

Les aquifères de socle en Basse-Normandie

Lower Normandy hard rock aquifers

Alexandra LAURENT ⁽¹⁾, Maurice FRESLON ⁽²⁾, Frédéric GRESSELIN ⁽³⁾

(1) BRGM Basse-Normandie, (2) DDTM Manche, (3) DREAL Basse-Normandie
a.laurent@brgm.fr, maurice.freslon@manche.gouv.fr, Frederic.GRESSELIN@developpement-durable.gouv.fr

I. INTRODUCTION

Les formations de socle recouvrent la moitié de la surface de la Basse-Normandie et sont masquées sous les formations sédimentaires du Bassin parisien dans l'autre moitié de la région. Environ 40 % des captages en eau souterraine servant à alimenter en eau potable les populations bas-normandes se situent dans les formations de socle armoricain. D'après les données de l'ARS (agence régionale de santé), les captages dans le socle permettraient de fournir environ 73 Mm³ par an (débit réglementaire de la base de données de l'ARS). Malgré l'abondance et l'importance de cette ressource, peu d'études ont été réalisées jusqu'alors sur ce type d'aquifères en Basse-Normandie.

Grâce aux suivis hydrométriques menés par la DREAL de Basse-Normandie depuis une quarantaine d'années, les débits d'étiage de nombreux cours d'eau sont connus, notamment dans le socle armoricain. Ces suivis s'exercent en continu au niveau de stations hydrométriques ou par jaugeage ponctuel sur les sites non équipés. La synthèse des données déclarées dans la banque du sous-sol (BSS) permettant de lister plusieurs paramètres hydrogéologiques par ouvrage implanté dans les formations du socle, il est possible d'analyser les relations pouvant exister entre la productivité aquifère des forages et celle dont disposent les cours d'eau.

L'objectif de l'étude est de présenter les caractéristiques hydrogéologiques spécifiques aux formations géologiques constituant les aquifères de socle et de mettre en évidence leurs capacités aquifères en lien avec leurs variabilités lithologiques et hydrogéologiques.

II. CONTEXTE GEOLOGIQUE

Le territoire de la Basse-Normandie se partage en deux grands domaines géologiques, le Bassin parisien à l'est, constitué de formations carbonatées ou détritiques, d'âge mésozoïque et cénozoïque, et le Massif armoricain à l'ouest, composé de terrains d'âges précambrien et paléozoïque (-2 milliards d'années à -295 Ma). Le bâti armoricain dispose d'une histoire complexe marquée de l'empreinte des cycles orogéniques icartien, cadomien, varisque et alpin.

Les formations du socle armoricain de Basse-Normandie sont composées de manière simplifiée des grands ensembles suivants (Figure 1) :

