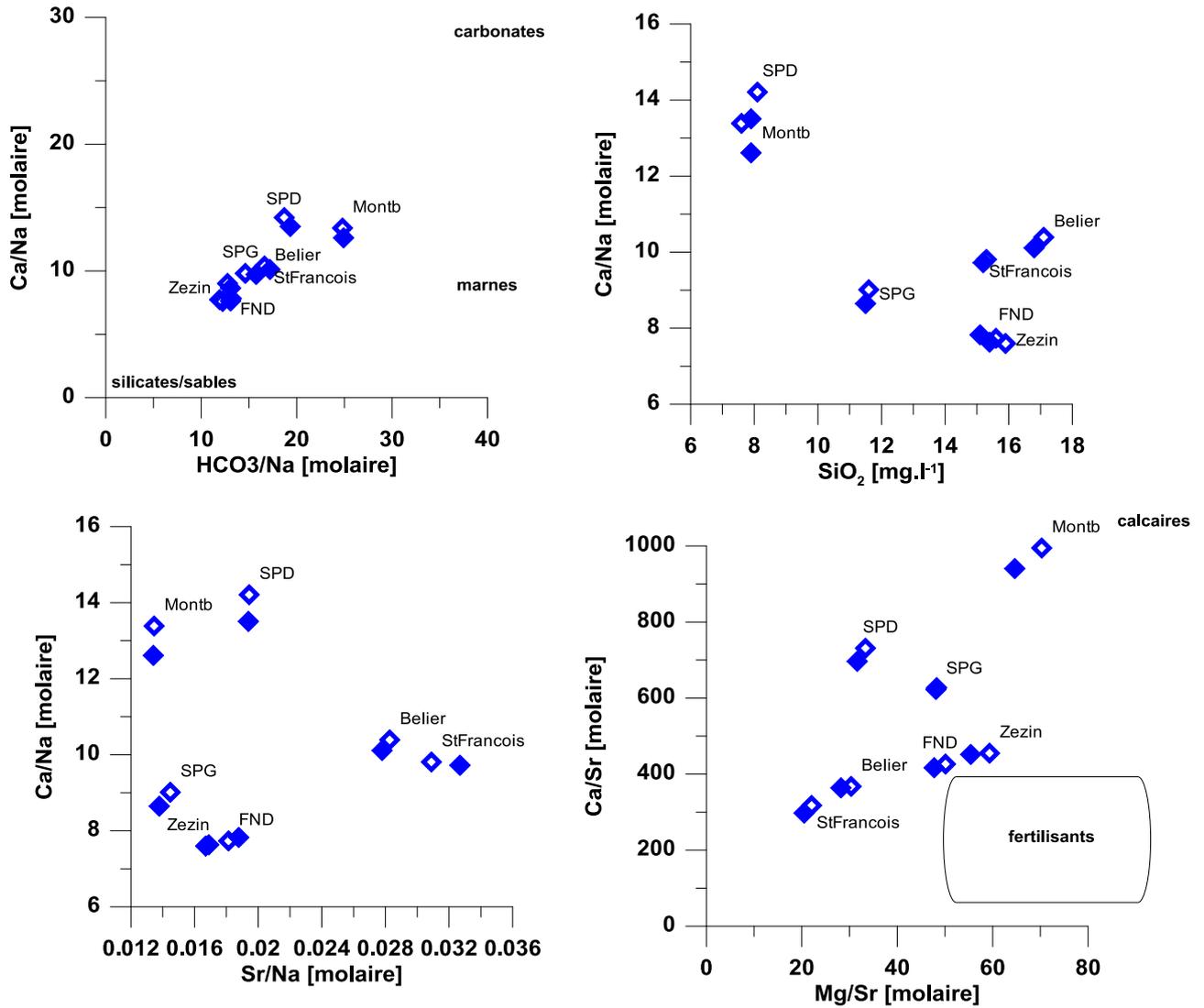


Illustration 22 : Différents rapports élémentaires permettant une différenciation chimique des eaux des sources du bassin de Bruyères-et-Montbérault

Ainsi, on peut relever 3 familles chimiques principales correspondant à i) la source de Montbérault (et, dans une moindre mesure Saint-Pierre Droite), ii) les sources de Fontaine-Notre-Dame et Zézin et iii) les sources de Bélier et Saint-François.

