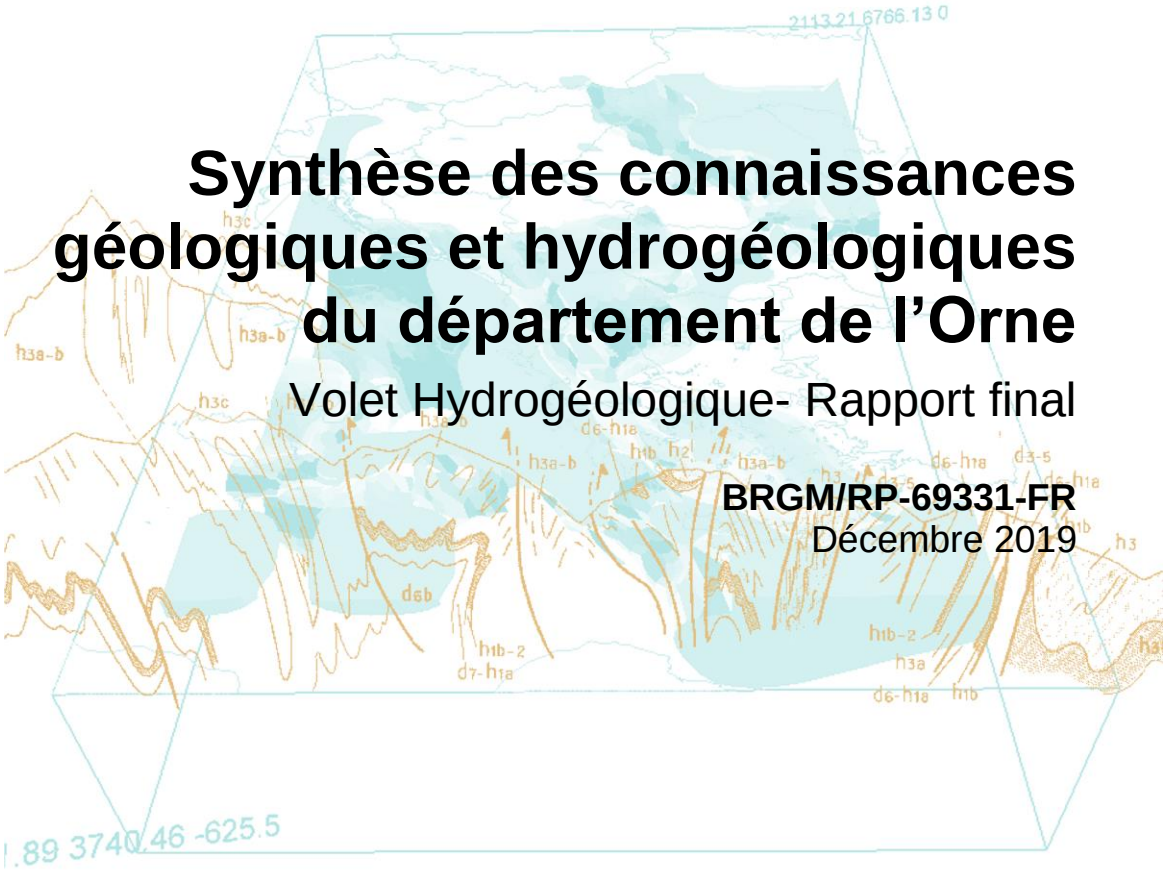


Document public



Synthèse des connaissances géologiques et hydrogéologiques du département de l'Orne

Volet Hydrogéologique- Rapport final

BRGM/RP-69331-FR
Décembre 2019

Avec le concours financier de :

Document public

Synthèse des connaissances géologiques et hydrogéologiques du département de l'Orne

Volet hydrogéologique - Rapport final

BRGM/RP-69331-FR
Décembre 2019

Étude réalisée dans le cadre du projet de recherche et développement partagés (AP16BNO007) mené pour le Syndicat Départemental de l'Eau de l'Orne (SDE61) : Programme OAGPRO61 bis, Outil intégré d'Aide à la Gestion Patrimoniale des Ressources en eaux souterraines du département de l'Orne, Phase 1.

E. Idée, N. Jallais, A. Boisson, A. Neveux avec la collaboration de F. Gresselin, O. Dugué

Vérificateur :	**Approbateur :**
Nom : Luc Arnaud	Nom : Didier Pennequin
Fonction : Hydrogéologue	Fonction : Directeur Régional Normandie
Date : 22/11/2019	Date : 16/12/2019
Signature :	Signature :

Le système de management de la qualité et de l'environnement est certifié par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.
Contact : qualite@brgm.fr

Avec le concours financier de :

Mots-clés : Hydrogéologie, Géologie, Syndicat Départemental de l'Eau, piézométrie, failles, écoulement, paramètres hydrodynamiques, aquifères, sédimentaire, socle, Orne, Normandie, France.

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

Idée E., Jallais N., Boisson A., Neveux A. avec la collaboration de Gresselin F., Dugué O. (2019) – Synthèse des connaissances géologiques et hydrogéologiques du département de l'Orne, Volet hydrogéologique. Rapport final. BRGM/RP-69331-FR, 258p., 122 ill., 20 tabl., 3 ann.

© BRGM, **2019**, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Résumé

La géologie du département de l'Orne a pour particularité d'être située à cheval entre le Massif Armoricain à l'ouest, avec ses formations géologiques dites de socle (roches cristallines à cristallophylliennes ou métamorphiques ainsi que les formations sédimentaires plissées du Paléozoïque), et le Bassin Parisien à l'est, avec ses formations sédimentaires plus récentes (Mésozoïque et Cénozoïque).

Du fait de cette géologie contrastée, deux grands types d'aquifères sont présents :

- Les aquifères compartimentés, discontinus et fissurés, dits « de socle »,
- Les aquifères sédimentaires, stratifiés et plus ou moins continus.

Ces réservoirs ont un comportement hydraulique spécifique lié à l'histoire géologique des roches qui les constituent, où les lithologies affectées par des éléments structuraux (failles, plis, …) contribuent au fonctionnement hydraulique des nappes d'eau souterraine.

La connaissance du fonctionnement des ressources en eau souterraine est aujourd'hui un enjeu majeur pour développer les stratégies nécessaires à leur gestion durable et à celle des milieux aquatiques associés. Malheureusement, les informations permettant la compréhension de leur fonctionnement sont souvent incomplètes, en partie notamment à cause d'une dispersion des données, à une répartition inégale de l'information sur le territoire, à un manque de valorisation de l'information et à un accès aux ressources documentaires de ce fait, rendu difficile.

Pour répondre à ces enjeux, le Syndicat Départemental de l'Eau de l'Orne (SDE61) et le BRGM Normandie ont donc travaillé, avec leurs partenaires, à la mise en œuvre d'un programme en 2 phases d'Amélioration des connaissances Géologiques et Hydrogéologiques pour l'ensemble du département de l'Orne, qui vise à créer un outil intégré d'aide à la gestion patrimoniale des ressources en eau souterraine du département (programme OAGPRO61 bis).

L'étude, objet du présent rapport, représente la première phase du Programme OAGPRO61 Bis. Elle a permis de recueillir et de valoriser les informations facilement disponibles au Syndicat Départemental des Eaux de l'Orne et au BRGM, afin de proposer une synthèse bibliographique des connaissances hydrogéologiques sur le fonctionnement des grands aquifères du domaine sédimentaire et de socle.

Les entités concernées étaient les suivantes :

- Les aquifères du Briovérien, des granitoïdes et de leur auréole de métamorphisme, les formations paléozoïques pour le domaine de socle,
- La craie céno-turonienne, les sables du Perche, les formations oxfordiennes et enfin les calcaires du Bajocien-Bathonien pour les formations du domaine sédimentaire.

Ce travail s'est donc appuyé sur ce socle de connaissances afin de préciser de manière générale et pour chacun des grands aquifères :

- Leur fonctionnement général (aquifère à nappe libre ou captive, rôle de la fracturation ou du karst et les conditions d'alimentation et de recharge),

- Les directions des principaux écoulements, lorsqu'une piézométrie était disponible,
- Les fluctuations des niveaux, dont l'analyse des chroniques des ouvrages de suivi piézométrique (SDE61 et BRGM),
- Les paramètres hydrodynamiques et autres indicateurs de productivité.

Ce travail a également permis de réaliser une synthèse générale des connaissances sur le fonctionnement des aquifères du socle armoricain et de proposer une méthodologie de caractérisation de ces derniers, transposable au domaine Nord-Armoricain et plus particulièrement au contexte du département de l'Orne.

Ce travail de synthèse préliminaire a également permis de mettre en évidence un certain nombre de lacunes, notamment : l'absence d'informations précises sur les sens et directions d'écoulement, de la position des eaux souterraines par rapport aux eaux superficielles (niveau perchés, à l'équilibre, drainant), de l'absence d'évaluation des épaisseurs d'altérites et d'horizon fissuré, du rôle de drain ou non des principales fractures « tectoniques », etc…

Ces éléments sont pourtant essentiels pour avoir une vision plus précise du fonctionnement des aquifères sédimentaires et de socle permettant de fournir des indicateurs opérationnels de gestion ou de protection efficace de ces ressources (comme par exemple : zone d'alimentation/protection, vulnérabilité, risque inondation et sécheresse, secteurs productifs, suivi des eaux souterraine, etc…).

Pour répondre à ces enjeux, la suite du programme OAGPRO61 bis (phase 2 à venir) s'attachera donc en conséquence à fournir les informations utiles à une meilleure gouvernance :

- L'élaboration de cartes piézométriques à l'échelle départementale pour chaque grand ensemble aquifère (piézométrie reconstituée à partir des données existantes et d'hypothèses de travail qui seront formulées).
- La caractérisation des propriétés et du fonctionnement des systèmes aquifères sédimentaires et de socle, au regard notamment :
    - Des secteurs où existe un manteau d'altération et/ou un horizon fissuré susceptible d'indiquer la présence d'un aquifère à perméabilité significative.
    - Des secteurs où prédomine un réseau de fractures et failles d'origine tectonique pouvant favoriser la circulation et l'altération de la roche.
    - D'un bilan du fonctionnement des aquifères par ensemble litho-structural, mise en évidence d'éventuelles interactions.
    - De la réalisation de bilans quantitatifs, en s'appuyant sur une dizaine de modèles globaux à l'échelle des grands bassins versants.
    - D'un bilan général de la qualité des eaux des principaux aquifères.
- L'établissement d'indicateurs de gestion des ressources, de l'ordre de grandeur du potentiel des ressources en eau en termes de volumes théoriques disponibles et de cartes thématiques utiles mettant en évidence les propriétés des aquifères, leurs secteurs vulnérables ou sensibles sur le plan « qualité des eaux », les secteurs présentant un potentiel de développement, notamment.

Enfin, un volet de valorisation et de diffusion des résultats permettra de communiquer, à un large public, les résultats de l'ensemble du programme.

Les autres rapports BRGM réalisés dans le cadre de la première phase du programme OAGPRO61 bis sont les suivants[1] :

- RP-69292-FR, volet géologique (synthèse lithologique et structurale),
- RP-69332-FR, volet bancarisation

[1] Rapports disponibles au téléchargement sur le site http://infoterre.brgm.fr/

Sommaire

1. Introduction 19

1.1. CADRE DE L'ETUDE 19

1.2. OBJECTIFS 20

2. Contexte hydrologique du département de l'Orne 23

2.1. GEOMORPHOLOGIE 23

2.2. HYDROLOGIE 24
2.2.1. Organisation des cours d'eau 24
2.2.2. Régime hydrologique 33

2.3. CONTRIBUTION DES EAUX SOUTERRAINES AU DEBIT DES COURS D'EAU 37
2.3.1. Sources 37
2.3.2. Soutien au débit d'étiage 41

2.4. ZONES HUMIDES 43

2.5. BILAN DES CONNAISSANCES SUR LES EAUX SUPERFICIELLES 45

3. Connaissances actuelles sur le fonctionnement des aquifères du socle armoricain 49

3.1. FONCTIONNEMENT HYDROGEOLOGIQUE 49
3.1.1. Généralités 49
3.1.2. Propriétés hydrodynamiques des horizons d'altération des aquifères de socle 50
3.1.3. Rôle de la fracturation structurale et tectonique 52
3.1.4. Continuité spatiale des aquifères de socle 53
3.1.5. Processus hydrochimique : la dénitrification 55

3.2. CONNAISSANCES REGIONALES 57
3.2.1. Qualification régionale de l'horizon d'altération (Projet SILURES) 57
3.2.1. Caractérisation de l'hétérogénéité (Projet MORPHEUS) 63
3.2.2. Impact des failles et typologies d'aquifères (Projet ANAFORE) 64
3.2.3. Sites et comportements remarquables (Projets RAPSODI et CASPAR) 69
3.2.4. Atlas Hydrogéologique Numérique du Calvados (volet relatif au domaine de socle) 71

3.3. IMPLICATION DES SPECIFICITES DES AQUIFERES DE SOCLE DANS LA GESTION ET LA RECHERCHE DE RESSOURCES 73
3.3.1. Outil géophysique dans la recherche de nouvelles ressources 73
3.3.2. Pompages d'essai 74
3.3.3. Gestion et protection de la ressource 75

3.4. METHODOLOGIE PROPOSEE POUR CARACTERISER LE FONCTIONNEMENT DES AQUIFERES DE SOCLE 79

4. Synthèse bibliographique sur le fonctionnement des grandes unités aquifères du département de l'Orne 81

4.1. METHODOLOGIE DE CARACTERISATION DES PRINCIPALES RESSOURCES EN EAU SOUTERRAINES EXPLOITEES POUR L'ALIMENTATION EN EAU POTABLE 81

4.2. PRINCIPALES RESSOURCES DU DOMAINE DE SOCLE 82
4.2.1. Aquifère des Flysch Briovériens peu ou non métamorphisés 82
4.2.2. Aquifère des Granitoïdes et Cornéennes 85
4.2.3. Aquifère des formations paléozoïques 91

4.3. PRINCIPALES RESSOURCES DU DOMAINE SEDIMENTAIRE 97
4.3.1. Aquifère des calcaires aaléniens, bajociens et bathoniens 97
4.3.2. Aquifères des formations oxfordiennes 112
4.3.3. Aquifère de la craie cénomanienne et turonienne 120
4.3.4. Aquifère des sables du Perche 139

4.4. RESSOURCES EN EAU SOUTERRAINE SECONDAIRES 144
4.4.1. Formations superficielles et d'altération 144
4.4.2. Aquifères des formations tertiaires 155
4.4.3. Nappes des marnes et calcaires calloviens 156
4.4.4. Aquifère du Lias 157
4.4.5. Aquifère des sables du Trias 158

4.5. BILAN DES CONNAISSANCES POUR LES PRINCIPAUX AQUIFERES EXPLOITES POUR L'ALIMENTATION EN EAU POTABLE 159

5. Analyse des données bancarisées pour les principales formations aquifères 163

5.1. METHODOLOGIE 163
5.1.1. Utilisation des informations bancarisées 163
5.1.2. Points d'eau disponibles pour l'analyse 163

5.2. ANALYSE PRELIMINAIRE 169
5.2.1. Densité de forage par aquifère 169
5.2.2. Profondeur des ouvrages 171
5.2.3. Arrivées d'eau 173

5.3. PARAMETRES HYDRODYNAMIQUES 175
5.3.1. Rappels et Généralités 175
5.3.2. Transmissivité 178
5.3.3. Coefficient d'emmagasinement 181
5.3.4. Débit spécifique 185
5.3.5. Complément : débit critique et débit au soufflage 188

5.4. PROXIMITE D'UN SYSTEME FAILLE 194

5.5. BILAN DE L'ANALYSE DES DONNEES HYDROGEOLOGIQUES DE CARACTERISATION DES AQUIFERES 195

6. Analyses statistiques des chroniques piézométriques dans le département de l'Orne 197

6.1. RESEAU DE SUIVI PIEZOMETRIQUE DU DEPARTEMENT DE L'ORNE 197
6.1.1. Bassins versants suivis 197
6.1.2. Masses d'eau souterraines suivies 200
6.1.3. Les blocs litho-structuraux 201

6.2. METHODOLOGIE D'ANALYSE STATISTIQUE DES CHRONIQUES PIEZOMETRIQUES 203
6.2.1. Analyse descriptive 203
6.2.2. Tests statistiques 203
6.2.3. Détection des tendances 204
6.2.4. Analyse spectrale 204
6.2.5. Corrélogramme croisé 205

6.3. ANALYSE DES CHRONIQUES PIEZOMETRIQUES 205
6.3.1. Chroniques analysées 205
6.3.2. Aquifère des calcaires bathoniens-bajociens 207
6.3.3. Aquifère des formations oxfordiennes 210
6.3.4. Aquifère de la craie 212
6.3.5. Aquifère des sables du Perche 214
6.3.6. Aquifère des formations cambriennes 215
6.3.7. Aquifère des flyschs briovériens 217
6.3.8. Aquifères des cornéennes 218

6.4. BILAN SUR LE SUIVI DES NIVEAUX PIEZOMETRIQUES 220

7. Synthèse générale 223

8. Conclusions et perspectives 227

8.1. CONCLUSION 227

8.2. PERSPECTIVES 227

9. Bibliographie 229

Liste des figures

Illustration 1 : Géomorphologie du département de l'Orne, Fond Modèle Numérique de Terrain, source IGN, Fond structural et lithologie simplifiée, BRGM Normandie 2019 23

Illustration 2 : Découpage Hydrographique du département de l'Orne (source : BD Carthage, cours d'eau et Gest'eau pour les périmètres des SAGE) 26

Illustration 3 : Organisation des cours d'eau et bassins versants du département de l'Orne, source : MNT et BD Carthage, IGN 2018. 27

Illustration 4 : Organisation de l'hydrographie de Normandie Occidentale (J.M. Cador – GEOPHEN, 2014 pour DREAL Normandie, 2015) 28

Illustration 5 : Exemple schématique d'organisation d'un réseau hydrographique en domaine de socle armoricain, J.M. Cador (GEOPHEN, 2014) pour DREAL Normandie, 2015 29

Illustration 6 : Histogrammes des directions (azimut est : 0 à 180°) réalisés à partir de l'analyse SIG A) des principales structures géologiques (plis, failles, flexures) n = 1330 objets, B) des tronçons des cours d'eau de la BD Carthage pour les unités de rang supérieur (les plus petits cours d'eau) n = 251 objets pour l'ensemble du département de l'Orne..... 29

Illustration 7 : Carte du découpage en blocs litho-structuraux du département de l'Orne, source : Rapport BRGM RP-69292-FR, 2019..... 32

Illustration 8 : Evaluation du coefficient de ruissellement des principaux bassins verants de Normandie occidentale (source : Profil Environnemental de Basse Normandie, DREAL Normandie, 2015)..... 34

Illustration 9 : Lame d'eau annuelle moyenne écoulée des grands ensembles hydrologiques, Profil Environnemental de Basse-Normandie, DREAL Normandie (2015) d'après J.M. Cador (2014) Geophen. 36

Illustration 10 : Typologie des sources (C.W Fetter in Applied Hydrogeology, 2001)..... 37

Illustration 11 : Représentation des sources connues dans les banques de données (IGN BD Topo et BSS, bases non-exhaustives) sur fond lithologique..... 38

Illustration 12 : Source et lavoir de la Ferrière-Bochard à l'ouest d'Alençon, contact entre les formations crayeuses et granitiques, BRGM 2017..... 40

Illustration 13 : Résurgence Karstique du Sourtoir dans les calcaires jurassiques au nord d'Alençon, BRGM 2017..... 40

Illustration 14 : Exemple dans le Pays d'Auge de la Vie et de la Touques, dont le cours subméridien incise les formations du Crétacé pour s'établir sur les assises des terrains jurassiques du Kimméridgien et de l'Oxfordien. (DREAL Normandie, 2015)..... 41

Illustration 15 : Carte du débit d'étiage des cours d'eau, DREAL Normandie 2015 Les débits d'étiages les plus importants correspondent à d'importantes ressources facilement mobilisables ; à l'inverse les débits d'étiage les plus faibles sont à associer des réservoirs ou des formations non-aquifères aux ressources plus faiblement mobilisables..... 42

Illustration 16 : Zones d'accumulation des formations d'alluvions, issues de la carte géologique harmonisée du département de l'Orne (BRGM) et principales structures géologiques rencontrées (rapport RP-69292-FR). Zones de subsidence, famille de failles qui pourraient potentiellement être à l'origine de l'accumulation de sédiments : en orange (N60-80/N150-170), rouge (N10-30/N100-120) et vert (N60/N120). 43

Illustration 17 : Organisation des zones humides dans le contexte structural de Normandie Occidentale (DREAL Normandie, 2015) 44

Illustration 18 : Schéma d'une structure en pull-appart , failles décrochantes et normales associées (A.Gurbuz, 2014) 45

Illustration 19 : Schéma conceptuel des aquifères de socle (Source : Wyns et al., 2004) 51

Illustration 20 : Débits instantanés par mètre en fonction de la profondeur du forage en-dessous de la base des altérites meubles (Mougin et al., 2008). Mesures sur différentes lithologies à l'échelle de la Bretagne sur un échantillon de 6089 forages 51

Illustration 21 : Représentation schématique des propriétés d'un aquifère de socle, in Maréchal et al., 2004. CFZ : Connnected/Conductive Fault Zone, PFN : Primary Fracture Network (Réseau Primaire de Fractures), n'affecte que la matrice à une échelle décimétrique, SFN : Secondary Fracture Network (Réseau Secondaire de Fractures), Vertical ou Horizontal affecte le massif à une échelle plurimétrique, Bulk : Massif 52

Illustration 22 : Caractéristiques géologiques du site de St Brice en Cogles (Roques et al. 2014), contexte similaire à celui de l'Orne Occidentale 53

Illustration 23 : Modèle conceptuel des écoulements en fonction des niveaux d'eau Maréchal et al. 2018 modifé d'après (Guihéneuf et al., 2014) 54

Illustration 24 : Modèle conceptuel d'un aquifère associé à une veine de quartz (Dewandel et al., 2011) 55

Illustration 25 : Exemple de dénitrification sur un profil d'aquifère en milieu de socle, La concentration en nitrates diminue alors que les concentrations en sulfates et dioxyde de carbone augmentent source : Pauwels H. (2000) BRGM/RP-50304-FR 56

Illustration 26 : Cartographie de l'épaisseur des altérites en place (m) – Projet SILURES (Mougin et al.,2008) 58

Illustration 27 : Cartographie des secteurs où l'exploitation de l'eau souterraine peut être encouragée En rouge orangé les secteurs défavorables et en bleu les secteurs les plus favorables – Projet SILURES (Mougin et al.,2008) 59

Illustration 28 : Cartographie de l'inertie du milieu physique souterrain, en bleu les secteurs où l'inertie est faible, en orange et rouge les secteurs où l'inertie est forte – Projet SILURES (Mougin et al.,2008) 60

Illustration 29 : Valorisation des données de géophysique aéroportée, représentation de secteurs favorables et défavorables à l'implantation de forages d'eau – Projet SILURES (Mougin et al. 2008) 61

Illustration 30 : Exemple de cartographie d'épaisseur de la lame d'eau réalisée dans le cadre du projet SILURES Bassins versants (Mougin et al., 2008b) 62

Illustration 31 : Carte piézométrique (à gauche) et carte de transmissivité obtenue par inversion sur le massif de Tiébaghi en Nouvelle Calédonie (Dewandel et al., 2017) 63

Illustration 32 : Exemple d'analyse géologique réalisée dans le cadre du projet ANAFORE, site de Guénodou (Finistère)- Schroëtter et al., 2017 65

Illustration 33 : Diagnostic d'essai de pompage sur le site de Guénodou (Finistère) - Schroëtter et al., (2017) 68

Illustration 34 : Informations obtenues par test de pompage, essai de puits (paliers) et de longue durée (Roques et al. 2016) 69

Illustration 35 : Modèle conceptuel du fonctionnement de l'Aquifère de St Brice en Cogles (Ille et Vilaine), a) au repos et b) en condition de pompage (Roques et al. 2014) – Projet CASPAR 70

Illustration 36 : Carte de l'épaisseur des altérites de socle du département du Calvados (source : Rapport BRGM/RP-55671-FR) 72

Illustration 37 : Bilan des données disponibles en Banque de Données du Sos-Sol (BRGM, 2018) .. 73

Illustration 38 : Confrontation des traînées, d'un panneau éléctrique et anomalies radon aux débits d'exploitations de forages (Baïsset et al., 2015) 74

Illustration 39 : Méthodologie recommandée pour l'interprétation de pompages d'essai. Utilisation des dérivées des rabattements pour diagnostiquer les essais (Gutierrez et Dewandel, 2013) 75

Illustration 40 : Principales caractéristiques hydrogéologiques schématisant la diponibilité et la vulnérabilité des ressources du domaine de socle en fonction de la profondeur exploitée dans les profils d'altération, exemple d'un granite in Boisson et al., 2014 modifié Maréchal et al. 2004 76

Illustration 41 : Exemple de réactions différentes de la nappe dans les cornéennes, les schistes briovériens et les grès paléozoïques du département de l'Orne. Année hydrologique 2015-2016. Source : SDE61 77

Illustration 42 : Carte d'affleurement des formations des flyschs briovériens (d'après la carte géologique harmonisée de l'Orne) 82

Illustration 43 : Schéma hydrogéologique de fonctionnement du marais du Grand Hazé, (Telosia et Hydriad, 2011). 85

Illustration 44 : Carte d'affleurement des formations des granitoïdes et des cornéennes (d'après la carte géologique harmonisée de l'Orne) 85

Illustration 45 : Exemple d'organisation des écoulements dans les granites et les cornéennes sur le secteur de la chapelle d'Andaine (Aster, 1998) 88

Illustration 46 : Localisation des zones de pertes et de gain sur le ruisseau du Moulin, secteur de St Jean des Bois (Orne), observations suite aux mesures de jaugeages de Dassibat et Pareyn, 1979 .. 90

Illustration 47 : Carte d'affleurement des formations paléozoïques (d'après la carte géologique harmonisée de l'Orne) 91

Illustration 48 : Source « Fontaine de Santé » à St Léonard des Bois (Sarthe), dans les grès ordoviciens (BRGM) 92

Illustration 49 : Carte d'affleurement des formations du Bajocien-Bathonien et limite de son aquifère (d'après la carte géologique harmonisée de l'Orne et la BD-LISA, niveau 3) 97

Illustration 50 : Isovaleurs du toit, mur et épaisseur des formations du Bajocien-Bathonien à l'est d'Alençon (Lithologic, 2009) 98

Illustration 51 : Coupe géologique de la campagne de Trun SSW – NNE et légende extraites de la carte géologique N°177 de Vimoutiers (Ménillet, 1994) 99

Illustration 52 : Coupe schématique de la « cuvette » d'Argentan (Pivette et Baumann, 1999) 100

Illustration 53 : Piézométrie de la Région d'Argentan en 1999, Pivette et Baumann (2001), modifié. Les flèches matérialisent les sens d'écoulements 101

Illustration 54 : Esquisse piézométrique du secteur de Sées. Géotherma, 1993 103

Illustration 55 : Isopièzes de la nappe des calcaires bajociens-bahtoniens du secteur nord-est d'Alençon (Lithologic, 2009) 104

Illustration 56 : Coupe schématique entre Gacé et Céton, Meire et al. 2019, RP-69292-FR, volet géologique, modifié : les flèches bleues matérialisent le sens d'écoulement supposé dans les calcaires bajociens-bathoniens représentés en rose 105

Illustration 57 : Caractéristiques hydrodynamiques de quelques ouvrages captant les formations du Bajocien-Bathonien sur le secteur d'Alençon (Lithologic, 2009) 106

Illustration 58 : Coupe schématique des environs de Mortrée (Pierson, 2002) Il est probable qu'un réseau karstique de type binaire se développe au contact entre les formations anciennes du Paléozoïque et les terrains calcaires du Jurassique 107

Illustration 59 : Vue du collecteur fossile aujourd'hui en partie comblé et de l'incision basale, Grotte de Monts à Sentilly (J.Rodet, 2011). 108

Illustration 60 : Rare affleurement de sables pliensbachiens, équivalents latéraux de la formation des Grès de Sainte-Opportune, surmontés par les calcaires bajo-bathoniens du site 1 (ancienne carrière de sables). Paysage de dolines sur le site 2 montrant le développement karstique. Association du Patrimoine Géologique de Normandie, J.Avoine pour DREAL Normandie, 2012 109

Illustration 61 : Traçages réalisés dans le secteur de Radon – Vingt-Hanaps, Oyo RGS (1998) 110

Illustration 62 : Résurgence du Sourtoir à Semallé (http://bernard.langellier.pagesperso-orange.fr/resurgences.html) 110

Illustration 63 : Exemple de différents modes d'alimentation des calcaires bathoniens flèches bleues, (Pierson, 2002), modifié 111

Illustration 64 : Carte d'affleurement des formations de l'Oxfordien-Kimméridgien et limite de son aquifère (d'après la carte géologique harmonisée de l'Orne et la BD-LISA, niveau 3) 112

Illustration 65 : Coupe hydrogéologique schématique du secteur de Mortagne au Perche montrant l'existence de niveaux individualisés dans les différentes formations lithologiques de l'Oxfordien : calcaires coralliens de Mortagne et Sables et grès de l'Ormoie (Pivette consultant, 2006) 114

Illustration 66 : Coupe hydrogéologique schématique du secteur de Mardilly au Nord de Gacé, Safege 1993 in Aster 1993 114

Illustration 67 : Coupe schématique représentant le niveau piézométrique au niveau de la faille de Bellême (Pivette Consultant, 2004). Un réseau karstique se développerait dans les formations du Crétacé 116

Illustration 68 : Esquisse piézométrique de l'Oxfordien sur le bassin versant de la Même réalisée à partir d'une piézométrie de 2002, Pivette (2011) 117

Illustration 69 : Carte d'affleurement des formations crayeuses du Turonien et Cénomanien et limite de son aquifère (d'après la carte géologique harmonisée de l'Orne et la BD-LISA, niveau 3) 120

Illustration 70 : Coupe interprétative des conditions hydrogéologiques (nappe captive) de la vallée de l'Iton sur la commune des Aspres, (Géotherma, 1997) 121

Illustration 71 : Coupes interprétatives du fonctionnement hydrogéologique (nappe libre) du secteur de Gacé, bv de la Touques (SAFEGE, 1991 et Horizons 2002). Les sources des formations crayeuses sourdent librement au niveau de la rencontre avec la topographie (captage AEP des Aulnes) ou au contact avec la glauconie de base 122

Illustration 72 : Coupe hydrogéologique interprétative du secteur de Normandel (Pivette, 2005) 124

Illustration 73 : Esquisse piézométrique du bassin amont de l'Huisne, les courbes bleues correspondent à la nappe de la craie (SAFEGE, 2012) 125

Illustration 74 : Extrait de la carte piézométrique de la nappe de la craie séno-turonienne des bassins amont de la Risle, de l'Iton et de l'Avre (Mougin et al. 2011 - BRGM RP-59301-FR). Le département de l'Eure est materialisé en vert. Les limites des bassins hydrogéologiques sont matérialisés par des petits ronds bleus, ceux des bassins versants de surface par des petits points bleus 126

Illustration 75 : Piézométrie du secteur de Vimoutiers, nappe de la craie en bleu et nappe du roussier de Gacé en vert (Ecogee, 2001 in Pivette Consultant, 2015) 128

Illustration 76 : Résurgence de l'Orbiquet à la Folletière Abenon (Calvados), le conduit de résurgence a été reconnu en plongée sur près de 800 m. source : https://www.geocaching.com/geocache/GC5Z2R6 130

Illustration 77 : Opérations de traçages réalisés autour du bassin d'alimentation des sources de l'Orbiquet (Leblanc, 1998) 131

Illustration 78 : Bassin versant de la Guiel, localisation des zones de pertes et de reconnexion de la nappe (P.Stollsteiner, BRGM, 2007) 132

Illustration 79 : Pertes et gains de débit sur le bassin versant de l'Avre. Les pertes se font via des infiltrations dans des bétoires ou des zones de pertes diffuses sur les tronçons perchés du cours d'eau. David P-Y. (2017), modifié 133

Illustration 80 : Grotte de la Mansonnière (Rémalard-au-Perche, Orne). Topographie du labyrinthe primokarstique développant plus d'un kilomètre de galeries. 1-galerie désobstruée, 2-continuité supposée, 3-galerie recoupée par la carrière, 4-paroi résiduelle dans la carrière (J. Rodet, 2007) .. 135

Illustration 81 : Bloc diagramme montrant la vulnérabilité des ressources crayeuses de Normandie, en domaine karstique. En plus de la vulnérabilité hydrologique, cette vulnérabilité s'applique également au génie civil et au domaine des risques ; (source : BRGM) 136

Illustration 82 : Exemple d'indice de bétoires sur terrains crayeux, secteur de Rémalard (source : BRGM) 137

Illustration 83 : Carte d'affleurement des formations du Sables du Perche et limite de son aquifère (d'après la carte géologique harmonisée de l'Orne et la BD-LISA, niveau 3) 139

Illustration 84 : Extrait de la carte piézométrique des sables du Cénomanien du bassin Loire-Bretagne (BRGM, 1995) 141

Illustration 85 : Coupe hydrogéologique interprétative du secteur de Neuilly sur Eure (Pivette, 2005) 142

Illustration 86 : Carte d'affleurement des formations d'alluvions d'après la carte géologique harmonisée du département de l'Orne 144

Illustration 87 : Relations hydrodynamiques entre la nappe d'accompagnement du cours d'eau et la nappe, source BRGM 145

Illustration 88 : Relation d'une nappe alluviale avec les terrains encaissants (Daum et al., 1997 dans Vernoux et al., 2010). L'ensemble des cas peut être rencontré dans le département de l'Orne (exemples A : l'Orne amont, B : La Dives et la Sarthe amont, C : La Touques – l'Eure, D : Le Noireau – la Mayenne) 146

Illustration 89 : Schéma de l'interface nappes/rivières et variabilité des échanges (Bravard et Clémens, 2008) 146

Illustration 90 : Carte d'affleurement des altérites des Loess, limons et colluvions d'après la carte géologique harmonisée du département de l'Orne 148

Illustration 91 : Carte d'affleurement des altérites des formations carbonatées mésozoïques d'après la carte géologique harmonisée du département de l'Orne 150

Illustration 92 : Modèle conceptuel d'évolution de la perméabilité des formations superficielles en fonction de la profondeur ; le modèle proposé est fondé sur des mesures de perméabilité réalisées au laboratoire en fonction de quelques valeurs de pression ; en rouge passage de la base des limons aux argiles à silex (Dupont et al. 2009) 151

Illustration 93 : Comparaison des chroniques de piézométrie de l'aquifère superficiel (en rouge) et de piézométrie de l'aquifère de la craie (en bleu) – (Dupont et al. 2009) 152

Illustration 94 : Carte d'affleurement des altérites des formations de socle d'après la carte géologique harmonisée du département de l'Orne 153

Illustration 95 : Carte d'affleurement des formations tertiaires d'après la carte géologique harmonisée du département de l'Orne 155

Illustration 96 : Carte d'affleurement des formations des marnes et calcaires calloviens d'après la carte géologique harmonisée du département de l'Orne et limite de son aquifère d'après la BD-Lisa 156

Illustration 97 : Carte d'affleurement des formations du Lias d'après la carte géologique harmonisée du département de l'Orne 157

Illustration 98 : Carte d'affleurement des formations Trias d'après la carte géologique harmonisée du département de l'Orne 158

Illustration 99 : Cartes des ouvrages recensés en base de données, regroupés par stratigraphie et faciès 167

Illustration 100 : Profondeur des forages d'eau recensés dans le département de l'Orne (BSS+SDE61) 172

Illustration 101 : Exemple de coupes techniques de deux forages implantés dans les formations schisteuses du Briovérien. Celle du haut montre de nombreuses arrivées d'eau réparties tout le long du profil d'altération, la seconde montre l'absence d'arrivées d'eau sur un profil très argilisé (source : SDE61) 174

Illustration 102 : Influence des paramètres perméabilité et emmagasinement sur les rabattements (source J.J. Collin 2004). Attention le débit n'impacte pas le rayon d'influence 175

Illustration 103 : Variation de niveau et volume d'eau libéré dans un aquifère libre (gauche) et captif (droite), source : J.J. Collin (2004) 177

Illustration 104 : Carte de répartition des valeurs de transmissivité disponibles dans le département de l'Orne 179

Illustration 105 : Carte de répartition des informations sur le coefficient d'emmagasinement 183

Illustration 106 : Transmissivité versus Emmagasinement (échelles logarithmiques) 184

Illustration 107 : Carte de répartition des valeurs recensées sur le débit spécifique 186

Illustration 108 : Relation empirique entre transmissivité et débit spécifique 188

Illustration 109 : Cartes de répartition des valeurs de débit critique et de débit au soufflage évalués 192

Illustration 110 : Répartition des ouvrages de suivi piézométrique sur fond géologique 198

Illustration 111 : Moyenne des précipitations annuelles, période de 1981 à 2010 (source : Météo France) 199

Illustration 112 : Répartition des ouvrages de suivi en fonction des masses d'eaux souterraines, version rapportage 2016 200

Illustration 113 : Carte de répartition des piézomètres des réseaux du SDE61 et du BRGM/AFB par bloc litho-stratigraphique 202

Illustration 114 : Répartition des chroniques piézométriques analysées statistiquement en fonction de l'aquifère suivi et de la longueur de sa chronique 206

Illustration 115 : Chroniques piézométriques des ouvrages suivant la nappe des formations bathoniennes et bajociennes 207

Illustration 116 : Chronique piézométrique des ouvrages suivant la nappe des formations oxfordiennes 210

Illustration 117 : Chroniques piézométriques des ouvrages suivant la nappe de la craie 212

Illustration 118 : Chroniques piézométriques des ouvrages suivant les formations des sables du Perche 214

Illustration 119 : Chroniques piézométriques des ouvrages suivant les formations des grès du Cambrien 215

Illustration 120 : Chroniques piézométriques des ouvrages suivant la nappe des flyschs briovériens 217

Illustration 121 : Chroniques piézométriques des ouvrages suivant la nappe des cornéennes 218

Illustration 122 : Exemples de chroniques types des différents ensembles aquifères suivis 221

Tableau 1 : Débits caractéristiques des principaux cours d'eau du département de l'Orne (source : Banque Hydro). Les lignes jaunes représentent les cours d'eau du domaine sédimentaire, en rose les cours d'eau du domaine de socle et en vert les mixtes 33

Tableau 2 : Représentation cartographique schématique des différents types de sites rencontrés parmi les 100 forages les plus productifs de Bretagne (il ne s'agit pas de coupes mais du vues en plan), Schroëtter 2019, inédit 67

Tableau 3 : Caractéristiques hydrodynamiques des formations d'altération du socle briovérien, Télosia et Hydriad (2010) 154

Tableau 4 : Regroupements proposés pour les différentes entités hydrogéologiques BD-LISA (v2), niveau 3 165

Tableau 5 : Profondeur des points d'eau par grand type d'aquifère 170

Tableau 6 : Profondeur des arrivées d'eau renseignées pour les principales formations géologiques, source : base de donnée hydrogéologique du département de l'Orne 173

Tableau 7 : Informations sur la transmissivité disponibles pour les principaux aquifères du département de l'Orne 178

Tableau 8 : Comparaison des valeurs de transmissivité (en m²/s) dans les départements de Normandie Occidentale, évantail des valeurs présenté à l'aide des « boites à moustaches » 181

Tableau 9 : Informations sur les valeurs du coefficient d'emmagasinement disponibles pour les principaux aquifères du département de l'Orne 182

Tableau 10 : Comparaison des valeurs moyennes des coefficients d'emmagasinement connues pour les principales formations géologiques des départements de Normandie Occidentale 185

Tableau 11 : Informations sur le débit spécifique disponible pour les principaux aquifères du département de l'Orne (en m³/h/m) 185

Tableau 12 : Comparaison des débits spécifiques pour les principales formations géologiques exploitées pour l'alimentation en eau dans les départements de l'Orne et de la Manche, éventail des valeurs présenté sous forme de « boites à moustaches » 187

Tableau 13 : Informations sur le débit au soufflage disponibles pour les principaux aquifères du département de l'Orne 189

Tableau 14 : Informations sur le débit critique disponible pour les principaux aquifères du département de l'Orne 190

Tableau 15 : Comparaison entre profondeur et débit au soufflage pour les différentes formations aquifères. Colonnes bleues sont favorables pour les projets de recherche en eau en termes de coût bénéfice, puis vert, jaune et enfin orange et rouge pour le plus défavorable 193

Tableau 16 : Données disponibles pour les ouvrages situés à proximité des principales structures faillées 194

Tableau 17 : Nombre de piézomètres suivant les bassins versants superficiels 197

Tableau 18 : Masses d'eau souterraines actuellement suivies par les réseaux piézométriques du BRGM/AFB et du SDE61 (état à fin 2018) 200

Tableau 19 : Répartition des piézomètres de suivi par bloc litho-stratigraphique 201

Tableau 20 : Répartition des chroniques piézométriques analysées statistiquement en fonction de l'aquifère suivi et de la longueur de la chronique 205

Liste des annexes

Annexe 1 Caractéristiques des blocs lithostructuraux homogènes 241

Annexe 2 Analyse des chroniques piézométriques 249

Annexe 3 Cartes des Zones de Répartition des Eaux (ZRE) du département de l'Orne 255

1. Introduction

1.1. CADRE DE L'ETUDE

La géologie du département de l'Orne a pour particularité d'être située à cheval entre le Massif Armoricain à l'ouest, avec ses formations géologiques dites de socle (roches cristallines à cristallophylliennes ou métamorphiques ainsi que les formations sédimentaires plissées du Paléozoïque), et le Bassin Parisien à l'est, avec ses formations sédimentaires plus récentes (Mésozoïque et Cénozoïque).

Du fait de cette géologie contrastée, deux grands types d'aquifères sont présents :

- les aquifères compartimentés, discontinus et fissurés, dits « de socle »,
- et les aquifères sédimentaires, stratifiés et plus ou moins continus.

Ces réservoirs ont un comportement hydraulique spécifique lié à l'histoire géologique des roches qui les constituent, où les lithologies affectées par des éléments structuraux (failles, plis, …) contribuent au fonctionnement hydraulique des nappes d'eau souterraine.

La connaissance du fonctionnement des ressources en eau souterraine est aujourd'hui un enjeu majeur pour développer les stratégies nécessaires à leur gestion durable et à celle des milieux aquatiques associés. Malheureusement, les informations permettant la compréhension de leur fonctionnement sont souvent incomplètes, en partie notamment à cause d'une dispersion des données, à une répartition inégale de l'information sur le territoire, à un manque de valorisation de l'information et à un accès aux ressources documentaires de ce fait, rendu difficile.

Pour répondre à ces enjeux, le Syndicat Départemental de l'Eau de l'Orne (SDE61) et le BRGM Normandie ont donc travaillé, avec leurs partenaires, à la mise en œuvre d'un programme en deux phases d'Amélioration des connaissances Géologiques et Hydrogéologiques pour l'ensemble du département de l'Orne, qui vise à créer un outil intégré d'aide à la gestion patrimoniale des ressources en eau souterraine du département (programme OAGPRO61 bis).

Ce programme vise en particulier à améliorer la connaissance du fonctionnement des différents hydro-systèmes sédimentaires et de socle. On rappelle que les formations géologiques concernées par cette synthèse sont les suivantes : formations anciennes (roches sédimentaires, métamorphiques précambriennes, paléozoïques et magmatiques associées), pour le Mésozoïque : Bajocien-Bathonien, Oxfordien-Kimmeridgien, formations crayeuses et les sables du Perche du Crétacé supérieur. Sont donc exclues de cette étude les formations tertiaires et les formations superficielles. *Le fonctionnement hydrogéologique de ces deux dernières entités sera tout de même abordé très brièvement dans les chapitres 3 et 4.*

Ce programme entend répondre à ces besoins et combler les lacunes, en fournissant une information valorisée, interprétée et validée qui améliorera le socle de connaissances actuelles de l'ensemble du département de l'Orne.

Ce travail doit aboutir *in-fine*, après la réalisation d'une seconde phase, à la création d'un Atlas hydrogéologique départemental, qui est un outil d'aide à la gestion des ressources en eau souterraine contenant notamment les indicateurs nécessaires à leur gestion durable.

La Phase 1 du projet a donc consisté à établir une synthèse des connaissances géologiques et hydrogéologiques actuelles, sur la base des explorations réalisées par le syndicat départemental de l'eau de l'Orne sur les secteurs sédimentaires et de socle : analyse structurale et synthèse préliminaire des aquifères sédimentaires et de socle.

Le découpage de cette étude réalisée dans le cadre de la première phase du programme OAGPRO61 bis (phase 1 du programme) a été le suivant :

- Volet 1 : collecte des données, traitement et bancarisation de l'information géologique et hydrogéologique utile au projet ;
- Volet 2 : analyse structurale des formations géologiques aquifères ;
- Volet 3 : proposition d'une méthodologie de caractérisation des aquifères de socle ;
- Volet 4 : synthèse générale des connaissances actuelles sur le fonctionnement des hydro-systèmes sédimentaires et de socle du département de l'Orne.

Le présent rapport BRGM/RP-69331-FR correspond aux volets 3 et 4 de l'étude. Les autres rapports réalisés par le BRGM dans le cadre de la première phase du programme OAGPRO61 bis sont les suivants[2] :

- RP-69332-FR, volet (1) bancarisation
- RP-69292-FR, volet (2) géologique (synthèse lithologique et structurale)

1.2. OBJECTIFS

L'objectif principal de cette synthèse hydrogéologique est de recueillir et synthétiser les informations bibliographiques disponibles sur le fonctionnement général des grands aquifères du domaine sédimentaire et de socle : en particulier les aquifères du Briovérien, des granitoïdes et de leur auréole de métamorphisme, les formations paléozoïques pour le domaine de socle. La craie céno-turonienne, les sables du Perche, les formations oxfordiennes et enfin les calcaires du Bajocien-Bathonien pour les formations du domaine sédimentaire.