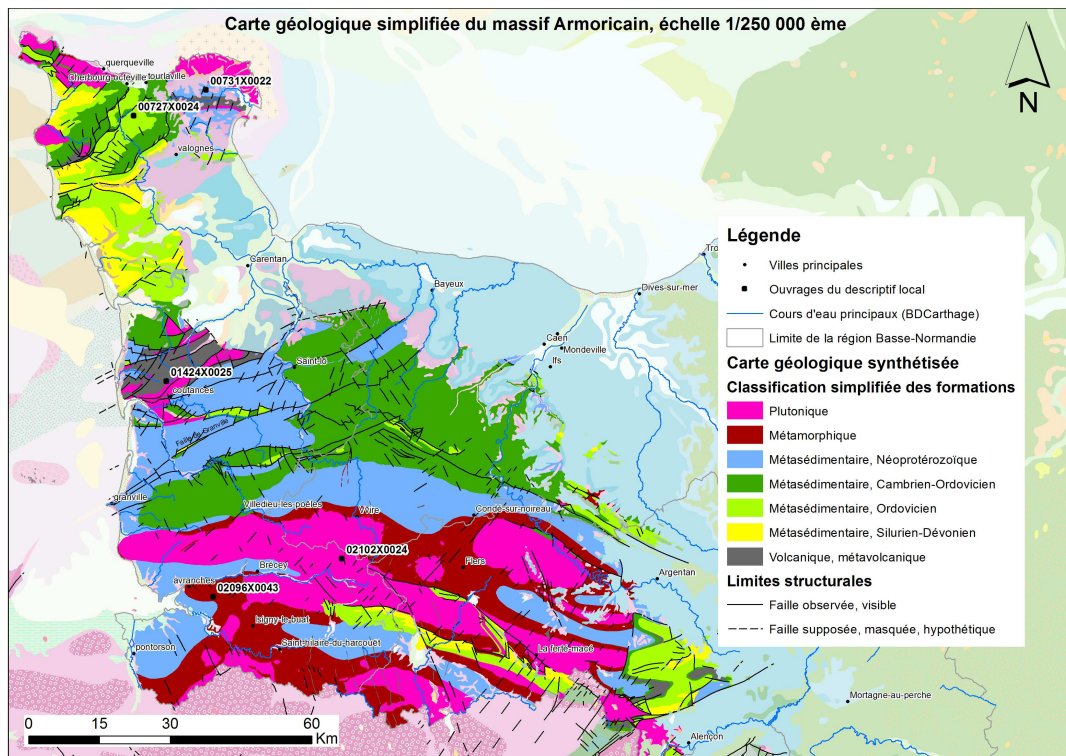


Figure 1 – Carte géologique simplifiée du « socle » en Basse-Normandie, fond de carte géologique au 1/1 000 000^{ème}, BRGM

Le socle cristallin-cristallophyllien est formé de la cordillère constantienne (un ancien arc insulaire situé dans la région de Coutances), de l'arc insulaire du Vaast (Val de Saire) et de massifs granitiques à dioritiques. Ces derniers sont composés de plutons et des auréoles de métamorphisme de cornéennes et de schistes tachetés au sein desquels ils se sont injectés.

Les plutons granodioritiques des massifs de Vire et d'Avranches (sud Manche et sud-ouest Calvados), des massifs d'Athis et de la Ferté-Macé (sud-ouest Orne), de Fougères et de la Hague (Manche) mais aussi les diorites quartziques du massif de Coutances (centre-ouest de la Manche) et de la Hague se sont mis en place à la fin des temps précambriens (Dissler et al., 1988). En revanche, les plutons granodioritiques de Barfleur, de Flamanville et le granite d'Alençon, de moindre superficie et situés au nord du département de la Manche et dans l'Orne, se sont introduits plus récemment au Carbonifère, lors de l'édification de la chaîne varisque.

Peu de formations volcaniques sont représentées dans la région. Toutefois, la formation de Montsurvent composée de basaltes et d'andésites, mise en place à la fin du Précambrien, s'étend dans le centre Manche au sein de la cordillère constantienne. Des roches volcaniques existent également dans le Val de Saire (Nord-Cotentin, un arc insulaire cadomien également) et dans la région de Vassy (des tholéiites abyssales).

Le socle sédimentaire est composé de formations briovériennes et paléozoïques. Ces formations sont parfois portées dans un stade métamorphique épizonal à anchizonal. Le Briovérien (ou néoprotérozoïque) sédimentaire est constitué de schistes et de grès plus ou moins déformés. Les séries sédimentaires du Briovérien inf. (formation de Saint-Lô) et du Briovérien sup. (formation de Granville) sont formées de roches détritiques terrigènes (pélites, grauweekes, grès fins, phtanites). A proximité des intrusions magmatiques cadomiennes, elles sont transformées en schistes tachetés ou cornéennes (voir socle cristallophyllien ci-dessus).

Les séries du Paléozoïque sont constituées essentiellement de roches détritiques d'âge Cambrien à Carbonifère. A la fin du Dévonien et durant une partie du Carbonifère, l'érection de la chaîne varisque les déforme en une succession de plis synschisteux.

Les synclinaux varisques d'axe WNW-ESE ou WSW-ENE selon les endroits (synclinal de la zone bocaine, synclinal d'Urville, synclinal de May, synclinal de Siouville...), entaillés par des vallées parfois profondes aux versants abrupts, sont essentiellement composés de terrains paléozoïques tandis que les anticlinaux qui les enchâssent, se composent des terrains plus déformés du Briovérien (Arnaud et *al.*, 2007).

De manière plus détaillée, la pile sédimentaire du Paléozoïque est formée à sa base d'un conglomérat, d'arkoses et de grès feldspathiques puis d'une succession de grès, de siltites et d'argilites. Les derniers magmatismes de l'orogénèse cadomienne (des laves acides essentiellement) servent de substratum à ces dépôts dans le Nord Cotentin mais s'intercalent dans les dépôts cambriens du sud de l'Orne.