5. Conclusions

Les 7 points d'eau échantillonnés en janvier et mai 2014 ont tous pu être datés dans des conditions acceptables mais non optimales du fait de la présence de contamination des eaux par 1 ou 2 des traceurs utilisés. Plusieurs modèles de recharge peuvent être utilisés selon les sources échantillonnées.

Les eaux sont relativement âgées, correspondant à une date moyenne de recharge comprise en 1989 et 1992 et/ou un temps moyen de résidence de plus de 14 ans. Il n'y a pas (ou de manière négligeable) de composante très jeune (moins de 5 ans) des eaux aux sources.

La chimie des eaux confirme l'existence de trois « familles » de fonctionnement hydrogéologique différents : les sources Zezin et Fontaine-Notre-Dame, les sources Saint-Pierre gauche, Bélier, Saint-François et la source de Montbérault. Les âges apparents de ces trois familles ne sont pas sensiblement différents. Il semble toutefois que les sources de Zezin et Fontaine-Notre-Dame soient d'âge apparent légèrement plus important. La différence de chimisme des eaux de Montbérault s'explique par des circulations d'eau majoritairement dans les formations des sables de l'Auversien alors que les autres sources captent les niveaux calcaires du Lutétien.

6. Bibliographie

Beaudoin N. (2006) - Caractérisation expérimentale et modélisation des effets des pratiques culturales sur la pollution nitrique d'un aquifère en zone de grande culture. Mémoire de thèse de doctorat INAPG, 209 p.

Busenberg E., Plummer L.N. (1992) - Use of Chlorofluoromethanes (CCl_3F and CCl_2F_2) as hydrologic tracers and age-dating tools: Example- The alluvium and terrace system of Central Oklahoma, *Water Resour. Res.* 28, 2257-2283.

Caudron M. (2006) - Picardie et Champagne Eocènes. *In* : Aquifères et eaux souterraines en France. Tome 1. BRGM éditions. J.C. Roux (Ed). pp 187-190.

Cook P.G., Solomon D.K. (1997) - Recent advances in dating young groundwater: chlorofluorocarbons, $^3\text{H}/^3\text{He}$ and ^{85}Kr , *J. Hydrol.* 191, 245-265.

Darling W.G., Goody D.C. (2007) – Assessing the applicability of global CFC and SF6 input functions to groundwater dating in the UK. *Science of the Total Environment*, 387, 353-362. [10.1016/j.scitotenv.2007.06.015](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2007.06.015).

Darling W.G., Goody D.C., MacDonald A.M., Morris B.L. (2012) - The practicalities of using CFCs and SF6 for groundwater dating and tracing. *Applied Geochemistry*, 27, 1688-1697.

Gaillardet J., Dupre B., Louvat P. et al. (1999).- Global silicate weathering and CO_2 consumption rates deduced from the chemistry of large rivers. *Chemical Geology* 159, 3-30.

Heaton T.H.E., Vogel J.C., (1981) - "Excess air" in groundwater, *Journal of Hydrology*, 50, 201-216.

Ho D.T., Schlosser P., Smethie W.M., Jr., Simpson H.J. (1998) - Variability in atmospheric chlorofluorocarbons (CCl_3F and CCl_2F_2) near a large urban area: Implications for groundwater dating, *Environ. Sci. and Technol.*, Vol. 32, No. 16, 2377-2382.

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

Laurentiaux D., Guerin H., Bergougnan H. et al. (1972) - carte géologique au 1/50000 et notice. Feuille de Craonne, N°107. Ed. BRGM.

MacCarthy R.L., Bower F.A., Jesson J.P. (1977) – The fluorocarbon-ozone theory, 1. production and release – world production and release of CCl_3F and CCl_2F_2 (fluorocarbons 11 and 12) through 1975. *Atmospheric Environment*, 11, 491-497.