Ce travail s'appuie notamment sur l'ensemble des données qui ont pu être collectées et valorisées dans le cadre de la première partie du projet (volet 1 bancarisation), sur la synthèse géologique et structurale réalisée dans le volet 2 et enfin sur une analyse bibliographique réalisée à l'échelle départementale à partir du fond documentaire du SDE61 et du BRGM. Ce travail a consisté notamment à :

- collecter les documents et assurer le traitement des données,
- décrire dans leurs grandes lignes les caractéristiques générales des grands ensembles aquifères,
- synthétiser de manière générale et préliminaire le comportement connu des différents aquifères en fonction des informations disponibles.

Le présent rapport de synthèse des connaissances hydrogéologiques est agencé de la manière suivante :

1. Introduction
2. Contexte hydrologique

[2] Rapports disponibles au téléchargement sur le site http://infoterre.brgm.fr/

3. Connaissances actuelles sur le fonctionnement des aquifères de socle et proposition d'une méthodologie pour caractériser leur fonctionnement
4. Synthèse bibliographique sur le fonctionnement des grandes unités aquifères
5. Analyse des données bancarisées pour les principales formations aquifères
6. Analyse statistiques des chroniques piézométriques du département de l'Orne
7. Synthèse générale
8. Conclusions et perspectives

2. Contexte hydrologique du département de l'Orne

2.1. GEOMORPHOLOGIE

La diversité des paysages de l'Orne doit beaucoup à sa géologie contrastée (voir volet 1 de l'étude : rapport BRGM/RP-69292-FR). Celle-ci va avoir une influence majeure sur la géomorphologie du département mais également en ce qui concerne l'organisation des cours d'eau.

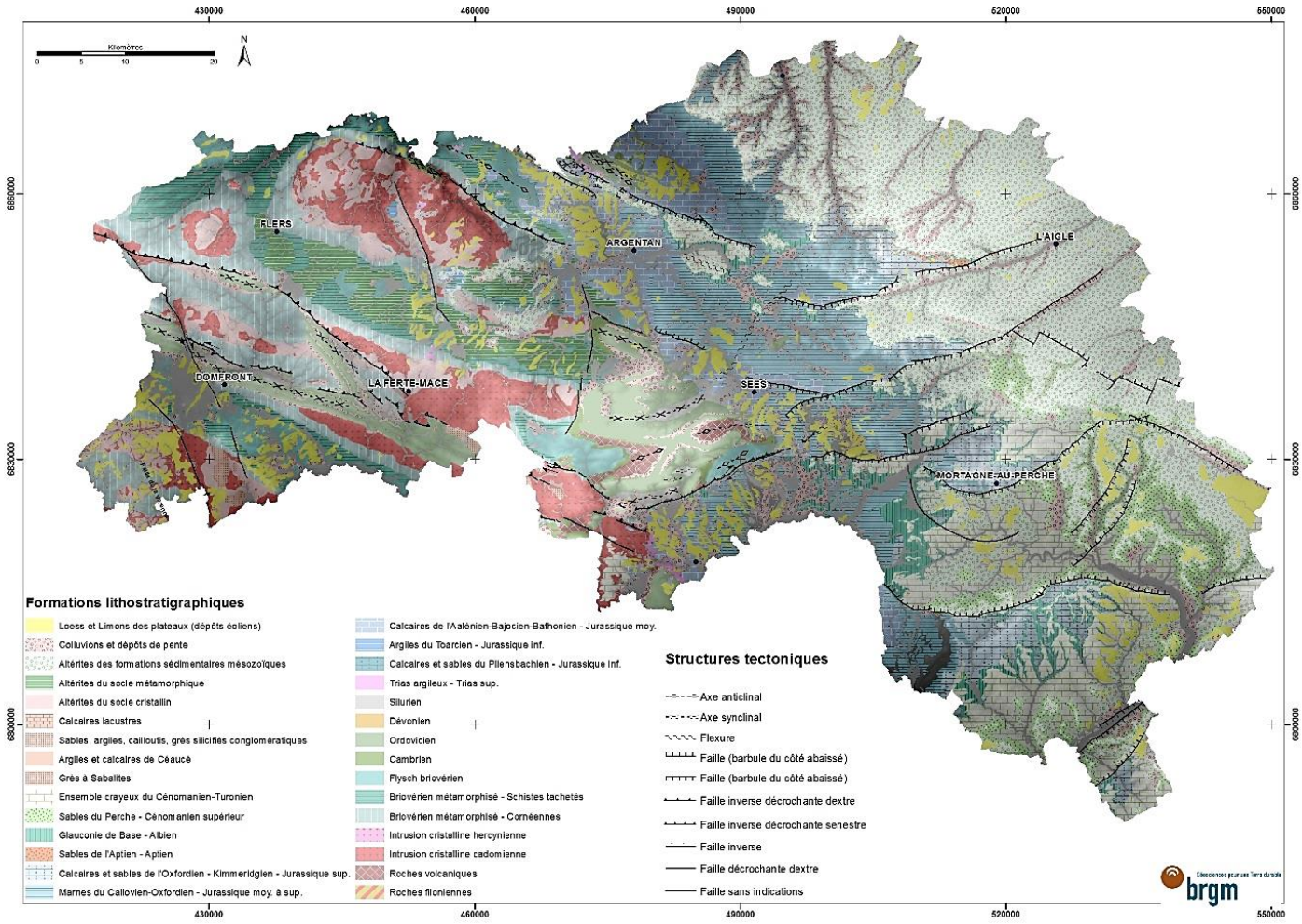


Illustration 1 : Géomorphologie du département de l'Orne, Fond Modèle Numérique de Terrain, source IGN, Fond structural et lithologie simplifiée, BRGM Normandie 2019

L'analyse géomorphologique montre (Illustration 1) :

- **A l'Ouest du département** :
  - Les grandes discontinuités lithologiques et structurales qui affectent les grandes unités plissées du Paléozoïque créent des reliefs aux pentes parfois importantes. Exemple : barres de grès du massif d'Ecouves culminant à plus de 400 m, de la zone bocaine ou de Mortain-Domfront dont l'altitude dépasse fréquemment les 300 m.

- Le reste du massif armoricain possède un relief plus doux comme sur le granite d'Athis, ou dans les formations gréseuses et schisteuses du Briovérien. Exemple : la dépression du Houlme.

- **A l'Est du département** :
  - Le secteur du Pays d'Ouche, au nord-est, est marqué par la présence de hauts plateaux dont l'altitude peut dépasser les 300 m. Ces derniers reposent sur des assises crayeuses, relativement tabulaires. Les vallées de la Vie et de la Touques sont fortement incisées et se distinguent par leurs fortes pentes et marquent la continuité du Pays d'Auge.
  - Le secteur vallonné du Perche au sud-est du département, marqué par une succession d'accidents structuraux mettant au contact des formations géologiques différentes d'âge mésozoïque.
  - Les plaines d'Alençon, d'Argentan-Ecouché-Sées et de Trun présentent un faible relief et constituent des espaces où s'est développée une agriculture de type « open-field » sur les assises marno-calcaires du Jurassique.

Ce relief contrasté, hérité en grande partie de la structuration des différentes formations géologiques, confère au département une richesse paysagère et de terroir.

2.2. HYDROLOGIE

2.2.1. Organisation des cours d'eau

La géologie joue un rôle déterminant dans la densité de drainage des territoires. Les roches les plus imperméables sont en effet parcourues d'un réseau dense de cours d'eau au contraire des roches qui le sont moins. Le drainage par le sol est donc plus important lorsque les roches sont très perméables (DREAL Normandie, 2015). Aussi on constate qu'un nombre de cours d'eau plus important parcourt le domaine de socle.

Cette diversité géologique et géomorphologique s'exprime donc également du point de vue hydrologique : la plupart des cours d'eau prennent naissance en s'appuyant sur ces reliefs. Cette spécificité va mettre le département de l'Orne en position centrale par rapport aux départements voisins, notamment en ce qui concerne la répartition des ressources en eaux.

En effet, plus d'une dizaine de cours d'eau régionaux et supra-régionaux prennent leur source dans le département :

- fleuves côtiers normands : la Dives, la Touques, l'Orne ;
- affluents majeurs de la Seine : la Risle, l'Eure et ses affluents l'Avre et l'Iton ;
- cours d'eau du Bassin de la Loire : la Sarthe et son affluent l'Huisne, la Mayenne et son affluent la Varenne.

Plusieurs de ces cours d'eau sont actuellement couverts par un Schéma d'Aménagement et des Gestion des Eaux (SAGE), cf. Illustration 2 page suivante où ils sont représentés avec leur bassin-versant (BV).

Au niveau régional, le département se trouve à la jonction de deux grandes lignes de partage des eaux (DREAL Normandie, 2015) :

- La première, centrée sur le bocage Virois, sépare grossièrement les cours d'eau se jetant en baie de Seine et ceux se jetant dans le golfe anglo-normand.
- Le second, de forme hémisphérique, dessine un point haut à partir duquel les cours d'eau divergent au nord sur le bassin de la Seine et des côtes de la Manche et au sud le bassin Loire-Bretagne.

Ces lignes de partage des eaux s'appuient principalement sur les reliefs. Ceux-ci sont axés notamment sur des discontinuités tectoniques d'axe NW-SE (Illustration 3).

Ainsi, de par sa position en tête des grands bassins-versants, le département de l'Orne a un rôle central, de « château d'eau », vis-à-vis des agglomérations situées à l'aval de ces grands cours d'eau et des aquifères qui alimentent les départements voisins du Calvados, de l'Eure, de l'Eure et Loir, de la Sarthe, de la Mayenne et dans une moindre mesure de la Manche (Illustration 4).

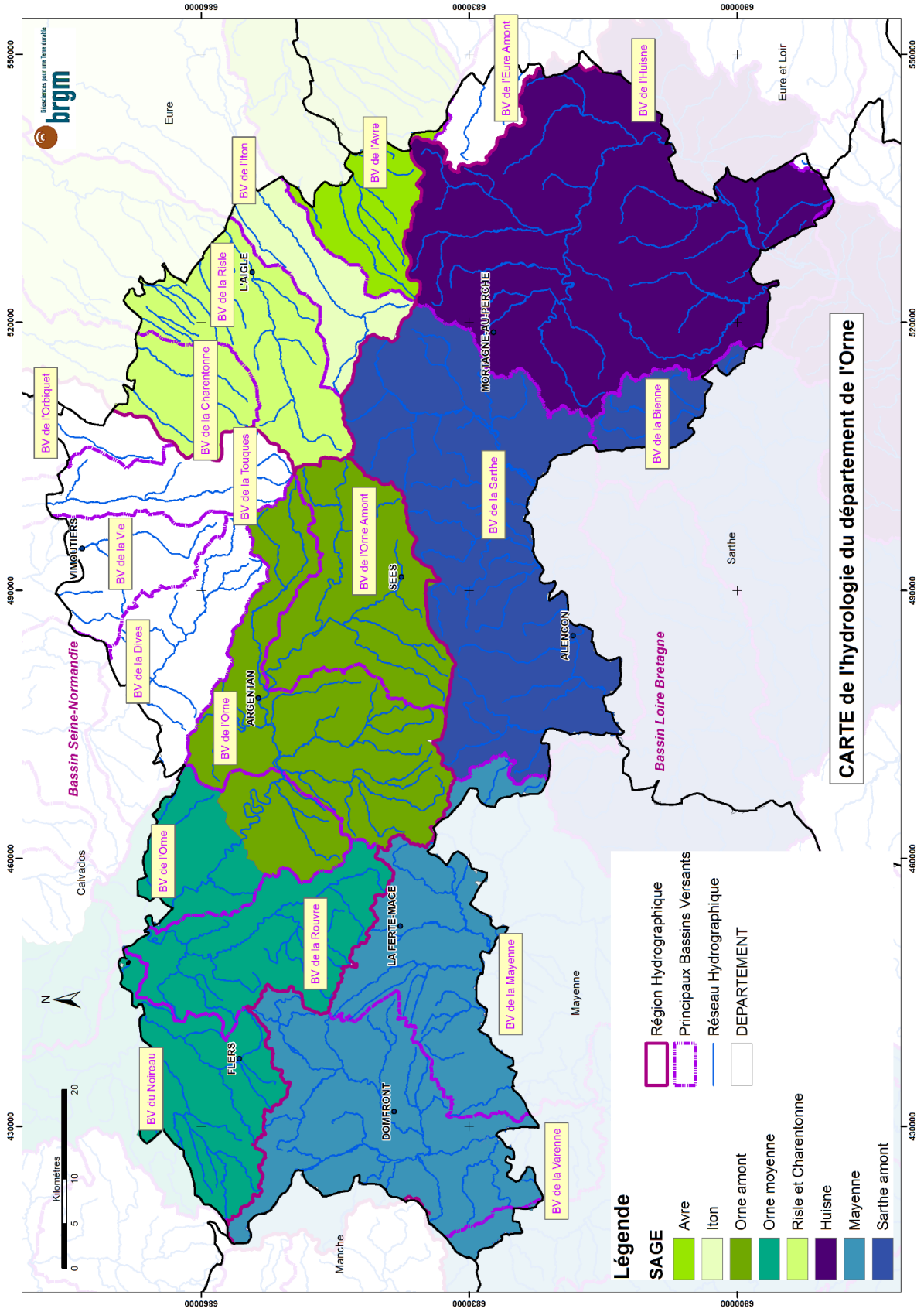


Illustration 2 : Découpage Hydrographique du département de l'Orne
(source : BD Carthage, cours d'eau et Gest'eau pour les périmètres des SAGE)

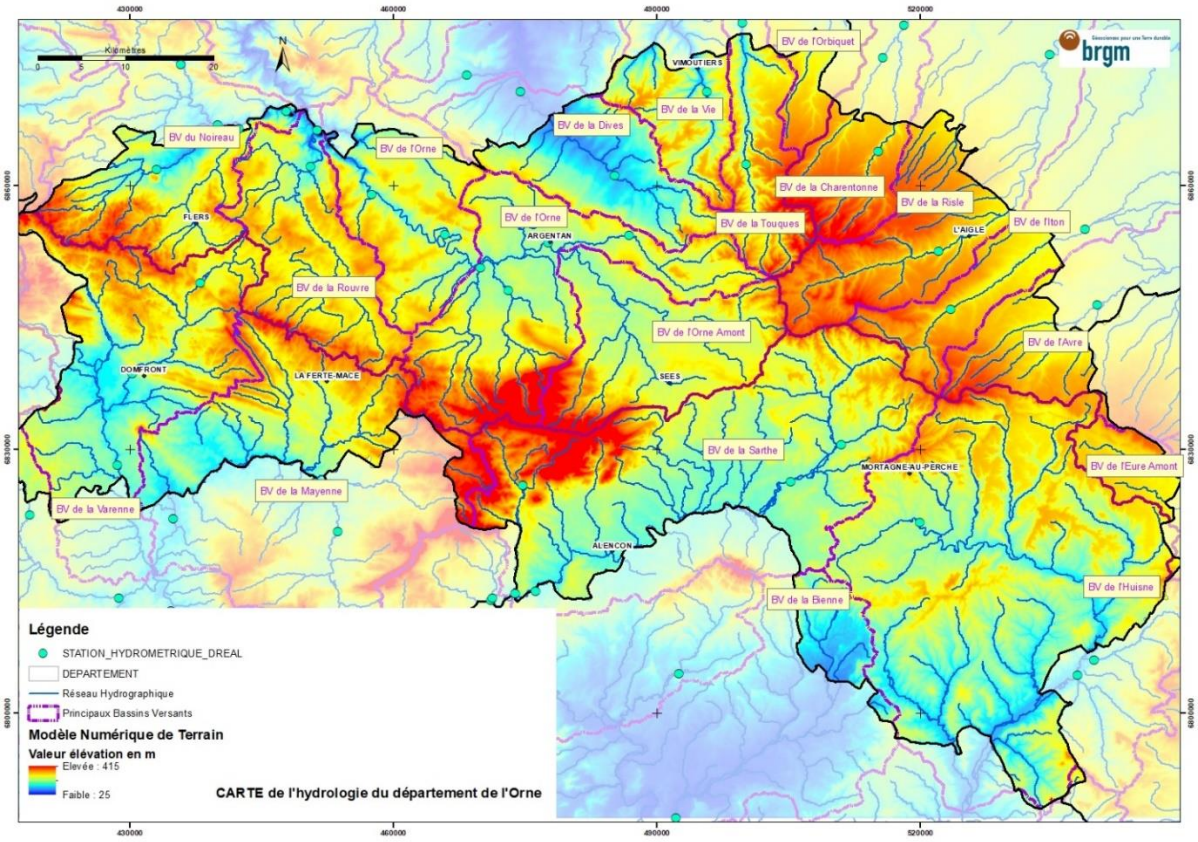
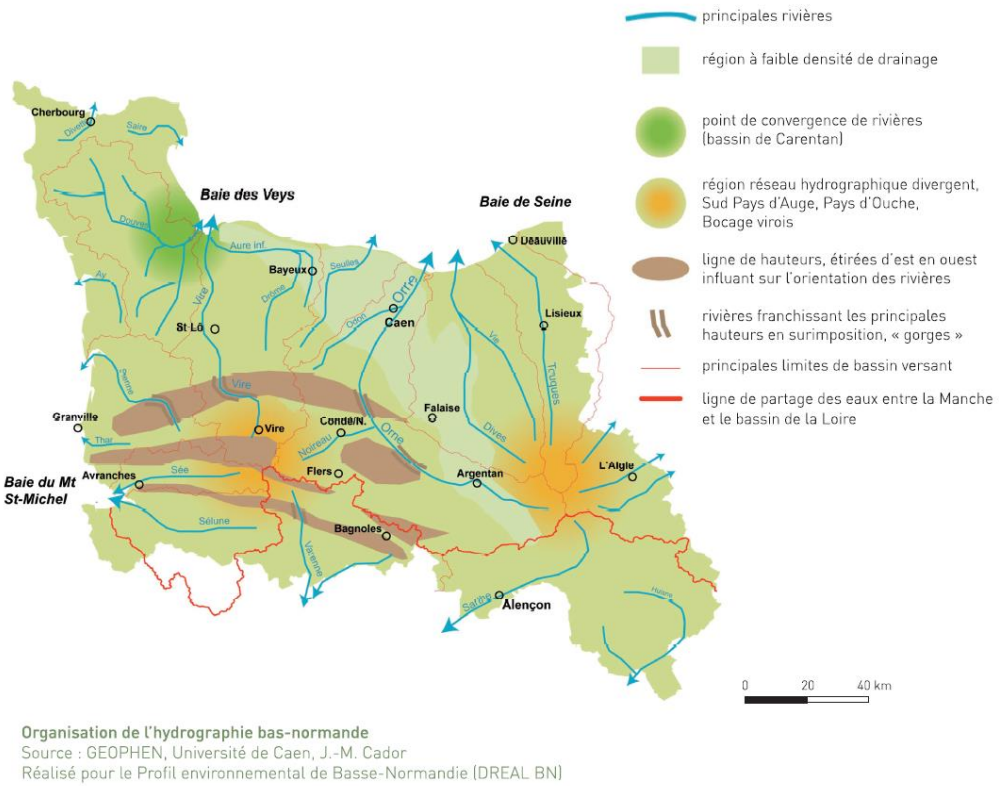


Illustration 3 : Organisation des cours d'eau et bassins versants du département de l'Orne, source : MNT et BD Carthage, IGN 2018.



Organisation de l'hydrographie bas-normande
Source : GEOPHEN, Université de Caen, J.-M. Cador
Réalisé pour le Profil environnemental de Basse-Normandie (DREAL BN)

Illustration 4 : Organisation de l'hydrographie de Normandie Occidentale (J.M. Cador – GEOPHEN, 2014 pour DREAL Normandie, 2015)

La morphologie des cours d'eau est régie par plusieurs critères notamment : la pente, la nature des terrains traversés (rhéologie, disposition en couches ou blocs homogènes, pendage, fracturation, etc…), la largeur du lit et sa profondeur.

Les cours d'eau inadaptés à la structure géologique des terrains qu'ils traversent présentent souvent des morphologies singulières qui peuvent s'expliquer par certains mécanismes comme : l'antécédence, la surimposition, ou encore l'érosion régressive. Ce dernier pouvant engendrer notamment la capture de bassins versants.

Ainsi l'étude du caractère sinueux, encaissé, etc… actuel ou passé des cours d'eau peut souligner certaines discontinuités structurales ou hétérogénéités lithologiques des terrains traversés et servir d'indicateurs sur les mouvements qui ont affecté leur bassin versant dans le temps.

Dans le département de l'Orne, la morphologie des tronçons des cours d'eau est très marquée par la nature géologique (lithologique et structurale) des terrains qu'ils traversent. Nombre de ces objets géologiques constituent des limites qui vont influencer le parcours des cours d'eau ou marquer la limite de partage des eaux entre deux bassins versants.

On peut citer par exemple le cas du fleuve Orne dont la sinuosité dans son cours supérieur, remarquable à l'échelle de la région, forme de véritables gorges au niveau de son passage dans la zone de transition entre les terrains sédimentaires et de socle entre Ecouché et Putanges à l'ouest d'Argentan (Illustration 3). Autres cas emblématiques :

- La Vée et ses affluents (BV de la Mayenne) s'écoulent le long des barres gréseuses paléozoïques avant de les traverser à hauteur de Bagnoles de l'Orne, dans l'ouest du département, formant à cette occasion de véritables cluses.
- Le cours de l'Eure, à l'est du département, suit un épaulement NW-SE marquant la faille de Senonches.

Le bloc diagramme synthétique présenté ci-après (Illustration 5), montre très bien l'organisation des cours d'eau de la partie occidentale du département de l'Orne.

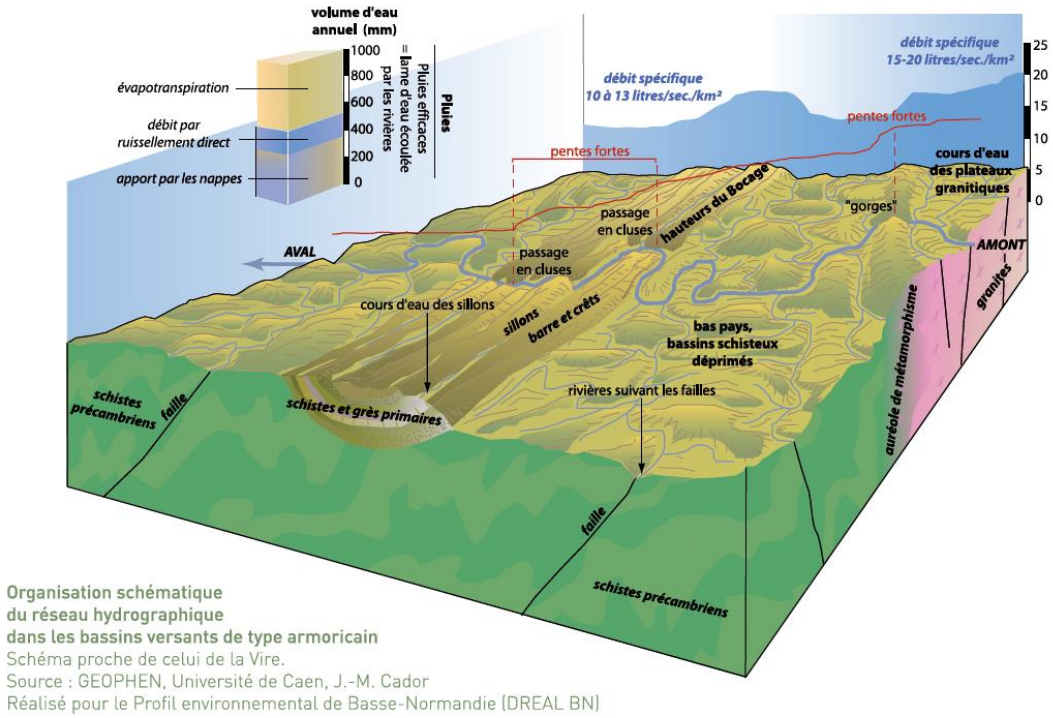


Illustration 5 : Exemple schématique d'organisation d'un réseau hydrographique en domaine de socle armoricain, J.M. Cador (GEOPHEN, 2014) pour DREAL Normandie, 2015

L'analyse directionnelle des principales structures (failles, plis, etc…) et des directions des tronçons de cours d'eau a été réalisée à l'échelle de l'ensemble du département (Illustration 6) mais également à l'échelle de chaque bloc litho-structural (annexe 1).

Analyse à l'échelle départementale

A B

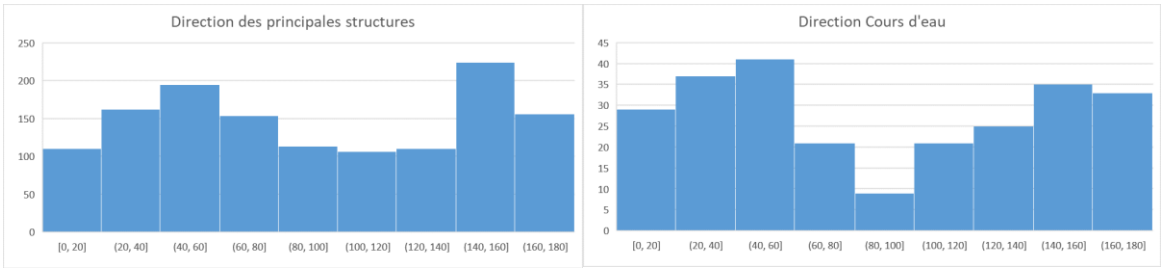


Illustration 6 : Histogrammes des directions (azimut est : 0 à 180°) réalisés à partir de l'analyse SIG A) des principales structures géologiques (plis, failles, flexures) n = 1330 objets, B) des tronçons des cours d'eau de la BD Carthage pour les unités de rang supérieur (les plus petits cours d'eau) n = 251 objets pour l'ensemble du département de l'Orne

On note qu'à l'échelle du département les deux histogrammes se corrèlent bien entre eux. On peut donc confirmer l'hypothèse que l'aspect structural est l'un des facteurs principaux qui détermine l'orientation des cours d'eau.

Les familles d'objets N0-20, N20-40, N40-60, N140-160 et N160-180 sont très bien représentées : il s'agit donc vraisemblablement des chemins d'écoulements préférentiels des eaux superficielles. Par analogie on peut faire l'hypothèse qu'il s'agit probablement d'axes de drainage des eaux souterraines.

On rappelle que les axes compris entre N100 à 120 correspondent globalement à des axes compressifs et que les directions sub-méridiennes N150 à 160 et leur conjuguée N20 à 30 correspondent davantage à des axes extensifs (cf. synthèse géologique rapport RP-69292-FR) hydrauliquement conducteur.

A noter toutefois que le remplissage des accidents méridiens par les filons doléritiques ou de quartz va modifier le caractère drainant des structures. Dans ce type de contexte, l'écoulement se fait dans la zone d'altération à l'interface des deux zones lithologiques présentant de fortes hétérogénéités, (cf. paragraphe 3.1).

Attention toutefois : toutes les vallées ne répondent pas forcément à une origine structurale. Leur façonnement répond à une succession d'évènements qui se sont surimposés dans le temps : dépôts originels, déformation, structuration, surrection, altération, érosion… (cf. rapport BRGM/RP-69292-FR).

Analyse à l'échelle des blocs-litho-structuraux

Au sein des blocs litho-structuraux (Illustration 7), décrits dans le rapport BRGM/RP-69292-FR, l'analyse directionnelle montre que les objets structuraux et tronçons de cours d'eau qui se corrèlent le plus correspondent aux directions suivantes (cf. Annexe 1 pour le détail) :

- N20 à 60
- N140 à 180

Les directions comprises entre N60 et N140 sont sous-représentées, à de rares exceptions. On peut donc estimer que ce dernier groupe possède un caractère probablement moins drainant que les deux premiers (sauf pour le bloc du Noireau et Avre-Iton où c'est la direction N60-80 qui est prépondérante).

Nous avons regroupé ci-après quelques remarques sur le lien entre l'organisation hydrologique et structurale du département :

- Pour les cours d'eau circulant en domaine sédimentaire :
  - la Risle et l'Iton coulent toutes deux en limite de la faille de Merlerault et Moulin la Marche dans le compartiment abaissé ;
  - les BV[3] de l'Avre et de l'Eure sont séparés par un Horst ;
  - l'Eure et l'Huisne coulent toutes deux dans un même bassin d'effondrement, respectivement le long des épaulements nord et sud. L'Huisne franchit cet épaulement au niveau d'une cluse ;
  - le BV de la Dives s'appuie au sud sur le prolongement de la zone Bocaine.

[3] BV : Bassin Versant

- Pour les cours d'eau circulant en domaine de socle :
  - le cours de la Varenne est assez singulier car il traverse 6 blocs litho-structuraux différents. Dans sa partie aval, il s'écoule du côté effondré du bloc de Passais-le-Horps ;
  - la Rouvre s'écoule au cœur du graben qui coupe en deux le massif d'Athis.

Par ailleurs, on constate également assez facilement à partir de l'analyse directionnelle des tronçons de cours d'eau que la densité du « chevelu » de cours d'eau est plus importante pour les blocs situés en domaine de socle que pour ceux situés en domaine sédimentaire.

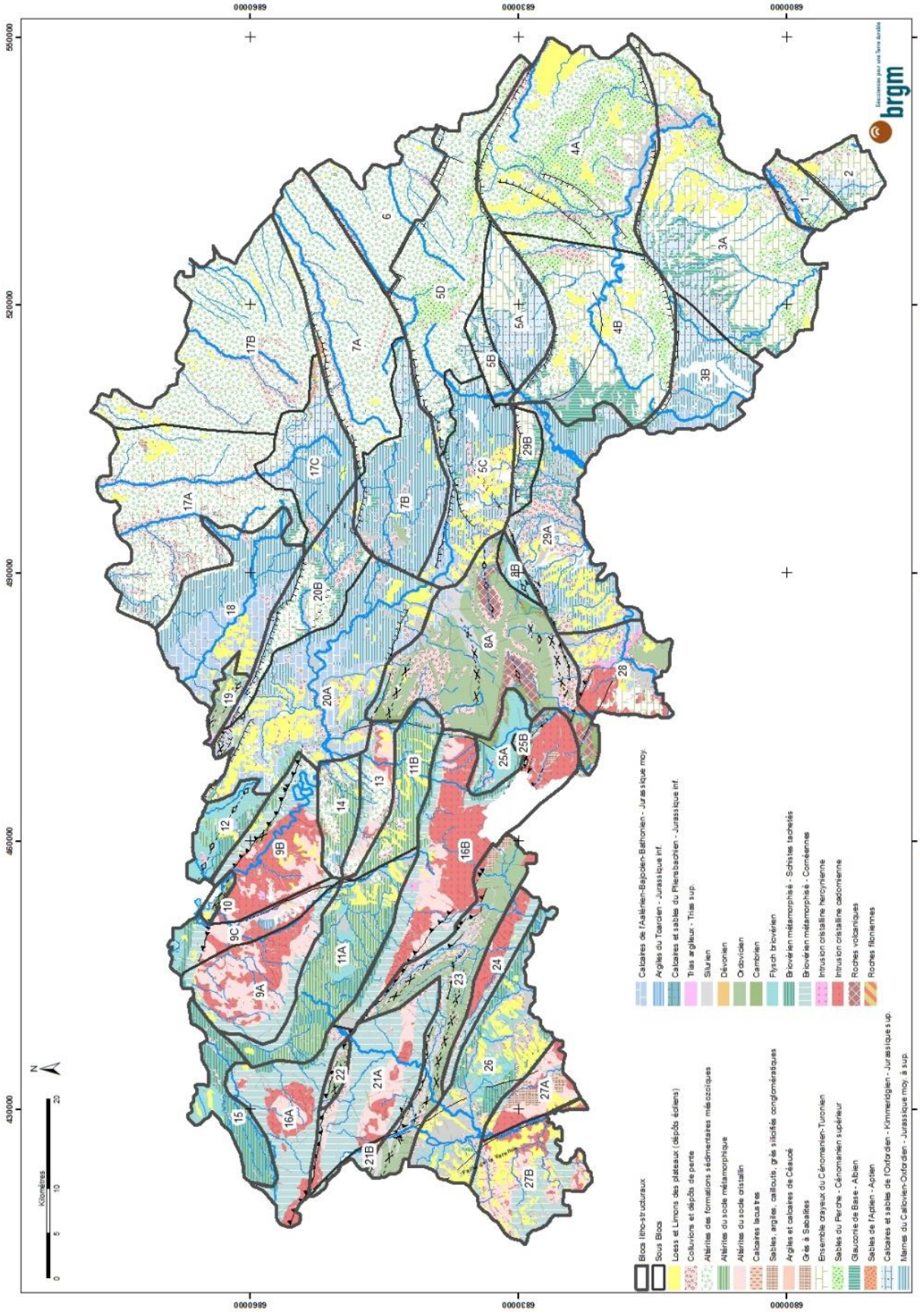


Illustration 7 : Carte du découpage en blocs litho-structuraux du département de l'Orne, source : Rapport BRGM RP-69292-FR, 2019.

2.2.2. Régime hydrologique

Cours d'eau	Nom Station (Code)	Taille du BV (km2)	QMNA5 (m3/s)	Module (m3/s)	Module/QMNA5	Débit spécifique (l/s/km2)	Débit spécifique à l'étiage (l/s/km2)
Noireau	Cahan (I3462010)	520	0,48	6,78	14,1	13,0	0,92
Mayenne	Ambrières les Vallées - 53 (M3060910)	828	0,43	8,70	20,2	10,5	0,52
Rouvre	Segrie-Fontaine (I3352010)	301	0,19	3,35	17,6	11,1	0,63
Varenne	St Fraimbault (M3133010)	517	0,76	7,43	9,8	14,4	1,47
Orne	Rabodanges (I3131010)	995	0,64	7,60	11,9	7,6	0,64
Sarthe	St Ceneri (M0050620)	908	0,73	6,90	9,5	7,6	0,80
Avre	St Christophe - 27 (H9202020)	109	0,02	0,35	17,3	3,2	0,18
Charentonne	Trinité Réville - 27 (I0102020)	224	0,90	1,80	2,0	8,0	4,02
Dives	Beaumais - 14 (I2021010)	282	0,42	1,57	3,7	5,6	1,49
Eure	St Luperce -28 (H9021010)	330	0,22	1,60	7,3	4,8	0,67
Huisne	Nogent le Rotrou - 28 (M0361510)	827	1,90	6,05	3,2	7,3	2,30
Iton	Bourth - 27 (H9402020)	159	0,31	1,26	4,1	7,9	1,95
Risle	Rai (I0011010)	149	0,47	1,30	2,8	8,7	3,15
Touques	Mardilly (I1011010)	87,5	0,23	0,75	3,3	8,6	2,63

Tableau 1 : Débits caractéristiques des principaux cours d'eau du département de l'Orne (source : Banque Hydro). Les lignes jaunes représentent les cours d'eau du domaine sédimentaire, en rose les cours d'eau du domaine de socle et en vert les mixtes

L'analyse du Tableau 1 ci-dessus montre que les cours d'eau du domaine de socle ont les débits spécifiques les plus importants du département (10 à 15 l/s par km²). En domaine sédimentaire, les débits spécifiques des rivières sont plus faibles (5 à 9 l/s/km²). A noter : les BV de l'Avre et de l'Eure présentent des débits spécifiques très faibles qui s'expliquent par l'existence de circulations karstiques.

L'indicateur du ratio entre module et QMNA5 montre qu'il existe un effet de saisonnalité très marqué sur les bassins versants du domaine de socle : rapport de 10 à 20 alors qu'il est plutôt de l'ordre de 2 à 4 (hors BV de l'Avre et de l'Eure) pour les cours d'eau du domaine sédimentaire (et de 10 pour les cours d'eau mixtes). Ainsi le débit des cours d'eau du domaine sédimentaire est plus régulier tout au long de l'année, à l'inverse de ceux du domaine armoricain. Les débits des cours d'eau en domaine sédimentaire sont soutenus par les puissantes nappes des calcaires jurassiques et de la craie, voir paragraphe 2.3 suivant. A noter tout de même : les rivières drainant les granitoïdes et leurs arènes peuvent avoir des débits spécifiques estivaux plus élevés que celles drainant la nappe des calcaires jurassiques.

Dans l'ensemble la capacité de ruissellement des bassins versants du domaine de socle serait donc plus importante que celle des bassins versants du domaine sédimentaire comme le montre l'Illustration 8 page suivante.

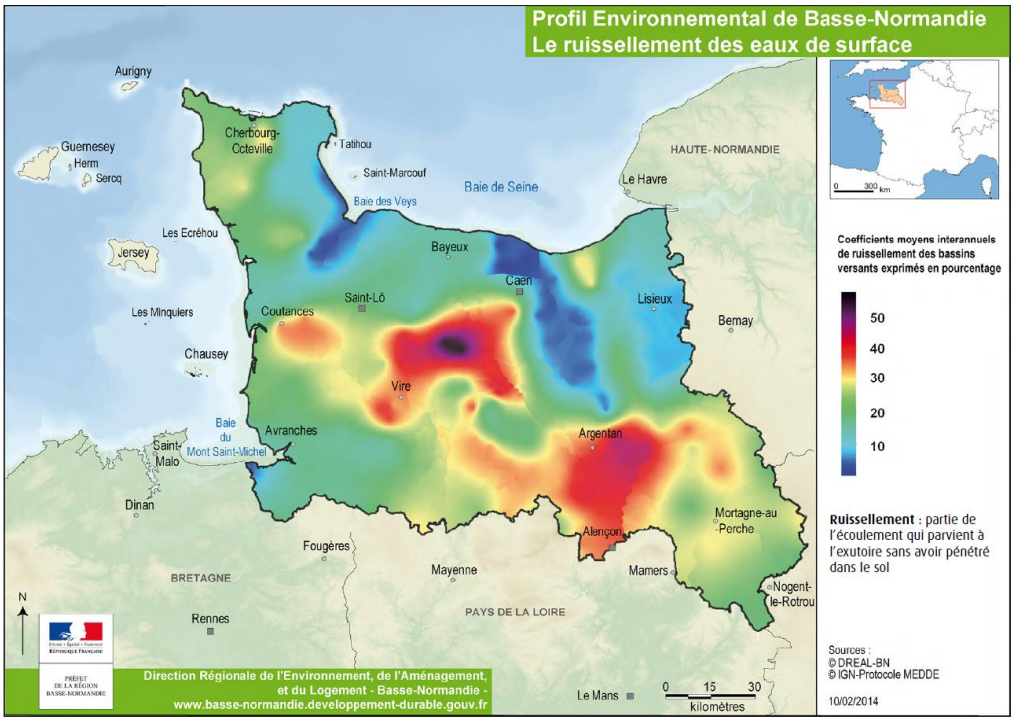


Illustration 8 : Evaluation du coefficient de ruissellement des principaux bassins verants de Normandie occidentale (source : Profil Environnemental de Basse Normandie, DREAL Normandie, 2015)

Ci-après, nous proposons une analyse synthétique du fonctionnement hydrologique des différentes régions ou pays du département de l'Orne se base sur le travail de la DREAL Normandie (2015), modifié pour l'occasion. Les informations principales sont reportées sur l'Illustration 9 :

- **Plaine d'Argentan et d'Alençon**

Le sous-sol de ce territoire est pour l'essentiel composé de calcaires jurassiques, recouverts de manière très discontinue par des lœss et des altérites. Il s'agit dans l'ensemble de matériaux très perméables et la grande majorité des pluies efficaces s'infiltre dans ces terrains pour rejoindre la nappe du Bathonien.

*Le réseau hydrographique se limite donc aux rares vallées où la nappe du Bajocien-Bathonien émerge dans le milieu superficiel. C'est le cas des bassins amont de l'Orne et de la Sarthe séparés par une discontinuité structurale (*faille de Courtomer*). Elles possèdent toutes deux le même débit spécifique compris entre 7 et 8 l/s/km². Les deux cours d'eau reçoivent, avant la sortie du département, les écoulements provenant des formations des domaines de socle du massif d'Ecouves et du massif d'Athis.*

- **Pays d'Auge**

Situé dans la partie nord-est du département de l'Orne, le Pays d'Auge, est un hydrosystème composé d'un plateau crayeux recouvert d'argiles à silex et de limons, incisé en son cœur par la Touques et ses affluents et bordé par la Dives qui contourne sa cuesta.

Ainsi, la Dives reçoit dans sa partie amont un important volume provenant directement de sa nappe alluviale, le sous-sol reposant en partie sur les marnes imperméables callovo-oxfordiennes. En rive droite, celle-ci est bordée par le talus de la cuesta du Pays d'Auge qui

la domine d'environ 150 mètres (région de Gacé). De la cuesta descend notamment la Vie, alimentée par les formations calcaires oxfordiennes et par la craie.

Alimentée par de multiples ruisseaux drainant la nappe de la craie et les nappes des terrains de l'Oxfordien, la Touques dispose d'un débit régulier, peu contrasté entre l'hiver et l'été.

La craie est la clef de voûte du fonctionnement hydroloqique du bassin de la Touques. Elle génère une ligne de sources au contact des sables argileux verts ou noirs dits de « la glauconie de base », peu perméables. Les milliers de sources et zones humides recensées à l'interface craie / glauconie libèrent des eaux souterraines qui se concentrent via de petits ruisseaux en direction du cours de la Touques ou de ses affluents majeurs.

De grands volumes d'eau de ruissellement circulent également sur le Plateau augeron. Ils rejoignent également dans de larges proportions les eaux souterraines grâce aux bétoires (points d'engouffrement) qui jalonnent les fonds de vallées sèches. Ces bétoires acheminent l'eau de ruissellement jusqu'aux réservoirs aquifères via un réseau de conduits karstiques.

- **Le plateau du Lieuvin, du Thymerais et du Pays d'Ouche**

Ces rivières disposent d'écoulements interannuels fort variables selon l'exposition de leur bassin versant aux pluies. La partie nord du plateau et le talus qui le borde sont en effet beaucoup plus arrosés que sa partie sud. L'Iton, la Charentonne et la Risle écoulent ainsi entre 7 et 8 l/s/km² par an, soit deux fois plus que l'Eure et l'Avre pourtant si proches mais situés dans des blocs litho-structuraux différents.

Tout comme dans le Pays d'Auge, les plateaux crayeux de la région de L'Aigle sont karstiques et parcourus de pertes et de résurgences. C'est également un point d'attention permettant d'expliquer les différences de débit spécifiques observées entre les deux groupes de rivières.

- **Le Perche**

Entre les failles de Mortagne-au-Perche et de Bellême, le Perche se compose de collines ouvertes, façonnées dans les assises marno-calcaires du Jurassique supérieur et dans les formations crayeuses et sableuses du Crétacé. Ce territoire est limité à l'ouest par un talus de cuesta plongeant vers les marais de la Sarthe. Il est dominé à l'est par les forêts de Réno-Valdieu puis par le plateau de la forêt de Longny. Cet ensemble composite est incisé par le cours supérieur de l'Huisne.

La rivière est en majorité alimentée par la nappe de la craie qui lui garantit un soutien d'étiage excellent en été. Quelques-uns de ses affluents, comme la Même au sud près de Bellême ou la Chippe au nord à proximité de Mortagne, bénéficient également des apports de la nappe des terrains oxfordiens.

- **Région des bocages**

La région se situe sur le domaine de socle armoricain de l'ouest du département de l'Orne, entre les synclinaux paléozoïques, les massifs granodioritiques et les schistes et grès du Briovérien.

Ce vieux socle plissé et fracturé offre un paysage de collines plus ou moins ouvertes au pied desquelles coulent des cours d'eau relativement paisibles dont le débit varie en fonction de leur exposition aux pluies. Les débits spécifiques sont les plus importants à l'échelle du département (10 à 15 l/s/km² comme déjà souligné plus avant, cf. Tableau 1*).*

En été, ces cours d'eau ne s'assèchent que rarement bien que leur débit chute fortement.

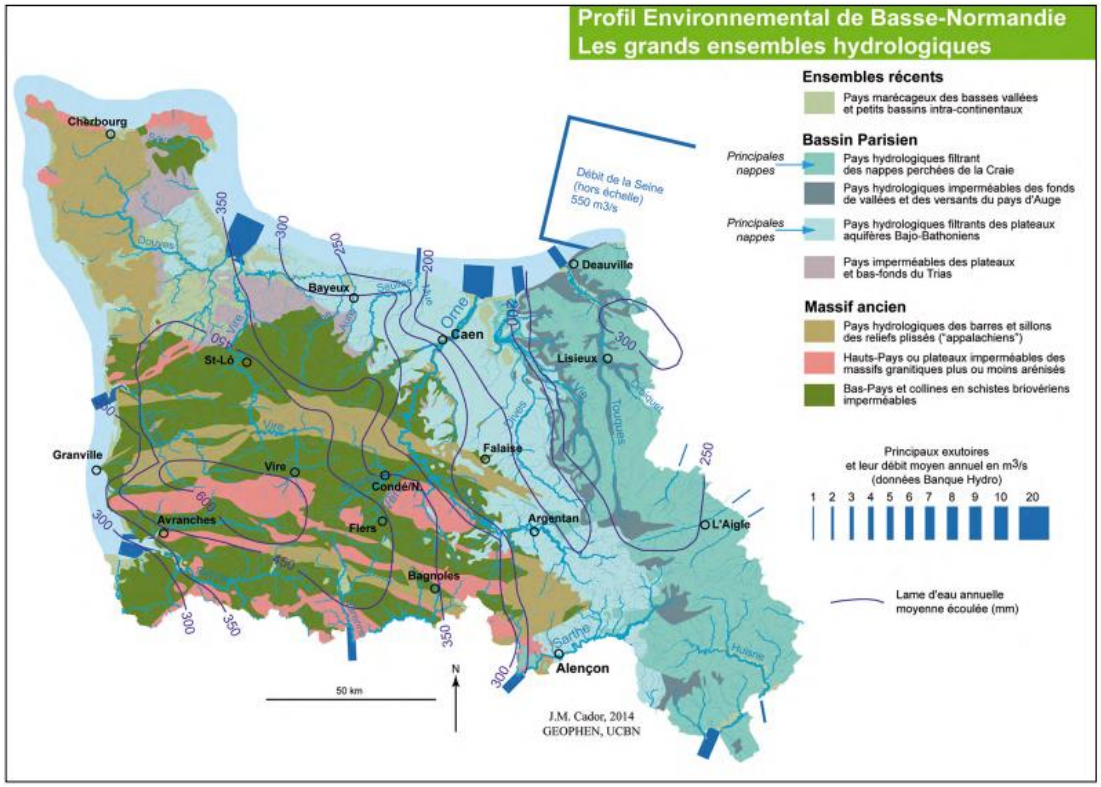


Illustration 9 : Lame d'eau annuelle moyenne écoulée des grands ensembles hydrologiques, Profil Environnemental de Basse-Normandie, DREAL Normandie (2015) d'après J.M. Cador (2014) Geophen.