Dans le Nord Cotentin, dans la vallée de l'Orne mais aussi dans le Maine, une plateforme carbonatée s'installe précocement dès le Cambrien inférieur mais pour une période relativement brève et certains de ces calcaires abritent un karst.

A l'issue de l'orogénèse cadomienne, la véritable transgression marine intervient à l'Ordovicien inférieur (Arenig) dont la mer recouvre toute la région contrairement à celle du Cambrien. Les formations des Grès de May, du Grès armoricain, des Schistes d'Urville (schistes noirs à rares intercalations gréseuses), et des Schistes du Pissot (schistes, argiles noirs) sont les principales formations s'étant déposées au cours de l'Ordovicien. Les grès ordoviciens comptent parmi les plus résistants à l'érosion de la région. Avec les séries détritiques du Cambrien basal, ils dessinent de longues lignes de crêtes rocheuses armant les principaux reliefs régionaux. Les schistes ordoviciens mais aussi les ampélites siluriennes et les schistes dévoniens, beaucoup plus sensibles à l'érosion, forment les parties déprimées des synclinaux paléozoïques.

La longue série détritique du Paléozoïque s'interrompt temporairement au Dévonien inférieur avec l'installation d'une nouvelle plate-forme carbonatée. Des carbonates se déposent également au Carbonifère inférieur dans la région de Montmartin-sur-Mer. Ils sont localement karstiques, tout comme ceux du Cambrien.

Les dépôts paléozoïques issus du démantèlement de la chaîne varisque en Basse-Normandie sont essentiellement détritiques : Carbonifère houiller et Permien du bassin de Carentan.

Toutes ces formations sont recouvertes d'un manteau d'altérites et de formations superficielles plus ou moins épais, dont la présence est en partie liée à l'histoire quaternaire de la région. La position de la Basse-Normandie en bordure de l'inlandsis du nord de l'Europe au cours des dernières glaciations a favorisé effectivement la gélifraction des horizons superficiels du socle armoricain, le colluvionnement de pente et le dépôt de loess. Toutes ces formations superficielles périglaciaires auxquelles il convient d'ajouter les arènes granitiques et les altérites plus anciennes, semblent jouer un rôle majeur dans l'hydrogéologie régionale. Les failles, les fractures et la schistosité ne sont donc pas les seuls éléments pouvant expliquer la présence d'eau dans le sous-sol armoricain de la région.

III. METHODOLOGIE

Depuis plusieurs décennies la DREAL de Basse-Normandie procède à des campagnes de jaugeage au niveau des stations de son réseau hydrométrique (suivi en continu) mais aussi sur des cours d'eau non équipés de centrales d'acquisition (réseau dit complémentaire). Environ 850 cours d'eau ou tronçon de cours d'eau ont fait l'objet à ce jour d'un suivi. Les données produites servent à estimer les caractéristiques du tarissement des cours d'eau, les relations nappes / rivières qui les conditionnent ainsi que le débit de référence de la loi sur l'eau. Ce dernier est le débit d'étiage $QMNA_{5}$, soit le débit (Q) mensuel (M) minimal (N) de chaque année civile (A) de fréquence de retour 5 ans sec. Il s'agit donc du débit mensuel minimal de l'année civile ayant une probabilité d'être dépassé 4 années sur 5. Chaque station hydrométrique ou point de calcul est associé à une surface de bassin versant ; le débit d'étiage ($QMNA_{5}$) est ainsi exprimé en l/s/km² (débit dit spécifique). Cette unité permet de comparer entre eux des bassins versants de taille très différente ainsi que la productivité des aquifères qui les composent. Les stations du réseau complémentaire sont choisies, si possible, de sorte que le cours d'eau mesuré ne soit alimenté que par un seul aquifère. Ceci permet d'appréhender aisément la relation nappe / rivière qui lie les milieux aquatiques souterrains et superficiels dans un même bassin versant.