MacDonald A.M., Darling W.G., Ball D.F., Oster H. (2003) – Identifying trends in groundwater quality using residence time indicators: an exemple from the Permian aquifer of Dumfries, Scotland. *Hydrogeology Journal*, vol. 11, N.4, pp. 504-517.

Maloszewski P., Zuber A. (1982) - Determining the turnover time of groundwater systems with the aid of environmental tracers. 1. Models and their applicability, *J. Hydrol.*, Vol. 57, 207-231.

- Mazor E.** (1972) – Paleotemperatures and other hydrological parameters deduced from noble gases dissolved in groundwater: Jordan Rift Valley, Israel. *Geochemica Cosmochemica Acta*, vol. 36, pp.1321-1336.
- Mégnien F.** (1980) - Synthèse géologique du Bassin de Paris. Collectif. Volume III – lexique des noms de formation. Mémoire BRGM n°103.
- Meybeck M.** (1986) - Composition chimique des ruisseaux non pollués de France. *Sciences Géologiques Bulletin* 39:3-77.
- Négre P., Petelet-Giraud E.** (2005) - Strontium isotopes as tracers of groundwater-induced floods: the Somme case study (France). *Journal of Hydrology* 305:99-119.
- Oster H., Sonntag C., Munnich K.O.,** (1996) - Groundwater age dating with chlorofluorocarbons, *Water Resour. Res.*, Vol. 32, No. 10, 2989-3001.
- Plummer L.N., Busenberg E.** (2000) - Chlorofluorocarbons: Tools for dating and tracing young groundwater. In: *Environmental Tracers in Subsurface Hydrology* (P. Cook and A. Herczeg, eds.), Kluwer Academic Publishers, Boston, Chapter 15, 441-478.
- Pomerol C., Bournerias M., Bouttemy R.** et al. (1968) - carte géologique au 1/50000 et notice. Feuille de Laon, N°84. Ed. BRGM
- Prinn R.G., Weiss R.F., Fraser P.J.** et al. (2000) - A History of Chemically and Radiatively Important Gases in Air deduced from ALE/GAGE/AGAGE, *J. Geophys. Res.*, 105, 17,751-17,792.
- Santella N., Ho D.T., Schlosser P., Stute M.** (2003) - Distribution of atmospheric SF₆ near a large urban area as recorded in the vadose zone. *Environmental Sciences and Technologie*, Vol. 37, pp. 1069-1074.
- Schultz T.R., Randall J.H., Wilson L.G., Davis, S.N.** (1976) – Tracing sewage effluent recharge – Tucson, Arizona. *Groundwater*, 14, pp.463-470.
- Vernhet Y.** (2008), Carte géologique harmonisée du département de l'Aisne. Notice technique. Rapport final BRGM/RP-56204-FR.

Annexe 1

Résultats des analyses des campagnes (Concentrations en éléments majeurs et traces dissous et paramètres physico-chimiques)