2.3. CONTRIBUTION DES EAUX SOUTERRAINES AU DEBIT DES COURS D'EAU

2.3.1. Sources

Une source est une sortie naturelle localisée des eaux souterraines à la surface du sol : point de rencontre entre la surface de la nappe « phréatique » avec la surface topographique. Les sources vont contribuer de façon plus ou moins directe au débit des cours d'eau. Celles-ci sont, la plupart du temps, à l'origine de la naissance des cours d'eau et contribuent tout au long de leur parcours, à faire grossir leur débit (de façon ponctuelle ou diffuse).

Il en existe de différents types, dont les principales sont regroupées sur la figure suivante.

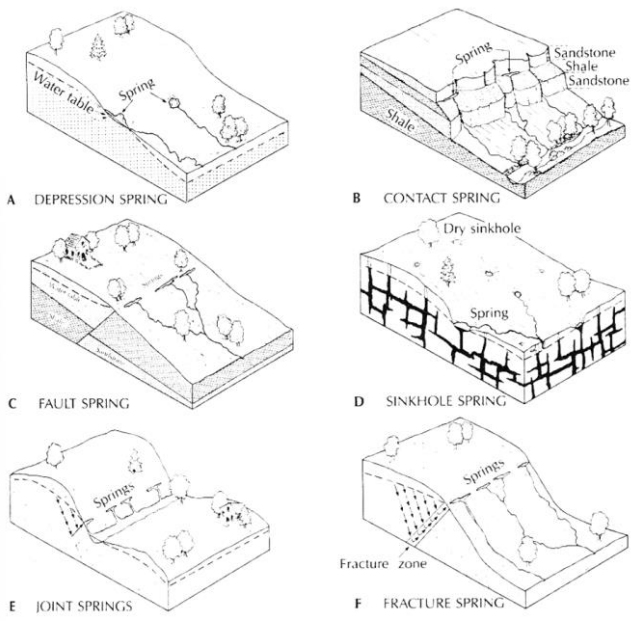


Illustration 10 : Typologie des sources (C.W Fetter in Applied Hydrogeology, 2001)

L'Illustration 10 ci-dessus représente ces différents types de source :

- Les **sources d'émergence** sont formées par le recoupement de l'aquifère et la surface topographique : cas A.
- Les **sources de déversement** naissent du recoupement entre le mur d'un aquifère (sa limite inférieure imperméable) et la surface du sol (surface topographique) : cas B. Il existe un cas spécifique : cas E, lié aux contrastes de perméabilité au sein d'un aquifère qui peut se matérialiser par exemple au droit de joints lithologiques (*hard-ground*, ou joint de stratification) ou encore au niveau de filons magmatiques.
- Les **sources issues de fractures** peuvent se former :
    - au niveau du contact entre deux formations aquifères et non-aquifères, celles-ci étant en contact anormal à cause du système faillé : cas C.
    - directement au droit des fractures affectant une formation aquifère au niveau de l'affleurement avec la surface topographique : cas F.
- Les **sources karstiques** résultant de l'arrivée en surface d'un conduit karstique (les vides karstiques sont des vides issus de la dissolution des roches carbonatées) : cas D.

- Ou encore de **sources artésiennes**, qui correspondent à la sortie de l'eau d'une nappe captive (donc sous pression) vers l'extérieur, non représenté sur le schéma ci-dessus.

La carte ci-après (Illustration 11) regroupe les informations sur la localisation des sources disponibles au sein de la banque de données du sous-sol (BSS) et sur la BD Topo (IGN).

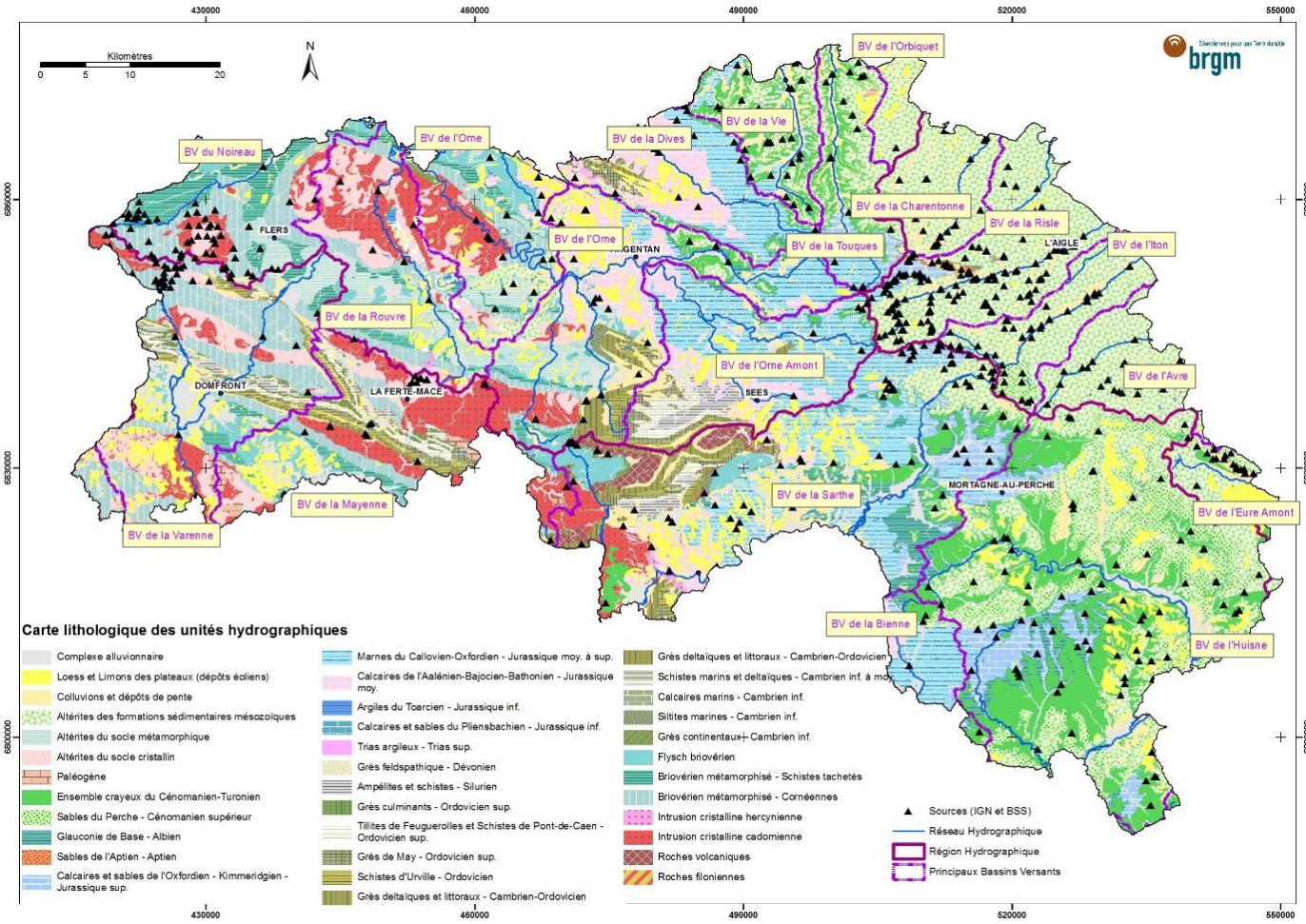


Illustration 11 : Représentation des sources connues dans les banques de données (IGN BD Topo et BSS, bases non-exhaustives) sur fond lithologique

A partir des informations fournies par la carte ci-dessus, on remarque que la localisation ou la typologie des sources va varier en fonction du contexte litho-structural local :

- **Dans les formations Magmatiques et méta-sédimentaires :**
  - Les sources prennent naissance au contact entre le granite et les cornéennes mais également indépendamment au sein des cornéennes et des granitoïdes, en fonction de leur degré de métamorphisme : exemple dans le Massif d'Athis des sources qui alimentent le Noireau et la Vère ; mais également avec la présence ou non de la présence ou non d'altérites.
  - Les sources d'émergence au sein des massifs granitiques sont liées à la topographie mais aussi à la fracturation et l'altération des roches : exemple des sources du massif de Chanu.

- Il semble que les roches filoniennes ne voient pas naître de sources au contact avec les formations encaissantes (exemple du champ doléritique).

- **Dans les formations du Briovérien (non-métamorphisé) :**
  - Dans ces formations à la structure complexe, il semble que les sources soient guidées par le contact lithologique entre les schistes et les grès (interbanc), la fracturation (et l'altération des roches) et également la topographie. Exemple des sources dans la dépression du Houlme.
- **Dans le Paléozoïque :**
  - Les sources naissent au contact entre des formations perméables et moins perméables : exemple des sources de la Sennevière et de la Thouane, petits affluents de l'Orne, qui prennent naissance dans le massif d'Ecouves (synclinal de Sées) au contact entre les grès et les schistes.
  - La source thermale de Bagnoles-de-l'Orne, seule source thermale naturelle en Normandie, les eaux proviendraient d'une fracture verticale ouverte dans le grès armoricain. L'eau provient probablement d'un aquifère profond constitué par le batholite de granite fracturé situé sous le Grès armoricain.
  - Les *heads*[4] issus du démantèlement des barres de grès abritent de nombreuses petites sources de déversement.
- **Dans les formations sédimentaires mésozoïques :**
  - Des sources de déversement issues des écoulements entre les formations perméables et leur base moins perméable : exemple de la craie et des formations argileuses de l'albo-aptien (glauconie de base) qui alimentent les sources du Don.
  - Des sources de contact entre les formations perméables et moins perméables : contact faillé entre les formations crayeuses et les marnes jurassiques du secteur de Bellême dont les sources alimentent la Même et du Merdereau par exemple.
  - Des sources d'émergence de la nappe à la rencontre avec la topographie : exemple des sources de la craie qui alimentent les petits affluents de la Touques.
  - Des sources karstiques : exemple des résurgences du Guiel dans la craie et des petits affluents de la Sarthe au nord d'Alençon dans les formations jurassiques.

Important : On précise que l'information sur la localisation des sources est non-exhaustive et très lacunaire à l'échelle départementale y compris dans la BSS. Il aurait été intéressant de pouvoir collecter les valeurs de débit de ces sources en plus de leur localisation pour pouvoir apprécier notamment la capacité globale des différents aquifères ; mais également pour pouvoir apprécier leur contribution au débit des cours d'eau et éventuellement aux zones humides. Il s'agit d'un point d'amélioration de la connaissance pour le futur (gestion plus efficiente).

[4] Le head est un dépôt de solifluxion sur un versant, formé sous climat périglaciaire. Constitué par un matériel sédimentaire grossier constitué de clastes (graviers, cailloux, blocs, méga-blocs) emballé dans une matrice plus fine (argile, limon, sable) plus ou moins abondante. Les heads sont caractérisés par un matériel hétérométrique et l'absence de figures de sédimentation (Jean Tricart, 1967).



Illustration 12 : Source et lavoir de la Ferrière-Bochard à l'ouest d'Alençon, contact entre les formations crayeuses et granitiques, BRGM 2017



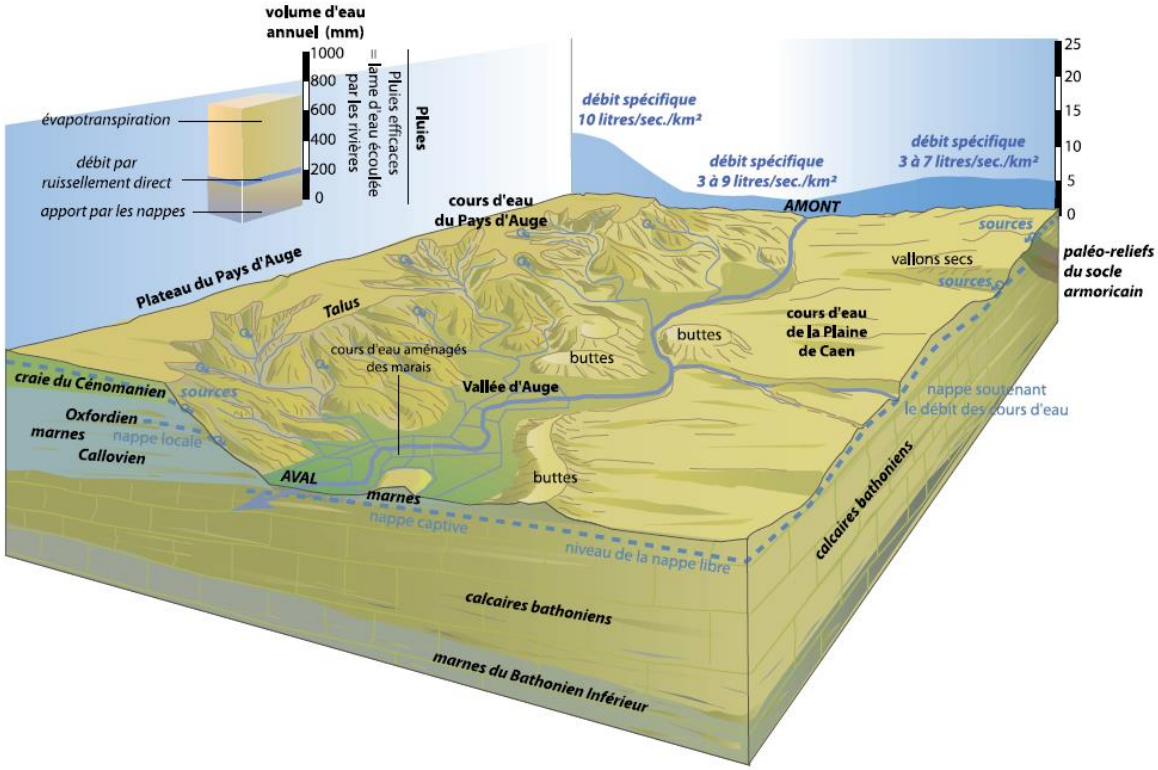
Illustration 13 : Résurgence Karstique du Sourtoir dans les calcaires jurassiques au nord d'Alençon, BRGM 2017

2.3.2. Soutien au débit d'étiage

Les eaux souterraines contribuent, à travers l'émergence de sources et des échanges nappe-rivière, au soutien d'étiage des cours d'eau. En été, lorsque les pluies sont moins importantes (limitant la recharge et les ruissellements au niveau des bassins versants), les rivières sont alors alimentées principalement par les eaux souterraines.

L'Illustration 14 montre par exemple, dans le contexte particulier du Pays d'Auge, le lien qui peut exister entre l'hydrologie et l'hydrogéologie : localisation des émergences, apports et soutien des nappes au débit des cours d'eau.

On se référera à l'Illustration 5 pour ce qui est de l'exemple en domaine de socle.

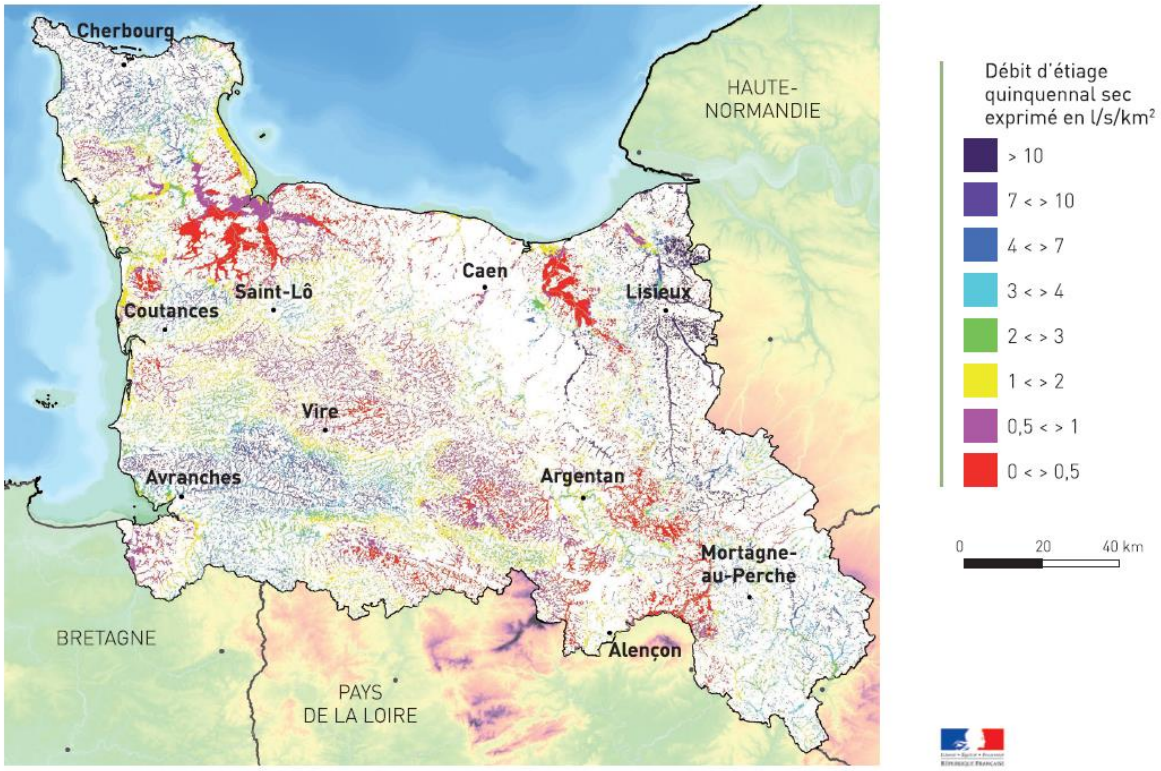


Organisation schématique du réseau hydrographique
dans les bassins versants de type « Bassin parisien »
Schéma proche de celui de la Dives.
Source : GEOPHEN, Université de Caen, J.-M. Cador
Réalisé pour le Profil environnemental de Basse-Normandie (DREAL BN)

Illustration 14 : Exemple dans le Pays d'Auge de la Vie et de la Touques, dont le cours subméridien incise les formations du Crétacé pour s'établir sur les assises des terrains jurassiques du Kimméridgien et de l'Oxfordien. (DREAL Normandie, 2015)

Ainsi, en mesurant le débit des cours d'eau à l'étiage, il est possible d'estimer la contribution des eaux souterraines à l'écoulement de surface.

La DREAL Normandie a réalisé une carte régionale du débit d'étiage des cours d'eau extrapolée à partir des mesures réalisées par le service hydrométrie. Cette carte nous renseigne d'une part sur la capacité des différents aquifères à stocker les eaux infiltrées mais également sur leur capacité à restituer l'eau emmagasinée pendant la période de recharge.



Débit d'étiage quinquennal sec (QMNA_5) des zones humides de Basse-Normandie
L'ordre de grandeur de la productivité des zones humides en période d'étiage quinquennal sec est désormais connu.
Source : DREAL

Illustration 15 : Carte du débit d'étiage des cours d'eau, DREAL Normandie 2015
Les débits d'étiages les plus importants correspondent à d'importantes ressources facilement mobilisables ; à l'inverse les débits d'étiage les plus faibles sont à associer des réservoirs ou des formations non-aquifères aux ressources plus faiblement mobilisables

Cette carte complète les informations du Tableau 1 page 33. Aussi, les éléments suivants peuvent être mis en avant :

- Les rivières s'écoulant sur les **formations crayeuses** ont les débits d'étiage les plus importants. C'est le cas de la Touques et de la Risle par exemple. Au niveau régional, l'aquifère crayeux présente probablement les meilleurs caractéristiques hydrodynamiques (DREAL Normandie, 2014).
- Les rivières reposant sur les **formations du Bathonien, du Bajocien et de l'Oxfordien** ont des débits d'étiage également soutenus, par exemple sur l'Orne ou la Sarthe. Ces formations calcaires présentent un bon potentiel aquifère.
- Pour **les schistes et grès du Briovérien et du Paléozoïque, et les formations sableuses du Perche**, la quantité et la disponibilité des ressources pour soutenir les débits d'étiages semblent moyennes : cas de l'Eure amont et de l'Orne moyenne par exemple.
- Les **formations magmatiques et métamorphiques, les formations superficielles et d'altération** ont des capacités plutôt moyennes à mauvaises dans le département de l'Orne pour soutenir les débits d'étiage des cours d'eau : exemple de la Mayenne. Il s'agit de formations aux capacités aquifères plus modestes.
- Les **formations marneuses du Callovo-Oxfordien et les formations volcano-sédimentaires** paléozoïques ont, pour finir, des capacités très mauvaises pour soutenir le débit d'étiage des cours d'eau, par exemple sur l'amont de la Sarthe et de

la Dives ou au sortir du massif d'Ecouves. Ces unités sont considérées comme peu ou pas aquifères.

Les séparations d'écoulement que la DREAL a réalisé montre que les rivières sont principalement alimentées par les eaux souterraines en moyenne annuelle et pas simplement en étiage.

La DREAL Normandie[5] indique à juste titre que les alluvions, les formations d'altération, les formations de pentes (et colluvions) apportent un soutien d'étiage qui localement peut être important. Notamment leur rôle dans la régulation des hydro-systèmes peut être souligné (effet tampon ou filtre) ainsi que leur rôle dans le maintien des zones humides et des petits objets hydrauliques que sont les mares, étangs, fossés, etc… (rôle hydro-écologique).

2.4. ZONES HUMIDES

L'Illustration 16 suivante regroupe les informations sur les secteurs où l'on observe une accumulation d'alluvions (par extrapolation où l'on va rencontrer des zones humides) et les informations sur les principales structures géologiques recensées à l'échelle du département de l'Orne.

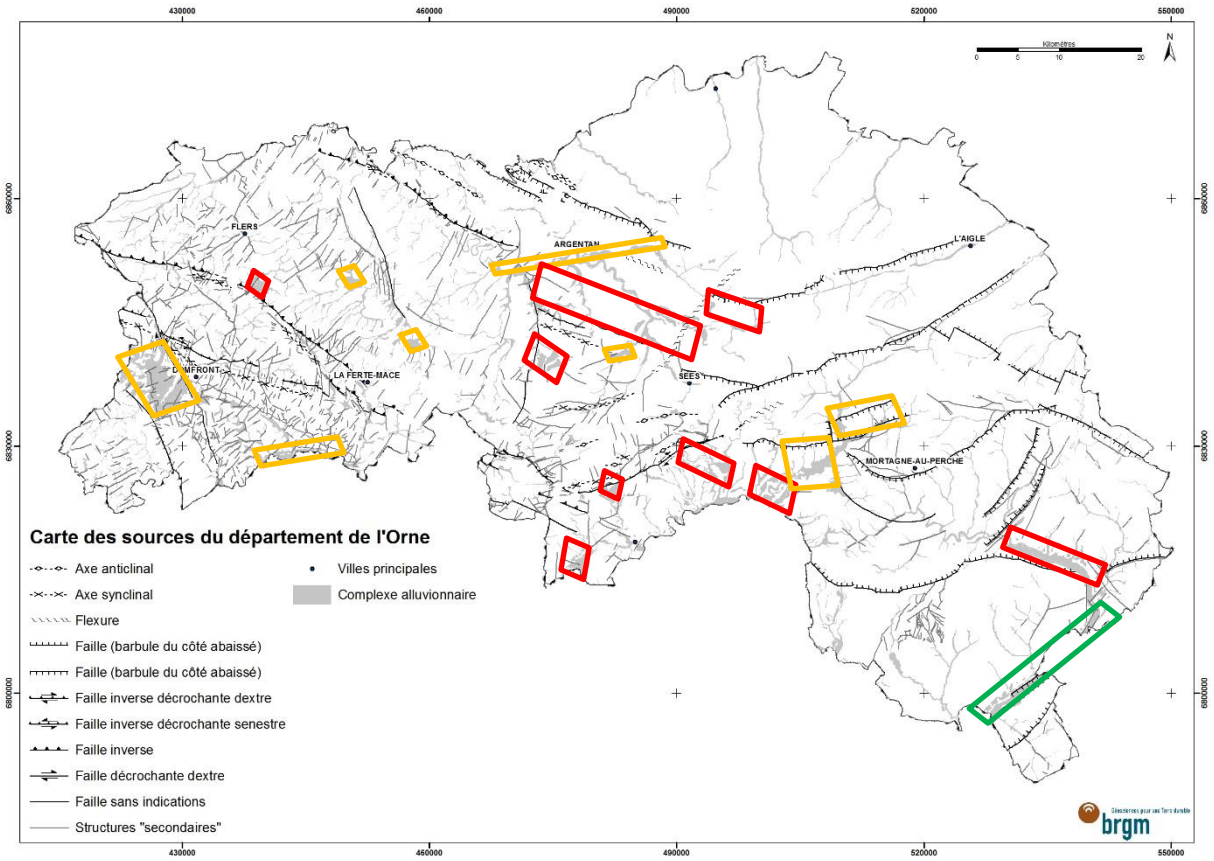
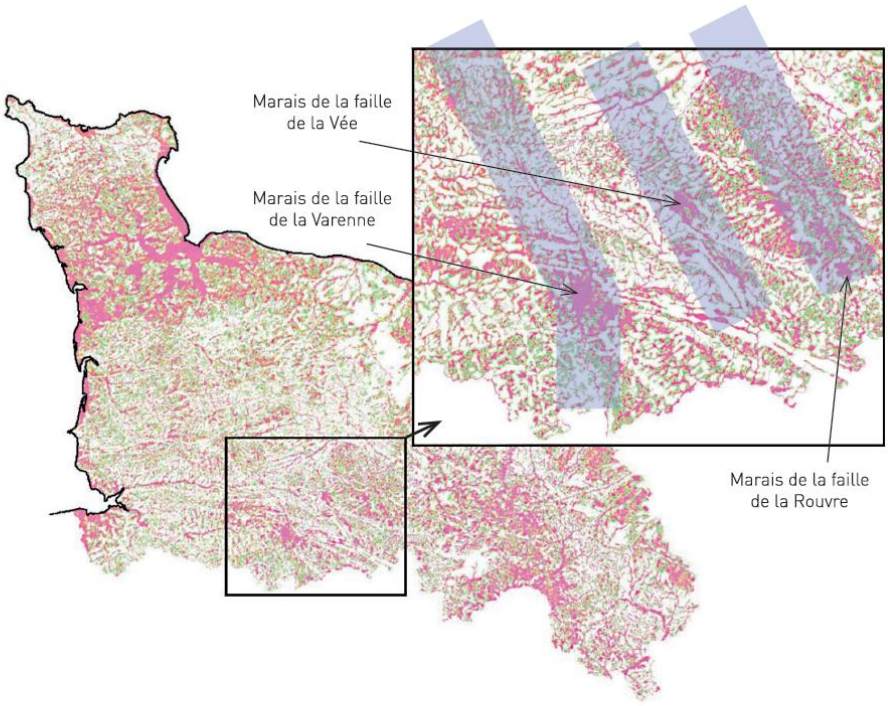


Illustration 16 : Zones d'accumulation des formations d'alluvions, issues de la carte géologique harmonisée du département de l'Orne (BRGM) et principales structures géologiques rencontrées (rapport RP-69292-FR). Zones de subsidence, famille de failles qui pourraient potentiellement être à l'origine de l'accumulation de sédiments : en orange (N60-80/N150-170), rouge (N10-30/N100-120) et vert (N60/N120).

[5] Communication orale de F.Gresselin

En cherchant à identifier les familles de structures qui pourraient en être à l'origine, on remarque que 2 familles principales se distinguent : en orange (N60-80/N150-170) et rouge (N10-30/N100-120). Une troisième famille secondaire représentée en vert se distinguerait à l'extrême sud-est (N60/N120). On peut donc faire l'hypothèse que ces ensembles structuraux pourraient expliquer la présence de ces zones humides.



Les plus grands marais du socle armoricain s'organisent le long de lignes de failles, généralement orientées NW-SE. C'est le cas des marais des vallées de la Varenne, de la Vée ou de la Rouvre, qui s'égrènent le long de failles, prouvant leur activité tectonique actuelle.
Les marais et zones humides sont représentés en rose sur la carte.
Source : DREAL BN

Illustration 17 : Organisation des zones humides dans le contexte structural de Normandie Occidentale (DREAL Normandie, 2015)

Sur la figure ci-dessus (Illustration 17), la DREAL Normandie montre que les marais de St Gilles (la Varenne), de Messei (la Vée), du Grand Hazé/Houlme (le Breuil), situés à l'ouest du département de l'Orne, sont implantés le long de structures N150-170 et N40-60. On peut émettre l'hypothèse qu'il s'agit de structures de type Pull-Appart ou encore appelées Rhomb-Graben (Illustration 18).

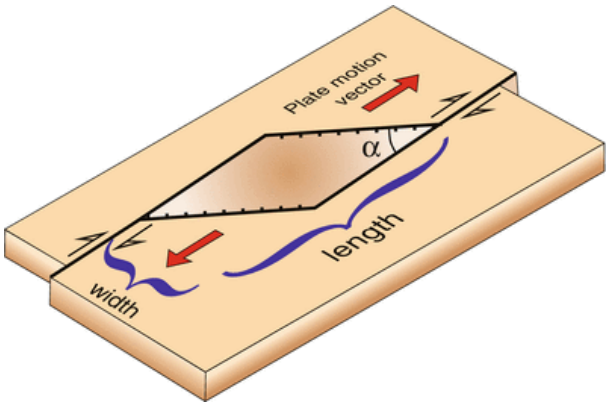


Illustration 18 : Schéma d'une structure en pull-appart , failles décrochantes et normales associées (A.Gurbuz, 2014)

Sur le secteur Est du département, les structures N100-120 et N60-80 ou N10-30 semblent contrôler également la répartition des zones humides : vallées de l'Huisne, de la Sarthe, de l'Orne, du Colombier et de Mieuxcé à l'Ouest d'Alençon.

Ces petits grabens ont pu se constituer très vraisemblablement au cours du tertiaire et du quaternaire et constituer des zones d'accumulation préférentielle des sédiments dont le comblement s'est fait probablement à la fin du Quaternaire (il existe des indices d'une néotectonique mais le fonctionnement de ces structures s'est fait a priori majoritairement au cours du Quaternaire). La nature des sédiments, généralement poreuse, est le plus souvent compatible avec le stockage d'eau souterraine. Ces zones « déprimées » au niveau géomorphologique sont également des zones de contact et d'échanges privilégiés entre les eaux superficielles et les eaux souterraines.

En tout état de cause, ces zones d'accumulation de sédiments, probablement d'origine tectonique (hypothèse à confirmer), constituent des milieux humides dont le rôle et les fonctions hydro-écologiques sont aujourd'hui reconnus comme étant d'une grande importance en particulier pour la protection des ressources en eaux souterraines sous-jacentes (qualité chimique des eaux affectée de manière bénéfique).

2.5. BILAN DES CONNAISSANCES SUR LES EAUX SUPERFICIELLES

a) Organisation des cours d'eau

On note qu'à l'échelle du département **il a pu être mis en évidence que l'aspect structural est l'un des principaux facteurs qui détermine l'orientation des cours d'eau**.

Les familles d'objets N0-20, N20-40, N40-60, N140-160 et N160-180 correspondent aux chemins d'écoulements préférentiels des eaux superficielles. Par analogie on peut faire l'hypothèse qu'il s'agit également d'axes de drainage des eaux souterraines.

A de rares exceptions près, les directions comprises entre N60 et N140 sont sous-représentées. Pour ces deux derniers groupes de directions, on peut donc estimer qu'ils possèdent un caractère potentiellement moins drainant que les deux premiers (sauf pour le bloc du Noireau et Avre-Iton où c'est la direction N60-80 qui est prépondérante).

Par ailleurs, les axes compris entre N100 à 120 correspondent *a priori* à des axes compressifs et les directions sub-méridiennes NNE-SSW à NNW-SSE correspondent pour partie à celle

des filons doléritiques. Le caractère drainant de ces deux familles de structures n'est donc probablement pas prépondérant.

b) Régime hydrologique

Les cours d'eau du domaine de socle ont les débits spécifiques les plus importants du département (10 à 15 l/s par km²). En domaine sédimentaire, les débits spécifiques des rivières sont plus faibles (5 à 9 l/s/km², hors BV de l'Avre karstique et de l'Eure).

Le ratio entre module et QMNA5 montre qu'il existe un effet de saisonnalité très marqué sur les bassins versants du domaine de socle alors que celui-ci est beaucoup moins important pour les cours d'eau du domaine sédimentaire. Ainsi, pour ce dernier, le débit des cours d'eau y est plus régulier tout au long de l'année, soutenu par les puissantes nappes des calcaires jurassiques et de la craie.

c) Contribution des eaux souterraines au débit des cours d'eau

Les sources vont contribuer de façon plus ou moins directe au débit des cours d'eau. Celles-ci sont, la plupart du temps, à l'origine de la naissance des cours d'eau et contribuent tout au long de leur parcours, à faire grossir leur débit (de façon ponctuelle ou diffuse). En été, lorsque les pluies sont moins importantes, les rivières sont alors alimentées principalement par les eaux souterraines.

A l'échelle départementale, il a ainsi pu être mis en évidence que :

- Les rivières alimentées par les formations crayeuses ont des débits d'étiage les plus importants et soulignent le caractère de réservoir exceptionnel que constituent ces formations.

- Les rivières alimentées par les formations du Bathonien et du Bajocien et de l'Oxfordien ont des débits d'étiage également soutenus. Ces formations jurassiques constituent de bons aquifères.

- Pour les schistes et grès du Briovérien et du Paléozoïque, et les formations sableuses du Perche, la quantité et la disponibilité des ressources pour soutenir les débits d'étiages des cours d'eau semblent ainsi moyennes.

- Les formations magmatiques et métamorphiques, les formations superficielles et d'altération ont des capacités plutôt moyennes à mauvaises pour soutenir les débits d'étiage des cours d'eau. Il s'agit de formations aux capacités aquifères *a priori* plus modestes.

- Les formations marneuses du Callovo-Oxfordien et les formations volcano-sédimentaires ont, pour finir, des capacités très mauvaises pour soutenir le débit d'étiage des cours d'eau. Ces unités sont considérées comme peu ou pas aquifères.

d) Zones humides

Il a pu être souligné le fait qu'une partie des zones humides pourraient être le marqueur de secteurs de subsidence légère (lien structural). En faisant cette hypothèse, et en cherchant à identifier les familles de structures qui pourraient en être à l'origine, on remarque alors qu'il existe 2 familles principales : N60-80/N150-170 et N10-30/N100-120. Une troisième famille

N60-120, secondaire, se distinguerait encore à l'extrême sud-est du département. Ces ensembles structuraux pourraient alors expliquer la présence de ces zones humides.

L'interdépendance entre eaux souterraines, eaux superficielles et zones humides est très peu documentée à l'échelle du département de l'Orne. Sauf, *a priori*, sur le secteur du marais du Houlme (étude Télosia et Hydriad, 2011) où il a pu être démontré, une certaine indépendance entre la zone humide et les eaux superficielles d'une part et les eaux souterraines d'autre part.

Pour pouvoir mieux préserver ces milieux, il convient de mieux connaitre leur fonctionnement, notamment au regard de l'étude :

- **du fonctionnement des cycles de recharge/vidange des aquifères qui les supportent, de l'éventuel soutien d'étiage apporté des nappes vers les zones humides et des zones humides vers les cours d'eau (et inversement en période humide) afin de distinguer différentes typologies de milieux ;**

- **de leur pouvoir épurateur et d'effet sur la qualité des eaux des hydrosystèmes ;**

- **de leur rôle de support pour les milieux terrestres et aquatiques, et éventuellement de marqueurs biologiques en lien avec la quantité et la qualité des eaux souterraines ;**

- **de la sensibilité de ces habitats aux modifications des interactions eau souterraine/eaux superficielles : par exemple résilience face aux prélèvements (renouvellement des ressources) et face au changement climatique.**

L'identification précise, la typologie du fonctionnement et l'évaluation du rôle écologique de chacune de ces zones restent à préciser à l'échelle du département.

3. Connaissances actuelles sur le fonctionnement des aquifères du socle armoricain

3.1. FONCTIONNEMENT HYDROGEOLOGIQUE

3.1.1. Généralités[6]

Régionalement, le massif armoricain ne possède pas de grands aquifères et le paysage hydrogéologique est composé d'une multitude de petits aquifères locaux. Les capacités aquifères locales sont dépendantes de la lithologie, de l'altération, de la fracturation et de la distribution des formations superficielles. Ces aquifères ont des extensions généralement limitées et des propriétés hydrodynamiques très hétérogènes pouvant varier sur plusieurs ordres de grandeurs à la fois pour la perméabilité (capacité conductrice) et l'emmagasinement (capacité de stockage).

Pendant longtemps, les hydrogéologues ont cru que ces roches étaient exemptes d'eau. Ce n'est que dans les années 80 que la communauté scientifique s'intéresse à ces potentiels réservoirs d'eau souterraine. Il faudra attendre la fin des années 1990 pour découvrir le schéma conceptuel des aquifères de socle.

Les roches de socle sont à l'origine massives et très peu perméables. Leur perméabilité est acquise par la suite par différent mécanismes d'altération chimiques et physiques. Postérieurement à leur formation, ces roches ont subi différents types de modifications physiques : fracturation d'origine tectonique, altération météorique, etc. Certaines de ces modifications, en créant des vides ou de la porosité, ont amélioré la capacité de ces formations à fournir de l'eau : augmentation du stockage et de la transmissivité. Elles expliquent l'existence de ressources en eau au sein de ces roches à faible ou moyenne profondeur (0-100 à 150 m) et la possibilité de l'existence d'autres types de ressources, à plus grande profondeur (fracturation profonde).

De par leur formation, les aquifères en contexte de socle présentent une structure compartimentée, parfois discontinue, étroitement liée à leur passé, tant du point de vue de la nature de la roche mère (plus ou moins favorable vis-à-vis des processus d'altération ou de fracturation), que des modifications physiques et chimiques subies. A l'échelle d'un forage, la discontinuité s'observe par les arrivées d'eau recoupées au cours de la foration : elles sont très locales, au niveau des fractures, sur quelques centimètres et rencontrées au sein d'une roche imperméable.

L'altération des roches dures peut varier en fonction de plusieurs facteurs (tectoniques, chimiques, climatiques, lithologiques), l'altération des roches granitiques est relativement bien connue et détaillée ci-dessous.

Les formations superficielles et d'altération qui nappent une partie des régions de socle, peuvent contenir une part importante des réserves en eau souterraine. Ces formations créent à l'inverse une frange plus continue en termes de répartition, mais plus vulnérable de l'hydrosystème.

[6] On renvoie le lecteur aux articles du SIGES Bretagne : http://sigesbre.brgm.fr/ qui traitent dans une large majorité les éléments décrits ci-après.

3.1.2. Propriétés hydrodynamiques des horizons d'altération des aquifères de socle

En domaine de socle (granites et schistes), une structure d'aquifère stratiforme découlant de l'altération peut être décrite de la surface vers la profondeur par trois zones en fonction de l'altération et de la fracturation rencontrée (Illustration 19).

- **Les altérites** constituent un horizon meuble riche en argiles provenant de la décomposition *in situ* de la roche mère (caractère peu perméable). En raison de sa composition argilo-sableuse, les altérites ont une porosité effective importante généralement comprise entre 1 et 15%. *Cet horizon assure de fait une fonction de stockage, lorsque celui-ci est non érodé et lorsqu'il est saturé.* Ces formations sont donc souvent considérées comme ayant **un rôle capacitif**. En revanche leur conductivité hydraulique est généralement faible en l'absence de chemins d'écoulements préférentiels et est généralement comprise entre 10^{-6} et 10^{-8} m/s.

  L'horizon d'altérites est peu perméable et est doté d'une porosité significative. C'est le cas par exemple dans les granites du bassin versant de la Sienne dans la Manche. Au contraire, dans le bassin versant de l'Orne, les arènes granitiques du Massif d'Athis ont de faibles épaisseurs ce qui impacte fortement leur capacité de stockage.

- En-dessous, **l'horizon fissuré** se caractérise par une fissuration très dense dans les premiers mètres qui décroit par la suite avec la profondeur à partir d'un maximum obtenu à l'interface entre la base des altérites et l'horizon fissuré. Dans les roches isotropes (granitoïdes) ou à foliation verticale, cette fissuration est dominée par les fractures sub-horizontales. Cet horizon fissuré peut avoir localement une forte conductivité hydraulique et assure le **rôle transmissif de l'aquifère.**

  Dans l'horizon fissuré, seules quelques-unes des fractures de ce compartiment présentent des venues d'eau. Leur perméabilité est relativement homogène et c'est donc plus leur nombre et leur connectivité que leur perméabilité relative qui conditionne la productivité de cet horizon (cf. Illustration 21*).*

- En-dessous de l'horizon fissuré, l'eau circule au sein des fractures, la **roche saine** et massive étant peu perméable. Ce sont ces fractures qui donnent un caractère transmissif à cet horizon qui présente par ailleurs un faible emmagasinement (ou capacité de stockage). Le substratum n'est donc perméable que très localement à la faveur de fractures d'origine tectonique.

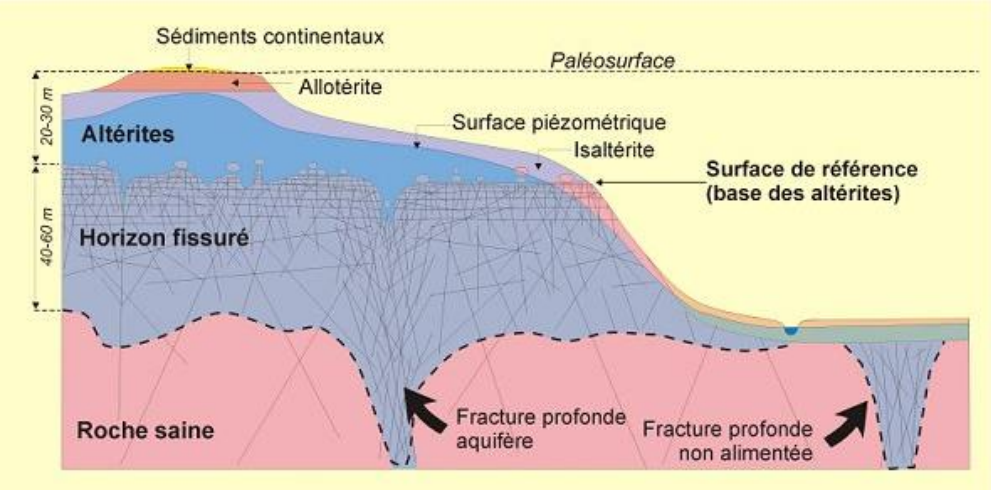


Illustration 19 : Schéma conceptuel des aquifères de socle (Source : Wyns et al., 2004)

Cette structuration du milieu implique une diminution de la perméabilité et de l'emmagasinement avec la profondeur (Dewandel et al., 2006 ; Boisson et al., 2015). Ceci se traduit par une diminution des débits instantanés par mètre linéaire avec la profondeur. La compilation des données bretonnes (Illustration 20) illustre ce comportement (Mougin et al., 2008a).