La synthèse des données des ouvrages recensés en BSS recoupant les formations du Massif armoricain de Basse-Normandie a permis de collecter les paramètres caractérisant l'aspect quantitatif et qualitatif de la ressource en eau souterraine. Parmi les 1575 ouvrages listés, 267 valeurs de débits spécifiques des ouvrages ont été calculés à partir d'un rabattement mesuré à un débit de pompage associé. Ces valeurs sont utilisées avec précaution, car les données de rabattement et de débit de pompage ont pu être obtenues de façon hétérogène sur les ouvrages. En BSS de Basse-Normandie, les dossiers les plus anciens ont été instruits dans les années 1950, mais les travaux d'ouvrages les plus anciens et déclarés en BSS datent de la fin du 18^{ème} siècle.

Les ouvrages de la BSS et les stations hydrométriques (et points de calcul) de la DREAL de Basse-Normandie ont été associés à une classe de formation géologique du socle présentée ci-dessus (Figure 1). Les valeurs de débit d'étiage (QMNA₅) spécifique et de débit spécifique de l'ouvrage ont été moyennées par classe de formations géologiques (Tableau 1). Le calcul des moyennes s'est accompagné du calcul d'un intervalle de confiance de la moyenne (distribution de Student) à 90 %.

Afin d'avoir une approche à une échelle plus locale, des sites d'études, positionnés sur la figure 1, ont été sélectionnés en fonction des débits de production des forages d'eau. Les caractéristiques acquises lors de la réalisation des ouvrages choisis sont présentées (Tableau 2).

IV. RESULTATS

II. 1 Caractérisation des formations du socle à l'échelle régionale

Les formations de socle en Basse-Normandie présentent des potentiels aquifères non négligeables, qui se manifestent naturellement à travers le soutien aux débits d'étiage des cours d'eau et qui diffèrent selon la nature des roches. A partir des données de la DREAL de Basse-Normandie et des données collectées en BSS, le rapport relatif du débit d'étiage (QMNA₅) spécifique avec le débit spécifique de forages a pu être illustré (Tableau 1 et figure 2).

Classement des formations géologiques	Nb. de valeurs de débits spécifiques	Nb. de stations hydrométriques (DREAL)	QMNA ₅ sp. moy. (l/s/km ²) Intervalle de confiance à 90 %	Q sp. moy. (m ³ /h/m) Intervalle de confiance à 90%
Plutonique	57	38	2,6 ± 0,4	4,1 ± 1,0
Métamorphique	28	26	2,0 ± 0,3	3,8 ± 1,7
Métasédimentaire, Néoprotozoïque	49	32	1,4 ± 0,3	5,8 ± 5,2
Métasédimentaire, Cambrien-Ordovicien	88	18	1,3 ± 0,4	8,1 ± 2,5
Métasédimentaire, Ordovicien	18	9	2,8 ± 0,8	3,4 ± 2,0
Métasédimentaire, Silurien-Dévonien	16	5	1,9 ± 1,2	5,6 ± 3,3
Volcanique	11	4	1,9 ± 1,1	4,1 ± 2,4

Tableau 1 – Répartition des moyennes des débits spécifiques (source BSS) et des débits d'étiage spécifiques des cours d'eau (source DREAL de Basse-Normandie), avec un intervalle de confiance (Student) à 90 %, par classe de formations géologiques du socle

Le débit d'étiage ($QMNA_{-5}$) spécifique varie entre 1,3 et 2,8 l/s/km² avec des intervalles de confiance à 90 % compris entre 0,3 et 1,2 l/s/km², le débit spécifique des forages varie quant à lui entre 3,4 et 8,1 m³/h/m avec des intervalles de confiance à 90 % compris entre 1,0 et 5,2 m³/h/m. Il apparaît difficile de mettre en perspective la valeur moyenne de débit spécifique associée aux formations métasédimentaires du néoprotérozoïque, au regard de l'intervalle de confiance élevé.

En moyenne les formations métasédimentaires du Cambrien correspondent aux ressources les plus productives. En revanche, ce sont les formations plutoniques et métasédimentaires de l'Ordovicien qui en moyenne soutiennent le plus les cours d'eau à l'étiage par rapport aux autres formations du socle.