	Ag	Al	As	B	Ba	Ca	Cd	Cl	Co	Cr
<i>LQ</i>	0.01	0.5	0.05	0.5	0.05	0.5	0.01	0.5	0.05	0.1
<i>Unite</i>	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	mg/l	µg/l	mg/l	µg/l	µg/l
Zezin	0.21	0.72	0.11	18.5	25.1	132.8	0.04	34.1	< LQ	0.55
Fontaine notre dame	0.18	0.60	0.07	14.6	20.9	130.7	0.01	34.4	< LQ	0.46
St Pierre droite	0.12	0.98	0.10	8.77	16.0	126.9	0.04	26.9	0.05	0.16
St Francois	0.17	1.68	0.11	9.11	13.7	121.8	< LQ	32.8	< LQ	0.39
Belier	0.13	< LQ	0.09	8.72	19.5	133.7	< LQ	30.8	< LQ	0.18
Montberault	0.12	2.01	2.17	19.9	29.2	79.0	0.10	4.6	0.50	0.18
St Pierre gauche	0.16	0.90	0.09	12.1	11.6	136.9	0.05	34.9	< LQ	0.22
	Cu	F	Fe	K	Li	Mg	Mn	NH4	NO2	NO3
<i>LQ</i>	0.1	0.1	0.02	0.5	0.1	0.5	0.1	0.05	0.01	0.5
<i>Unite</i>	µg/l	mg/l	mg/l	mg/l	µg/l	mg/l	µg/l	mg/l	mg/l	mg/l
Zezin	0.48	< LQ	< LQ	4.4	3.28	9.9	0.10	0.08	< LQ	51.6
Fontaine notre dame	0.19	< LQ	< LQ	3.1	2.73	9.1	< LQ	< LQ	< LQ	49.0
St Pierre droite	0.61	< LQ	< LQ	1.2	1.20	3.5	0.19	0.07	< LQ	72.8
St Francois	1.05	0.1	< LQ	0.5	2.15	5.1	0.25	< LQ	< LQ	38.3
Belier	0.37	0.1	< LQ	0.7	2.84	6.3	0.14	< LQ	< LQ	36.2
Montberault	2.36	< LQ	< LQ	3.1	0.34	3.3	0.54	0.07	< LQ	11.1
St Pierre gauche	0.43	< LQ	< LQ	1.4	2.01	6.4	0.16	0.06	< LQ	51.4
	Na	Ni	PO4	Pb	SO4	SiO2	Sr	Zn	CO3	HCO3
<i>LQ</i>	0.5	0.1	0.1	0.05	0.5	0.5	0.1	0.5	5	5
<i>Unite</i>	mg/l	µg/l	mg/l	µg/l	mg/l	mg/l	µg/l	µg/l	mg/l	mg/l
Zezin	10.0	0.35	< LQ	< LQ	43.4	15.4	644	40.0	< LQ	347
Fontaine notre dame	9.6	0.30	< LQ	< LQ	42.9	15.1	687	3.63	< LQ	335
St Pierre droite	5.4	0.28	< LQ	< LQ	35.7	7.9	399	34.7	< LQ	277
St Francois	7.2	0.17	< LQ	0.09	33.3	15.2	897	1.78	< LQ	301
Belier	7.6	0.25	< LQ	0.05	35.8	16.8	805	1.40	< LQ	347
Montberault	3.6	1.88	2.4	0.13	16.0	7.9	184	154	< LQ	238
St Pierre gauche	9.1	0.24	< LQ	0.05	52.0	11.5	478	28.0	< LQ	316
	pH	Temp	Cond	Eh	O₂					
<i>Unite</i>		°C	µS.cm ⁻¹	mV	%					
Zezin	7.05	9.4	812	241.3	90.9					
Fontaine notre dame	6.98	9.2	793	255.5	88					
St Pierre droite	7.28	9.5	784	224.5	92.3					
St Francois	7.11	7.4	700	244.2	87.8					
Belier	7.04	8.7	761	238	93.7					
Montberault	6.65	7.8	446	254.2	77.8					
St Pierre gauche	7.45	8.7	720	237	94					