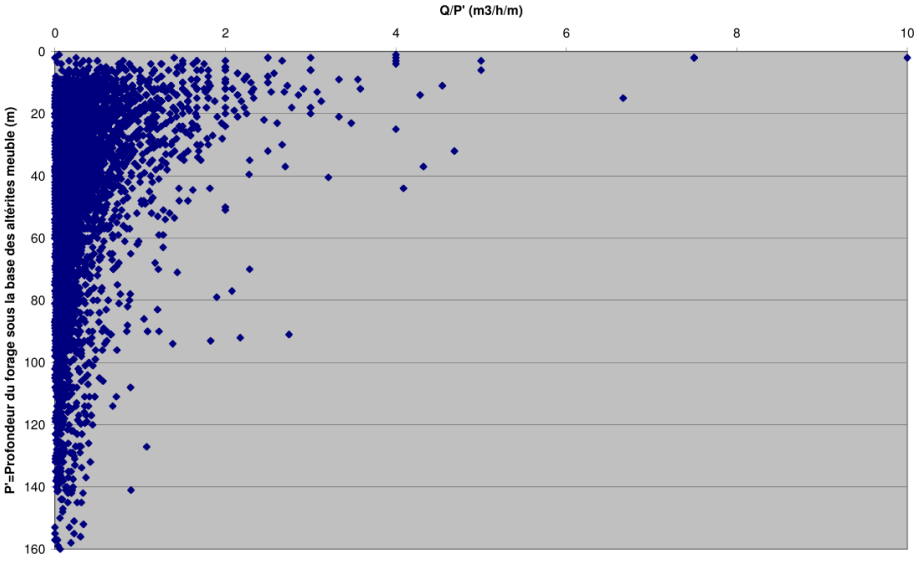


Illustration 20 : Débits instantanés par mètre en fonction de la profondeur du forage en-dessous de la base des altérites meubles (Mougin et al., 2008). Mesures sur différentes lithologies à l'échelle de la Bretagne sur un échantillon de 6089 forages

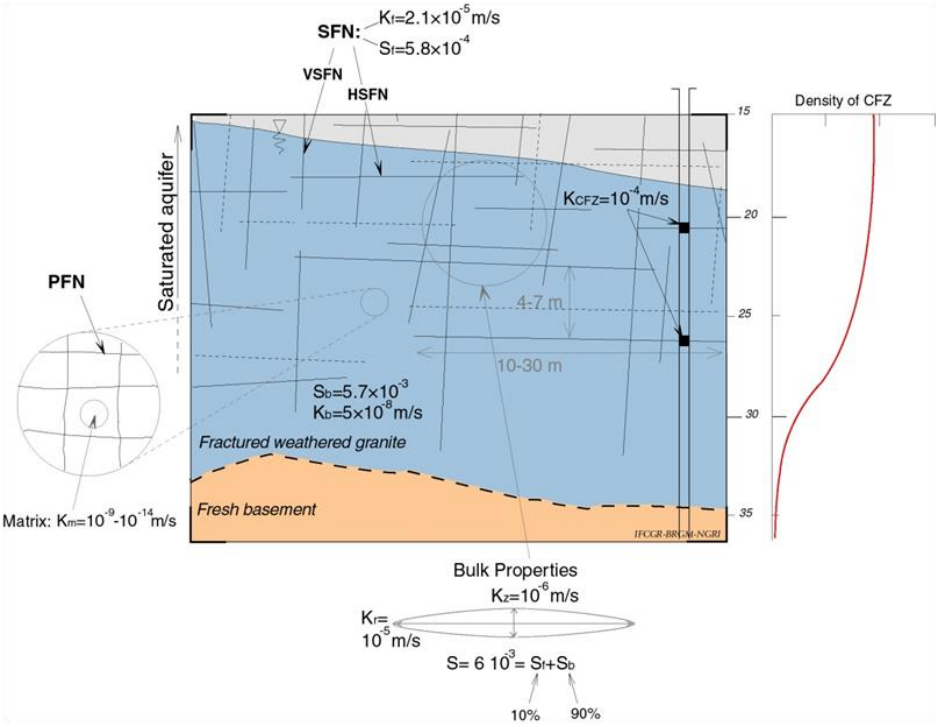


Illustration 21 : Représentation schématique des propriétés d'un aquifère de socle, in Maréchal et al., 2004. CFZ : Connnected/Conductive Fault Zone, PFN : Primary Fracture Network (Réseau Primaire de Fractures), n'affecte que la matrice à une échelle décimétrique, SFN : Secondary Fracture Network (Réseau Secondaire de Fractures), Vertical ou Horizontal affecte le massif à une échelle plurimétrique, Bulk : Massif

L'Illustration 21 (page précédente) présente la structure du milieu fissuré avec une diminution de la densité de fractures avec la profondeur jusqu'à la roche saine. Les réseaux de fractures provenant de l'altération chimique de la roche forment principalement des fractures horizontales qui sont par la suite recoupées par des fractures verticales qui assurent la connectivité du réseau. Cette structuration induit une forte anisotropie du milieu avec des écoulements principalement horizontaux. Ces réseaux sont composés de fractures de tailles variables allant de quelques millimètres à des dizaines de mètres, pouvant être définis en réseau primaire (millimétrique à décimétrique) et secondaire (pluri-métrique). L'emmagasinement des fractures est faible en comparaison à l'emmagasinement de la matrice altérée. Une proportion de 10% fractures et 90 % matrice altérée a été estimée dans les granites archéen indiens (Maréchal et al., 2014).

Cette structuration du milieu provoque régulièrement des comportements de type double porosité (observés lors des pompages d'essai).

3.1.3. Rôle de la fracturation structurale et tectonique

En plus de ces horizons d'altération les différents réservoirs peuvent être recoupés par des failles majeures ou des déformations liées à la tectonique ou au métamorphisme comme par exemple lors de la mise en place de plutons granitiques.

La présence de failles peut avoir un impact significatif sur les caractéristiques hydrodynamiques intrinsèques des réservoirs et sur la continuité des aquifères. Ces caractères spécifiques sont toutefois difficiles à identifier : en effet, dans certains cas, les failles sont faiblement perméables (Gleeson and Novakowski, 2009) et agissent comme des

barrières hydrauliques. Dans d'autres situations, les failles favorisent la présence d'importants flux souterrains (Le Borgne et al., 2006; Roques et al., 2014). La coexistence des deux états et d'états intermédiaires est souvent observée le long des structures ce qui a pour conséquence de rendre difficile la prévision du potentiel productif.

La présence de failles donne souvent lieu à des comportements hydrogéologiques et hydrochimiques complexes liés à de fortes anisotropies. En particulier celles provoquées par des combinaisons entre chemins d'écoulements locaux et régionaux, sans parler des interactions possibles avec des compartiments profonds (Jiménez-Martìnez et al., 2013; Roques et al., 2014). La présence de failles d'échelle régionale peut donner lieu à des débits importants (ex : 110 m^3/h sur le site de Ploemeur dans le Morbihan (Jiménez-Martìnez et al., 2013) mais en contrepartie ces sites ont souvent des comportements complexes avec notamment des échanges entre écoulements souterrains et superficiels comme le montre le site de Saint Brice-en-Cogles en Île et Vilaine (Roques et al., 2014 ; Illustration 22).

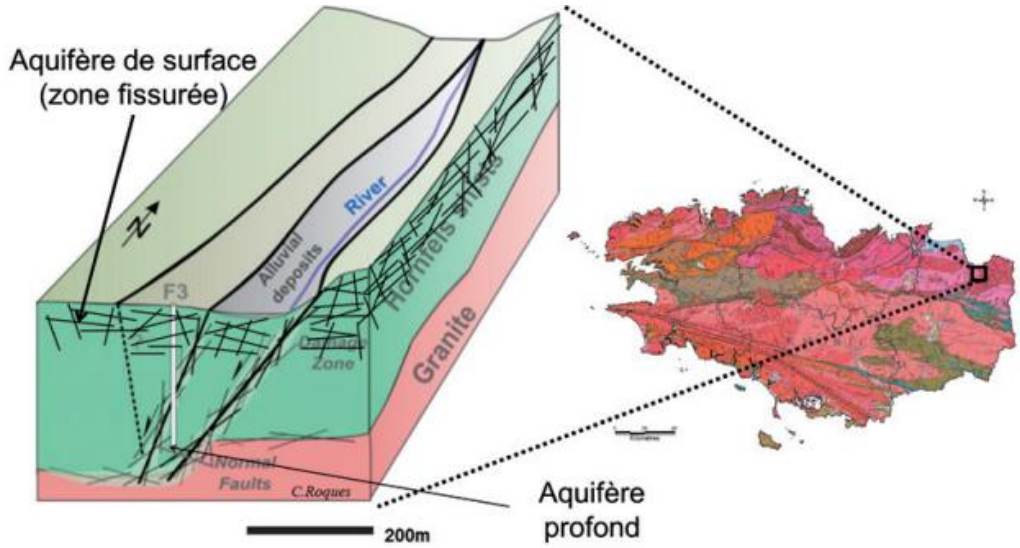


Illustration 22 : Caractéristiques géologiques du site de St Brice en Cogles (Roques et al. 2014), contexte similaire à celui de l'Orne Occidentale

3.1.4. Continuité spatiale des aquifères de socle

L'extension des aquifères de socle est principalement contrôlée par : la topographie, la présence de failles, les hétérogénéités lithologiques (ex : filons de quartz ou dolérites), la connectivité des fractures formant l'horizon fissuré et l'épaisseur des altérites. L'extension spatiale des aquifères de socle reste donc très variable et généralement réduite.

a) Connectivité des fractures et niveau piézométrique

Relativement peu d'études permettent d'identifier l'impact de la continuité des réseaux de fractures sur la ressource en raison de la densité de données nécessaire pour pouvoir effectuer une telle définition.

Dans un contexte géologique similaire, Perrin et al., (2011) et Guihéneuf et al., (2014) ont montré l'impact de la diminution de la densité de fractures avec la profondeur sur la connectivité des aquifères (Illustration 23). Ces études ont montré que lorsque les niveaux d'eau sont hauts, on observe une continuité des écoulements à l'échelle du bassin versant

notamment via la partie supérieure de l'horizon fissuré. Cependant quand les niveaux d'eau diminuent très fortement et lorsque le niveau piézométrique atteint la base de l'horizon fissuré, une compartimentation de l'aquifère est observée.

Bien que le contexte d'exploitation soit différent dans le massif armoricain, cette structuration implique que le fonctionnement de la ressource peut varier de manière importante à une échelle locale entre les situations de hautes et basses eaux ce qui va avoir notamment des implications notamment en termes d'exploitation et gestion de la ressource et de transport de contaminants.

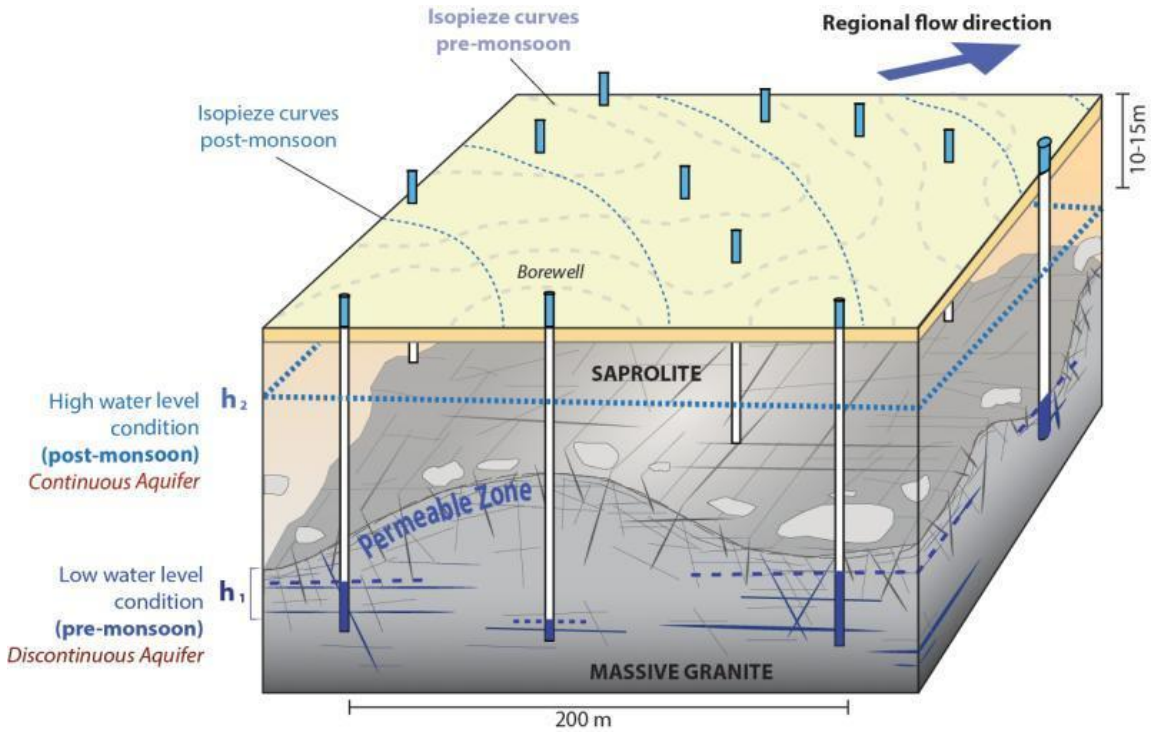


Illustration 23 : Modèle conceptuel des écoulements en fonction des niveaux d'eau Maréchal et al. 2018 modifié d'après (Guihéneuf et al., 2014)

b) Influence des hétérogénéités géologiques

Les hétérogénéités géologiques de type « veine ou filon de quartz » peuvent avoir des effets importants sur la continuité spatiale de la ressource en eau : (Dewandel et al., 2011 ; Perrin et al., 2011). Dewandel et al., (2011) ont montré l'existence d'un profil d'altération significativement plus développé à proximité d'une veine de quartz (3 à 5 fois pour la zone fissurée). A proximité du contact avec l'hétérogénéité, le profil dans l'encaissant est toujours caractérisé par l'existence de niveaux de saprolite et d'une zone fissurée subparallèles à l'objet géologique. Ces niveaux ne sont plus alors subparallèles à la surface contemporaine de l'altération mais subparallèles aux épontes de la discontinuité (Illustration 24).

Cette forme en U montre un enracinement local du profil d'altération. Elle résulte des mêmes processus d'altération que ceux observés sur les profils horizontaux et stratiformes, mais se développe parallèlement au filon. Ainsi, durant l'altération, la formation encaissante devient perméable et favorise un approfondissement local du profil. Cet épaississement est à l'origine d'une augmentation locale de la zone transmissive de l'aquifère. Le fonctionnement

hydrodynamique du secteur peut alors être caractérisé par un écoulement chenalisé le long de ces objets.

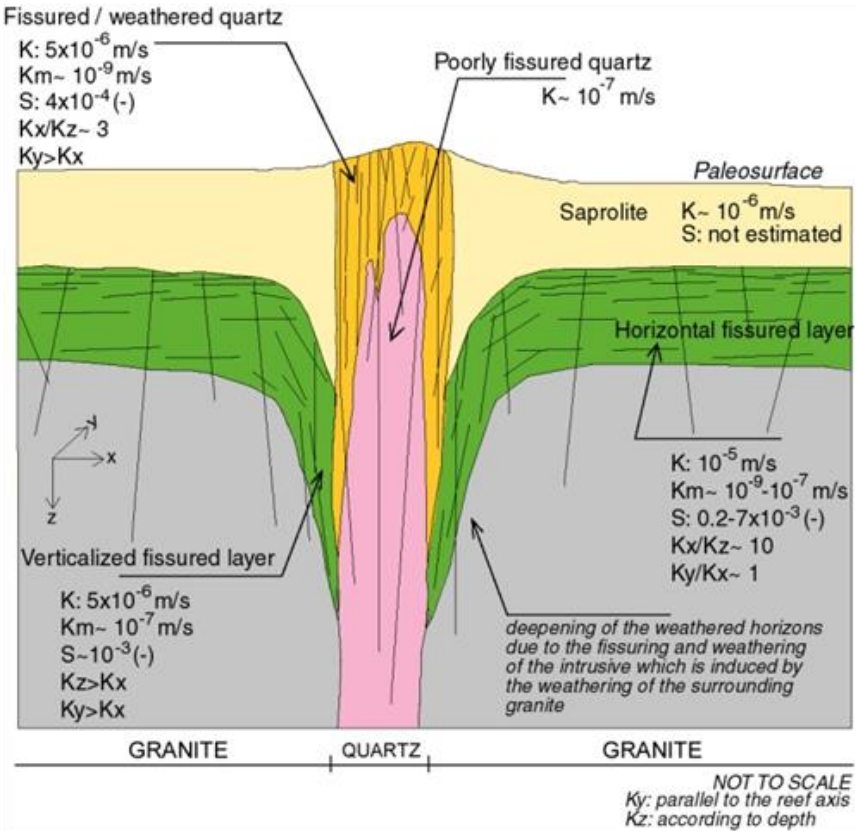


Illustration 24 : Modèle conceptuel d'un aquifère associé à une veine de quartz (Dewandel et al., 2011).

Ce modèle d'altération serait à extrapoler aux champs filoniens existant dans l'Orne occidentale notamment les champs doléritiques ou de quartz (cf. volet géologique rapport BRGM/RP-69292-FR).

Pour pouvoir appréhender le fonctionnement des aquifères de socle, il sera nécessaire de chercher à préciser : les caractéristiques hydrodynamiques (double porosité) du ou des horizons aquifères, les conditions aux limites des réservoirs (existence de limites finies, drainance d'horizons superficiels par exemple) et enfin le comportement de la ressource en périodes hydrologiques contrastées (hautes et basses eaux).

Il faudra s'appuyer pour cela sur une connaissance approfondie de la géologie des réservoirs (lithologie, épaisseur, structuration) et de leur continuité spatiale (ou non).

3.1.5. Processus hydrochimique : la dénitrification

A l'échelle du massif armoricain la présence de nitrates dans les eaux souterraines est un problème récurrent. Les temps de résidence importants dans les eaux souterraines et les interactions géochimiques entre les nutriments et les minéraux constitutifs des roches constitutives des aquifères de socle permettent cependant dans certains cas d'en atténuer les concentrations au travers de la dénitrification autotrophe.

En surface, les eaux contenues dans le compartiment superficiel (sol et altérites) sont le plus souvent concentrées en nitrates, alors qu'en profondeur elles en sont quasiment exemptes.

Généralement il va se produire une réaction de dénitrification, celle-ci intervenant essentiellement dans la zone fracturée, bien qu'elle existe également dans la zone altérée. Souvent, cela correspond à une zone oxydante reposant sur une zone réductrice. Ces deux zones sont séparées par un front d'oxydoréduction, propice aux phénomènes de dénitrification.

L'une des équations chimiques de cette dénitrification est la suivante :

$5FeS_2 + 14NO_3^- + 4H^+ \rightarrow 7N_2 + 10\ SO4^{2-} + 5Fe^{2+} + 2H_2O$

Cette réaction d'oxydo-réduction catalysée par les populations bactériennes permet une réduction significative des concentrations en nitrates en absence (ou faible taux) d'oxygène. Initialement considérée comme dépendante de la présence de pyrite (Pauwels et al., 1998), cette réaction est maintenant considérée comme plus ubiquiste (Boisson, 2011 ; Aquilina et al., 2018 ; Roques et al., 2018) en raison de son occurrence avec la biotite notamment.

Cette réaction peut être localement très rapide (Boisson et al., 2013) mais son efficacité à l'échelle d'un site est contrôlée par la structure du système réactif pouvant être un ensemble de points réactifs ou un système continu (Kolbe et al, 2019), dans ce dernier cas on parle alors de front de dénitrification.

La réorganisation des écoulements liés à la mise en pompage peut dans certains cas amplifier la réactivité en raison des mélanges induits (Tarits et al., 2006 ; Roques et al., 2014) et permettre le maintien d'une réactivité pérenne (Tarits et al., 2006 ; Roques et al., 2018).

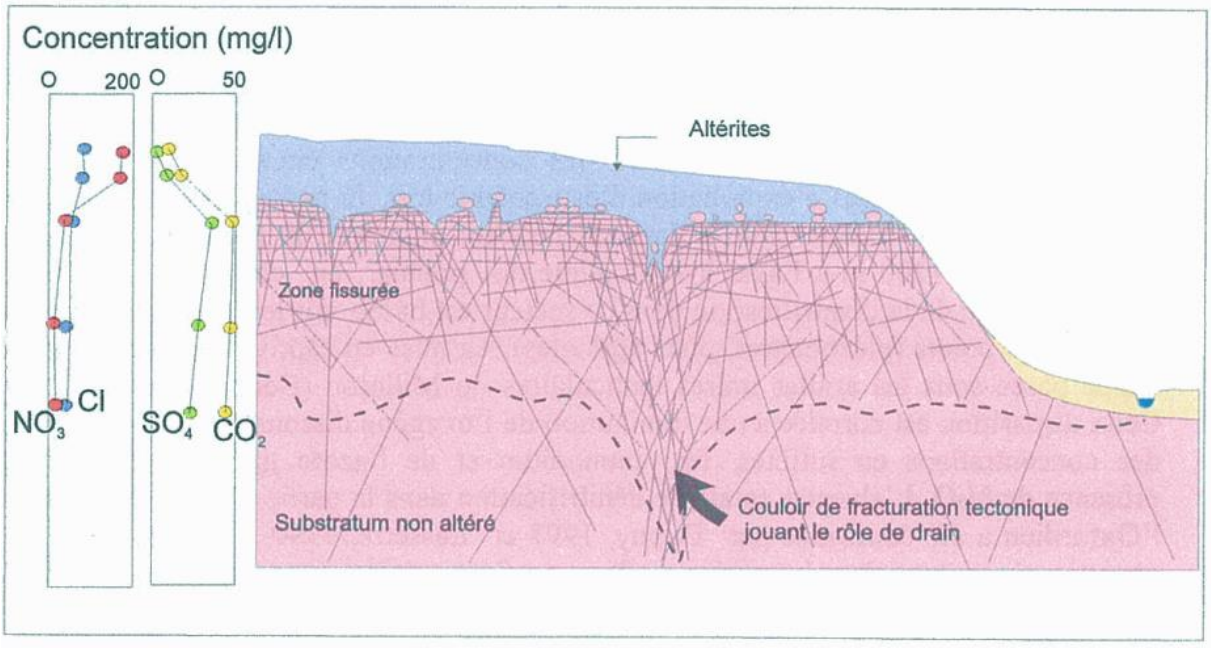


Illustration 25 : Exemple de dénitrification sur un profil d'aquifère en milieu de socle, La concentration en nitrates diminue alors que les concentrations en sulfates et dioxyde de carbone augmentent source : Pauwels H. (2000) BRGM/RP-50304-FR

Ce processus biogéochimique est un avantage significatif des ressources du domaine de socle par rapport aux ressources en eau du domaine sédimentaire où le processus de dénitrification est moins efficient.

3.2. CONNAISSANCES REGIONALES

C'est à partir de ces représentations sur le fonctionnement des aquifères de socle que le BRGM a développé différents projets permettant d'obtenir une meilleure connaissance du fonctionnement de ces aquifères dans le contexte du massif armoricain. Ces connaissances, transposables au contexte nord-armoricain de Normandie occidentale, pourraient servir notamment à la gestion durable de la ressource et à mieux évaluer sa vulnérabilité.

3.2.1. Qualification régionale de l'horizon d'altération (Projet SILURES)

- Contexte et objectifs de l'étude

Les concepts liés à l'horizon d'altération ont été appliqués à l'échelle régionale au travers du projet SILURES[7]. Ce projet, d'une durée de 6 ans avait pour objectif de fournir les éléments nécessaires pour la gestion des ressources en eaux souterraines à l'échelle de la région Bretagne : Rapport BRGM/RP-56457-FR, Mougin et al. (2008).

Son objectif était de réaliser des outils d'aide à la décision pour une politique globale de gestion de l'eau (meilleure prise en compte des eaux souterraines). C'est un outil d'appui aux décideurs pour la localisation des secteurs où le recours aux eaux souterraines est à encourager et où les recherches locales ont les meilleures chances de succès. C'est aussi un guide pour définir des priorités dans les actions de restauration de la qualité des eaux.

- Méthodologie et principaux résultats

Le projet s'est appuyé sur les données existantes, notamment celles disponibles sur la BSS (Banque du sous-sol) qui recensait 25 000 forages en 2008, à l'échelle de la région.

Une base de données régionale a été créée intégrant notamment les informations sur la profondeur des différents horizons (altérites, horizon fissuré). Ce qui a permis de produire des cartes régionales (échelle 1/250 000) de :

- l'épaisseur des altérites,
- l'épaisseur de l'horizon fissuré utile,
- débit de l'horizon fissuré utile,
- participation des eaux souterraines au débit des rivières
- de l'inertie du milieu physique souterrain.

Les cartes des altérites et de l'épaisseur de l'horizon fissuré ont été réalisées en utilisant les observations de profondeur des différents horizons rencontrés sur plus de 12 000 forages. La modélisation de l'épaisseur des altérites en place et l'épaisseur de l'horizon fissuré a été réalisé par krigeage (Illustration 26).

[7] Système d'Information pour la Localisation et l'Utilisation des Ressources en Eau Souterraine (SILURES)

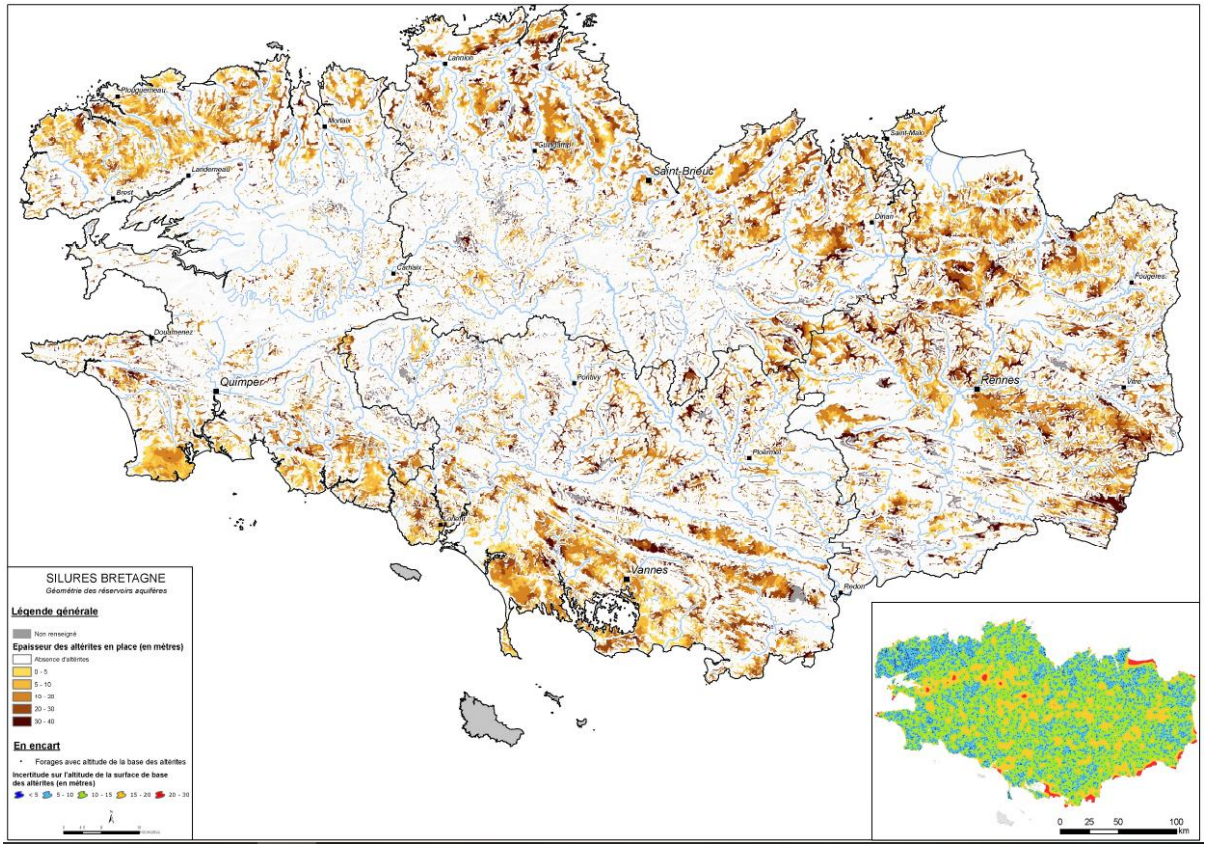


Illustration 26 : Cartographie de l'épaisseur des altérites en place (m) – Projet SILURES (Mougin et al.,2008)

Ces cartes ont ensuite été mises en relation avec les statistiques disponibles sur les débits des forages, les profondeurs forées et la géologie pour développer une cartographie des zones où l'exploitation de l'eau souterraine peut être encouragée (zones de potentiel plus important - Illustration 27).

Cette méthode s'est appuyée notamment sur l'estimation de la présence de milieux fissurés (on parlera ici de fissuration utile par analogie à la porosité efficace) et sur l'identification des formations géologiques fournissant les meilleurs débits.

La carte d'intérêt hydrogéologique a été réalisée en se basant sur : le pourcentage de forages ayant fourni un débit instantané au moins égal à 10 m^3/h et le débit moyen du quartile supérieur (*est le quart de la série de données qui comporte les plus grandes valeurs*) calculé sur 126 formations de socle cristallin. Ainsi, en Bretagne le « débit fissuré utile » varie de 3.8 à 42.6 m^3/h avec une moyenne à 13.5 m^3/h pour l'ensemble de la région, ce qui est faible en comparaison de ce que l'on peut trouver dans les bassins et formations sédimentaires (cf. chapitre 5).

La carte des débits du milieu fissuré utile indique, sur chaque formation géologique de socle, le débit instantané potentiellement mobilisable en foration (m^3/h). Ce débit ne peut être mobilisable que si le forage traverse toute l'épaisseur du millieu fissuré utilie.

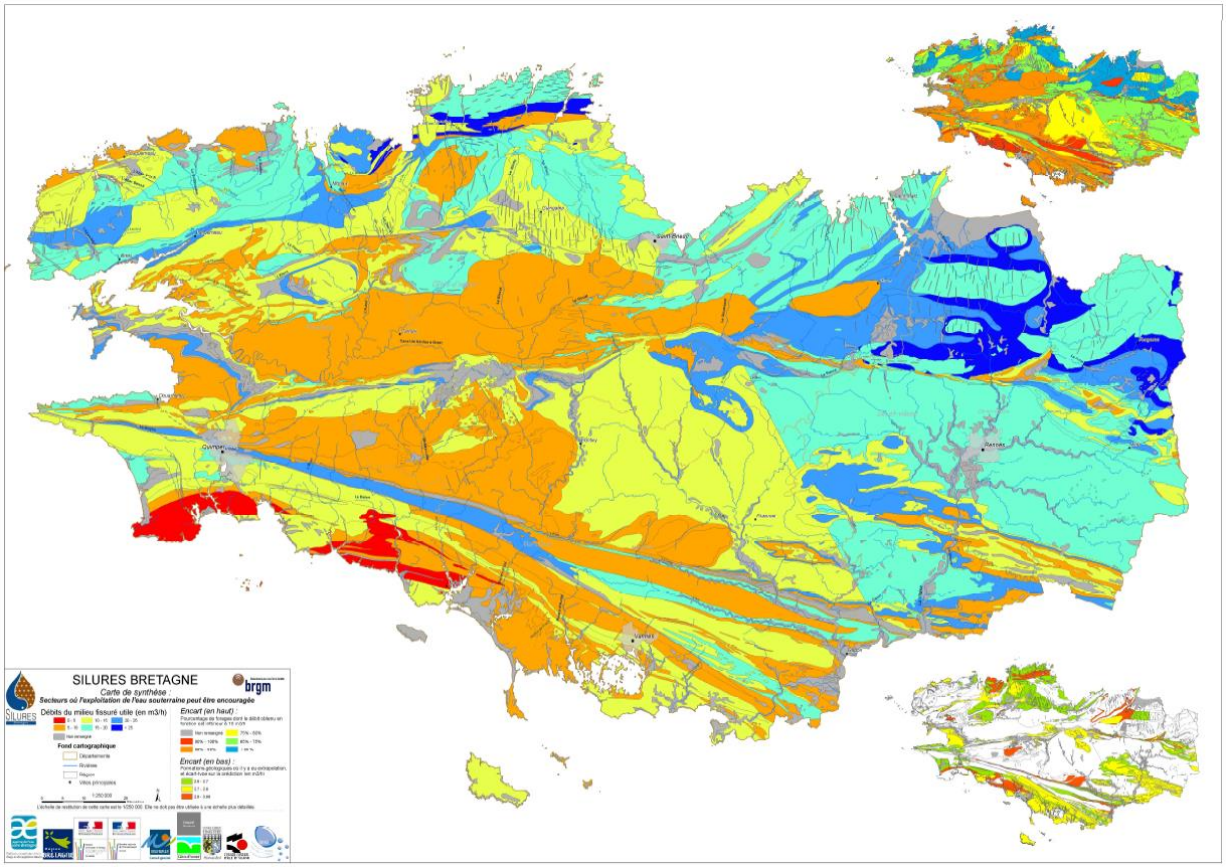


Illustration 27 : Cartographie des secteurs où l'exploitation de l'eau souterraine peut être encouragée En rouge orangé les secteurs défavorables et en bleu les secteurs les plus favorables – Projet SILURES (Mougin et al.,2008)

En plus de l'évaluation du potentiel d'exploitation des aquifères, le projet SILURES s'est aussi intéressé à la dynamique des aquifères au travers de l'inertie du milieu (Illustration 28). Ce volet a été réalisé au travers de modèles globaux à réservoirs, type GARDENIA, permettant de simuler les débits et les niveaux des aquifères. Les modélisations ont été réalisées sur 70 cours d'eau sur plus de 10 ans. Ce travail a permis de quantifier la contribution des eaux souterraines aux cours d'eau. Celle-ci varie de 38 à 83% avec une participation moyenne de 55 % (Mougin et al., 2008). Cette participation peut monter jusqu'à 80 ou 100% en périodes d'étiages. L'utilisation de ces éléments permet aussi d'estimer les secteurs où l'inertie du milieu physique souterrain est la plus faible. Cette information est primordiale notamment lors de la mise en œuvre d'actions de restauration de la qualité de l'eau ou pour la prévision des épisodes de crue ou de sécheresse par exemple.

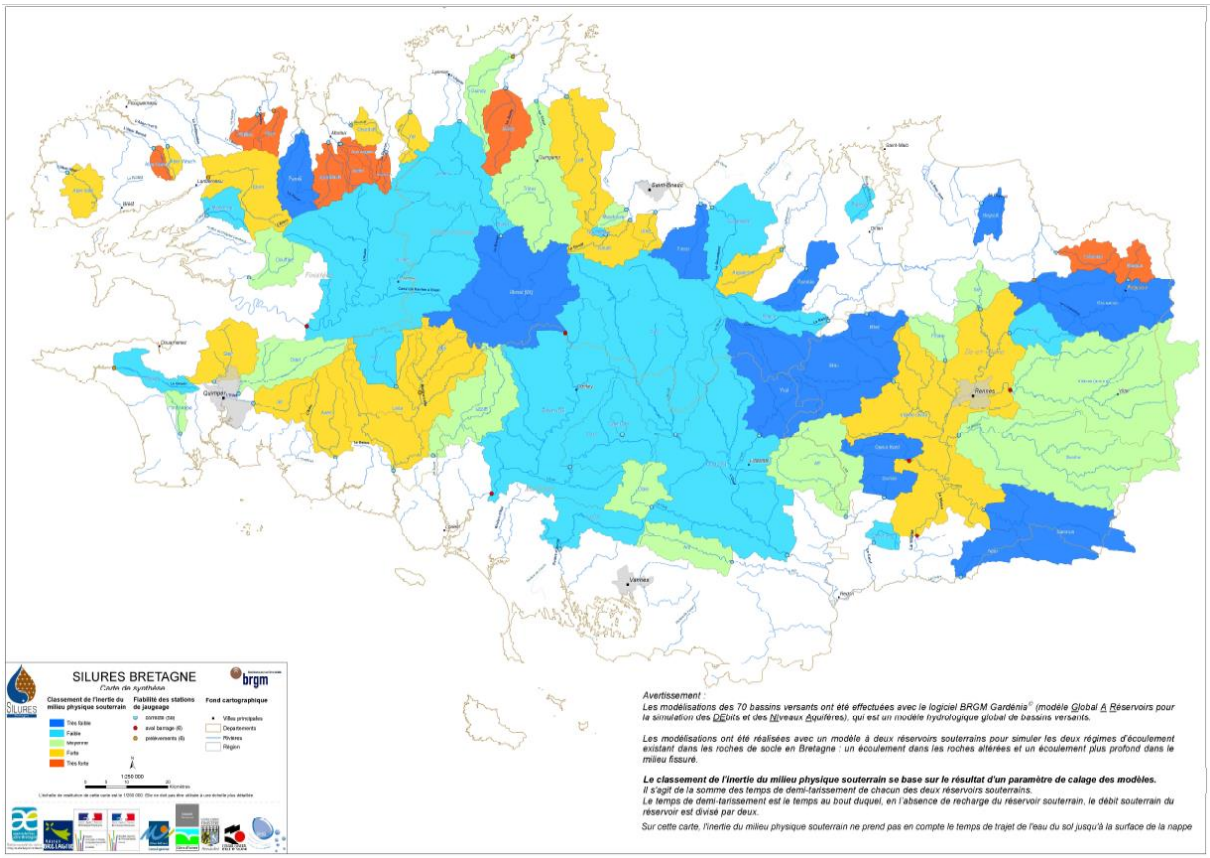


Illustration 28 : Cartographie de l'inertie du milieu physique souterrain, en bleu les secteurs où l'inertie est faible, en orange et rouge les secteurs où l'inertie est forte – Projet SILURES (Mougin et al.,2008)

Une dernière avancée a concerné la mise en évidence d'objets structuraux par le traitement de données de géophysique aéroportée.

Le Massif Armoricain a été survolé afin de mesurer le magnétisme des roches ainsi que leur radiométrie spectrale (combinaison Uranium-Potassium-Thorium). Les grilles ont été traitées et ont ensuite fait l'objet d'une analyse structurale automatique qui a permis de tracer des discontinuités géophysiques.

Des périmètres ont été tracés autour de ces discontinuités. Les résultats des forages d'eau ont ensuite été analysés (débit instantané en fin de foration rapporté à la profondeur de l'ouvrage). Les résultats moyens des forages présents ont été associés à chaque discontinuité.

Ceci a permis de déterminer des directions de discontinuités favorables à l'implantation de forages d'eau, des directions défavorables et des directions intermédiaires (Illustration 29).

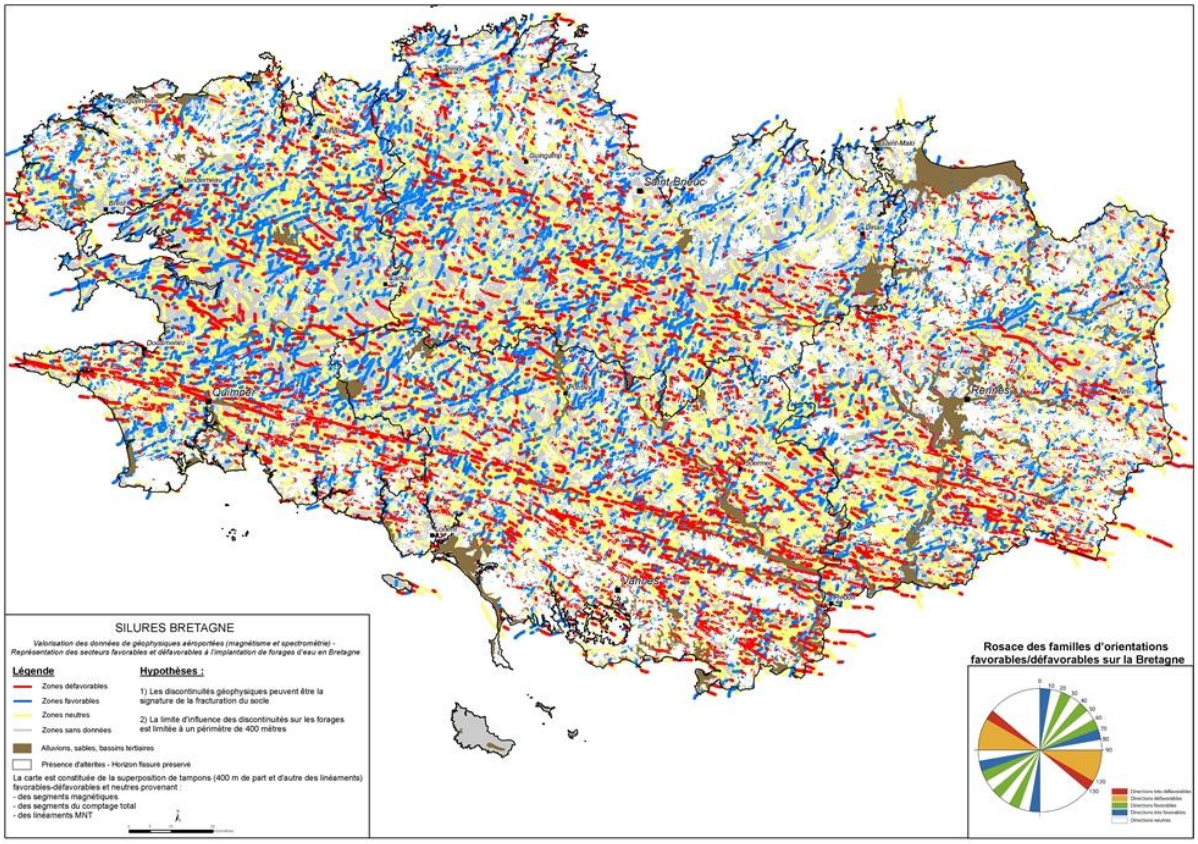


Illustration 29 : Valorisation des données de géophysique aéroportée, représentation de secteurs favorables et défavorables à l'implantation de forages d'eau – Projet SILURES (Mougin et al. 2008)

Bien qu'on retrouve globalement un certain nombre de ces principales directions (cf. volet géologique de l'étude), ces observations ne sont toutefois pas totalement extrapolables au contexte de l'Orne. En effet, l'histoire géologique et structurale du domaine nord-armoricain auxquels appartiennent les départements de Normandie occidentale est différent de celle des domaines de Bretagne.

- Perspectives

Ce programme d'importance a permis de faire progresser les connaissances sur le domaine de socle et le fonctionnement des principaux réservoirs. Les données et connaissances acquises dans ce projet sont aujourd'hui couramment utilisées dans de nombreuses études plus locales. Le projet a servi par exemple à redéployer le réseau piézométrique à l'échelle de la Bretagne sur les secteurs les plus représentatifs et sert également aux collectivités pour la recherche de nouvelles ressources en eau souterraine (aide à la localisation des zones de prospect).

En parallèle et complément, le projet "SILURES bassin versants" (Mougin et al., 2008b ; Mougin et al., 2005) a été mené sur certains bassins versants d'une cinquantaine de km² avec une acquisition de nouvelles données afin de réaliser des cartes détaillées (1/50 000) sur des paramètres spécifiques tels que l'extension des différents réservoirs aquifères, la porosité des réservoirs, les débits ou les volumes d'eau stockés.

Ces cartes ont été réalisées à partir de mesures de débits instantanés obtenus en foration, de niveaux d'eau souterraine (campagne piézométrique) et mesures géophysiques de Résonance Magnétique Protonique (RMP) permettant d'estimer notamment :

- la teneur en eau des sols et formation géologiques,
- les directions et sens d'écoulement des eaux souterraines,
- la profondeur de la première nappe d'eau disponible,
- la lame d'eau de l'aquifère d'altération (altérites et horizon fissuré) et par extrapolation les réserves en eau disponibles dans chaque bassin versant.

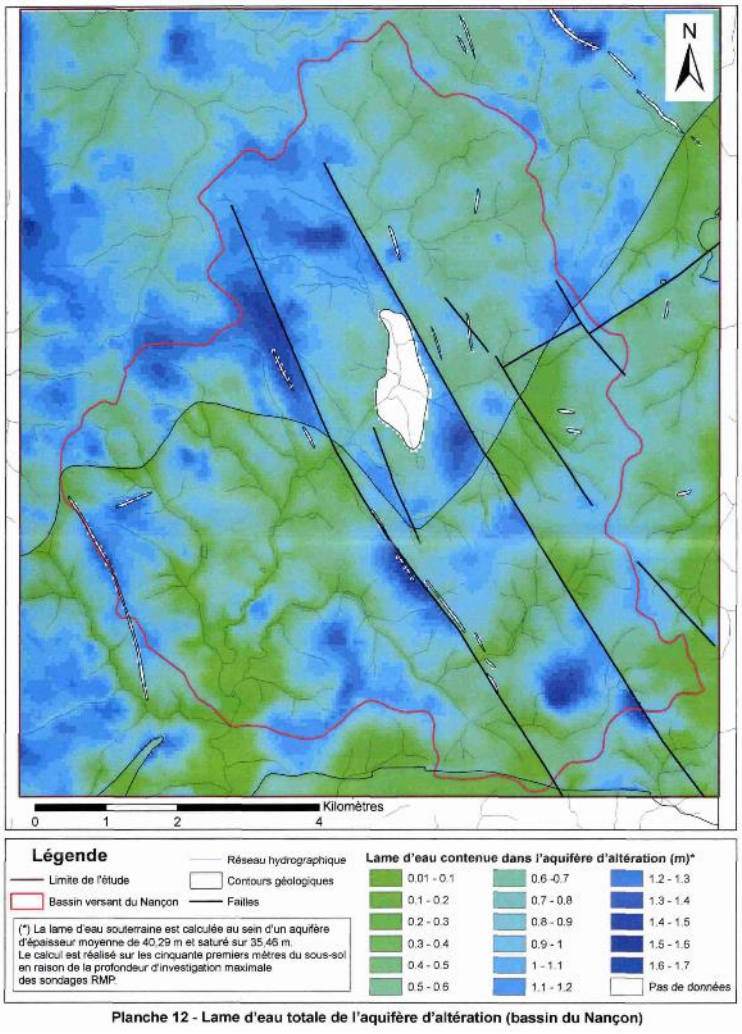


Illustration 30 : Exemple de cartographie d'épaisseur de la lame d'eau réalisée dans le cadre du projet SILURES Bassins versants (Mougin et al., 2008b)

Dans l'ensemble, les informations nécessaires à l'établissement de tels études ou documents ne sont disponibles que très localement à l'échelle du département de l'Orne. Il n'existe pas de données régionales ou d'études à l'échelle de grands bassins versants, y compris sur les secteurs couverts par les Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SAGE).

Les résultats ne peuvent pas être transposés sur le département de l'Orne, mais la méthodologie a notamment été réutilisée à l'échelle du domaine de socle de Normandie pour l'Atlas hydrogéologique du Calvados (Petit V. *et al.*, 2007). Les données de cette étude ont été archivées dans une base de données. Il serait notamment très intéressant d'appliquer cette méthodologie au département de l'Orne et d'étudier dans le détail les forages les plus productifs, et en particulier leur contexte morpho-structural. Ce travail devrait être réalisé dans la seconde phase du projet OAGPRO61 bis en s'appuyant également sur le travail de la DREAL Normandie sur la cartographie de la première nappe d'eau disponible.