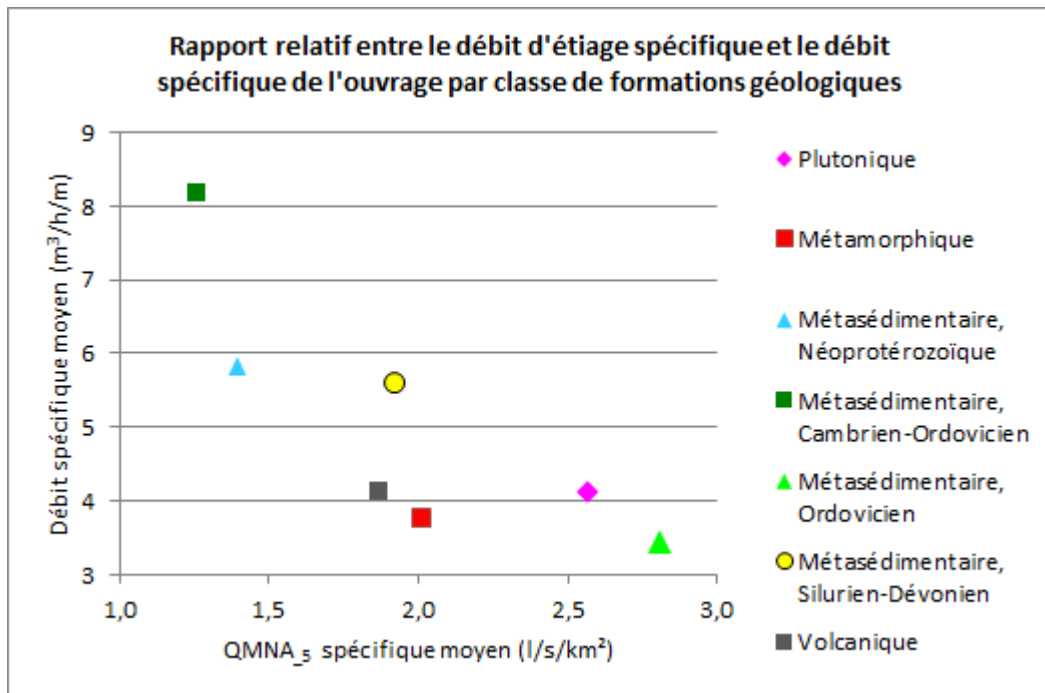


Figure 2 – Représentation du rapport du débit d'étiage ($QMNA_{-5}$, source : DREAL de Basse-Normandie) et du débit spécifique (source : BSS) par classe de formations géologiques du socle

Le rapport relatif des deux paramètres paraît montrer une corrélation. En effet une tendance semble se dessiner entre les débits d'étiage spécifiques et les débits spécifiques des forages (Figure 2). Les formations plutoniques et d'âge ordovicien assurent en période d'étiage un apport plus important au cours d'eau et présentent une productivité en eau souterraine moindre. En revanche les formations métasédimentaires du néoprotérozoïque et celles du Cambrien et Ordovicien montrent un soutien à l'étiage des cours d'eau plus faible, de plus les formations métasédimentaires du Cambrien et Ordovicien semblent être les plus productives.

II. 2 Descriptions locales des formations du socle

Les débits spécifiques moyennés à l'échelle du Massif armoricain de la Basse-Normandie (Tableau 1) révèlent des valeurs plutôt modestes (< 10 m³/h/m). En revanche des études spécifiques réalisées dans le département de la Manche ont permis de mettre en évidence des zones de socle avec des débits spécifiques pouvant atteindre 40 m³/h/m. Les principaux résultats de ces études circonscrites sont présentés dans le tableau 2.

Classe des formations géologiques	Code BSS	Commune	Formation recoupée	Prof. (m)	Débit instantané (m ³ /h) forage essai (env. 165 mm)	Débit instantané (m ³ /h) forage exploitation (env. 254 mm)	Principales arrivées d'eau	Débit spécifique (m ³ /h/m)	Transmissivité (m ² /s)	Interprétation pompage d'essai
Plutonique	02102X0024	Vengeons	Granite de vire	55	30	105	Entre -15 et -40 m	25	1,2E-02	Theis/Jacob
Métamorphique	02096X0043	Saint Loup	Schistes tachetés du Briovérien	70	145	260	Entre -22 et -65 m	15	1,2E-03	Système fracturé
Métasédimentaire, Néoprotérozoïque	00731X0022	Théville	Schistes du Briovérien	80	40	115	Entre -20 et -70 m	24	2,2E-02	barrières étanches + réduction densité fracturation
Métasédimentaire, Ordovicien	00727X0024	Tollevast	Grès de May fracturés (synclinal de Siouville)	65	80	225	Entre -22 et -55 m	40	9,0E-03	Theis + barrières étanches
Volcanique	01424X0025	La Vendelée	Métavolcanites du Briovérien	40	30	72	Entre -10 et -40 m	24	2,0E-03	Theis + barrières étanches