Résultats de la première campagne

	Ag	Al	As	B	Ba	Ca	Cd	Cl	Co	Cr
<i>LQ</i>	0.01	0.5	0.05	0.5	0.05	0.5	0.01	0.5	0.05	0.1
<i>Unite</i>	$\mu\text{g/l}$	$\mu\text{g/l}$	$\mu\text{g/l}$	$\mu\text{g/l}$	$\mu\text{g/l}$	mg/l	$\mu\text{g/l}$	mg/l	$\mu\text{g/l}$	$\mu\text{g/l}$
Zezin	0.06	< LQ	0.13	19.7	25.4	137.5	< LQ	32.1	< LQ	0.42
Fontaine notre dame	0.06	< LQ	0.09	16.6	21.6	138.6	0.01	35.1	< LQ	0.30
St Pierre droite	0.06	< LQ	0.11	10.6	16.4	133.5	< LQ	25.3	< LQ	0.10
St Francois	0.06	0.58	0.11	11.2	14.1	128.0	< LQ	32.2	< LQ	0.29
Belier	0.06	0.91	0.10	10.9	19.6	135.6	0.01	28.2	< LQ	0.14
Montberault	0.04	1.44	2.62	19.3	24.1	72.2	0.02	4.7	0.51	0.13
St Pierre gauche	0.05	< LQ	0.10	14.3	11.7	142.7	0.01	33.4	< LQ	0.14
	Cu	F	Fe	K	Li	Mg	Mn	NH4	NO2	NO3
<i>LQ</i>	0.1	0.1	0.02	0.5	0.1	0.5	0.1	0.05	0.01	0.5
<i>Unite</i>	$\mu\text{g/l}$	mg/l	mg/l	mg/l	$\mu\text{g/l}$	mg/l	$\mu\text{g/l}$	mg/l	mg/l	mg/l
Zezin	0.18	0.1	< LQ	4.7	3.93	10.9	< LQ	< LQ	< LQ	48.0
Fontaine notre dame	0.46	0.2	< LQ	3.3	3.39	9.9	0.19	< LQ	< LQ	48.4
St Pierre droite	0.33	< LQ	< LQ	1.3	1.37	3.7	< LQ	< LQ	< LQ	71.8
St Francois	0.19	0.2	< LQ	0.5	2.58	5.4	< LQ	< LQ	< LQ	36.9
Belier	0.48	0.2	< LQ	1.0	3.63	6.8	0.24	< LQ	< LQ	34.1
Montberault	1.91	< LQ	< LQ	2.6	0.32	3.1	0.32	< LQ	< LQ	8.0
St Pierre gauche	0.52	0.1	< LQ	1.4	2.46	6.7	0.36	< LQ	< LQ	49.8
	Na	Ni	PO4	Pb	SO4	SiO2	Sr	Zn	CO3	HCO3
<i>LQ</i>	0.5	0.1	0.1	0.05	0.5	0.5	0.1	0.5	5	5
<i>Unite</i>	mg/l	$\mu\text{g/l}$	mg/l	$\mu\text{g/l}$	mg/l	mg/l	$\mu\text{g/l}$	$\mu\text{g/l}$	mg/l	mg/l
Zezin	10.4	0.33	< LQ	< LQ	43.1	15.9	662	1.02	< LQ	338
Fontaine notre dame	10.3	0.31	< LQ	< LQ	44.0	15.6	712	3.08	< LQ	326
St Pierre droite	5.4	0.26	< LQ	< LQ	35.2	8.1	400	< LQ	< LQ	268
St Francois	7.5	0.16	< LQ	< LQ	33.1	15.3	883	1.02	< LQ	291
Belier	7.5	0.37	< LQ	0.05	36.5	17.1	808	1.67	< LQ	331
Montberault	3.1	1.86	2.6	0.06	10.0	7.6	159	2.33	< LQ	204
St Pierre gauche	9.1	0.24	< LQ	< LQ	53.5	11.6	502	0.61	< LQ	308
	pH	Temp	Cond	Eh	O₂					
<i>Unite</i>		°C	$\mu\text{S.cm}^{-1}$	<i>mV</i>	%					
Zezin	7.17	10.7	815	198	85.7					
Fontaine notre dame	7.18	10.6	799	183	84.1					
St Pierre droite	7.45	10.3	717	115	91.6					
St Francois	7.17	9.9	695	199	78.7					
Belier	7.34	10.2	745	205	89					
Montberault	7.07	11.3	386	191	82.6					
St Pierre gauche	7.22	10.7	792	118	88					

Résultats de la seconde campagne



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Centre scientifique et technique

3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009

45060 – Orléans Cedex 2 – France

Tél. : 02 38 64 34 34 - www.brgm.fr

Direction régionale "Picardie"

Polytech de Rivery
7 rue Anne Frank

80136 – Rivery – France

Tél. : 03 22 91 42 47