3.2.1. Caractérisation de l'hétérogénéité (Projet MORPHEUS)

- Contexte et objectifs de l'étude

Le projet MORPHEUS (MéthOdologie de Régionalisation des Propriétés HydrogEologiques des aqUifères de Socle - Dewandel et al., 2019) en cours de développement au BRGM s'applique à quantifier les variations de perméabilité et d'emmagasinement à l'échelle du bassin versant ce que ne permettait pas le projet SILURES : globalisation des paramètres hydrodynamiques. Ce qui ne permettait donc pas de prendre en compte l'hétérogénéité des propriétés d'écoulement à une échelle plus locale.

L'objectif principal du projet est de tester des méthodes de régionalisation des paramètres hydrodynamiques (perméabilité et emmagasinement) en s'appuyant sur les données disponibles ou sur les données d'acquisition facile (piézométrie, débit de cours d'eau, tests hydrauliques, données de forages, etc.).

Le projet propose aussi une réflexion sur les concepts et méthodes permettant, à partir de données simples, d'aboutir à une cartographie des propriétés hydrogéologiques des aquifères de socle. Ces méthodes s'appuient notamment sur le concept que les variations d'une carte piézométrique, ou du débit d'un cours d'eau à l'étiage, peuvent renseigner sur les propriétés hydrogéologiques des aquifères concernés. Cette réflexion s'appuie sur les méthodes développées au cours des études menées sur le socle Indien (Dewandel et al., 2012, 2017a) et les péridotites de Nouvelle Calédonie et d'Oman (Dewandel et al., 2017b).

- Méthode et principaux résultats

Des mesures piézométriques et de jaugeage des cours d'eau ont été effectuées sur les bassins versants du Nançon (Ile et Vilaine) et de la Maudouve (Côte d'Armor). L'inversion de ces données permet d'obtenir des cartes détaillées de transmissivité à l'échelle du bassin versant. Les cartes obtenues ont été vérifiées sur le terrain par des mesures de résonance magnétique protonique. Des exemples de cartes produites sont fournies (Illustration 31).

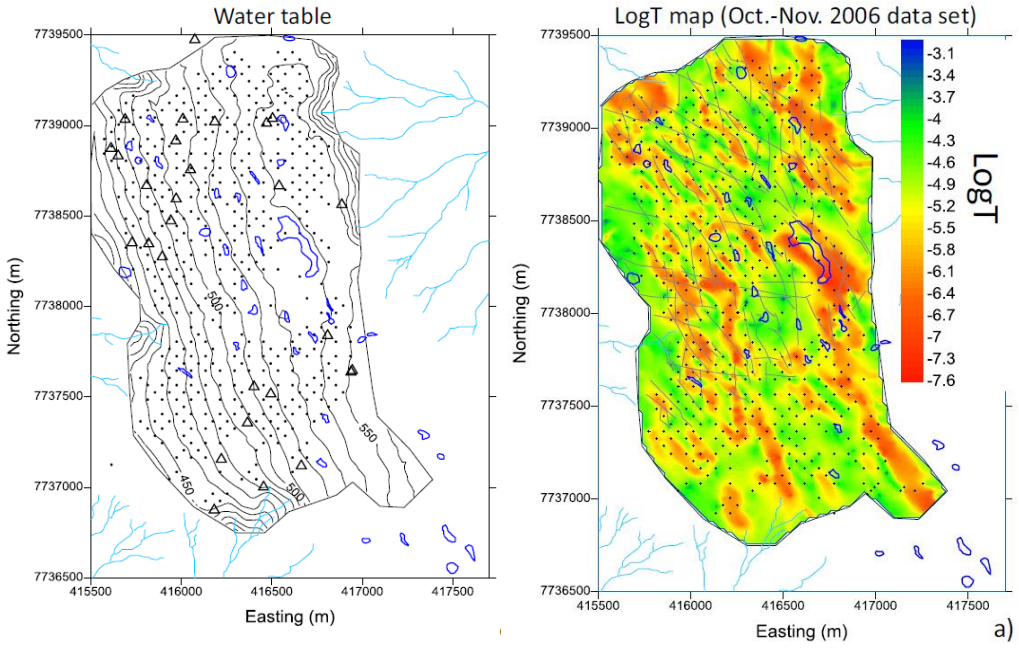


Illustration 31 : Carte piézométrique (à gauche) et carte de transmissivité obtenue par inversion sur le massif de Tiébaghi en Nouvelle Calédonie (Dewandel et al., 2017)

- Perspectives

Les cartes de transmissivité obtenues par inversion des données piézométriques peuvent ensuite être utilisées comme indicateurs pour l'implantation de nouveaux forages ou être utilisées dans des modèles numériques d'écoulements pour produire des outils de gestion : par exemple pour évaluer la disponibilité des eaux souterraines, orienter les recherches en eau, évaluer la dépendance des zones humides par rapport aux eaux souterraines…

En fonction de la fiabilité et de la densité de mesures, de telles cartes pourraient être produites sur les zones où il existe une lacune de données, comme dans les zones de socle, moins bien loties en cartes et esquisses piézométriques.

3.2.2. Impact des failles et typologies d'aquifères (Projet ANAFORE)

- Contexte et objectifs de l'étude

Bien que le concept d'horizon d'altération permette de généraliser les structures des aquifères de socle et d'en déterminer un potentiel hydrogéologique global, l'hétérogénéité au sein des différentes unités lithologiques est importante. Parmi les raisons pouvant expliquer cette hétérogénéité l'histoire structurale des formations peut être un élément majeur.

C'est dans ce cadre qu'une analyse régionale sur les forages les plus productifs de Bretagne a été proposée dans le cadre du projet ANAFORE (ANAlyse multicritère des données des Forages les plus prOductifs de bREtagne - Schroëtter et al., 2017). L'objectif de ce projet est de s'intéresser aux 100 forages les plus productifs de la région Bretagne en essayant de faire un lien précis entre géologie (lithologie et structure) et hydrogéologie pour expliquer les productivités importantes et inhabituelles de ces ouvrages.

- Méthode et principaux résultats

Des fiches caractéristiques des différents ouvrages étudiés ont été réalisées en se basant sur l'analyse de critères géomorphologiques, hydrologiques, géochimiques, géologiques et hydrogéologiques.

Les analyses sont menées en détaillant et interprétant les sites du point de vue de la géologie structurale (direction des failles, densité, historique) pour déterminer et généraliser leur comportement (drains, barrières étanches…) et d'évaluer la capacité de réservoir des altérites. Cette analyse est réalisée par des mesures sur affleurements et analyse de la géomorphologie. Un exemple de cartographie réalisée est présenté (Illustration 32).

Cet exemple montre que le site de Guénodou (Finistère) est structuré autour de directions de fracturation Nord-Sud et N40° avec des réserves potentielles dans et sous les altérites proches du forage.

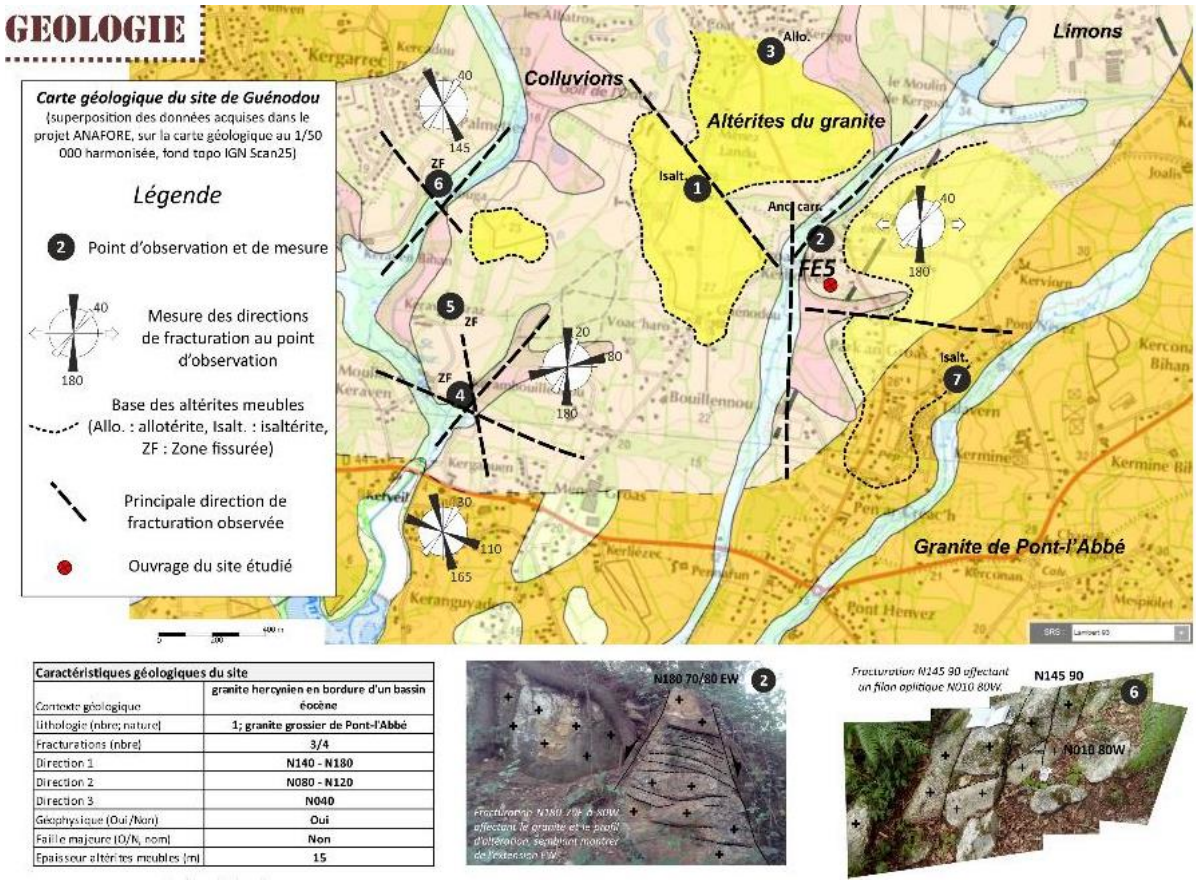


Illustration 32 : Exemple d'analyse géologique réalisée dans le cadre du projet ANAFORE, site de Guénodou (Finistère)- Schroëtter et al., 2017

Cette analyse a permis de dresser une typologie du fonctionnement des différents sites. Les regroupements proposés font le lien entre les structures (failles et fractures) observées sur le terrain, les lithologies (nature des roches impliquées sur les sites) et l'altération des roches mères.

Ces trois critères sont les principaux critères qui vont participer à la création de porosité ou perméabilité dans les roches. Faire des typologies permet de comprendre et comparer mais aussi de faire le lien avec les cartes géologiques (lithologies et failles/fractures) ce qui devrait **aider à cartographier des Zones Potentiellement Productrices en eaux souterraines (ZPP)**

Avoir un nombre important de sites à étudier a permis d'assoir les typologies proposées mêmes si celles-ci n'expliquent pas encore les capacités de l'ensemble des sites. Actuellement, 7 typologies couvrent 75 sites sur les 100 étudiés (75%) :

- Typologie 1 : correspond à une auréole de métamorphisme de contact en bordure d'une intrusion magmatique majeure comme un granite, une granodiorite, recoupée par des failles principales orientées NS et N150 moyenne, définissant un effondrement. L'aquifère est libre.
- Typologie 2 : correspond à une intrusion magmatique majeure, recoupée par des failles principales orientées NS et N150 en moyenne, définissant un effondrement. L'aquifère est libre.
- Typologie 3 : correspond à un synclinal de roches méta-sédimentaires de type grés & quartzites (plutôt d'âge paléozoïque), recoupé par des failles principales orientées NS

et N150 en moyenne, définissant un effondrement. L'aquifère comme pour les typologies 1 et 2 est libre.

- Typologie 4 : la grande particularité est le caractère aquifère captif à semi-captif, contenu dans un horizon gréseux à l'intérieur d'une formation géologique supposée étanche (mesure de teneurs en eau faite à l'aide de l'outil de Résonnance Magnétique Protonique par le BRGM) ; et recoupée par des failles principales orientées NS et N150 qui délimitent un effondrement.
- Typologie 5 : correspond à diverses lithologies (schistes briovériens par exemple), contenant des intrusions magmatiques mineures (type filons de dolérites), dont l'ensemble est recoupé par des failles avec des orientations diverses : NS et N150 dans certains secteurs à N045 dans d'autres. Les intrusions magmatiques mineures peuvent être elles-aussi avec des orientations diverses, à partir du moment où elles constituent des hétérogénéités dans le sous-sol influençant les circulations souterraines. L'aquifère est libre.
- Typologie 6 : correspond surtout à des roches méta-sédimentaires (schistes) mais avec présence de niveaux de grès importants qui génèrent des lieux propices au regroupement des eaux souterraines si l'ensemble est toutefois fracturé. Les failles observées ont des orientations plutôt NS et N150 à N045 dans d'autres. L'aquifère est libre.
- Typologie 7 : est bien marquée cartographiquement car elle est à l'intersection entre les fracturations NS à N150 et N045, et le Cisaillement Sud Armoricain (CSA). L'aquifère est libre.

Le Tableau 2, page suivante, regroupe l'ensemble des schémas illustrant les différentes typologies rencontrées.

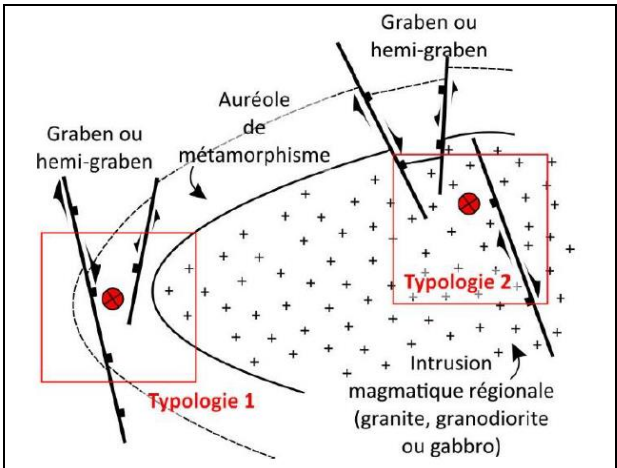
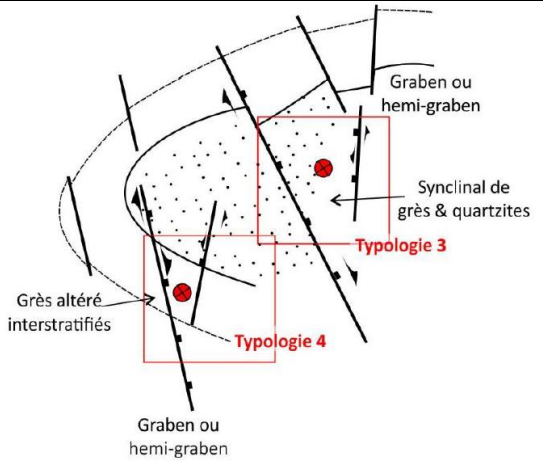
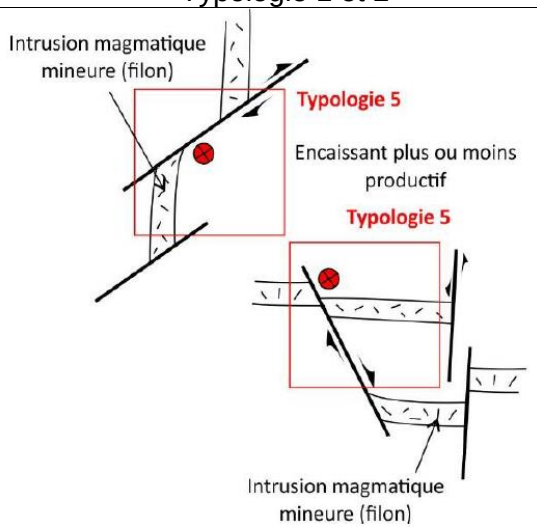
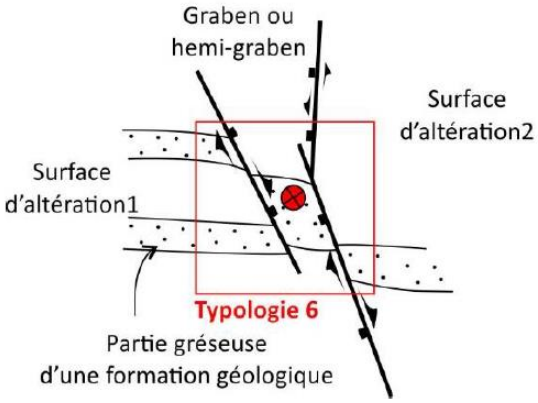
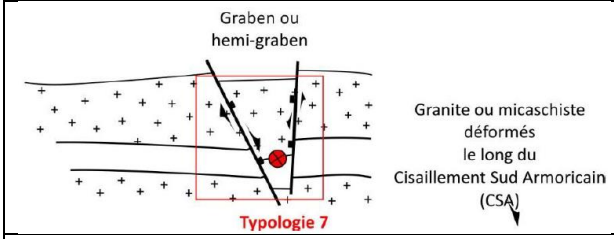
	
Typologie 1 et 2	Typologie 3 et 4
	
Typologie 5	Typologie 6
	Autres typologies : Zone de chevauchement, front de charriage, fractures types flats and ramps, failles listriques, etc…
Typologie 7	

Tableau 2 : Représentation cartographique schématique des différents types de sites rencontrés parmi les 100 forages les plus productifs de Bretagne (il ne s'agit pas de coupes mais du vues en plan), Schroëtter 2019, inédit

Les pompages d'essais réalisés sur les sites ont également été analysés par des méthodes innovantes permettant non seulement d'obtenir les capacités hydrauliques du site (perméabilité) mais aussi la structure des écoulements (failles, milieu poreux, limites étanches etc..) (cf. paragraphe 3.3.2. suivant).

Un exemple montrant le rabattement et la dérivée du rabattement est fourni Illustration 33.

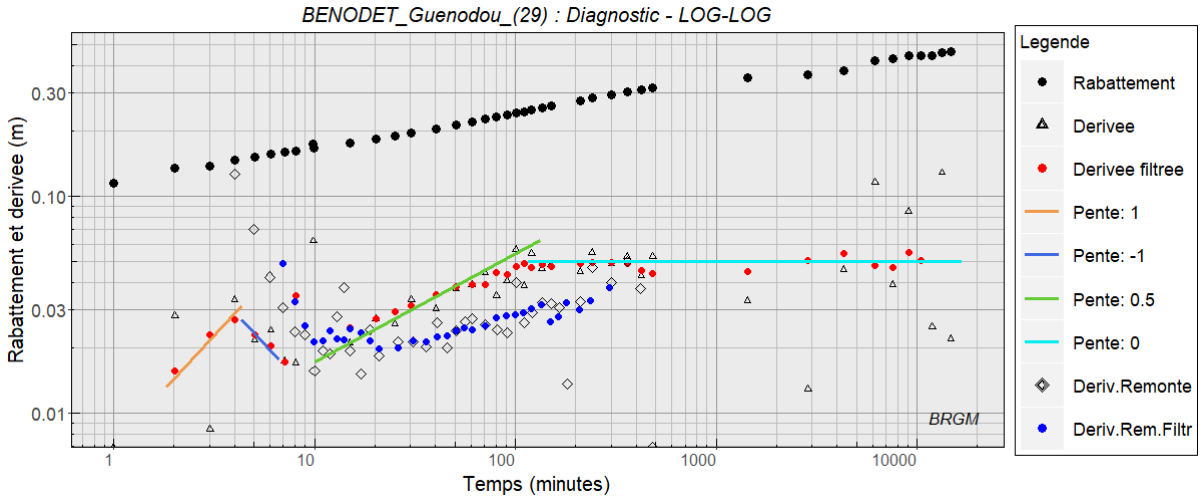


Illustration 33 : Diagnostic d'essai de pompage sur le site de Guénodou (Finistère) - Schroëtter et al., (2017)

Sur l'exemple choisi, aux temps courts jusqu'à 4 minutes (droites orange et bleu), la rapide montée et descente de la dérivée indique des effets au proche puits pouvant être liés à la présence d'une zone très fracturée de très faible extension. Par la suite entre 4 minutes et 2,2 heures, la dérivée suit une droite de pente 0,5 (loi de puissance – droite verte) indiquant un écoulement linéaire pouvant être une fracture sub-verticale. Après 2,2 h de pompage, l'écoulement devient radial (dimension d'écoulement de 2, pente nulle) indiquant une structure aquifère relativement homogène dont les limites ne sont pas atteintes durant les 278 heures de pompage. Ce forage se situerait donc dans une zone fortement fracturée à proximité immédiate d'une zone de faille majeure drainant un réservoir dont l'extension maximale semble importante.

A partir de l'ensemble de ces interprétations, il a été possible de conclure que le forage se situait dans une zone fortement fracturée d'orientation méridienne ou N40° à proximité immédiate d'une zone de faille majeure d'une extension de l'ordre de 200 m drainant un réservoir dont l'extension maximale est probablement située à des distances supérieures à 1600 m.

La connaissance de la structure du réservoir capté et des écoulements est essentielle pour une bonne gestion de la ressource à l'échelle du site ainsi que pour sa sauvegarde (définition des périmètres de protection notamment).

- Perspectives

Cette étude, en cours, devrait permettre de caractériser différents types de contextes et leur schéma de fonctionnement (exemple : Illustration 34). Ce qui devrait permettre in fine de préciser le potentiel productif de ces zones types et de permettre une bonne gestion des ressources existantes. Ces études visent notamment à améliorer l'exploitation (ressource en eau disponible et productivité des ouvrages et de l'aquifère) ainsi que leur protection (évaluation des portions de nappes alimentant le captage).

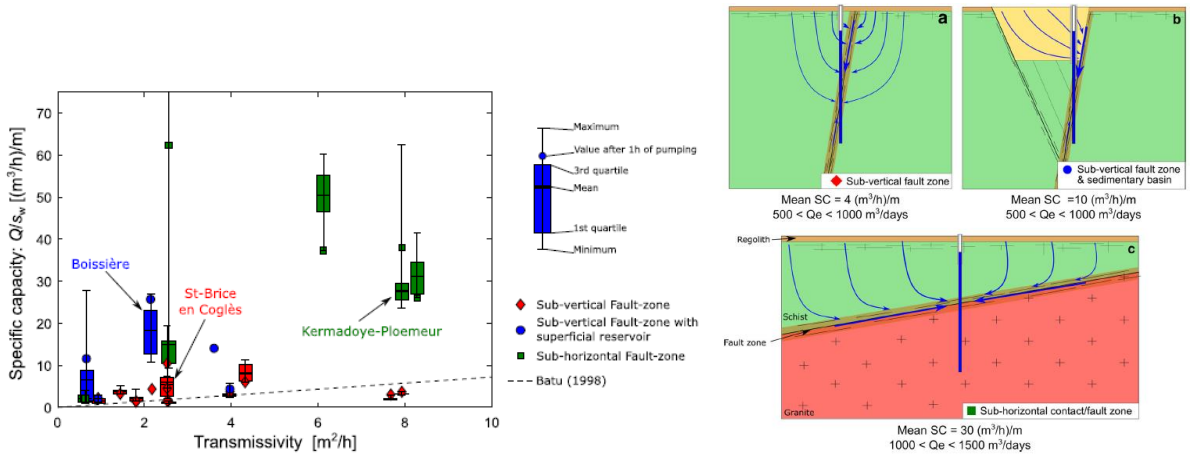


Illustration 34 : Informations obtenues par test de pompage, essai de puits (paliers) et de longue durée (Roques et al. 2016)

Par la suite, la transposition des interprétations pourra être réalisée avec le contexte géologique normand. Ce travail permettra notamment d'identifier des contextes géologiques et hydrogéologiques similaires où des ressources en eau, très productives, pourraient être recherchées.

Des études similaires, pour les ouvrages les plus productifs, pourraient également être mises en œuvre à l'échelle du département de l'Orne et plus largement à l'échelle du socle armoricain de Normandie, ce qui permettrait de voir s'il existe pour un certain nombre d'entre eux, des analogies avec les sites du socle Breton.

3.2.3. Sites et comportements remarquables (Projets RAPSODI et CASPAR)

- Contexte et objectifs de l'étude

Au cours des 15 à 20 dernières années, quelques rares forages « semi-profonds », jusqu'à 300 m, ont été réalisés en Bretagne. Certains de ces forages ont rencontré des structures perméables significatives au-delà des horizons de sub-surface avec des débits supérieurs à 80 m³/h.

Ainsi, le forage semi-profond de 216 m réalisé en 2008 à Saint-Brice-en-Coglès (35) dans le cadre du projet RAPSODI (Recherche d'Aquifères Profonds dans le SOcle du Département d'Ille-et-Vilaine, RP-56749-FR[8]), implanté dans des cornéennes briovériennes, a donné des débits exceptionnels (débit instantané de 160 m³/h). Le projet CASPAR, en cours (Caractérisation des Aquifères Semi-Profonds ARmoricains), a par la suite permis de préciser

[8] http://sigesbre.brgm.fr/spip.php?page=sigles&id_dictionnaire=2 - sigle74

la nature de ces zones aquifères ainsi que leurs relations avec les eaux souterraines moins profondes (in Roques et al., 2014b ; Roques et al., 2014b, Dewandel et al., 2014).

Le projet, mené en collaboration entre le BRGM et l'OSUR (Observatoire des Sciences de l'Univers de Rennes), visait à améliorer les connaissances scientifiques sur l'origine des eaux « profondes » notamment sur les liens entre les structures géologiques, hydrogéologiques et la compartimentation verticale de l'aquifère ; les phénomènes de mélange entre les compartiments ; les temps de résidence de ces eaux ; l'origine de leur minéralisation… afin d'améliorer la gestion de ce type de ressources.

- Méthode et principaux résultats

Dans le cadre de ce projet, plusieurs piézomètres ont été réalisés autour du forage principal permettant de réaliser de nombreux relevés hydrogéologiques (essai de pompage de très longue durée, essais par packers), diagraphiques (fluides, débitmétrie, etc.), géochimiques et isotopiques, datation des eaux, suivis géophysiques...

Ces analyses ont permis de définir un modèle local d'écoulements mais aussi de significativement améliorer les connaissances sur les ressources semi-profondes et leurs interactions avec la surface (cf. Illustration 35). Il a notamment été mis en évidence pour le cas étudié :

- l'existence, pour partie, d'une alimentation de la zone altérée et superficielle de l'aquifère par la partie profonde et fissurée de celui-ci (hors pompage),
- lors du pompage, les flux proviendraient à 30 % de circulations profondes et à 70 % de circulations dans l'horizon altéré et superficiel (dont 20% proviendraient des eaux de surface : dénoiement local de l'altérite et constat d'une évolution du pôle chimique vers les eaux de surface),
- lors du pompage on constate également une dénitrification complète des eaux avec une amplification du phénomène lié au pompage prélevé (Roques et al., 2014).

Ainsi il a pu être démontré une forte connexion entre les eaux de surface et les eaux profondes. Dans ce contexte particulier, la capacité de l'aquifère est liée à celle des ressources de surface ce qui pose la question de la soutenabilité des prélèvements (impact) et de sa vulnérabilité.

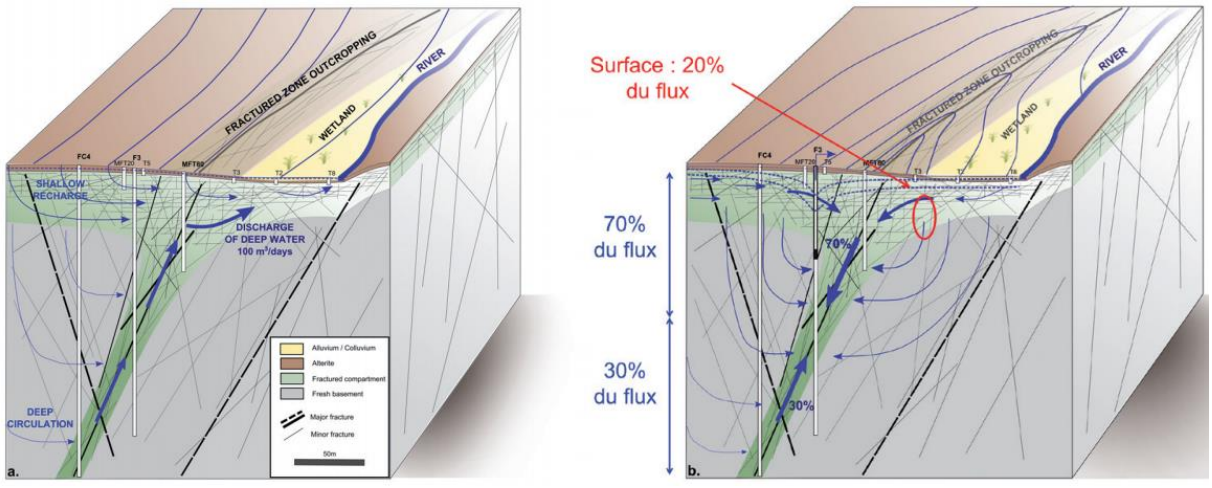


Illustration 35 : Modèle conceptuel du fonctionnement de l'Aquifère de St Brice en Cogles (Ille et Vilaine), a) au repos et b) en condition de pompage (Roques et al. 2014) – Projet CASPAR

- Perspectives

Bien que des fonctionnements détaillés de sites tels que celui-ci ne soient pas courants, les interprétations d'essais de pompage dans le cadre du projet ANAFORE indiquent couramment des cas de pompage dans une zone de fracture principale drainant des horizons plus superficiels. Il semble donc que ce type de structure soit relativement courant à l'échelle du massif armoricain.

Ce qui est intéressant c'est que bien que l'évolution du pôle chimique global tende vers celui des eaux de surface, on constate que le processus de dénitrification est toujours complet. Ce type de site présente donc un avantage certain d'un point de vue qualitatif. Il faudra alors veiller à ce que l'exploitation des ouvrages et le phénomène de drainance des horizons superficiels soit soutenable et donc ne provoque pas de déséquilibre quantitatif pour les milieux (cours d'eau, zone humide notamment).

L'apport méthodologique est bien entendu transposable au contexte normand. On pense notamment aux marais du Houlme et aux sources thermales de Bagnoles de l'Orne, seules sources de ce type dans l'ouest de la France, mais également aux failles longeant le granite de Mayenne dans le bassin de l'Egrenne et aussi sous le granite d'Athis... Ces sites pourraient être étudiés de façon plus approfondie.

3.2.4. Atlas Hydrogéologique Numérique du Calvados (volet relatif au domaine de socle)

Le volet relatif au domaine de socle de l'Atlas hydrogéologique numérique du Calvados (Petit V. *et al.*, 2007. Rapport BRGM/RP-55671-FR) a permis la réalisation d'une carte de l'épaisseur actuelle des altérites de socle et de dresser le bilan des données disponibles sur les débits de forage pour le département du Calvados.

- Analyse débit vs profondeur

L'analyse des données a permis d'en tirer les enseignements suivants :

- les débits totaux par forage ont une valeur médiane de 9 m^3/h ;
- les débits linéaires sont a priori sensiblement supérieurs à ceux qui s'observent dans d'autres régions du socle (cf. paragraphe 3.1.2). Ceci peut s'expliquer par la présence dans le Calvados de la formation des schistes et calcaires cambriens, karstifiée et localement très productive. Note : cette formation est présente uniquement dans la zone bocaine sur une mince frange du nord du département.

  Le débit linéaire décroit avec la profondeur du forage sous les altérites, et plus particulièrement à partir de 25-30 m sous les altérites ;
- il ne semble pas y avoir de relation entre le débit total de l'ouvrage et sa profondeur ;
- en moyenne, les valeurs de débits instantanés les plus faibles ont été observées au niveau des granodiorites et des cornéennes ;
- enfin, les données semblent indiquer que l'épaisseur des altérites n'influencerait pas le débit total des forages.

- Carte d'épaisseur des altérites

Celle-ci a été élaborée à partir des logs géologiques disponibles en BSS et de la carte géologique harmonisée du département. Le résultat est une carte départementale au 1/125 000, présentée ci-dessous (Illustration 36).

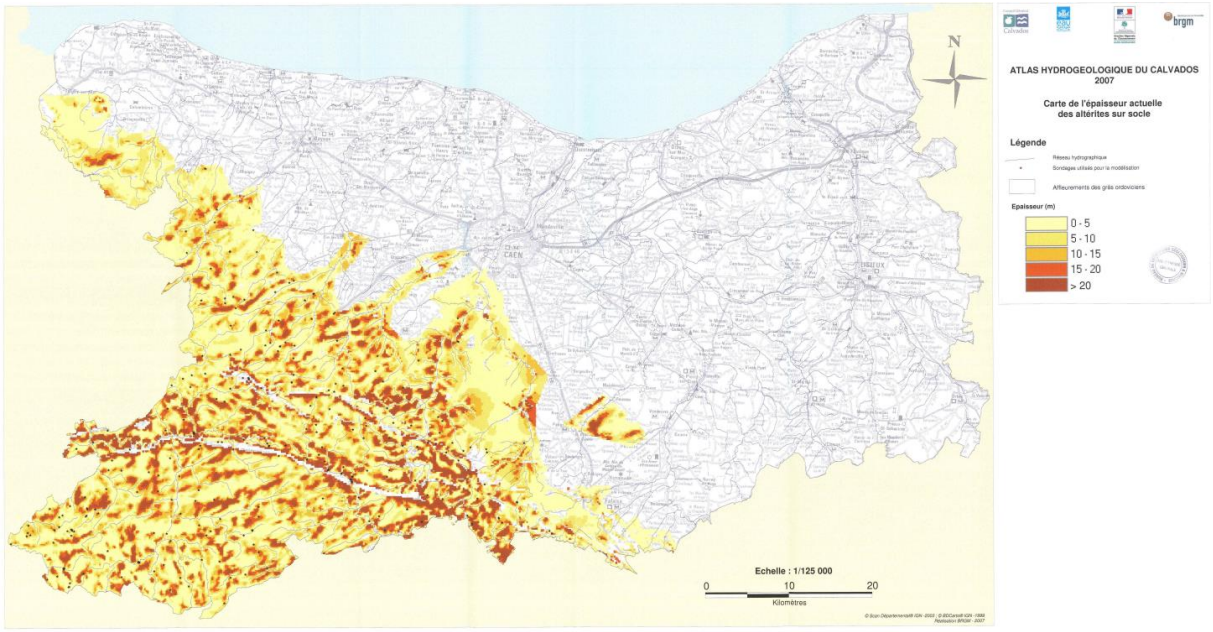


Illustration 36 : Carte de l'épaisseur des altérites de socle du département du Calvados (source : Rapport BRGM/RP-55671-FR)

Pour les formations briovériennes et paléozoïques, les épaisseurs maximales ont été calculées sur les zones élevées, et plus particulièrement sur les versants des lignes de crêtes du synclinorium de la zone bocaine. Cette tendance est confirmée par plusieurs notices des cartes géologiques de la zone d'étude.

L'épaisseur des altérites briovériennes est reconnue importante également à proximité des contacts avec la couverture sédimentaire mésozoïque notamment à l'ouest de l'Orne, cette particularité semble avoir été correctement modélisée.

En ce qui concerne le massif granitique, les épaisseurs moyennes sont de moindre importance comme annoncé par l'analyse statistique réalisée sur les données de forages. Les épaisseurs maximales ont été calculées sur les hauteurs mais, dans la très grande majorité des cas, elles n'ont pas été contrôlées par des données de forages. Ces valeurs importantes en sommet de plateau sont probablement surestimées.

Par ailleurs, d'après la notice de la carte géologique de Vire, les arènes granitiques se cantonneraient essentiellement dans deux zones : les bordures du graben central (fossé de Saint-Germain-de-Tallevende) et l'extrémité orientale du massif. Ces tendances ne sont pas retrouvées par le modèle.

- Perspectives

L'objectif de ce travail était de mettre en évidence les zones à plus forte épaisseur d'altérites et de dégager des tendances liées au contexte géologique et structural. Toutefois, faute d'une information suffisamment homogène et précise, ces résultats sont à prendre avec précautions,

en particulier donc pour les zones granitiques où très peu de forages décrivent les arènes granitiques dans le Calvados (28 log disponibles seulement).

Pour travailler à l'échelle départementale, il est donc nécessaire de disposer d'une quantité d'information suffisante et homogène pour éviter les incertitudes liées à la réalisation de modèles. Cet élément peut notamment être un facteur limitant dans le département de l'Orne qui souffre d'un nombre de points disponibles en banque de données du sous-sol (BSS) bien moindre que les autres départements normands (Illustration 37).

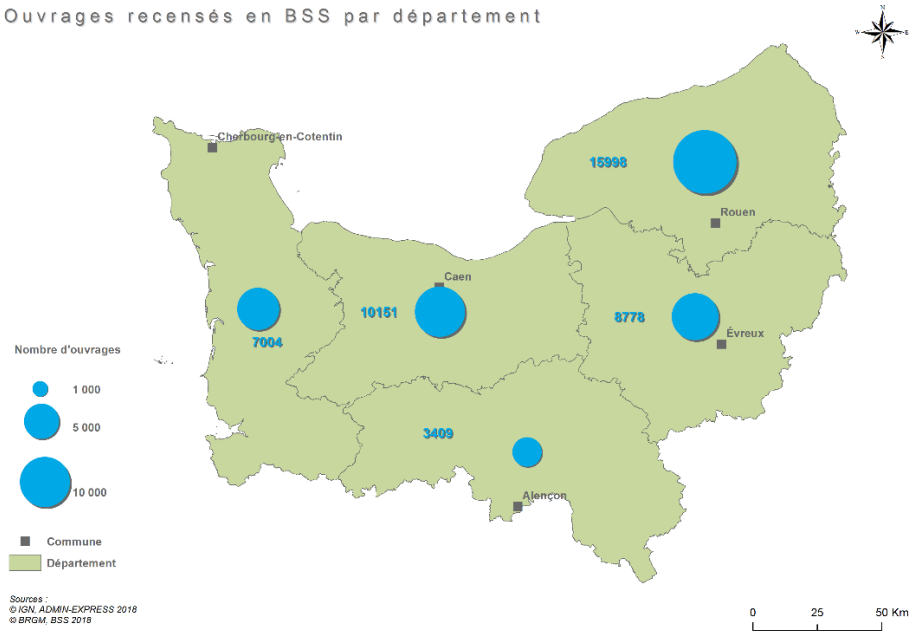


Illustration 37 : Bilan des données disponibles en Banque de Données du Sos-Sol (BRGM, 2018)

3.3. IMPLICATION DES SPECIFICITES DES AQUIFERES DE SOCLE DANS LA GESTION ET LA RECHERCHE DE RESSOURCES

Les spécificités des aquifères de socle impliquent donc des démarches différentes des aquifères sédimentaires pour leur exploitation que ce soit pour l'implantation de forages, l'interprétation d'essai de pompage ou la gestion de la ressource.

3.3.1. Outil géophysique dans la recherche de nouvelles ressources

Pour la recherche en eau il est recommandé de prendre en compte à la fois la nature des roches, leur fracturation et leur géométrie pour pouvoir déterminer le potentiel du réservoir et d'écoulement du milieu.

L'hétérogénéité pouvant être très locale (variations importantes sur quelques mètres) les démarches précédemment présentées peuvent être complétées par des mesures géophysiques locales tels que les panneaux électriques ou des traînés voir l'analyse d'anomalies radon pour déterminer la profondeur, la structure de l'horizon d'altération ainsi que la présence de failles. Un exemple d'interprétation est fournie ci-dessous sur l'Illustration 38.

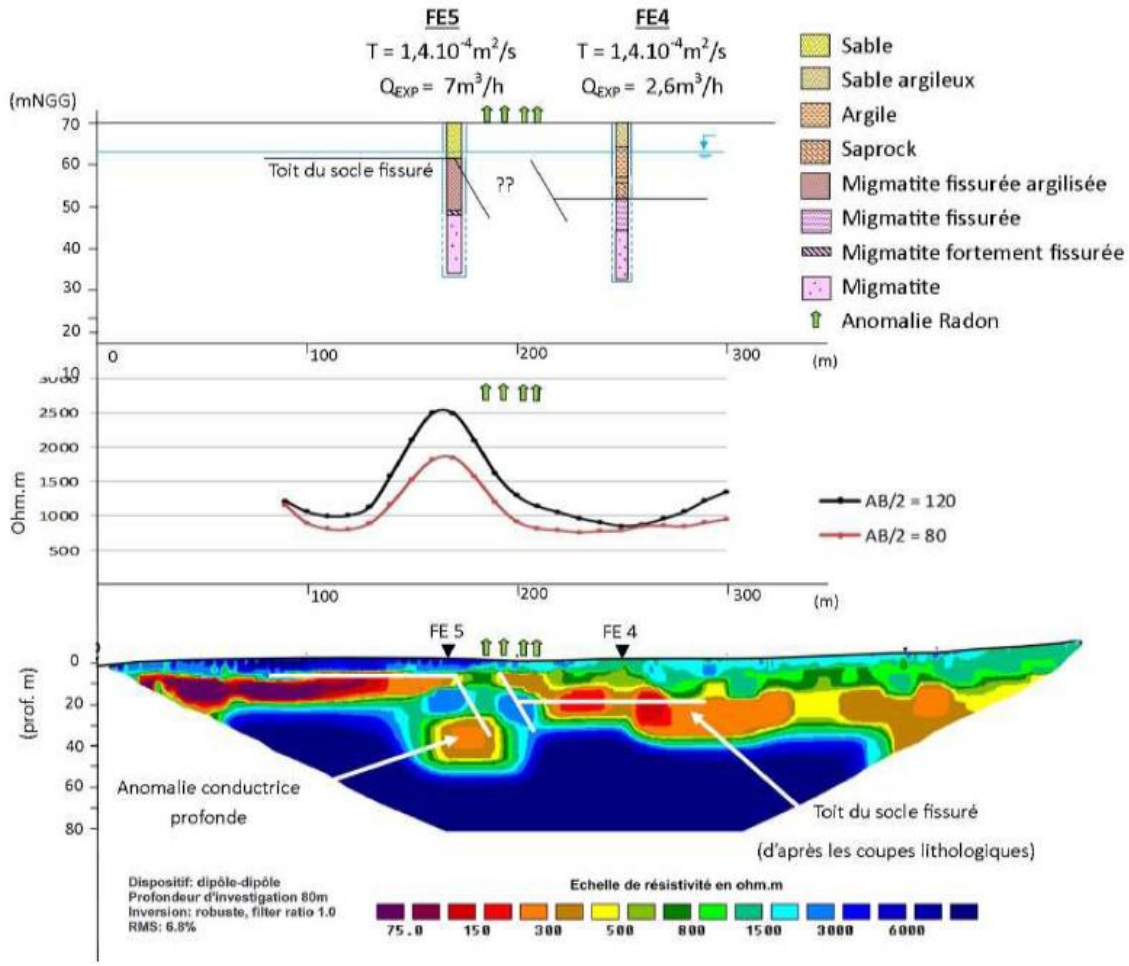


Illustration 38 : Confrontation des traînées, d'un panneau éléctrique et anomalies radon aux débits d'exploitations de forages (Baïsset et al., 2015)

3.3.2. Pompages d'essai

La majorité des interprétations de pompages réalisées dans les études hydrogéologiques se basent sur les méthodes de Theis (Theis, 1935), et sa simplification, la méthode de Cooper-Jacob (Cooper et Jacob, 1946). Cependant ces méthodes ont été développées sous les hypothèses de milieux homogènes, isotropes sur des nappes captives d'épaisseur constante et captées sur toute leur hauteur. De plus, bien que des limites puissent être intégrées à ces modèles, ils ne permettent pas de définir la structure et les régimes d'écoulement pouvant être variables dans ce type d'aquifères. Or dans le cas d'aquifères compartimentés incluant des failles importantes ou de la drainance, la non prise en compte de ces paramètres peut avoir une forte incidence sur la productivité et pérennité du prélèvement.

Pour cette raison il est recommandé d'identifier les types d'écoulements rencontrés et définir un modèle conceptuel d'aquifère avant de procéder à des estimations d'évolution par modélisation.

Pour cela, les méthodes d'interprétation par dérivées de rabattement, aussi appelées diagnostic de puits présentent un grand intérêt. Les diagnostics sont réalisés après déconvolution du signal, en se basant sur les rabattements (variations de niveau d'eau pendant le pompage) ainsi que leurs dérivées logarithmiques (Illustration 39). Les évolutions

récentes des interprétations de pompage sont présentées dans Gringarten, 2008 et Gutierrez et Dewandel, 2013. Les détails sur les méthodes d'interprétation par diagnostic de pompages sont discutés dans Bourdet et al., 1983 et Renard et al., 2009.