Tableau 2 – Tableau des caractéristiques hydrogéologiques de forages en terrain de socle ancien (d'après données DDAF Manche 1981-2008)

Les paramètres hydrogéologiques sont associés à un code BSS. Parmi la classification des formations géologiques du socle, on distingue :

- **Les granodiorites et auréoles de métamorphisme** : dans le sud-Manche les complexes granitiques peuvent fournir des débits d'exploitation atteignant 50 m³/h dans le massif de Vire (ex : Vengeons - 02102X0024) et dans les schistes tachetés en bordure du massif d'Avranches (ex : St-Loup – 02096X0043).
- **Les roches métasédimentaires** (schistes, grès, siltites) : constituent la majeure partie du socle bas-normand, notamment dans le Nord Cotentin, avec le Val de Saire (ex : débit de pompage de 20 à 30 m³/h, 00731X0022), ou la zone du synclinal de Siouville (ex : débit de pompage de 50 m³/h et transmissivité de 9.10⁻³ m²/s, 00727X0024).
- **Les roches volcaniques** : zones moins étendues qui affleurent au nord de Coutances, où la formation de Montsurvent révèle des débits d'exploitation supérieurs à 30 m³/h (ex : La Vendelée – 01424X0025).

V. DISCUSSIONS ET CONCLUSIONS

Les résultats du rapport relatif entre les débits d'étiage spécifiques (QMNA₅) et les débits spécifiques des ouvrages (Figure 2) montrent que les formations métasédimentaires du Cambrien-Ordovicien sont les plus productives en moyenne (8 m³/h/m) et celles qui soutiennent le moins les cours d'eau (QMNA₅ = 1,3 l/s/km²). En revanche les formations les moins productives et celles qui soutiennent le plus les cours d'eau à l'étiage sont les formations de l'Ordovicien (4,1 m³/h/m et 2,6 l/s/km²) et les formations plutoniques (3,4 m³/h/m et 2,8 l/s/km²). Le débit spécifique calculé et moyenné correspondant aux formations métasédimentaires du néoprotérozoïque n'a pas été discuté dans cette étude, l'intervalle de confiance de cette valeur étant trop élevé.

Ceci pourrait s'expliquer par une plus grande variabilité lithologique au sein même de ces formations. Une distinction plus fine de cette classe serait nécessaire pour apporter de meilleurs résultats.

Les zones altérées développées par des contraintes tectoniques ou des mécanismes chimiques jouent un rôle non négligeable dans les relations nappe-rivière. Les zones fracturées plus en profondeur donnent un caractère transmissif à la formation incisée, et améliorent les débits spécifiques aux ouvrages.

En revanche, la production au forage n'est pas en relation directe avec les débits spécifiques des cours d'eau. Une tendance semble se dessiner entre les débits d'étiage spécifique et les débits spécifiques des forages (Figure 2).

Pour les formations très dures et très compactes (granite, grès armoricain,...), la fracturation moins développée en profondeur pourrait expliquer des débits spécifiques moyens d'ouvrage plus faibles alors qu'une altération plus poussée en surface permettrait une alimentation substantielle des cours d'eau par des circulations au sein d'horizons supérieurs filtrants. Inversement, les schistes altérés en surface des formations cambriennes ralentiraient les circulations d'eau souterraine tandis que les horizons schisto-gréseux moyennement durs localisés en profondeur seraient plus propices à une fracturation densifiée. Néanmoins cette tendance doit être confirmée par des études et analyses (à la fois hydrogéologiques et géologiques) plus approfondies.