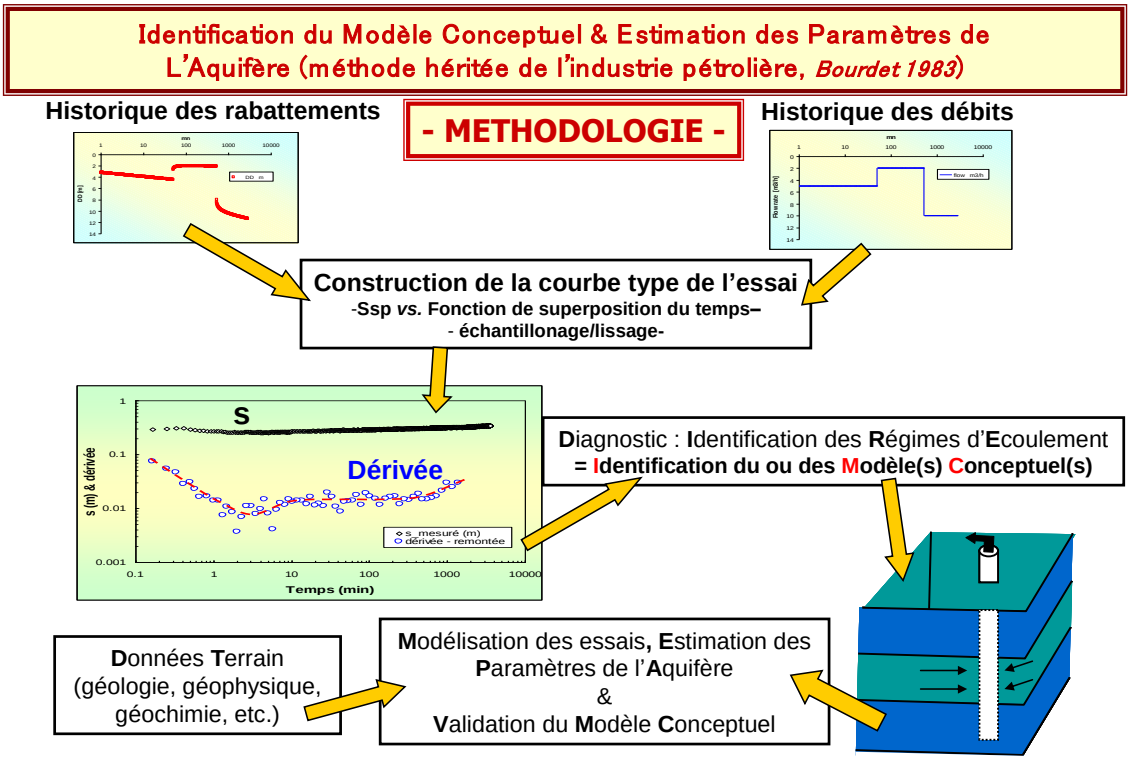


Illustration 39 : Méthodologie recommandée pour l'interprétation de pompages d'essai. Utilisation des dérivées des rabattements pour diagnostiquer les essais (Gutierrez et Dewandel, 2013)

Le diagnostic repose sur l'interprétation des pentes de la courbe de dérivée logarithmique des rabattements s en fonction du temps t ($\partial s/\partial \ln t$; à la descente ou à la remontée des niveaux) qui a l'avantage de représenter tous les régimes d'écoulement sur un seul et même graphique bi-logarithmique (Bourdet et al., 1983). L'avantage de cette méthode est que pour chaque type et/ou géométrie d'aquifère mais aussi pour chaque type de configuration forage-aquifère (captage partiel de l'aquifère par exemple), il correspond un certain régime ou une succession de certains régimes d'écoulement qu'il est en général possible d'identifier sur la courbe de dérivée (Renard et al., 2009, Ferroud et al., 2019).

3.3.3. Gestion et protection de la ressource

Les aquifères de socle présentent des avantages et des inconvénients qui vont nécessiter une gestion spécifique : ce sont des aquifères généralement faiblement capacitifs qui sont de fait très sensibles aux variations saisonnières et pluriannuelles. L'hétérogénéité spatiale des aquifères (plus faible continuité que les aquifères sédimentaires, en règle générale) et les variations des conditions de recharge et de vidange peuvent présenter des intérêts dans la gestion des ressources en eau : comme par exemple une plus grande résilience aux pollutions diffuses et une facilité plus grande à protéger ces ressources pour l'aspect qualitatif, une plus grande facilité à reconstituer les ressources dans le temps pour le volet quantitatif.

- **Protection de la ressource**

La géométrie complexe des réservoirs implique qu'il existe le plus souvent des incertitudes sur les données permettant de définir la protection de la ressource qu'il conviendra si possible de lever. Par exemple, la délimitation des périmètres de protection peut être plus complexe que dans les milieux continus : les écoulements et rabattements peuvent notamment suivre des orientations préférentielles. Il convient donc de prendre en compte les spécificités de ces milieux lors des études hydrogéologiques préalables à la définition des périmètres de protection de captages (PPC) ou des portions de nappes alimentant les captages (PNAC) évaluées dans le cadre des démarches liées aux aires d'alimentation des captages (AAC).

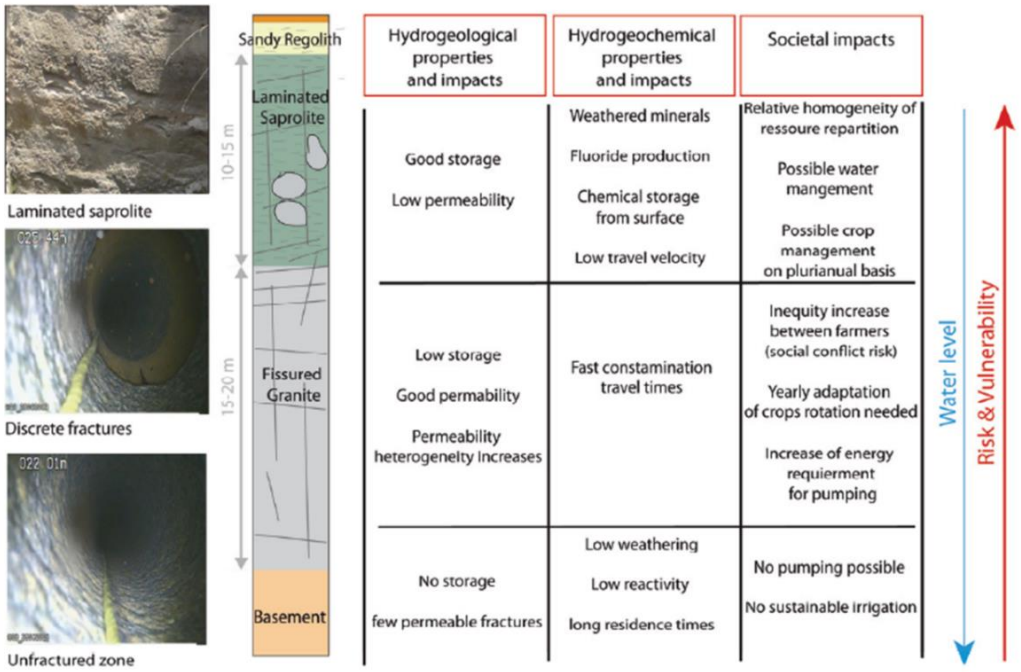


Illustration 40 : Principales caractéristiques hydrogéologiques schématisant la diponibilité et la vulnérabilité des ressources du domaine de socle en fonction de la profondeur exploitée dans les profils d'altération, exemple d'un granite in Boisson et al., 2014 modifié Maréchal et al. 2004

Les lacunes existantes peuvent donc être préjudiciables pour établir des mesures de protection efficaces des ressources en eau captées. C'est pourquoi l'ensemble des programmes présentés au paragraphe 3.2 ont contribué à leur échelle à faire progresser les connaissances sur le fonctionnement des ressources en eau du socle armoricain breton.

- **Suivi piézométrique et prévision des épisodes extrêmes**

Comme décrit au paragraphe 4.1, l'hétérogénéité des aquifères de socle induit des réponses aux évènements climatiques pouvant être très contrastées et variables dans le temps (cf. Illustration 41 ci-dessous). C'est pourquoi un suivi des aquifères en différents points est nécessaire pour assurer une représentativité de leur fonctionnement complexe.

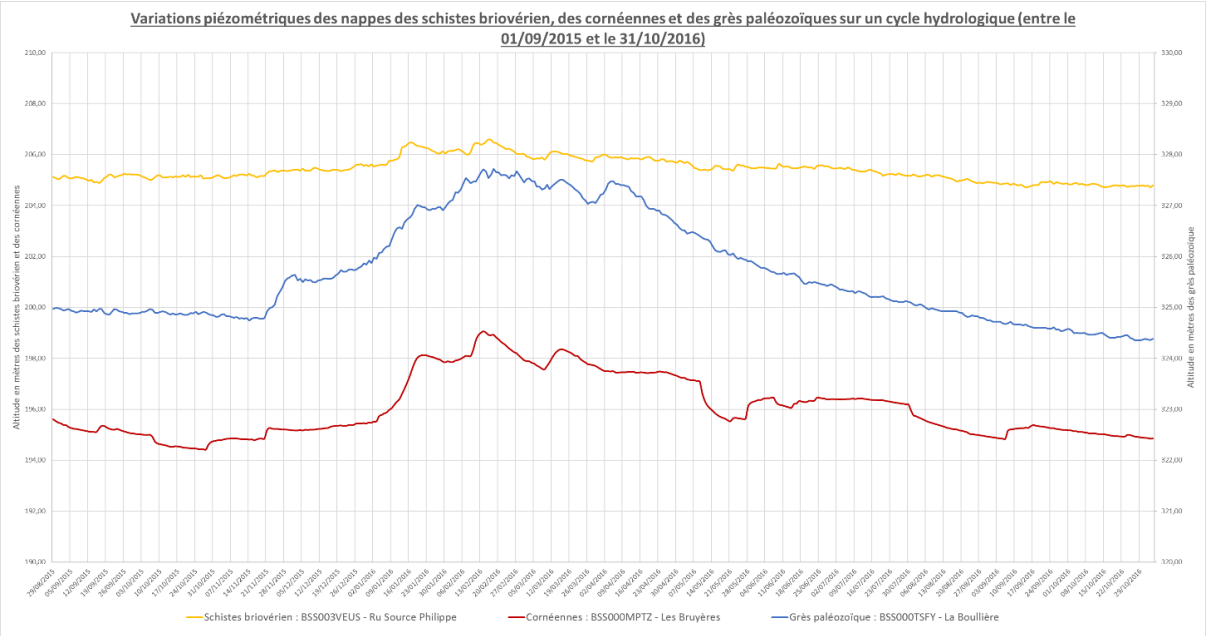


Illustration 41 : Exemple de réactions différentes de la nappe dans les cornéennes, les schistes briovériens et les grès paléozoïques du département de l'Orne. Année hydrologique 2015-2016. Source : SDE61

L'implantation du réseau piézométrique doit alors se faire en tenant compte des spécificités géologiques et hydrogéologiques régionales afin que les piézomètres soient bien représentatifs du comportement de la masse d'eau qu'ils doivent représenter.

A ce sujet, une analyse sommaire de la représentativité du réseau du SDE61 est fournie au chapitre 6.

Ces données et informations peuvent notamment être utiles pour être intégrées à des outils de prévision des épisodes extrêmes (crues ou sécheresses).

- **Sensibilité au changement climatique**

Les aquifères de socle sont des aquifères généralement faiblement capacitifs. De ce fait ils sont très sensibles aux variations saisonnières et pluriannuelles, ils ne peuvent présenter de longues tendances à la baisse de leurs niveaux.

CLIMAWAT[9] est un projet de recherche de trois ans (2011-2013) financé par l'Union Européenne dans le cadre du programme Interreg[10] France (Manche – Angleterre). Il avait pour but d'étudier les impacts des changements climatiques (en particulier la précipitation) sur la recharge des aquifères fracturés (craie et granite), ainsi que sur la quantité et la qualité des eaux souterraines.

[9] Les partenaires du projet CLIMAWAT sont l'Université de Brighton, l'Université d'East Anglia, l'Université de Bretagne Occidentale, l'Université de Rennes et le Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS).

[10] Interreg est un programme européen de coopération entre régions européennes transfrontalières visant le développement de solutions communes dans les domaines du développement urbain, rural et côtier, du développement économique et de la gestion de l'environnement. Il est financé par le Fond Européen de Développement Régional (FEDER).

Dans le cadre de ce projet, une analyse des anomalies de précipitations et de températures saisonnières et annuelles a été réalisée en utilisant une approche multi-modèles (15 modèles de climat : CMIP3, 8 ARPEGE, et 11 ENSEMBLES (cf. le portail DRIAS [Météo-France, CERFACS, CNRM, IPSL]), sur la période 2046-2065 comparée à la climatologie 1961-1990.

Les projections et les grandes tendances en Bretagne indiquées dans le guide du CRESEB[11] sont les suivantes : « Les grandes tendances en Bretagne pour le milieu du 21e siècle montrent un réchauffement des températures moyennes, surtout en hiver, et un assèchement en été au niveau du cumul de précipitations. (…) Les précipitations sont d'une manière générale inférieure d'une dizaine de pourcents, avec des déficits marqués en été et en automne (septembre/octobre) pour l'ensemble des projections. » Ces résultats impliquent mécaniquement l'augmentation de l'ETP et du ruissellement et donc une baisse de la recharge.

Dans l'article « *Partitioning a regional groundwater flow system into shallow local and deep regional flow compartments* » (Goderniaux et al., 2013), celui-ci indique qu'une modélisation hydrogéologique a été réalisée à l'échelle régionale sur des bassins versants bretons (Aven, Belon, Isole et Ellé [Finistère et Morbihan]) couvrant une superficie de 1385 km^2 afin d'étudier la répartition de la recharge entre les différents compartiments souterrains.

Celle-ci montre l'impact de la baisse de la recharge (c'est-à-dire la baisse de la quantité d'eau qui s'infiltre vers les sols puis vers les nappes) : la baisse d'un facteur 5 de la recharge effective (de 500 à 100 mm) fait baisser la surface de drainage (correspondant plus ou moins aux rivières) de 39% à 10%.

En conséquence, pour affiner les prévisions à long terme sur les effets du changement climatique, il est aujourd'hui nécessaire de développer des approches spécifiques actuellement en développement au BRGM et à l'OSUR[12] (Projet EAUX2050 – de Dreuzy et Boisson, 2019). Ces approches s'intéressent aux capacités de stockage (actuellement peu connues) et de vidange de ces aquifères notamment par l'analyse d'éléments intégrateurs tels que les récessions de cours d'eau.

L'objectif du projet est d'évaluer l'impact des changements climatiques sur le fonctionnement des grands aquifères, à l'échelle régionale, en fonction de leurs structures géologiques et hydrodynamiques. L'effet sera étudié au regard de la disponibilité des ressources et de comprendre comment leur inégale répartition peut être un facteur de vulnérabilité ou d'adaptation.

En Normandie, la DREAL a mis en évidence dans le profil environnemental (volet climatique, 2015) que sur ces 60 dernières années, il a été constaté une augmentation de la température moyenne de 0,6°C (écart entre les deux dernières normales 1951-80 et 1981-2010). Cette évolution, en cours, a et aura un impact significatif, dans les années à venir sur le cycle de l'eau, en particulier au niveau des têtes de bassin versants (+/- baisse de 10 % de la pluie efficace au 20^e s.).

De par sa position, en tête des principaux bassins versants régionaux (cf. chapitre 2) et l'exploitation de ressources en eau superficielles, l'Orne pourrait donc être particulièrement affectée par les changements climatiques en cours.

[11] Centre de Ressources et d'Expertise Scientifique sur l'Eau de Bretagne (CRESEB), http://www.creseb.fr/

[12] Observatoire des Sciences et de l'Univers de l'université de Rennes 1 (OSUR)

Au regard des récentes études tendancielles révisant les scénarios établis (projection du GIEC[13] notamment : +3°C à l'horizon 2100, quid de l'effet sur les nappes), il nous semble tout à fait pertinent de lancer des études similaires à l'échelle de la Normandie pour évaluer l'impact socio-économique du changement en cours et à venir sur le cycle de l'eau et la disponibilité de la ressource .

3.4. METHODOLOGIE PROPOSEE POUR CARACTERISER LE FONCTIONNEMENT DES AQUIFERES DE SOCLE

Pour pouvoir caractériser le fonctionnement des aquifères de socle et essayer d'établir un schéma conceptuel précis du fonctionnement de ce type d'aquifère, il est donc idéalement nécessaire de collecter les informations suivantes à l'échelle globale ou plus locale (bassin versant ou d'un site) :

- **Caractériser l'horizon superficiel :**
  - Caractérisation du sol : type, épaisseur, rôle hydrologique et hydrogéochimique, notamment à partir de l'analyse des données pédologiques.
  - Caractérisation du réseau de drainage (cours d'eau, fossés, drains, …) : densité, rôle éventuel de limite, interactions avec les eaux souterraines (drainance, équilibre quantitatif), impact qualitatif. Ce travail pourra s'effectuer notamment à partir d'une analyse fine des pompages d'essais, du suivi des niveaux d'eaux souterraines et superficielles (si possible enregistrement des débits également) et du suivi de la qualité des eaux.
- **Pour les altérites et l'horizon fissuré**, sont à caractériser :
  - **La nature, l'épaisseur et la géométrie de chaque formation** notamment à partir de l'analyse de géologie de terrain, des données de forage ou encore des données géophysiques. Il est important de mettre en évidence les variations spatiales des épaisseurs et les éventuelles hétérogénéités (discontinuités lithologiques ou tectoniques notamment) de chacun de ces deux horizons.
  - **Les paramètres hydrodynamiques et la productivité** seront recherchés pour chacun des horizons notamment à partir des données de pompages d'essais, de diagraphies de flux, ou de modèles d'inversion pour déterminer le rôle capacitif et/ou transmissif des différents horizons aquifères. Si possible les éventuelles limites seront identifiées (failles ou compartiments) à partir d'essai de pompage. On cherchera notamment à représenter les variations spatiales de ces paramètres tant sur un profil horizontal que vertical (profondeur).
  - **Le comportement piézométrique (niveau, écoulements)** : il est nécessaire d'évaluer le comportement des différents horizons sur des périodes hydrologiques contrastées : notamment en période de hautes et basses eaux. On cherchera à vérifier l'éventuelle compartimentation de l'aquifère principalement en période de basse eaux et de chercher également le lien qu'il peut exister entre ces horizons et l'horizon superficiel et les milieux supports (interaction, drainance).

Informations valorisables : Volume global de la ressource, rôle et fonctionnement des horizons aquifères, productivité globale soutenable pour l'hydrosystème (évaluation des

[13] Rapports du Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC ou IPCC en anglais) https://www.ipcc.ch/

effets des prélèvements sur les eaux superficielles et souterraines (incidences)), indicateurs pour la vulnérabilité de la ressource (notamment épaisseur zone saturée et non saturée, temps de transfert). Identification de secteurs favorables à la recherche de nouvelles ressources (volume disponible d'un aquifère globalement productif). Implantation d'un réseau de suivi des hydrosystèmes.

- **Caractériser, pour l'ensemble des horizons, la présence et le rôle de la structuration « tectonique »** :
    - Géométrie des objets (si possible direction, plongement, azimut), à partir des observations de terrain (surface), des données de forage et de géophysique.
    - Importance de la zone d'altération associée.
    - Historique du fonctionnement des accidents et dernier jeu connu, les zones d'extension ou graben seront recherchées en priorité.
    - Productivité des zones fracturées : notamment par la mesure de flux en forage.
    - Fonctionnement du réseau de fractures (connexion, rôle de circulation et/ou stockage) : analyse des chronique piézométriques, données de traçages, pollutions, hydrochimie, pompages d'essai.
    - Identification du rôle de drain ou de limite étanche : observation des rabattements en pompage, effets sur la productivité, processus hydrochimiques (notamment dénitrification).

Informations valorisables : Indicateur sur le fonctionnement local des aquifères. Indicateurs pour la protection de la ressource (direction des écoulements préférentiels, flux dont eaux profondes, identification de zones vulnérables). Fonctionnement hydrochimique (impact sanitaire). Identification de secteurs favorables à la recherche de nouvelles ressources en eau (profondeur et productivité).

Bien évidemment ces propositions devront être adaptées aux enjeux et besoins (locaux ou globaux), aux moyens à mettre en œuvre ainsi qu'aux ressources financières disponibles pour réaliser les études.

4. Synthèse bibliographique sur le fonctionnement des grandes unités aquifères du département de l'Orne

4.1. METHODOLOGIE DE CARACTERISATION DES PRINCIPALES RESSOURCES EN EAU SOUTERRAINES EXPLOITEES POUR L'ALIMENTATION EN EAU POTABLE

Cette synthèse des connaissances sur le fonctionnement des aquifères du domaine sédimentaire et du socle s'appuie sur l'analyse bibliographique d'une partie des documents disponibles dans les archives du SDE61 et du BRGM. Elle ne se veut pas exhaustive et n'engage pas le BRGM sur la validité des éléments rapportés.

Les caractéristiques des principales formations aquifères sont présentées de la façon suivante : fonctionnement général, écoulements, fluctuation des niveaux, paramètres hydrodynamiques et productivité, relation avec les cours d'eau, alimentation et recharge.

Une analyse détaillée du fonctionnement hydrogéologique des grandes formations aquifères devrait être réalisée dans la suite du programme (phase 2 du programme OAGPRO61 bis à venir) notamment sur le volet exploitation de la ressource dont le sujet n'est pas abordé dans la première phase de l'étude.

Chaque entité aquifère est représentée en début de paragraphe par une carte. Celle-ci représente, quand cela est possible : les formations affleurantes issues de la carte géologique harmonisée du département de l'Orne (Vernhet, 2002 - RP-51626-FR) et la carte des limites des systèmes aquifères issue de la BD-LISA.

Pour cette dernière, il faut rappeler que le département de l'Orne se situe sur 2 grands bassins-versants : Seine-Normandie et Loire-Bretagne. Dans ces 2 bassins, la délimitation des entités BD-LISA pour les aquifères de socle ne s'est pas appuyé sur la même méthodologie. Certaines limites sont basées sur la lithologie des formations et d'autres sur un découpage reposant sur les limites des bassins-versants. Cette absence d'homogénéité ne permet pas d'afficher les limites des entités aquifères du socle armoricain.

Il est à noter que pour les aquifères sédimentaires la même méthodologie, basée sur la lithologie, a été appliquée dans les 2 bassins, Loire-Bretagne et Seine-Normandie.

4.2. PRINCIPALES RESSOURCES DU DOMAINE DE SOCLE

4.2.1. Aquifère des Flysch Briovériens peu ou non métamorphisés

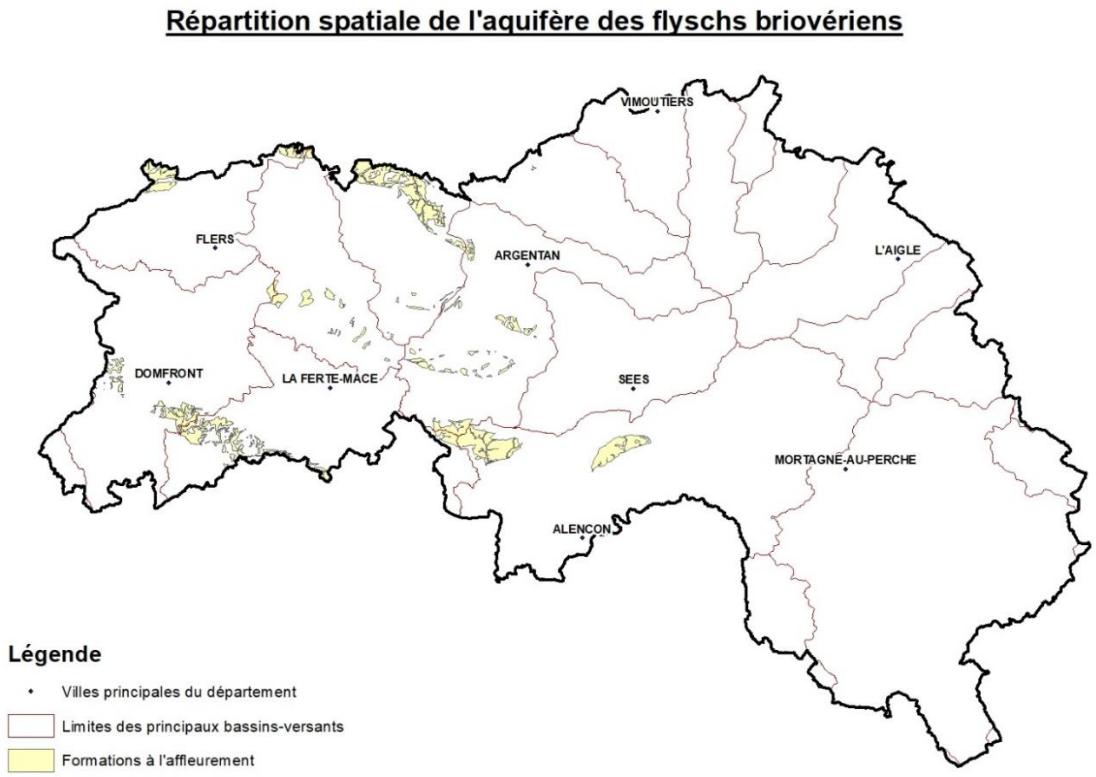


Illustration 42 : Carte d'affleurement des formations des flyschs briovériens (d'après la carte géologique harmonisée de l'Orne)

a) Caractéristiques générales de l'aquifère

La présence d'eau souterraine dans les schistes et grès du Briovérien se manifeste de deux façons (B.Lemoine, 2006) :

- **Dans les altérites**, formations peu consolidées, présentent une faible perméabilité de par leur teneur importante en argile, celles-ci possèdent toutefois un emmagasinement non négligeable (1 à 15 %). De fait ces formations assurent une fonction de stockage. Cet horizon superficiel est sensible aux pollutions diffuses.
- **Dans la roche saine** (grès et schistes, dans une moindre mesure calcaires), les horizons plus ou moins fracturés assurent la circulation des eaux et ont un rôle plus transmissif. Cet horizon est souvent captif à semi-captif sous les formations d'altération (avec l'existence très probablement de processus de dénitrification engendrant notamment la présence de fer et de manganèse).

Il est à signaler que ces formations, constituées d'une alternance de petits bancs souvent inframétriques (flyschs), composent des réservoirs très discontinus.

Enfin, la présence d'une argilisation dans les zones faillées n'est pas à exclure (phénomène pouvant assurer le rôle de barrière hydraulique).

b) Ecoulements

Actuellement, il n'existe pas de carte(s) piézométrique(s) globale(s) de cette unité aquifère, permettant d'apprécier les directions et sens d'écoulement (cf. rapport BRGM/RP-69552-FR). Seules quelques données locales ont pu être utilisées, en complément de la carte régionale de la DREAL Normandie.

Ces données partielles ont permis notamment de mettre en évidence que dans l'horizon superficiel, l'écoulement est celui d'une nappe libre, il suit le plus souvent la topographie.

Pour l'horizon fracturé situé plus en profondeur, il est difficile de disposer d'informations sur les circulations souterraines, celles-ci empruntent le plus souvent le réseau de fractures et suivent également les hétérogénéités des formations : circulations dans les plis, interbancs, etc...

Par exemple, des circulations Nord-Sud et SW-NE ont été soulignées respectivement sur le secteur du Houlme et de la vallée du Noireau le long de fractures majeures.

c) Fluctuation du niveau des nappes

Le niveau statique des formations superficielles d'altération est près du sol et varie peu au cours des saisons (voir chapitre 6).

Sur les coteaux où les formations d'altérations sont moins présentes, les niveaux relevés sont plus profonds et peuvent varier de 5 à 7 m (Telosia et Hydriad, 2011) sur le marais du Houlme.

Pour les niveaux situés dans les horizons fissurés, la nappe captive peut être en charge sous les horizons d'altération et présenter un artésianisme.

Cet aquifère, très compartimenté, fait partiellement l'objet d'un suivi en continu des niveaux piézométriques, cf. chapitre 6.

d) Paramètres hydrodynamiques et productivité

La productivité est très variable : de quelques dizaines à plus d'une centaine de m^3/h selon la configuration des sites.

Des productivités très élevées ont notamment été révélées dans les unités aquifères du Houlme et du bassin du Noireau. Pour ces sites, les transmissivités calculées dans les horizons fracturés sont de l'ordre de 10^{-3} à 10^{-4} m^2/s ; le coefficient d'emmagasinement est faible (horizon fissuré captif) et de l'ordre de 0,1 à 0,2 % (B.Lemoine, 2006 ; Telosia et Hydriad, 2011 ; O.Chauvière, 2012).

Les paramètres hydrodynamiques dans les horizons superficiels ne sont pas rapportés en bibliographie. Il est très probable que la transmissivité des formations argilo-sableuses soit bien plus faible, de l'ordre de 10^{-5} à 10^{-8} m^2/s.

Une analyse statistique de l'ensemble des données bancarisées est fournie au chapitre 1, nous invitons le lecteur à s'y reporter pour plus de détails.

e) Relation avec les cours d'eau, sources

La présence des formations d'altération garantit une relative indépendance entre les eaux de surface et les eaux prélevées en profondeur dans les zones fracturées.

La modélisation réalisée sur le secteur du Marais du Grand Hazé par Telosia et Hydriad (2011) indiquerait une drainance négligeable des eaux superficielles : 16 m^3/j pour 6000 m^3/j prélevés sur les eaux souterraines.

Plus généralement, lors des prélèvements dans les horizons fissurés, il peut se matérialiser des phénomènes de drainance des horizons superficiels. L'importance de ces phénomènes doit être évaluée localement lors des études d'incidence des projets d'exploitation.

Cet aquifère, très compartimenté, fait partiellement l'objet d'un suivi en continu (cf. chapitre 6).

f) Conditions d'alimentation et de recharge

L'alimentation du réservoir superficiel se fait par infiltration des précipitations (pluies efficaces = ruissellement + infiltration). A l'échelle du département, les surfaces affleurantes de Brioverien non-métamorphisé sont relativement réduites et ont été estimées à 130 km^2 environ.

Les valeurs de pluies efficaces estimées en bibliographie varient de 190 à 335 mm par an (O.Chauvière, 2012 et Lithologic, 2013), la période de recharge se situerait selon les auteurs de Décembre à Mars et accessoirement plus tôt dès Novembre. La lame d'eau infiltrée n'est pas toujours évaluée faute de pouvoir apprécier la part des ruissellements.

Pour le réservoir souterrain, la zone d'alimentation est plus difficile à identifier car les circulations se font dans un milieu très discontinu et fissuré. La recharge peut se faire par infiltration via les fissures et fractures et par drainance descendante depuis les formations superficielles.

D'autre part, il peut également exister dans ces réservoirs des alimentations profondes. Celles-ci représenteraient par exemple de 35 à 45 % des volumes prélevés sur les forages proches du marais du Grand Hazé selon les données hydrochimiques (Telosia et Hydriad, 2011, cf. Illustration 43 ci-après).

Le réservoir situé dans ces formations peut amortir un déficit d'alimentation annuel mais sera sensible à un déficit pluriannuel compte tenu de sa sensibilité à la recharge.

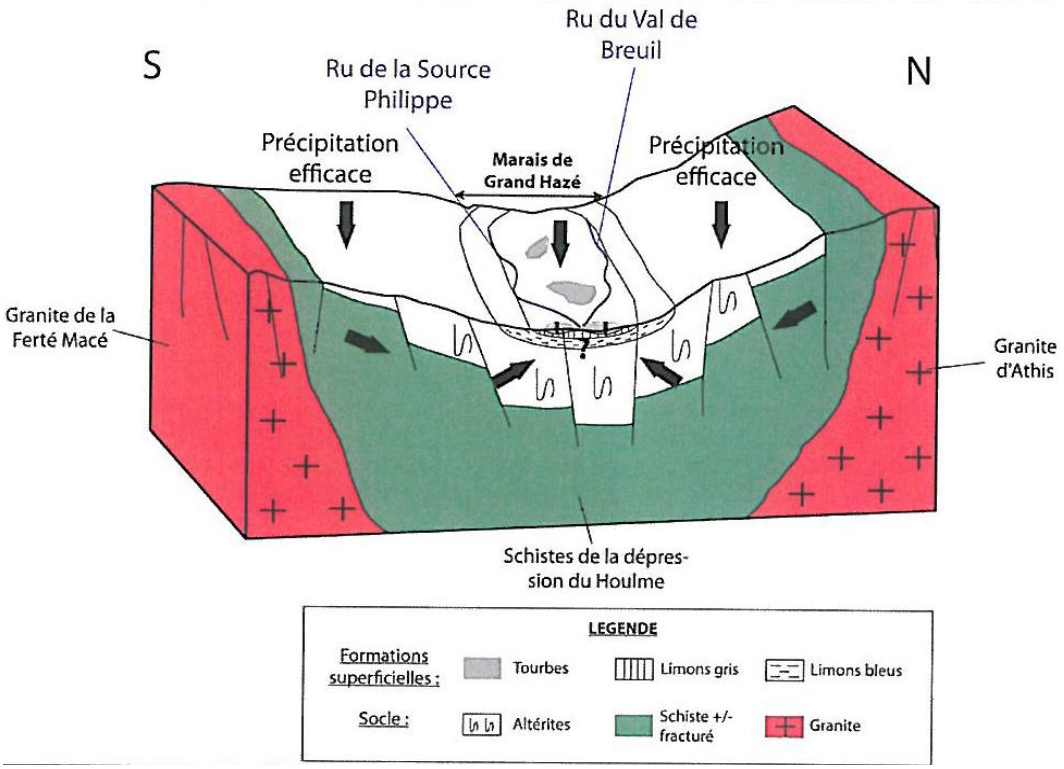


Illustration 43 : Schéma hydrogéologique de fonctionnement du marais du Grand Hazé, (Telosia et Hydriad, 2011).

4.2.2. Aquifère des Granitoïdes et Cornéennes

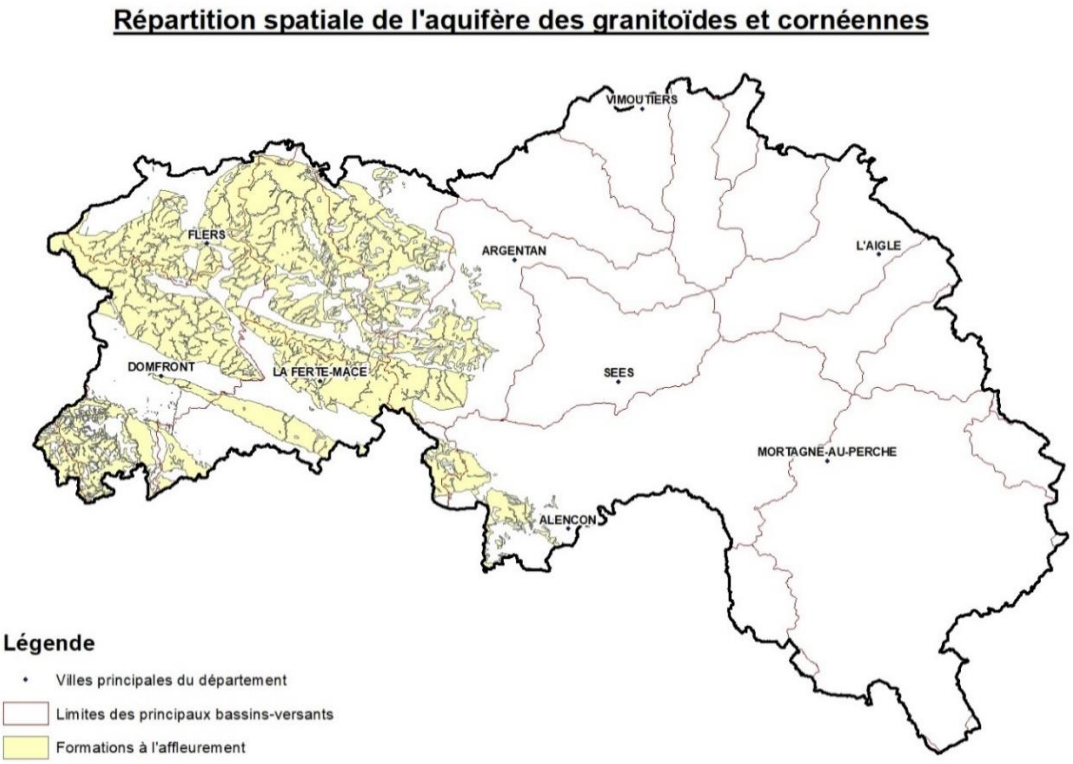


Illustration 44 : Carte d'affleurement des formations des granitoïdes et des cornéennes (d'après la carte géologique harmonisée de l'Orne)

a) Caractéristiques générales de l'aquifère

Dans les massifs granitiques (batholites) comme ceux d'Athis, d'Alençon, Ferté Macé, Rânes, Chanu, Lonlay l'Abbaye, Céaucé,… et leur auréole de métamorphisme proche (Cornéennes), on distingue deux horizons productifs :

- **dans les arènes granitiques et les altérites** (granite et cornéennes) d'une part, où l'horizon est relativement discontinu, notamment en termes d'épaisseur.

  Leur épaisseur est par exemple de 10 m sur le secteur d'Athis et plus de 30 m sur le secteur de Céaucé/Lonlay l'Abbaye. Cet horizon superficiel est capacitif et joue le rôle de réservoir. Il est libre et vulnérable aux pollutions.

  A l'échelle départementale, celui-ci n'est pas cartographié de façon homogène en termes de faciès, ou d'une évaluation de son épaisseur.
  A noter : il est fréquent que les ouvrages d'exploitation masquent volontairement les horizons altérés. Lorsque ces derniers sont perméables, ils n'assurent pas une protection suffisante face aux pollutions de surface.

- **dans l'horizon fissuré/fracturé** du granite ou des cornéennes, plus en profondeur, d'autre part. En effet, ces formations, très dures, ont un comportement tectonique fragile. Elles sont toutes affectées de failles, au moins en bordure et sous les massifs, qui en fonction du degré de connexion du réseau de fissures et fractures (réservoir discontinu) va conférer à cet horizon un rôle plus transmissif.

  Etapes Environnement (2006) indique à ce titre que les cornéennes à biotite, muscovite et cordiérite du secteur de Lonlay l'abbaye, sont des roches très recristallisées, très dures, ayant une texture massive. Celles-ci constituent des reliefs dans le paysage. Les forages réalisés dans ce secteur ont montré la présence d'une nappe superficielle située à 6-7 m de profondeur dans les altérites et l'existence d'arrivées d'eau conséquentes dans l'horizon fissuré vers 25 m de profondeur. L'ouvrage de plus de 100 m permet l'exploitation de l'horizon fissuré à un débit supérieur à 70 m^3/h.

  En fonction de la nature des altérites (argiles sableuses par exemple) et de la position des ouvrages dans la géomorphologie locale, l'horizon fissuré peut se trouver captif à semi-captif. Il acquiert alors un pouvoir de dénitrification et est susceptible d'avoir des concentrations en fer et manganèse significatives.

Important : en l'absence de fissures ou fractures, la roche alors saine est très peu perméable et donc peu aquifère.

Enfin, dans un certain nombre de cas, l'existence de phénomènes de circulations profondes n'est pas à exclure. Toutefois la mise en évidence de ces phénomènes est rendue complexe par la nécessaire mise en œuvre d'études spécifiques, détaillées au chapitre 3. Le BRGM n'a pas connaissance de tels cas pour le département de l'Orne.

A signaler : l'altération hydrothermale en limite du batholite de Chanu par le complexe intrusif de Beauvain (granite porphyrique, rhyolite, …) pourrait être susceptible de libérer des métaux rares dans les eaux qui percolent autour de cet ensemble (non démontré à ce jour).

b) Ecoulements

Actuellement, il n'existe pas de carte(s) piézométrique(s) globale(s) de cette unité aquifère, permettant d'apprécier les directions et sens d'écoulement (cf. rapport BRGM/RP-69552-FR). Seules quelques données locales ont pu être utilisées en complément de la carte régionale de la DREAL Normandie.

Ces données partielles ont permis notamment de mettre en évidence que dans les horizons superficiels les écoulements souterrains suivent généralement la topographie, les bassins versants hydrogéologiques correspondent alors aux bassins topographiques. Dans les franges d'altération, la nappe est accessible à faible profondeur et même souvent sub-affleurante sur les flancs et en fond des vallées.

Dans l'horizon fissuré plus profond, la fracturation jouerait le rôle de drain productif du réservoir. On dispose d'assez peu de données sur les écoulements souterrains dans et autour des batholites.

Autour des massifs (Céaucé, la Ferté Macé, Athis, Lonlay-L'Abbaye,…), deux directions principales de failles sont supposées drainantes : la direction NW–SE (N150) et d'assez grande extension (faille régionale de la Mayenne-Egrenne par exemple) et également la direction N120 au niveau de la zone de contact entre les batholites et leur encaissant. Il existe encore une troisième direction méridienne N170 à N20 qui peut également diriger les écoulements souterrains (cf. Illustration 45).

On signale la présence de filons plurimétriques de dolérite ou de quartz selon cette même direction N-S. Ces éléments structuraux recoupent l'ensemble des formations et peuvent même constituer des hétérogénéités lithologiques qui vont alors perturber localement les écoulements. Selon la configuration, ils peuvent servir de drain ou au contraire de barrière étanche (cf. chapitre 3).

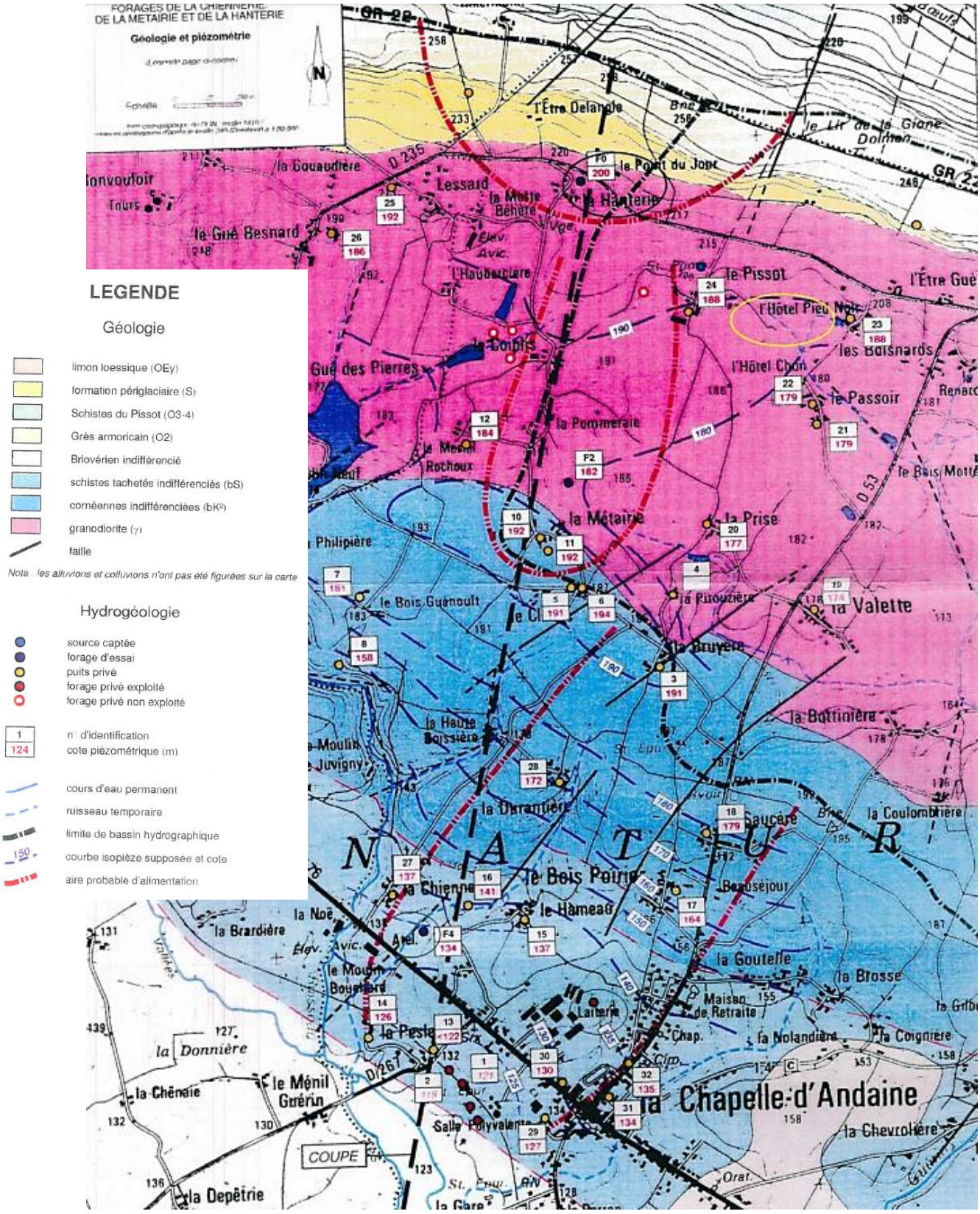


Illustration 45 : Exemple d'organisation des écoulements dans les granites et les cornéennes sur le secteur de la chapelle d'Andaine (Aster, 1998)

c) Fluctuation du niveau des nappes

Dans les vallées, les nappes sont sub-affleurantes et les niveaux varient peu.

Sur les reliefs, le niveau de la nappe peut être localement plus profond (jusqu'à une quinzaine de mètres) et varier de quelques mètres tout au plus entre les périodes de hautes et basses eaux.

Les formations libres sont très réactives aux pluies avec une recharge annuelle rapide en hiver, puis un tarissement pouvant être très prononcé pendant l'étiage.

Cet aquifère, très discontinu, fait partiellement l'objet d'un suivi en continu des niveaux piézométriques (cf. chapitre 6).

d) Paramètres hydrodynamiques et productivité

Les arènes et altérites des granites peuvent fournir des débits modestes, jusqu'à une dizaine de m^3/h.

Dans les cornéennes et les granites fissurés les débits peuvent être conséquents : de quelques dizaines de m^3/h à plus d'une centaine de m^3/h.

Dans cet horizon les transmissivités sont de l'ordre de 10^{-3} à 10^{-4} m^2/s et l'emmagasinement faible notamment autour de Flers, la Ferté Macé, (B.Lemoine, 1993 et 1995).

Une analyse statistique de l'ensemble des données bancarisées est fournie au chapitre 1, nous invitons le lecteur à s'y reporter pour plus de détails.

e) Relation avec les cours d'eau, sources

Le massif d'Athis, pauvre en altérites, fournit à ce titre un plus faible soutien d'étiage au cours d'eau que certains autres batholites du sud du département. A vérifier, en condition d'étiage, le possible asséchement de certains des cours d'eau qui le drainent.

Le fond des cours d'eau et plans d'eau reposent, le plus souvent sur ces secteurs, sur des formations argileuses. La bibliographie n'a pas permis de mettre en évidence d'incidence entre les prélèvements dans les eaux souterraines et les eaux de surface, ce qui ne veut pas dire que celles-ci soient à exclure.

Il est à souligner que de nombreuses sources naissent dans les massifs des cornéennes et alimentent de petits cours d'eau. Cette particularité souligne très probablement un contraste de perméabilité au sein des formations (sources de déversement). Sur le secteur de Tinchebray (dans la vallée du Noireau à l'ouest de Flers), Dassibat et Pareyn, 1979 ont mis en évidence, à l'aide de jaugeages sur les cours d'eau, l'existence de ressources importantes au niveau du contact faillé entre le batholite et les roches métamorphiques (faille N120 entre St Jean des Bois et Yvrandes +37 l/s). L'hypothèse émise par les auteurs est que l'accident fait barrage souterrain (zone de faible perméabilité) à une importante ressource en eau enfouie en profondeur, l'obligeant alors à remonter en surface. Sur ce même secteur, les auteurs signalent également l'existence de petites zones de pertes (< 5 l/s) qu'ils interprètent comme la traversée d'accidents drainants (Illustration 46).

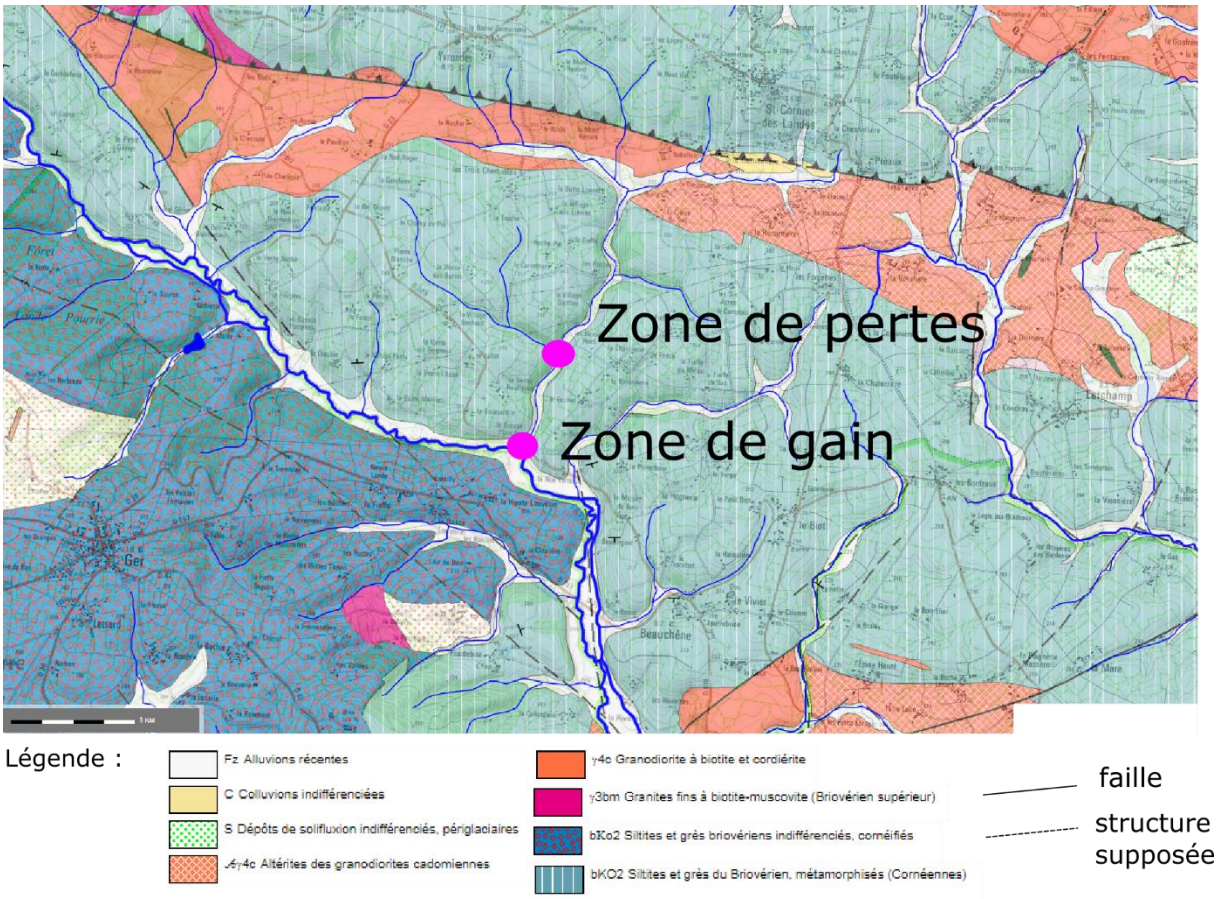


Illustration 46 : Localisation des zones de pertes et de gain sur le ruisseau du Moulin, secteur de St Jean des Bois (Orne), observations suite aux mesures de jaugeages de Dassibat et Pareyn, 1979

Dassibat et Pareyn (1979) montrent également que dans le bassin versant de l'Egrenne, voisin du ruisseau du Moulin, des pertes constatées pourraient correspondre à une importante anomalie (correspondant selon toute vraisemblance à la zone de conjugaison de deux failles d'orientation N10-20 et N120 sur le secteur de Pont d'Egrenne, Moulin d'Eaugeard : présence d'un petit fossé d'effondrement ?, cf. paragraphe 2.4).

On peut donc conclure qu'il peut exister localement des zones de drainage des cours d'eau, probablement en lien avec des structures tectoniques (hypothèse des pull-apart à vérifier).

Bien entendu dans le cas de captages de sources où les eaux contribuent habituellement à alimenter les cours d'eau, l'incidence des prélèvements est ici plus directe et doit être regardée avec discernement.

f) Conditions d'alimentation et de recharge

L'alimentation du réservoir superficiel se fait par infiltration des précipitations sur les zones d'affleurement (une part des pluies efficaces). A l'échelle du département, les surfaces à l'affleurement sont relativement importantes : de l'ordre de 370 km² pour les batholithes et intrusions magmatiques et de l'ordre de 380 km² pour leur encaissant métamorphisé.

Les pluies efficaces sont évaluées par la littérature entre 190 et 250 mm (Etapes Environnement, 2006 ; Lithologic, 2013), mais sont peut-être ici sous-estimées. La part

d'infiltration n'est pas toujours précisée faute de pouvoir évaluer les ruissellements. La période de recharge est souvent très précoce, parfois dès fin août.

Pour le réservoir souterrain, la zone d'alimentation est plus difficile à identifier car les circulations se font dans un milieu souterrain très discontinu et fissuré. La recharge peut se faire par infiltration via les fissures et fractures et par drainance descendante depuis les formations superficielles.

Le réservoir situé dans ces formations peut amortir un déficit d'alimentation annuel mais sera sensible à un déficit pluriannuel compte tenu de sa sensibilité à la recharge et l'aspect très discontinu du milieu. En contrepartie, celui-ci possède une meilleure capacité pour reconstituer rapidement les réserves.

4.2.3. Aquifère des formations paléozoïques

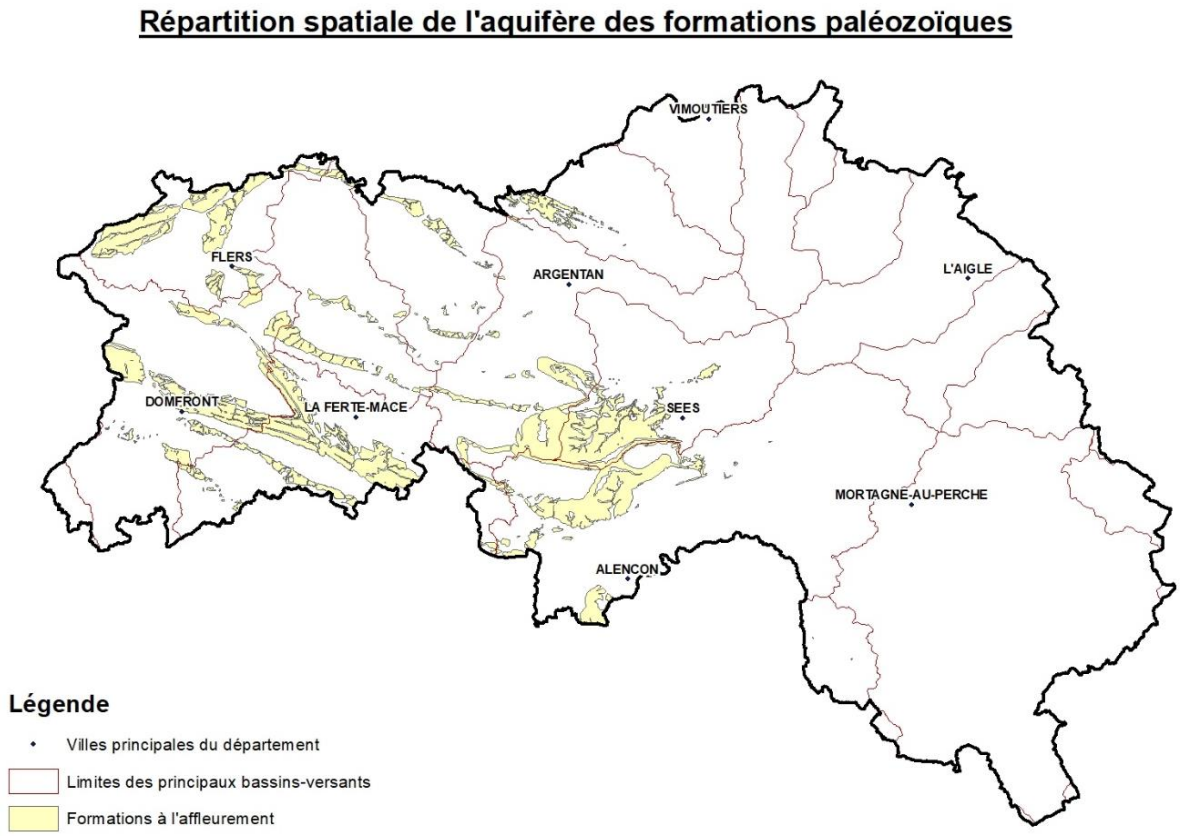


Illustration 47 : Carte d'affleurement des formations paléozoïques (d'après la carte géologique harmonisée de l'Orne)

a) Caractéristiques générales de l'aquifère

Cet ensemble, épais parfois de plusieurs centaines de mètres (cf. volet géologique Meire et al., 2019) se compose d'une superposition de formations essentiellement gréseuses et schisteuses. Celles-ci ont donc des propriétés aquifères différentes : les formations gréseuses (et calcaires) fissurées constituent des réservoirs perméables alors que les formations schisteuses sont généralement peu perméables et vont délimiter le toit ou le mur des premières.

Ces formations plissées possèdent des axes subhorizontaux ou à léger plongement est. Les plans axiaux sont légèrement déversés vers le sud (flanc nord plus accentués). Ces plis apparaissent ainsi en étroite relation avec le chevauchement fréquent des formations briovériennes le long de la bordure nord de ces axes hercyniens (N120) : zone bocaine, Forêt Auvray, St Clair de Halouze, Domfront, Vrigny, ...

Les formations reconnues comme ayant un potentiel aquifère exploitable à l'échelle du département de l'Orne sont les suivantes (de la plus ancienne à la plus récente) : grès pourprés, calcaires cambriens, grès Armoricains, grès de May, grès Culminants et grès Feldspathiques. Ces derniers sont d'avantage reconnus dans le nord du département.

A noter : le potentiel des formations volcano-sédimentaires d'Ecouves n'est pas à écarter, tout comme certains niveaux au sein des schistes (comme la formation ferreuse de base des schistes du Pissot qui possède une petite nappe). Celles-ci ne sont cependant pas décrites ci-après, la majorité des ressources documentaires concernent l'exploitation des grès armoricains et grès de May dans les synclinoriums.

Ces formations développent leur caractère aquifère à la faveur des zones d'altération et dans les réseaux de fissures qui affectent la roche plus saine (parfois très indurée, exemples des grès à tendance quartzitique). Les écoulements sont donc mixtes : poreux dans les arènes mais majoritairement fissuraux (AESN-BRGM, 2011), les premières étant globalement peu développées à l'échelle du département (épaisseurs limitées).



Illustration 48 : Source « Fontaine de Santé » à St Léonard des Bois (Sarthe), dans les grès ordoviciens (BRGM)

- **Secteur de la zone Bocaine**

Une schistosité se développe le long de ces zones de fracture ou de contact N120. Elle s'exprime préférentiellement dans les séries schisteuses cambriennes et ampélites siluriennes (également dans les formations briovériennes). Dans les niveaux gréseux, plus compétents, la schistosité de fracture associée à cette direction est plus frustre (Meire et al., 2019).

Sur le secteur de Rônai et Cordey (Calvados), ce sont les calcaires cambriens ou les grès pourpres qui sont a priori exploités par quelques petits ouvrages. A l'instar des formations connues dans le Calvados et la Mayenne, ces calcaires peuvent être fissurés et développer des circulations karstiques.

Sur le secteur de Nécy et Bailleul, quelques ouvrages exploitent les grès armoricains ou les grès de May.

On dispose de peu d'information dans la bibliographie sur ce secteur de la zone bocaine : les formations cambriennes et ordoviciennes y ont a priori été peu étudiées, dans le département de l'Orne.

- **Secteur de Domfront-la Ferrière aux étangs**

Sur ce secteur, les grès armoricains sont exploités sous les schistes du Pissot (Cambrien). Il s'agit d'une ressource profonde, de type fissurale et de nature captive à semi-captive (peu ou pas de nitrates).

Sur le secteur de Bagnoles de l'Orne, où les altitudes et pentes sont importantes, la bande gréseuse s'étend sur 300 à 400 m de large. Sur ce secteur appartenant au flanc sud du synclinal, les formations plongent de 20° à 40° environ vers le nord-nord-est, la formation des grès armoricain y aurait donc une épaisseur d'environ 70 à 100 m. Elle est parcourue de failles transversales principalement N10-20. L'eau qui circule dans ces formations y est très peu minéralisée (AD2E, 2006).

Nous ne disposons pas d'informations sur les grès et schistes ordoviciens et siluriens situés au cœur du synclinal (grès de May et grès culminants notamment), qui n'ont a priori pas fait l'objet de recherches spécifiques. Ces formations ont été traversées notamment à St Patrice du Désert mais n'ont pas fait l'objet d'une exploitation.

Sur les versants, les formations de pente (*head*), d'épaisseur métrique à plurimétrique, sont fréquentes. Ces dépôts, issus de la gélifraction au Quaternaire sont généralement constituées de blocs de grès enrobés dans une gangue argilo-sablo-graveleuse jaunâtre.

Les dépressions situées au cœur de la structure synclinale sont comblées par des colluvions qui prolongent latéralement les éboulis pierreux des versant. Dans les thalwegs, on retrouve notamment des alluvions récentes (Pivette, 2011).

Dans ces formations de versants et de pente il existe de petites émergences diffuses et superficielles.

A noter sur ce secteur : La présence d'anciennes mines de fer exploitées depuis le moyen âge et pour lesquelles plusieurs sites ont connu une exploitation importante à la fin du 19^{e} siècle jusqu'au milieu du 20^{e}. Il s'agit des anciens sites miniers de St Clair de Halouze, La Ferrière aux Etangs/Larchamp, St Patrice du Désert/l'Ermitage qui exploitaient le minerai contenu dans les schistes d'Urville/Pissot situé au-dessus des grès armoricains. Ces anciennes exploitations sont à prendre en compte dans le cadre de projets de recherche en eau et ou d'exploitation de ressources en eau souterraine.

- **Massif d'Ecouves**

Sur la bordure nord-ouest du synclinal paléozoïque de Sées ainsi que sur la bordure sud du massif, les émergences sont localisées dans les schistes et calcaires cambriens, les grès armoricains et grès de May mais également dans les volcanites cambriennes.

L'eau infiltrée dans les roches circule dans le sens de la pente des formations plissées, à des profondeurs différentes selon le degré d'altération ou en suivant les chemins de fractures préférentielles : N150 à N20 sur ce secteur (B. Lemoine, 2008). A ce titre, les ignimbrites

situées au nord-est du synclinal d'Ecouves sont localement très tectonisées et sont donc intéressantes hydrogéologiquement parlant.

Les sorties vont s'effectuer principalement en fonction du changement de lithologie dans les roches ou à la rencontre de barrières hydrauliques (failles ou fissures colmatées).

On retrouve également d'anciennes petites exploitations minières sur ce secteur sur la commune de la Ferrière-Bochard à l'ouest d'Alençon et encore au sud et à l'ouest de Sées (Ferrière-Béchet). Ces sites n'ont néanmoins pas atteint l'importance de ceux de l'ouest du département.

b) Ecoulements

Actuellement, il n'existe pas de carte(s) piézométrique(s) globale(s) de ces unités aquifères, permettant d'apprécier les directions et sens d'écoulement (cf. rapport BRGM/RP-69552-FR). Seules quelques données locales ont pu être utilisées en complément de la carte régionale établie par la DREAL Normandie.

Les données locales ont permis notamment de mettre en évidence qu'il n'existe que très peu de points d'observation sur cet aquifère.

Le sens d'écoulement de la nappe contenue dans cet aquifère fissuré peut correspondre : au sens de pendage de la formation, ou bien encore à la présence de structures faillées drainantes. Certains éléments structuraux vont créer des perturbations : contacts anormaux, failles ou fissures colmatées.

Généralement, la nappe alimente les cours d'eau.

c) Fluctuation du niveau des nappes

Dans les franges d'altération, la nappe est de faible profondeur et souvent affleurante sur les flancs et en fond de vallée, les niveaux varient très peu. La période de déficit hydrique se situe généralement d'avril à août. Cet horizon superficiel est sensible aux périodes de déficit hydrique prononcé.

Lorsque la nappe est captive sous les autres formations de schistes ou grès/calcaires, elle peut présenter une charge ascensionnelle importante qui peut dépasser les 100 m et conduire à l'artésianisme (AD2E, 2006), notamment si la ressource est captée en profondeur au sein des grands synclinoriums.

Sur les bordures des synclinaux, les variations de nappe peuvent être rapides tant pour la recharge que pour la vidange, l'amplitude entre hautes et basses eaux est relativement faible et dépasse rarement 10 m.

Cet ensemble aquifère, fait partiellement l'objet d'un suivi en continu des niveaux piézométriques (cf. chapitre 6).

d) Paramètres hydrodynamiques et productivité

Les valeurs des paramètres hydrodynamiques estimées par l'interprétation de pompages d'essai donnent des transmissivités comprises entre 10^{-3} et 10^{-4} m²/s (B.Lemoine, 2001 ; Lithologic, 2003 ; AD2E, 2006 ; Pivette, 2011), le coefficient d'emmagasinement n'a pas pu

toujours être évalué dans les documents consultés. Ce dernier est probablement faible (milieu fracturé et/ou captif), évalué à 0,1% par B.Lemoine (2001).

La productivité peut être particulièrement intéressante et les débits exploités dépasser les 100 m^3/h.

Les différents essais de pompages consultés mettent en évidence la présence de limites étanches. Ces différences caractérisent un milieu souterrain hétérogène dans lequel la présence de limite(s) est probable.

Une analyse statistique de l'ensemble des données bancarisées est fournie au chapitre 1, nous invitons le lecteur à s'y reporter pour plus de détails.

e) Relation avec les cours d'eau, sources

Les études d'incidences montrent une possible drainance des horizons superficiels ou des zones de remplissage par des colluvions, lors de pompages. Ce point doit donc faire l'objet d'attentions particulières notamment dans la caractérisation des horizons superficiels autour des milieux humides de surface. Cette singularité est probablement due à une perméabilité plus importante des formations d'altération et/ou à leur moindre épaisseur.

Dans le cas des captages de sources de débordement, de contact ou d'émergence dans les *head*, les eaux contribuent habituellement à alimenter les cours d'eau, l'incidence de prélèvements est ici plus directe et doit être regardée avec discernement.

f) Conditions d'alimentation et de recharge

L'impluvium sur lequel peut s'effectuer la recharge directe de l'aquifère correspond aux zones dans lesquelles ces terrains sont à l'affleurement au niveau des grands synclinoriums, ces zones sont relativement réduites : à l'échelle du département, on estime leur surface d'affleurement à 170 km² pour les formations gréseuses contre près de 300 km² pour les formations schisteuses, moins perméables.

On peut également supposer que la recharge s'effectue au droit des zones fissurées ou fracturées ou encore par drainance descendante depuis les formations de surface ou d'altération.

Il est à noter que les réservoirs paléozoïques s'avèrent relativement puissants mais peu étendus. Si ces derniers sont effectivement très compartimentés, alors les prélèvements peuvent représenter une part significative des volumes disponibles et de la recharge. Aussi, il est impératif, lors des projets d'adduction, de confronter les prélèvements envisagés à un bilan quantitatif aussi précis que possible.

g) Thermalisme

Enfin, il faut préciser qu'un autre mode d'alimentation de ces réservoirs doit être évoqué : les alimentations profondes. L'importance de ces circulations dans le fonctionnement de ces hydrosystèmes est relativement mal connue.

Le synclinal de Domfront connait plusieurs cas de ressources présentant des anomalies thermiques. On citera par exemple :

- La source de Bagnoles de l'Orne, située à proximité de la cluse de la Vée, naît au contact entre les Grès Armoricains et le granite. Le débit naturel de l'émergence était de l'ordre de 24 m^3/h. La réalisation d'un puits de 102 m de profondeur a permis d'en obtenir une cinquantaine de mètres cubes par heure. Les eaux ont une température comprise entre 24 à 26°C ce qui témoigne de circulations très profondes (Vernhet, 1996). Les eaux donnent lieu à un dégagement d'argon, hélium, azote et gaz carbonique et sont radioactives (F.Doré, 1987) témoignant probablement d'une remontée mantellique (très profonde) le long de la faille N120-140.
- La source des gorges de Villiers se situe dans le même contexte hydrogéologique que la source thermale exploitée à Bagnoles-de-l'Orne située quelques kilomètres plus à l'ouest. L'eau circule en profondeur où elle se charge en éléments minéraux et en gaz (azote, argon, hélium) avant de sortir à la faveur de la fracturation du Grès armoricain à une température de 17°C. Cette source était déjà connue des Romains.
- Le captage de St Ursin (commune de St Patrice du Désert) connait lui aussi une faible anomalie thermique (env. 14°C), une part vraisemblablement importante de la ressource a de toute évidence une origine locale (granite) ; Pivette (2011).

A notre connaissance, la ressource n'est pas exploitée comme gîte géothermique.

4.3. PRINCIPALES RESSOURCES DU DOMAINE SEDIMENTAIRE

4.3.1. Aquifère des calcaires aaléniens, bajociens et bathoniens

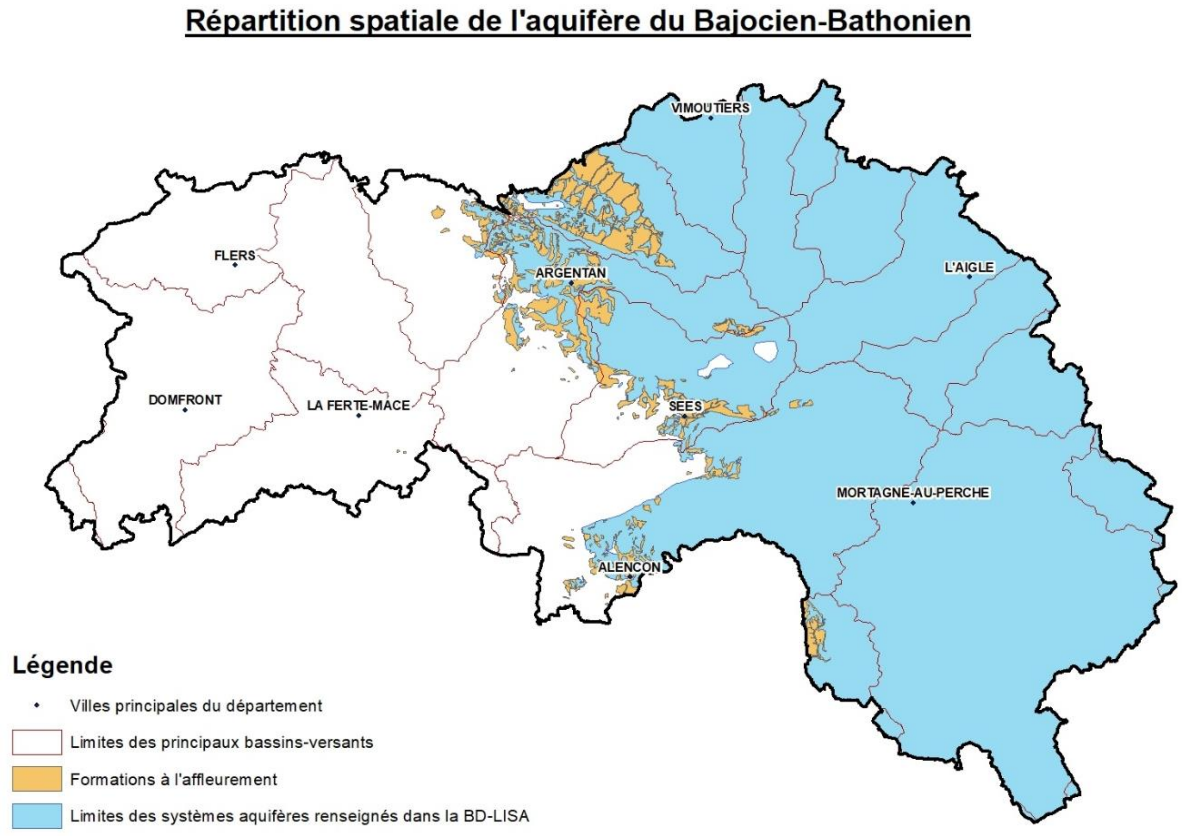


Illustration 49 : Carte d'affleurement des formations du Bajocien-Bathonien et limite de son aquifère (d'après la carte géologique harmonisée de l'Orne et la BD-LISA, niveau 3)

a) Caractéristiques générales de l'aquifère

Dans cette synthèse les éléments relatifs aux formations calcaires du Toarcien, de l'Aalénien et du Bajocien et Bathonien, constituent un seul ensemble, bien qu'il soit reconnu qu'il existe de fortes hétérogénéités lithologiques et spatiales. Par simplification, cette ressource est souvent appelée nappe des calcaires bajociens-bathoniens, les formations du Lias sont peu exploitées et donc peu connues. Le mur de cette formation est constitué des argiles toarciennes, lorsqu'elles sont présentes, ou directement par les formations du socle.

La nappe des calcaires peut être libre dans la partie ouest du territoire sur les secteurs où les formations sont affleurantes, puis semi-captive à captive vers l'est sous le recouvrement de plus en plus important des calcaires et marnes du Callovien, puis du Cénomanien (Lithologic, 2009). En effet, les marnes du Callovien protègent la nappe du Bathonien contre les pollutions de surface et peuvent rendre cette nappe captive, créant ainsi des conditions favorables à la dénitrification des eaux (Dassibat et al. 1980).

On fera remarquer que sur la zone située au centre du département les formations du Jurassique supérieur sont quasi-absentes. En effet, ces formations se biseautent rapidement à l'ouest d'une ligne passant du sud vers le nord par : Igé, Pervenchère, Laleu, Merlerault,

Croisilles. Au-delà de cette limite les formations du Crétacé reposent, le plus souvent, directement sur le Jurassique moyen (Dogger).

Dans l'ensemble, les terrains s'approfondissent et gagnent en épaisseur vers l'est, comme par exemple sur le secteur d'Alençon en direction du Mêle sur Sarthe, cf. Illustration 50.

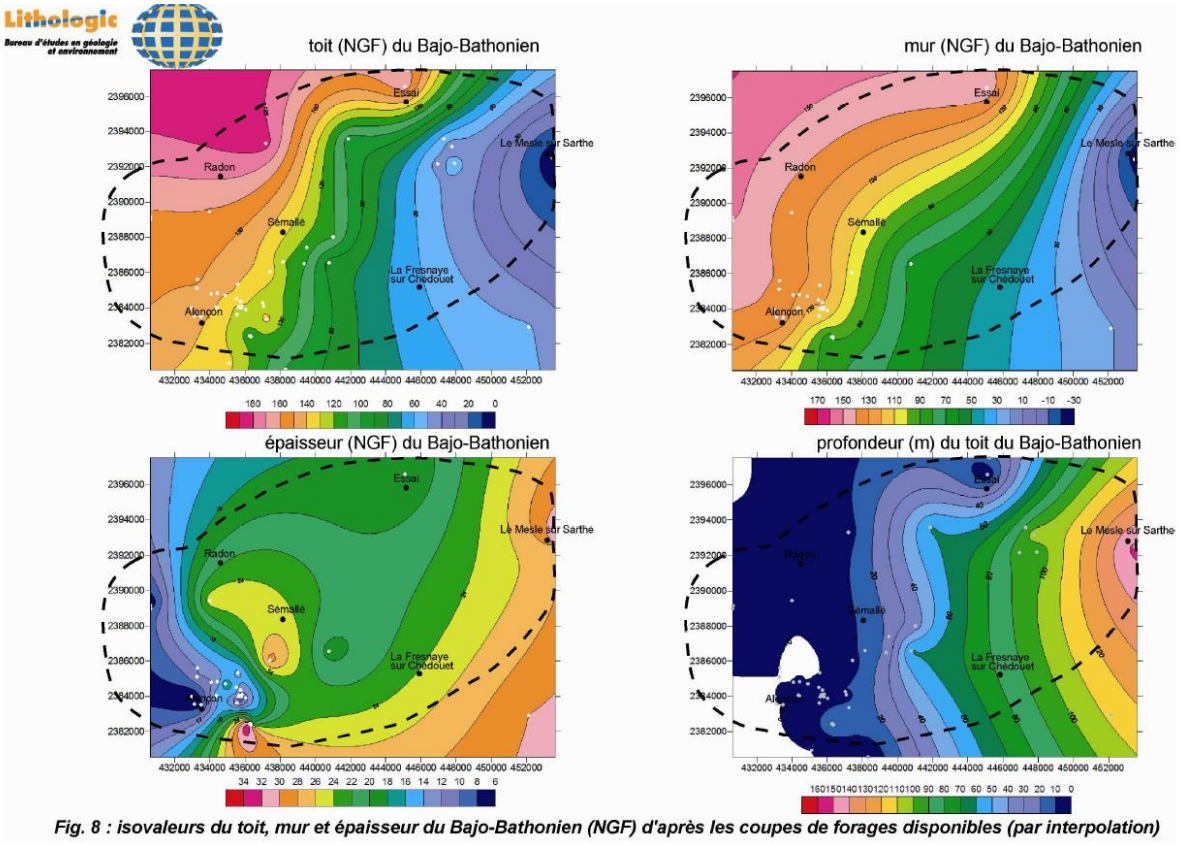


Illustration 50 : Isovaleurs du toit, mur et épaisseur des formations du Bajocien-Bathonien à l'est d'Alençon (Lithologic, 2009)

Aussi, l'exploitation des ressources en eau souterraine des calcaires bajocien-bathoniens devient difficile à mesure qu'on s'éloigne vers l'est, car il sera nécessaire de forer à des profondeurs importantes pour pouvoir atteindre et traverser ces formations profondément ennoyées sous les sédiments plus récents (> 100 m, sauf ponctuellement au niveau des failles de Courtomer, du Merlerault et du secteur de Mamers/Suré où ces formations affleurent).

A noter : sur le bassin Seine Normandie, cette ressource est couverte par une ZRE[14].

b) Ecoulements

Actuellement, il n'existe pas de carte(s) piézométrique(s) globale(s) de cette unité aquifère, permettant d'apprécier les directions et sens d'écoulement (cf. rapport BRGM/RP-69552-FR). Des données locales ont pu être utilisées, leur synthèse est reprise ci-après.

[14] Les zones de répartition des eaux (ZRE) sont définies en application de l'article R211-71 du code de l'environnement, comme des "zones présentant une insuffisance, autre qu'exceptionnelle, des ressources par rapport aux besoins".

- **Secteur de Trun**

Il n'existe pas de carte locale à notre connaissance, les éléments présentés sont extrapolés de la lecture de l'Atlas hydrogéologique numérique du Calvados (Arnaud L. et al., 2007) et de la carte de la DREAL Normandie.

Il existe donc très probablement une continuité et une similitude entre le fonctionnement hydrogéologique du secteur de Trun et la zone de Falaise (départent du Calvados) située plus à l'aval dans le bassin de la Dives.

L'écoulement général de la nappe se fait vers le nord et le nord-ouest dans l'axe de la vallée de la Dives, celle-ci sert de drain principal.

Au sud les formations viennent recouvrir la zone Bocaine constituée des terrains paléozoïques plissés. Cette zone constitue un point haut et une limite de partage des eaux (Illustration 51) entre le bassin versant de la Dives au nord et le bassin versant de l'Orne au sud. Il existe très probablement une interaction entre les bassins d'Argentan et de Trun comme le montre la figure ci-après.

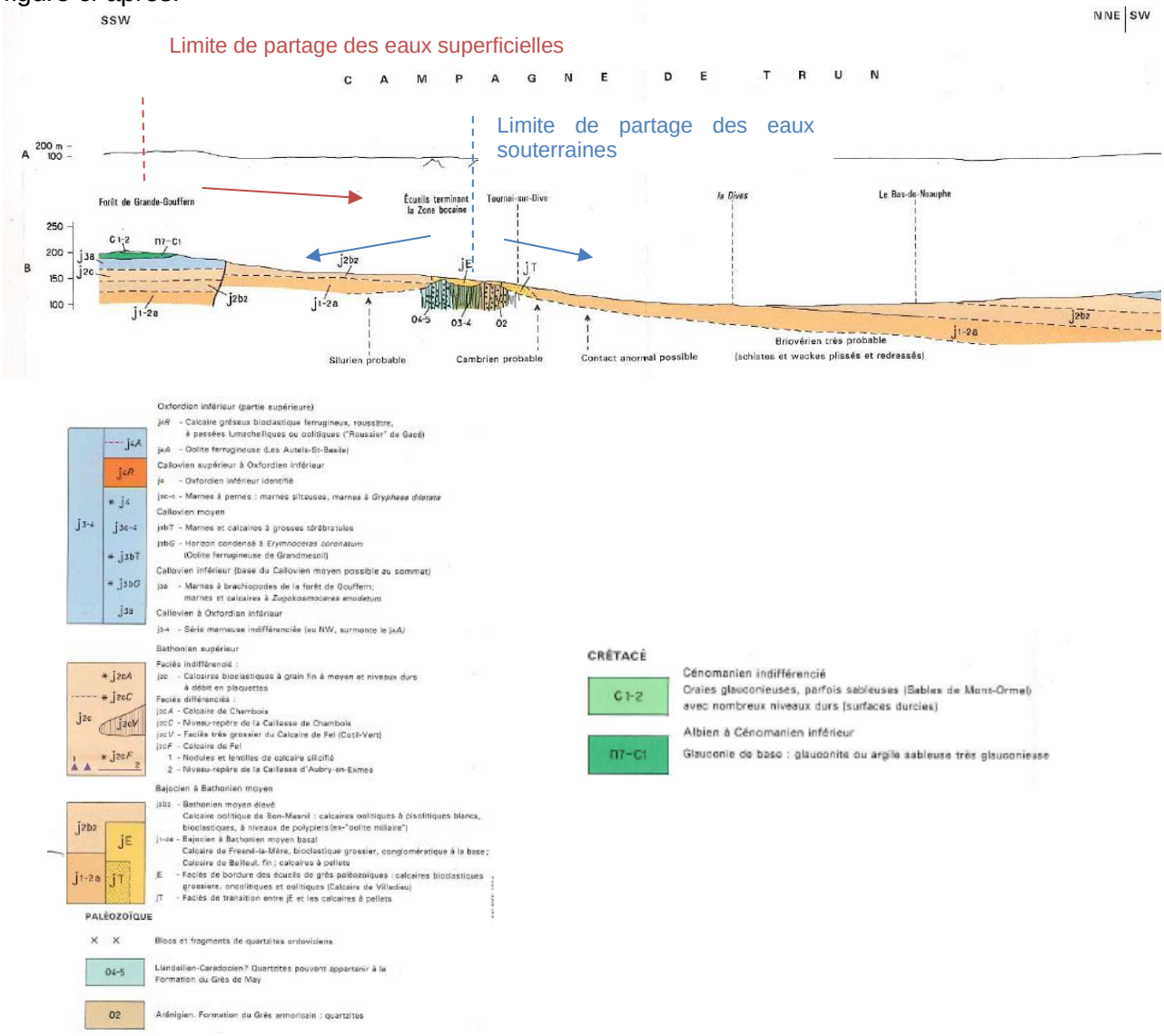


Illustration 51 : Coupe géologique de la campagne de Trun SSW – NNE et légende extraites de la carte géologique N°177 de Vimoutiers (Ménillet, 1994)

- **Secteur d'Argentan**

Au sud d'Argentan la nappe s'écoule vers le NNE ou le NNW en direction de l'Orne et de la Baize, les cours d'eau drainent la nappe et peuvent localement concentrer les directions d'écoulement autour des petits affluents.

Au nord, le secteur de la forêt de Gouffern, situé dans le prolongement de la zone bocaine, constitue un point haut de la nappe (Illustration 52). Sur ce secteur, les écoulements se font vers le sud en direction de la vallée de l'Orne.

A l'est les formations sont limitées par la flexure de Nonant-le-Pin (relief paléozoïque). Sur le secteur d'Almenêches /Nonant le Pin, les calcaires plongent légèrement vers le nord-est sous les formations marneuses calloviennes. On dispose de peu de points de suivi pour vérifier si la piézométrie suit également le plongement des couches, qui doit selon toute vraisemblance être limité à l'est par les reliefs paléozoïques.

Au nord-ouest d'Argentan, l'Houay draine la nappe vers le cœur de l'agglomération, du NW vers le SE. Ainsi, Argentan se situerait au centre d'une « cuvette » naturelle dont l'exutoire principal serait le cours de l'Orne, cf. Illustration 53. Des échanges sont possibles avec le bassin de Trun situé plus au nord.

Ces éléments sont décrits notamment dans l'étude Pivette et Baumann (2001) et dans l'étude Dassibat et Pascaud (1975). Ce que ces études générales ne montrent pas c'est l'influence locale des accidents majeurs ou secondaires sur la piézométrie.

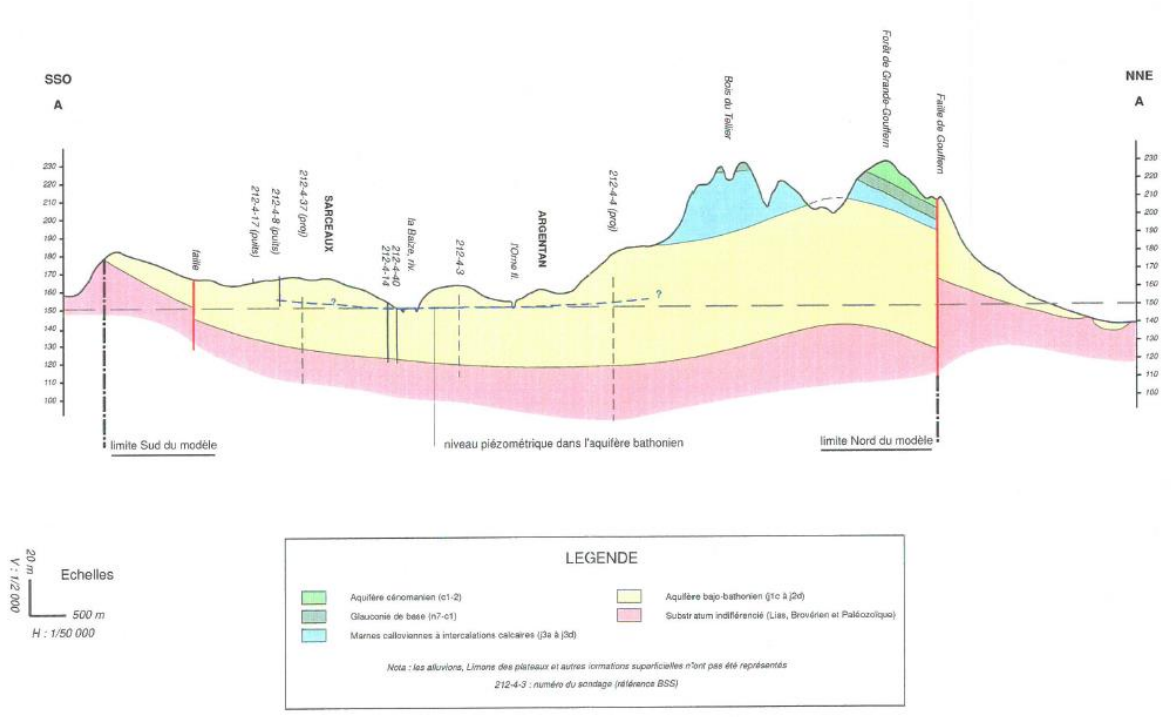


Illustration 52 : Coupe schématique de la « cuvette » d'Argentan (Pivette et Baumann, 1999)

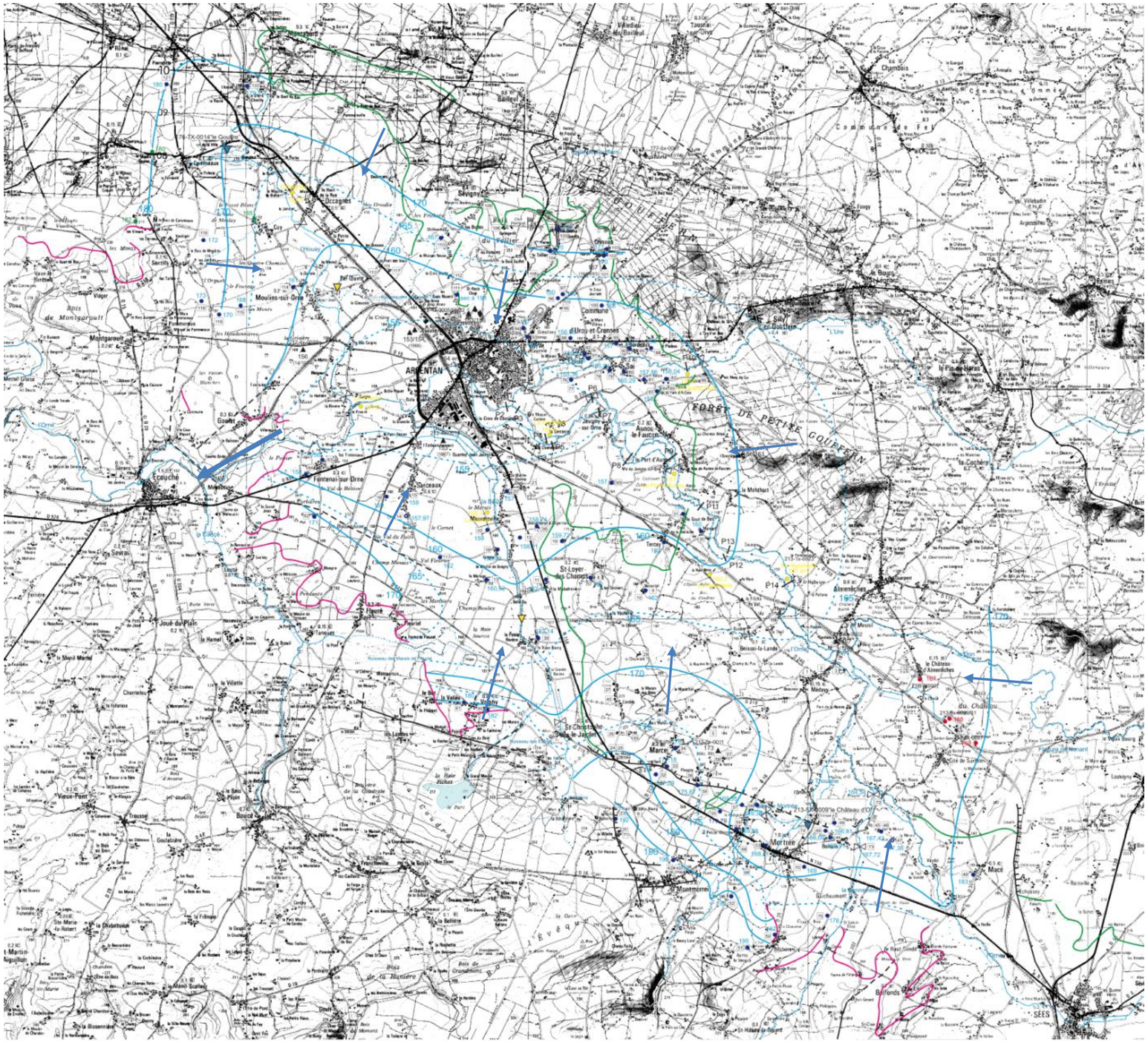


Illustration 53 : Piézométrie de la Région d'Argentan en 1999, Pivette et Baumann (2001), modifié.
Les flèches matérialisent les sens d'écoulements

- **Secteur de Sées**

Sur le secteur de Sées, les esquisses piézométriques semblent démontrer que la nappe des calcaires alimente les cours d'eau. Aussi, le cours de l'Orne et ses affluents drainent la nappe vers l'ouest et le nord-ouest.

La faille de Moulin de la marche, d'axe NNW-SSE jouerait ici un rôle de drain, qui n'est pas mis en évidence dans l'Illustration 54 suivante.

La zone de Chailloué, au nord de Sées, constituerait un point haut de la nappe (dôme piézométrique) d'après (Dassibat et Pascaud, 1975), information tirée de la piézométrie de 1974.