L'observation des formations de socle à l'échelle régionale donne des résultats différents par rapport à une observation plus circonscrite. Le tableau 2 met ainsi en évidence des ouvrages productifs, quelle que soit la formation recoupée. Les arrivées d'eau y sont relativement peu profondes. Les débits instantanés sont parfois spectaculaires, les débits spécifiques sont importants et les transmissivités sont bonnes, de l'ordre de 10^{-2} à 10^{-3} m²/s. Dans le département de la Manche en particulier, les aquifères de socle constituent une ressource en eau incontournable. Des études spécifiques accompagnées de recherches approfondies peuvent permettre de mettre en évidence des zones fracturées, dont l'extension latérale et en profondeur conditionnera largement la productivité des forages. Par ailleurs certaines investigations ont montré que des zones du socle pouvaient être non aquifères, notamment dans des secteurs non fracturés (granites, grès armoricain par exemple).

Dans les aquifères de socle, les arrivées d'eaux profondes (30-100 m) sont généralement de bonne qualité et protégées des pressions anthropiques, avec un développement des phénomènes de dénitrification. Néanmoins la présence d'éléments géogéniques, tels que le fer et le manganèse, et parfois l'arsenic et/ou l'antimoine (ex : formation de Montsurvent), peut contraindre la mise en exploitation de la ressource. Dans la Manche dès 1998, une solution technique originale (tube suspendu sans soudures, système HAGUESTA®) a été mise en place dans plusieurs ouvrages recoupant le socle, notamment lorsque les éléments « fer » et « manganèse » sont présents, afin d'une part de simplifier l'entretien et d'autre part de limiter le développement bactérien. Cette technique, qui ne peut être développée que dans des formations cohérentes sans risque d'éboulement, présente aussi l'avantage de limiter les pertes de charge dans l'ouvrage, mais aussi de réduire le coût de l'opération.

Plusieurs perspectives sont envisageables. A l'échelle régionale, il serait nécessaire de préciser et détailler les relations entre les variabilités lithologiques des formations de socle et leurs caractéristiques hydrogéologiques puis d'étudier les éventuelles corrélations avec les données hydrogéochimiques. En parallèle, à une échelle locale, la délimitation des zones fracturées et, quand elles sont présentes, la caractérisation de l'épaisseur et des propriétés des formations superficielles, notamment par des méthodes géophysiques, amélioreraient l'investigation des secteurs à fortes potentialités aquifères du socle bas-normand.

Références bibliographiques :

Arnaud L., Mardhel V., Coueffé R., Tourlière B. (2007) – Atlas hydrogéologique numérique du Calvados. Volet cartographique. Rapport BRGM/RP-55670-FR, 150p.

Dissler E., Dore F., Dupret L., Gresselin F., Le Gall J. (1988) - L'évolution géodynamique cadomienne du Nord-Est du Massif armoricain. Bull. Soc. géol. France, IV, 5, p 801-814.

Faillat J-P., Talbo H., Mazenc B., Marjolet G., Arnaud P. (2006) – Massif Armoricain, Aquifères et eaux souterraines. Aquifères & eaux souterraines en France - Tome1. Brgm éditions. Orléans : BRGM. 132 à 147p.

Freslon M. et al. (1981 à 2008) – Rapports de recherches d'eau et de forages d'exploitation DDAF/DDTM de la Manche.

Klein C. (1975) – Massif Armoricaire et Bassin Parisien : Contribution à l'étude géologique et géomorphologique d'un massif ancien et de ses enveloppes sédimentaires (Normandie, Maine, Anjou, Tourain, Poitou septentrional et contrées adjacentes). Thèse de doctorat. Université de Bretagne occidentale (Brest).

Le Gall J. (1993) - Pérogenèse des magmas andésitiques et ignimbritiques et leur signification dans l'évolution géodynamique cadomienne. Reconstitution des dynamismes éruptifs d'une province paléovolcanique : l'exemple du graben cambrien du Maine (Est du Massif armoricain). Mémoire de géosciences, n°52, Rennes, 361 p.

Petit V., Lachassagne P., Arnaud L., Coueffé R., Tourlière B. (2007) – Atlas hydrogéologique numérique du Calvados. Volet relatif aux aquifères de socle. Rapport BRGM/RP-55671-FR, 78p.

Wuilleumier A., Allanic C., Boudet M., Bourguin B., Croiset N., Machard de Gramond H., Pannet P., Tourlière B., Dugué O. (2013) - Modélisation des aquifères de la plaine de Caen et du bassin de la Dives. Phase 1 : Collecte des données, synthèse hydrogéologique et construction du modèle géologique. Rapport BRGM/RP-62002-FR. 178p.