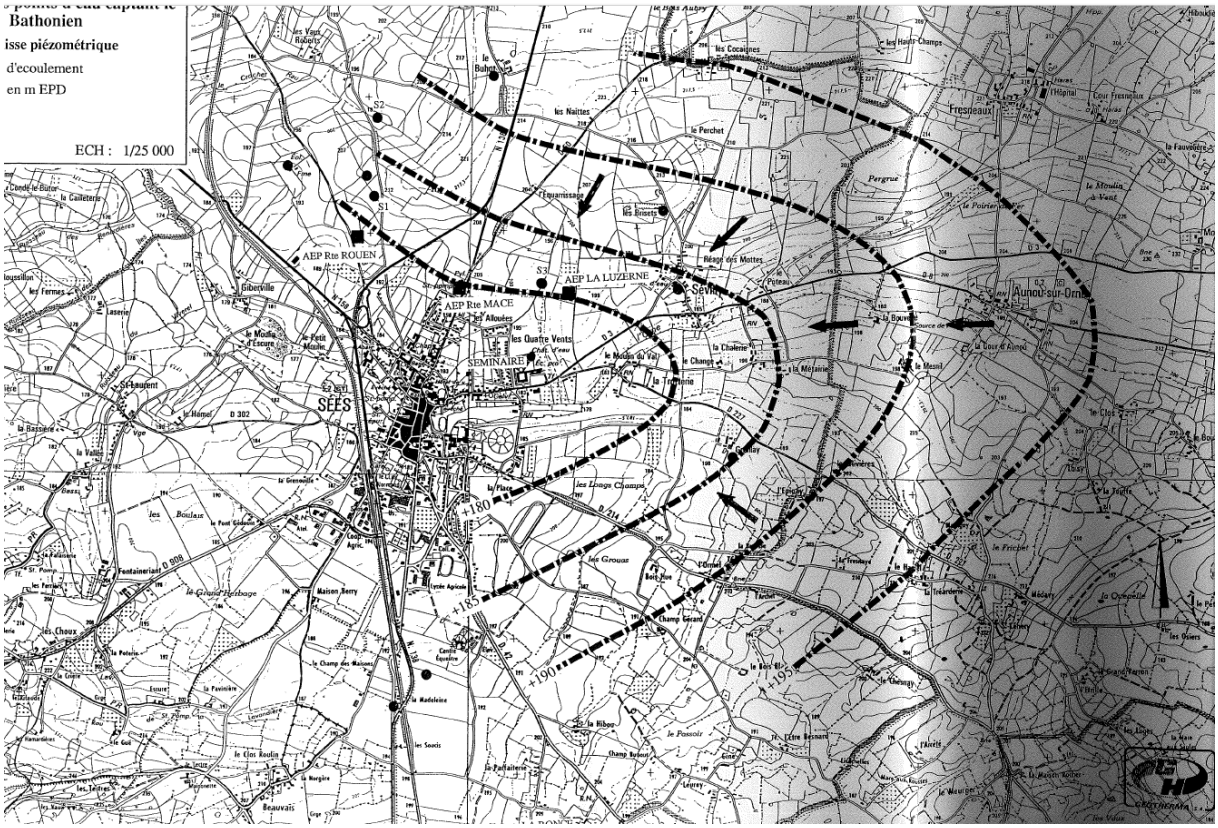


Illustration 54 : Esquisse piézométrique du secteur de Sées. Géotherma, 1993

Il est à noter que les sources de l'Orne seraient, *a priori*, issues du débordement de la nappe du Bathonien au niveau d'un contact faillé avec les marnes calloviennes (Geotherma, 1993), vers Aunou-sur-Orne, à l'est de Sées.

- **Secteur d'Alençon**

Sur le secteur du Mêle-sur-Sarthe, on observe une limite piézométrique (point haut, cf. Illustration 55). Celle-ci aurait une origine structurale (faille de socle ou flexure séparant deux compartiments distincts - élément non vérifié dans le volet géologique de l'étude (Lithologic, 2009 et dans le rapport d'étude RP-69292-FR)).

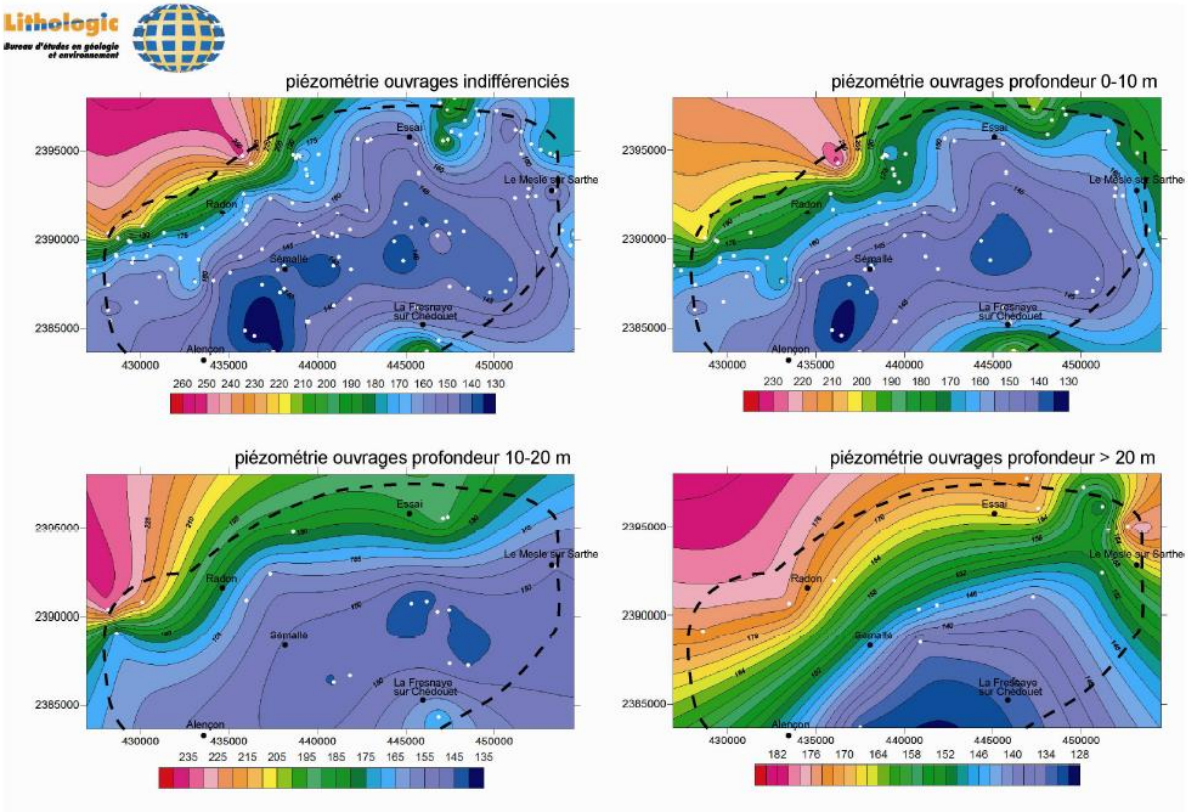


Illustration 55 : Isopièzes de la nappe des calcaires bajociens-bahtoniens du secteur nord-est d'Alençon (Lithologic, 2009)

- **Autres secteurs**

Pour les secteurs énumérés ci-après, il n'existe pas à notre connaissance d'éléments bibliographiques locaux traitant de la piézométrie.

Nonant-le-Pin : une nappe existe dans les calcaires fissurés bathoniens qui affleurent localement. Celle-ci serait en équilibre avec le niveau des cours d'eau (la Dieuge notamment). Selon toute vraisemblance, un drainage local de la nappe doit donc s'effectuer vers l'ouest ou le sud-ouest. On rappelle que la zone d'affleurement des calcaires est limitée sur ce secteur entre la faille du Merlerault et la Flexure de Nonant-le-Pin.

Courtomer : dans ce secteur, l'aquifère bathonien est constitué de calcaires grenus, il est présent en affleurement sur un faible secteur. Une source avait été captée pour l'alimentation en eau potable (BSS N°2145X0032), mais sa faible productivité associée à la condition de nappe libre, sans protection et donc très vulnérable, ont entraîné son abandon (Ménillet et al. 1998).

L'écoulement pourrait localement se faire le long de la faille de Courtomer, a priori vers l'Est ou dans le sens de plongement des couches, vers le NE.

Mamers (Sarthe) : sur ce secteur, les calcaires sont adossés au massif de Perseigne. Ce dernier constitue un point haut à partir duquel les écoulements sont dirigés vers le sud-sud-est. L'Orne Saosnoise draine la nappe.

Il existe peu de données sur l'aquifère bajocien-bathonien sous recouvrement des formations callovo-oxfordiennes, les calcaires sont profondément ennoyés sous les marnes. L'écoulement général de la nappe suit probablement le pendage des couches vers le nord.

Secteur du Perche : La coupe départementale N°3, réalisée dans le volet 1 de l'étude (Illustration 56), montre que les pendages des formations sont orientés de part et d'autre de l'éperon du Perche, cette zone constituant la limite de partage des eaux : au nord des failles de Bellême et Mortagne les écoulements se font probablement vers le nord-est, au Sud de ces accidents les écoulements se font probablement vers le sud-est.

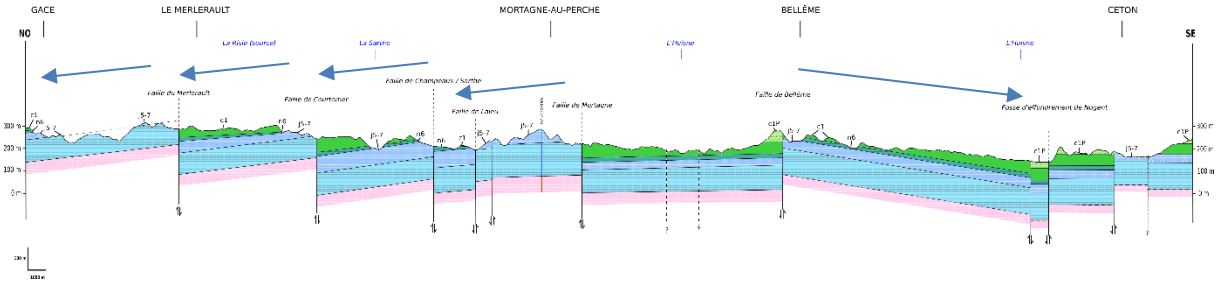


Illustration 56 : Coupe schématique entre Gacé et Céton, Meire et al. 2019, RP-69292-FR, volet géologique, modifié : les flèches bleues matérialisent le sens d'écoulement supposé dans les calcaires bajociens-bathoniens représentés en rose

Important : Les failles de Champeau-sur-Sarthe, Courtomer, Merlerault, Nogent… mettent en contact les calcaires bajociens-bathoniens avec les marnes calloviennes. En conséquence celles-ci doivent vraisemblablement bloquer l'écoulement régional ou tout du moins le contraindre, il existe donc très probablement des écoulements le long de ces failles majeures. L'absence de mesures de part et d'autre de ces objets structuraux ne permet pas actuellement de le démontrer.

Des circulations ascendantes sont également possibles le long des principaux axes faillés. La nappe des calcaires, captive et sous pression, pourrait remonter à la surface le long de ces discontinuités pour se mélanger aux eaux des nappes sus-jacentes de l'Oxfordien et du Cénomanien. L'outil géochimique peut s'avérer précieux dans ce cas pour démontrer cette hypothèse.

c) Fluctuation du niveau des nappes

La profondeur de la nappe est très variable dans la zone d'affleurement des calcaires : de quelques mètres sous la surface du sol (nappe sub-affleurante) à plus d'une dizaine de mètres sur les zones de relief comme sur le secteur de Nonant-le-Pin ou de Rônai par exemple.

Les informations disponibles ne montrent pas de variations importantes de niveaux. Celles-ci resteraient généralement < 10 m sous les plateaux et reliefs entre les situations de hautes et basses eaux et ne dépasseraient pas 4 à 5 m en vallée ou dans un thalweg. Sous couverture, les variations de la nappe captive sont très faibles et restent, le plus souvent, inférieures au mètre.

Cet aquifère fait partiellement l'objet d'un suivi en continu des niveaux piézométriques, cf. chapitre 6.

d) Paramètres hydrodynamiques et productivité

Il s'agit de l'aquifère principal de la zone d'étude et celui capté pour l'alimentation en eau potable par les différents ouvrages exploités ou de reconnaissance en vue de leur future exploitation. La nappe est contenue dans les calcaires et la productivité dépend du couple nature des calcaires/fracturation ; en effet l'aquifère sera d'autant plus développé dans les calcaires lorsqu'ils sont ± sableux et intensément fracturés permettant un bon emmagasinement et un écoulement facilité (Lithologic, 2009). Il semblerait également qu'au contact du socle, les calcaires présentent des comportements hydrodynamiques différents car plus grossiers et mieux cimentés.

Les débits instantanés à la foration et les débits de production peuvent être très variables d'un secteur à un autre (de moins de 10 m^3/h à plus 200 m^3/h), en fonction du contexte. D'après la bibliographie il semble que les critères suivants soient prédominants pour une zone de production favorable :

- calcaire grossier ou sableux,
- se trouver dans une zone de drainage de la nappe,
- présence de calcaires fissurés ou fracturés, proximité d'une zone de faille ou de décompression ou encore du gelifract,
- l'altération et les dissolutions, jusqu'à la formation de conduits karstiques parfois,
- dépression topographique,
- proximité des cours d'eau.

Quand les calcaires sont situés sur les plateaux, la fissuration mécanique y est généralement plus faible et les transmissivités sont de l'ordre de 10^{-5} à 10^{-3} m^2/s. Les débits y dépassent rarement la dizaine de m^3/h (Dassibat et al., 2009).

Dans les vallées sèches ou humides, la fracturation y est plus intense et les phénomènes de dissolution plus actifs. Les transmissivités sont comprises entre 10^{-3} et 10^{-1} m^2/s. Les débits exploités sont fréquemment supérieurs à 100 m^3/h.

Ouvrage	Transmissivité (m^2/s)	Coef. Emmagasinement (S)
Forage Le Mèle sur Sarthe	$2{,}1\ 10^{-4}$	
Forage des Périgaux	$1\ 10^{-3}$	4 à $5\ 10^{-2}$
Forage du Gué	$2\ 10^{-2}$	
Forage du Clos Henri	1 à $4\ 10^{-3}$	$2\ 10^{-5}$
Forages Courteille	$8\ 10^{-3}$ à $1{,}2\ 10^{-2}$	
Forage Sente des Requêtes	$6{,}2\ 10^{-3}$	
Forages Briante-Launay	$1\ 10^{-3}$ à $4\ 10^{-4}$	
Forages Champfleur	$2\ 10^{-3}$	
Forage Le Chevain	$1{,}5\ 10^{-2}$	

Illustration 57 : Caractéristiques hydrodynamiques de quelques ouvrages captant les formations du Bajocien-Bathonien sur le secteur d'Alençon (Lithologic, 2009)

Les transmissivités et l'emmagasinement sont moins importants lorsque l'aquifère devient captif, notamment à l'Est du territoire sous le recouvrement des calcaires et marnes du Callovien (Dassibat et al., 1980).

Une analyse statistique de l'ensemble des données bancarisées est fournie au chapitre 1, nous invitons le lecteur à s'y reporter pour plus de détails.

e) Relation avec les cours d'eau

Vers l'Est, aussi bien sur le secteur d'Argentan que d'Alençon, les calcaires bajociens et bathoniens sont recouverts par les formations marno-calcaires du Callovien qui deviennent de plus en plus épaisses. Celles-ci isolent l'aquifère des calcaires du réseau hydrographique sus-jacent (Pivette consultant, 1999).

Sur les secteurs où la nappe est libre, les cours d'eau peuvent constituer dans certains cas une limite d'alimentation. Les échanges sont alors plus directs entre la rivière et sa nappe d'accompagnement contenue dans les alluvions et la nappe des calcaires. Ces situations particulières doivent être étudiées au moment des études d'incidences des prélèvements, afin que l'équilibre d'alimentation entre les eaux souterraines et superficielles ne soit pas perturbé.

Au Nord-Est d'Alençon, il semblerait que sur certains tronçons ce soit la rivière (la Sarthe) qui alimente la nappe. Toutefois, les données à notre disposition ne sont pas suffisamment précises pour pouvoir l'affirmer. Il s'agit donc d'un point de vigilance.

f) Karst

- **Secteur d'Argentan**

Dassibat et al. (1980) indiquent que les pompages réalisés autour d'Argentan ont révélé une très bonne transmissivité dans les calcaires du Bathonien. Les coupes disponibles indiquent même la présence d'indices karstiques, en particulier vers la base de l'Aquifère. B.Lemoine (1990) signale dans sa synthèse sur les recherches en eaux du secteur de Mortrées (sud d'Argentan) qu'en forage il a été rencontré des pertes d'air et des vides importants provoquant la chute de l'outil (Illustration 58).

Des circulations du même type peuvent exister également sur le secteur de Trun-Chambois. L'une des explications plausibles pour le développement du karst, au contact des régions de socle, peut notamment s'expliquer par une acidité plus importante des eaux qui y circulent.

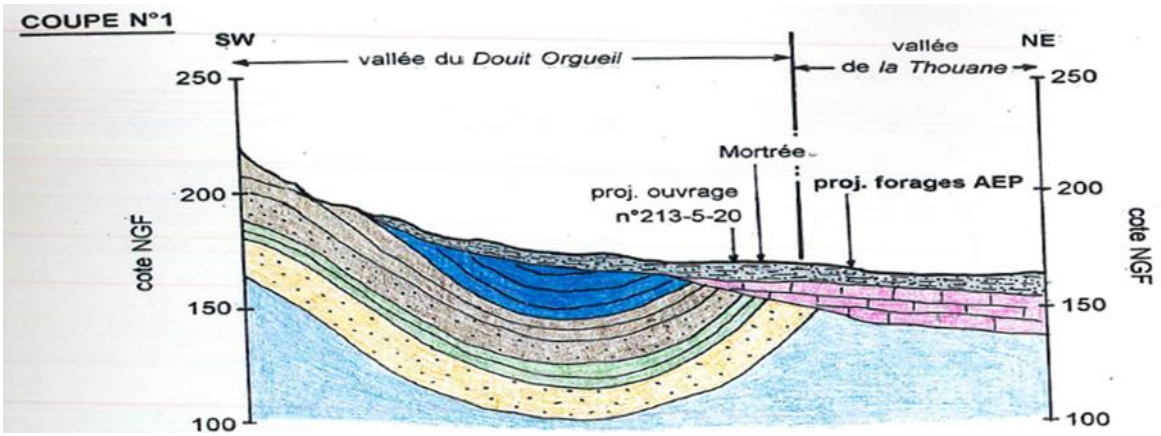


Illustration 58 : Coupe schématique des environs de Mortrée (Pierson, 2002) Il est probable qu'un réseau karstique de type binaire se développe au contact entre les formations anciennes du Paléozoïque et les terrains calcaires du Jurassique

Rodet (2011) a pu faire la description de l'un de ces indices : la Grotte des Monts à Sentilly (7 km au NW d'Argentan). Cette description est reprise en partie ci-dessous pour illustrer la possible existence de réseaux karstiques dans ces formations.

« Il s'agit d'une cavité au développement modeste dont la topographie a été relevée et remise au Conseil Général de l'Orne.

Son étude karstologique révèle une évolution complexe, avec notamment, l'installation d'un chenal de voûte ample (de l'ordre d'un mètre de large) et l'élaboration d'une cheminée d'équilibre de plus de 2 m de hauteur, éléments correspondant à des phases d'ennoiement mais aussi une phase d'assèchement de la cavité, soulignant des dynamiques hydrologiques variées.

L'incision basale dans le comblement terrigène souligne une phase d'abaissement du niveau de base. Cet élément pourrait souligner une incidence du creusement de la vallée de l'Orne, toute proche » (cf. Illustration 59*).*



Dans l'aval du collecteur : chenal à la voûte et entaille du sol encombré d'éboulis. Cliché J. Rodet.

Illustration 59 : Vue du collecteur fossile aujourd'hui en partie comblé et de l'incision basale, Grotte de Monts à Sentilly (J.Rodet, 2011).

*Il s'agit d'une cavité ancienne, très évoluée karstologiquement, mais aujourd'hui fossile, et isolée dans le haut d'une colline. Il s'agit donc d'un paléokarst. Tout autour, se développe un ensemble de dépressions dont plusieurs, assurément, sont des dolines d'effondrement ponctuant le développement du réseau karstique (*Illustration 60*).*



Front de taille montrant les sables pliensbachiens surmontés par le calcaire bioclastique bajocien (© J. Avoine)



Paysage de dolines sue le site 2 (© J. Avoine)

Illustration 60 : Rare affleurement de sables pliensbachiens, équivalents latéraux de la formation des Grès de Sainte-Opportune, surmontés par les calcaires bajo-bathoniens du site 1 (ancienne carrière de sables). Paysage de dolines sur le site 2 montrant le développement karstique. Association du Patrimoine Géologique de Normandie, J.Avoine pour DREAL Normandie, 2012

- **Secteur d'Alençon**

Des études menées le long du contact faillé au nord d'Alençon entre les calcaires et le socle du massif d'Ecouves ont démontré que l'eau en provenance du massif paléozoïque contribuait à alimenter la nappe des calcaires au travers la zone fracturée. Des zones d'engouffrement (dolines, perte, bétoires…) sont répertoriées à proximité du contact. Ces circulations ont entrainé la formation d'un système karstique dans les calcaires (Lithologic, 2009). Des opérations de traçages ont permis de mettre en évidence l'existence d'un système particulièrement développé entre des pertes et leurs exutoires (à noter la présence de nombreuses sources karstiques, comme celle du Sourtoir à Semallé). Le secteur de Radon Vingt-Hanaps est le plus connu dans ce secteur (Illustration 61 et Illustration 62).

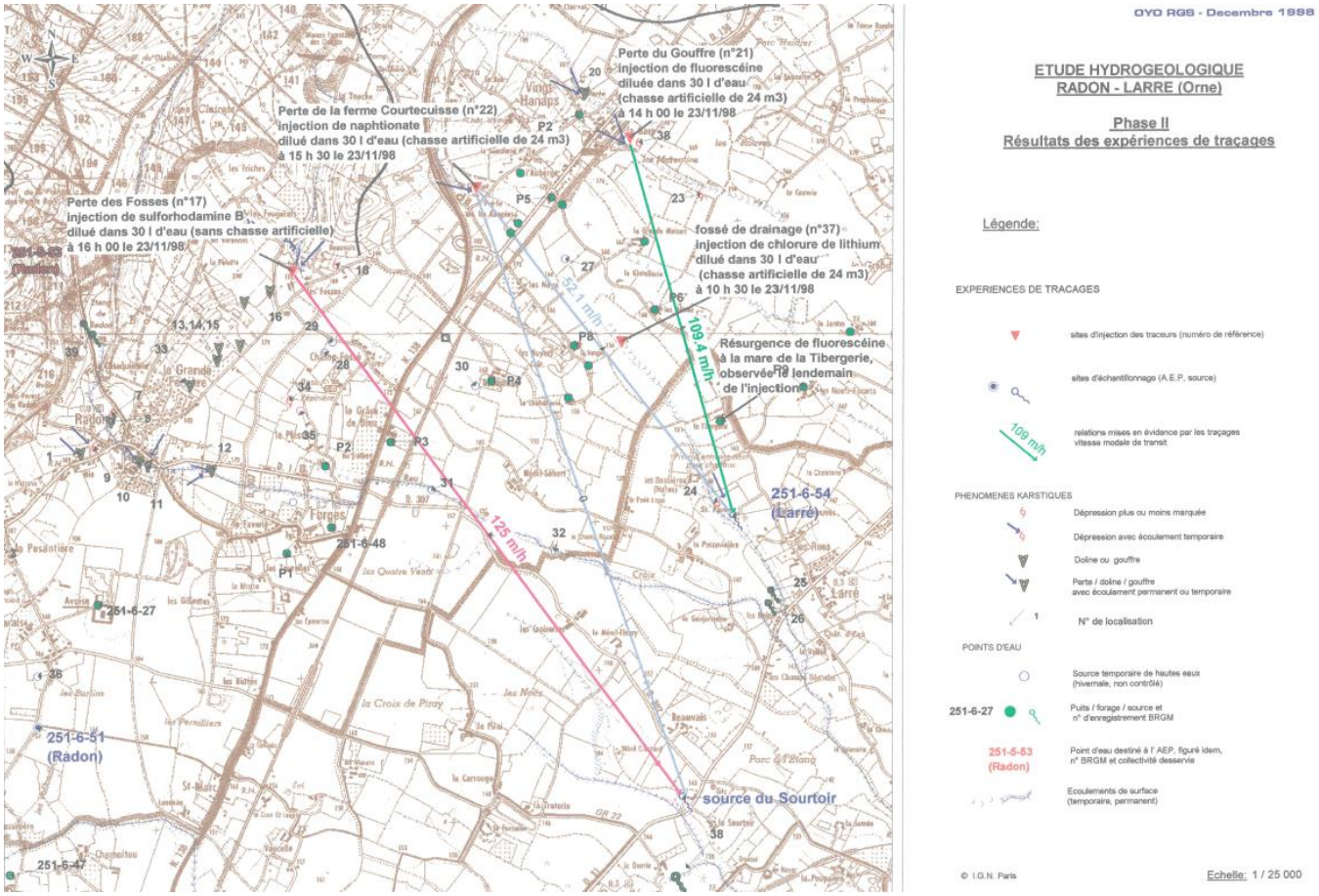


Illustration 61 : Traçages réalisés dans le secteur de Radon – Vingt-Hanaps, Oyo RGS (1998)



Illustration 62 : Résurgence du Sourtoir à Semallé
(http://bernard.langellier.pagesperso-orange.fr/resurgences.html)

Ces circulations peuvent avoir une incidence notable sur la piézométrie et l'écoulement des eaux (perturbation, mise en évidence de zones de drainage, etc…). En tout état de cause, elles mettent en contact rapide les eaux de surface avec les eaux souterraines (vitesse d'écoulement de l'ordre de 100 m/h), ce qui peut poser un problème de vulnérabilité et de protection des ressources. L'évaluation de ces dernières passent par la nécessaire prise en compte de l'ensemble des bassins versants qui contribuent à l'alimentation de ces ressources.

g) Conditions d'alimentation et de recharge

L'alimentation de cette nappe peut s'effectuer de la façon suivante (Pivette, (1999) ; Lithologic, (2009) ; cf. Illustration 63) :

- Par infiltration directe des précipitations via la zone d'affleurement, là où la nappe est libre. La surface d'affleurement de ces formations est estimée à 230 km² ce qui est modeste à l'échelle du département.
- Par drainance à travers le Callovien, dans la zone où la nappe est captive (dans la zone intermédiaire à faible recouvrement où la nappe est semi-captive, il y aurait combinaison entre infiltration et drainance).
- Via le socle :
  - la circulation superficielle (ruissellement et sources) vers les bassins sédimentaires contribue à l'alimentation directe de la nappe par infiltration ou engouffrement dans des zones de fractures parfois karstifiées (exemple Vingt-Hanaps) ;
  - à proximité des contacts faillés ou non, par alimentation ascendante.
    On trouve notamment des traces d'antimoine dans les eaux sur le secteur de Mortrée, cet élément pourrait être le marqueur d'une relation entre la nappe des calcaires bathoniens et le socle, sous-jacent. L'outil géochimique peut alors être une aide précieuse pour mettre en évidence l'existence de tels phénomènes.
- Via les échanges (infiltration et drainance) au travers des alluvions dans les vallées alluviales. Dans ce cas, ce n'est pas la rivière proprement dite qui alimente la nappe mais sa nappe d'accompagnement alluvionnaire.

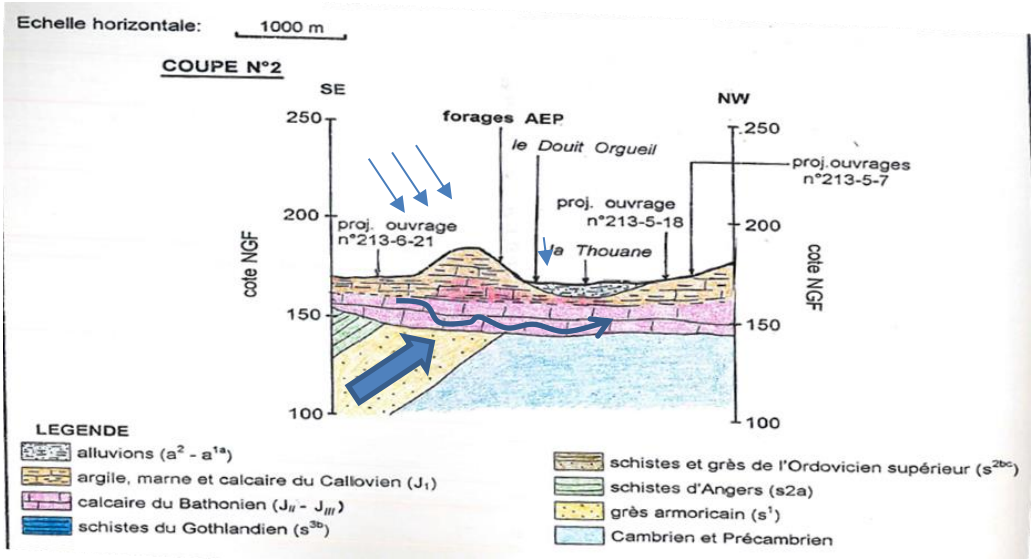


Illustration 63 : Exemple de différents modes d'alimentation des calcaires bathoniens flèches bleues, (Pierson, 2002), modifié

En fonction des auteurs, les pluies efficaces sont estimées entre 120 et 190 mm/an (la part d'infiltration ou de ruissellement n'est pas précisée). A l'échelle du département, la surface d'affleurement pouvant infiltrer librement les pluies efficaces est estimée à 230 km² d'après la carte géologique harmonisée, ce qui est relativement modeste.

4.3.2. Aquifères des formations oxfordiennes

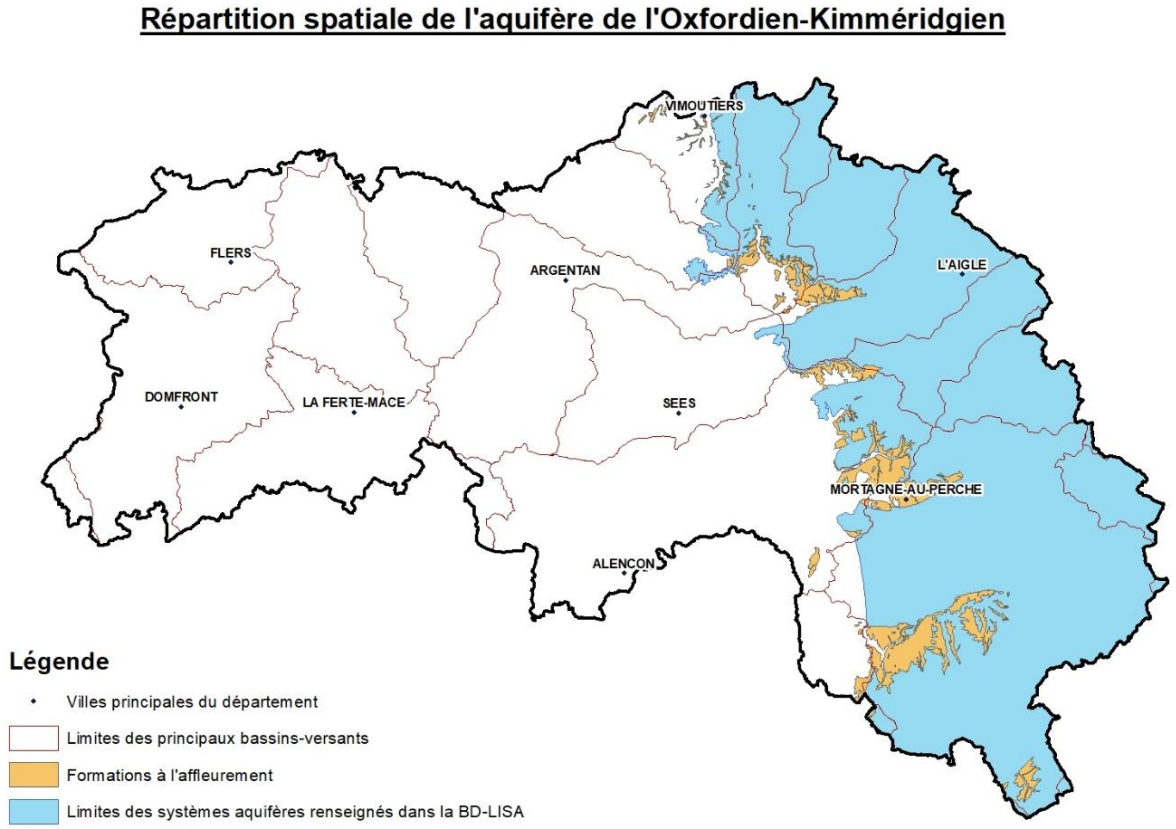


Illustration 64 : Carte d'affleurement des formations de l'Oxfordien-Kimméridgien et limite de son aquifère (d'après la carte géologique harmonisée de l'Orne et la BD-LISA, niveau 3)

a) Caractéristiques générales de l'aquifère

Les formations géologiques de l'ensemble des « calcaires et sables de l'Oxfordien – Kimméridgien » sont constituées de différentes unités lithologiques superposées et variant latéralement dont le dépôt a été conditionné par le jeu des failles au Mésozoïque (aquifère très compartimenté). Le mur de cet ensemble aquifère est constitué par les marnes à pernes (imperméable).

Globalement on trouve principalement ces formations à l'affleurement sur la bordure de la zone de cuesta à l'est du département.

Chaque sous-ensemble est décrit ci-dessous des formations les plus anciennes aux plus récentes.

- **Roussier de Gacé – Sables de Mortagne**

A la base de l'ensemble Oxfordien on retrouve un ensemble sableux constitué principalement par le Roussier de Gacé et les sables de Mortagne. L'épaisseur de cet ensemble varie de 10 à 30 m en s'épaississant globalement vers l'est (Meire et al. 2019).

L'aquifère est libre à captif sous les alluvions dans les vallées et captif sous les formations crayeuses et la glauconie de base sur les plateaux ou les niveaux marneux des formations calcaires oxfordiennes. La captivité de l'aquifère se traduit par une dénitrification et la présence de fer notamment dans les eaux.

- **Grouais – Calcaires du Bellêmois – Calcaires coralligènes**

Les calcaires oolithiques et coquillers de la formation de Grouais – Calcaires du Bêllemois – Calcaires corallien de Mortagne se biseautent vers l'ouest sous la glauconie de base. De manière générale, la géométrie de cette série carbonatée gagne en puissance vers l'est du département où elle passe de 10 à 50 m d'épaisseur environ (Meire et al. 2019).

L'aquifère est limité au toit par des argiles glauconieuses. La nappe est captive (présence de fer / absence de nitrates). Les ouvrages peuvent être artésiens en fonction des conditions d'affleurement où dans lesquelles les formations ont été rencontrées en forage (Aster, 1992).

- **Sables et grès de l'Ormoie et calcaires à astartes**

Cet ensemble est constitué de sables fins et de formations argilo-calcaires (Lemoine, 1994).

L'épaisseur des Sables et grès de l'Ormoie n'est que de 1 à 2 m seulement vers l'Ormoie et augmente vers l'est en direction de Nogent-le-Rotrou, de Mamers, Mortagne-au-Perche et La Loupe pour atteindre une dizaine de mètres. Les Sables de Glos, passage latéral des sables et grès de l'Ormoie, ne sont pas connus sur le secteur de Vimoutiers, au nord du département (Meire et al., 2019).

Ce petit ensemble peut être captif sous les bancs marneux des calcaires à Astartes (Aster, 1992).

L'épaisseur de la formation des calcaires à Astartes augmente vers le sud-est. Elle varie d'une dizaine de mètres sur Vimoutiers et jusqu'à 40 m vers Mortagne-au-Perche et Mamers.

La nappe des calcaires est captive sous la glauconie de base. De la même manière, les conditions sont favorables à la dénitrification et donc à la présence de fer.

Chaque ensemble lithologique peut constituer un petit aquifère plus ou moins indépendant des autres (réservoirs discontinus) comme le montre l'Illustration 65 suivante.

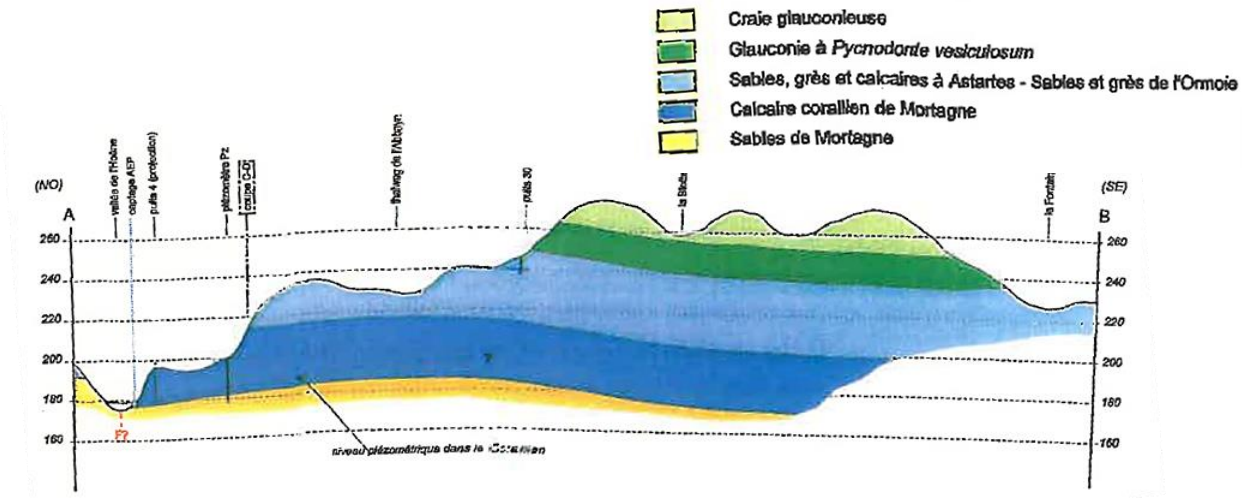


Illustration 65 : Coupe hydrogéologique schématique du secteur de Mortagne au Perche montrant l'existence de niveaux individualisés dans les différentes formations lithologiques de l'Oxfordien : calcaires coralliens de Mortagne et Sables et grès de l'Ormoie (Pivette consultant, 2006)

b) Ecoulements

Actuellement, il n'existe pas de carte(s) piézométrique(s) globale(s) de ces unités aquifères, permettant d'apprécier les directions et sens d'écoulement (cf. rapport BRGM/RP-69552-FR). Seules quelques données locales ont pu être utilisées pour établir cette synthèse.

- **Secteur du Pays d'Auge**

Sur ce secteur, la nappe est globalement drainée par les vallées et les cours d'eau. L'écoulement général de la nappe est donc a priori orienté vers le nord ou le nord-est comme la nappe de la craie (Illustration 66). Localement les écoulements sont dirigés vers le centre de la vallée (d'est en ouest en rive gauche et vice versa).

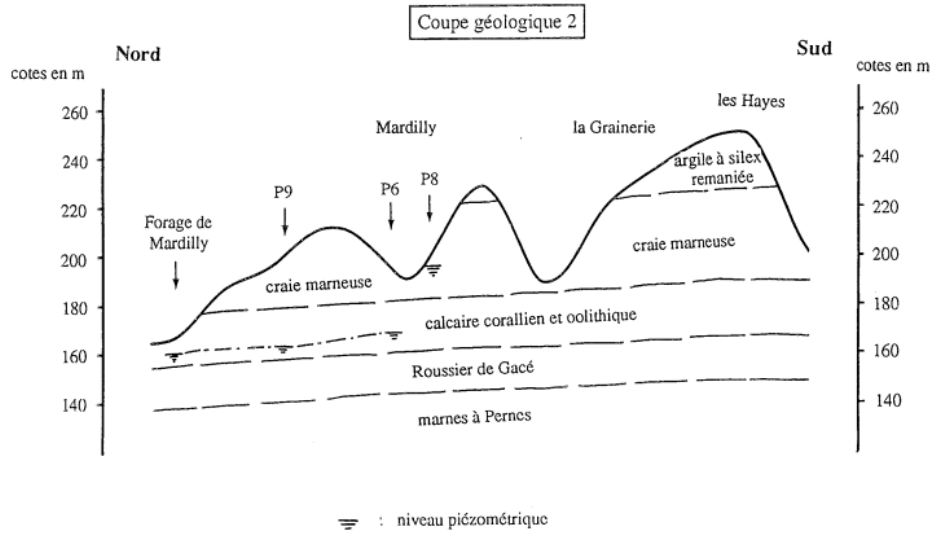


Illustration 66 : Coupe hydrogéologique schématique du secteur de Mardilly au Nord de Gacé, Safege 1993 in Aster 1993

Le gradient hydraulique est faible, de 3 à 4 pour mille dans la vallée de la Touques pour la nappe contenue dans le Roussier de Gacé (SAFEGE, 1991).

- **Secteur de Mortagne**

Les nappes de la craie et oxfordiennes sont séparées par la formation de la glauconie de base qui assure une relative imperméabilité entre les deux formations. Sur ce secteur, il est attesté d'une intense fracturation affectant l'ensemble des formations mais dont une grande majorité semble colmatée (Lemoine, 1994).

Une circulation verticale entre les compartiments sus-jacents semble être attestée par la présence de conduits comblés de sables ou de silts glauconieux qui pourraient provenir du lessivage des horizons crétacés. Si ces liaisons sont confirmées alors il pourrait exister une communication entre les deux aquifères via ces réseaux karstiques (non démontré à ce jour notamment par opérations de traçages). Si cette hypothèse se confirmait, ce ne serait pas sans poser des problèmes pour la vulnérabilité et la protection des ressources exploitées dans cet aquifère.

La circulation horizontale s'effectue selon toute vraisemblance dans le sens de celui de l'aquifère de la craie, vers l'ouest ou l'est (limite de deux bassins versants : la Sarthe et l'Huisne). Les axes de fracturation constituent des zones de faiblesses par lesquelles se font les écoulements et le drainage de l'aquifère (SAFEGE, 1997).

- **Secteur de l'Huisne**

Sur ce secteur, la nappe présente un écoulement souterrain de direction générale du nord vers le sud, sud-est en direction de la vallée de l'Huisne (cf. Illustration 68 - Pivette, 2011) ; l'Huisne draine *a priori* la nappe. Le gradient moyen de la nappe est de l'ordre de 1,3%.

Au nord-ouest la limite de l'aquifère est constituée par la zone d'affleurement des formations (limite de cuesta), cette zone constituerait un point haut de la nappe.

Au Nord, la faille de Bellême et le fossé d'effondrement de l'Huisne à l'Est de Nogent le Rotrou semblent jouer le rôle de limites étanches et bloqueraient les écoulements : faille étanche ou mise en contact de formations aux propriétés différentes (cf. coupes Gacé-Céton et Mamers-Crulai du volet géologique RP-69292-FR Meire et al., 2019).

Sur le secteur de Bellême, la surface piézométrique est interceptée au pied de la forêt du Perche par la surface topographique ce qui provoque l'apparition d'une ligne de sources de direction N100. L'existence de sources semble indiquer la présence plus au Nord d'un joint hydraulique développé sur une faille. Les eaux issues des sources s'infiltrent ensuite rapidement à la faveur d'un réseau karstique développé dans la craie Cénomanienne (Pivette, 2004, cf. Illustration 67).

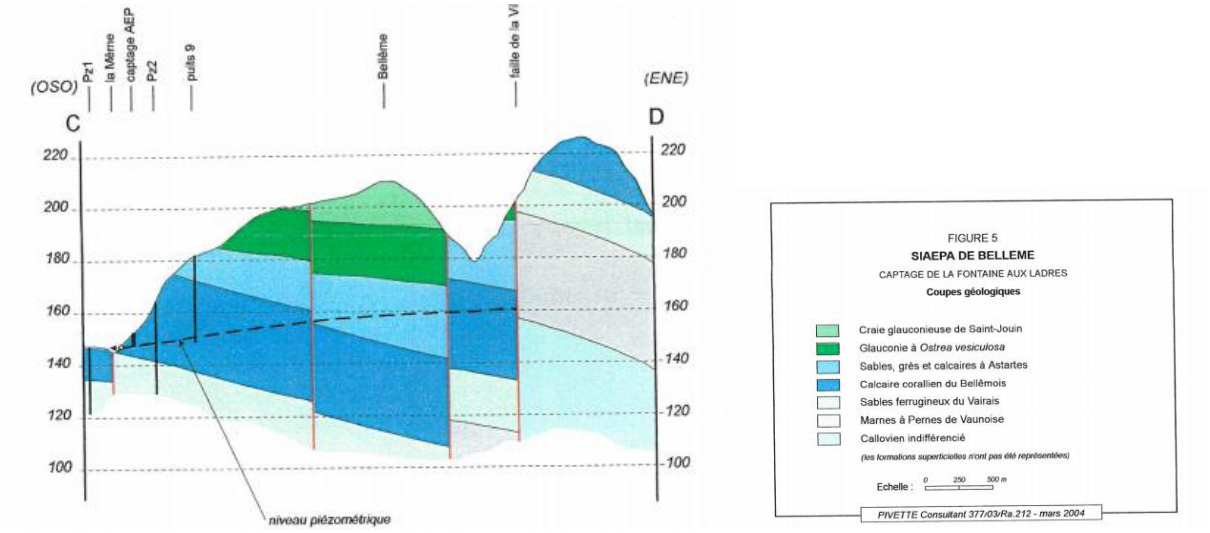


Illustration 67 : Coupe schématique représentant le niveau piézométrique au niveau de la faille de Bellême (Pivette Consultant, 2004). Un réseau karstique se développerait dans les formations du Crétacé

Des traçages réalisés dans le secteur de Sérigny au sud de Bellême (Lemoine, 1997) montrent une vitesse de circulation dans un milieu fracturé de l'ordre de 20 m/h. Cette vitesse, très moyenne, ne semble pas indiquer la présence de conduits karstiques importants. Ces derniers, lorsqu'ils sont développés, peuvent engendrer des circulations rapides de plusieurs centaines de mètres par heure.

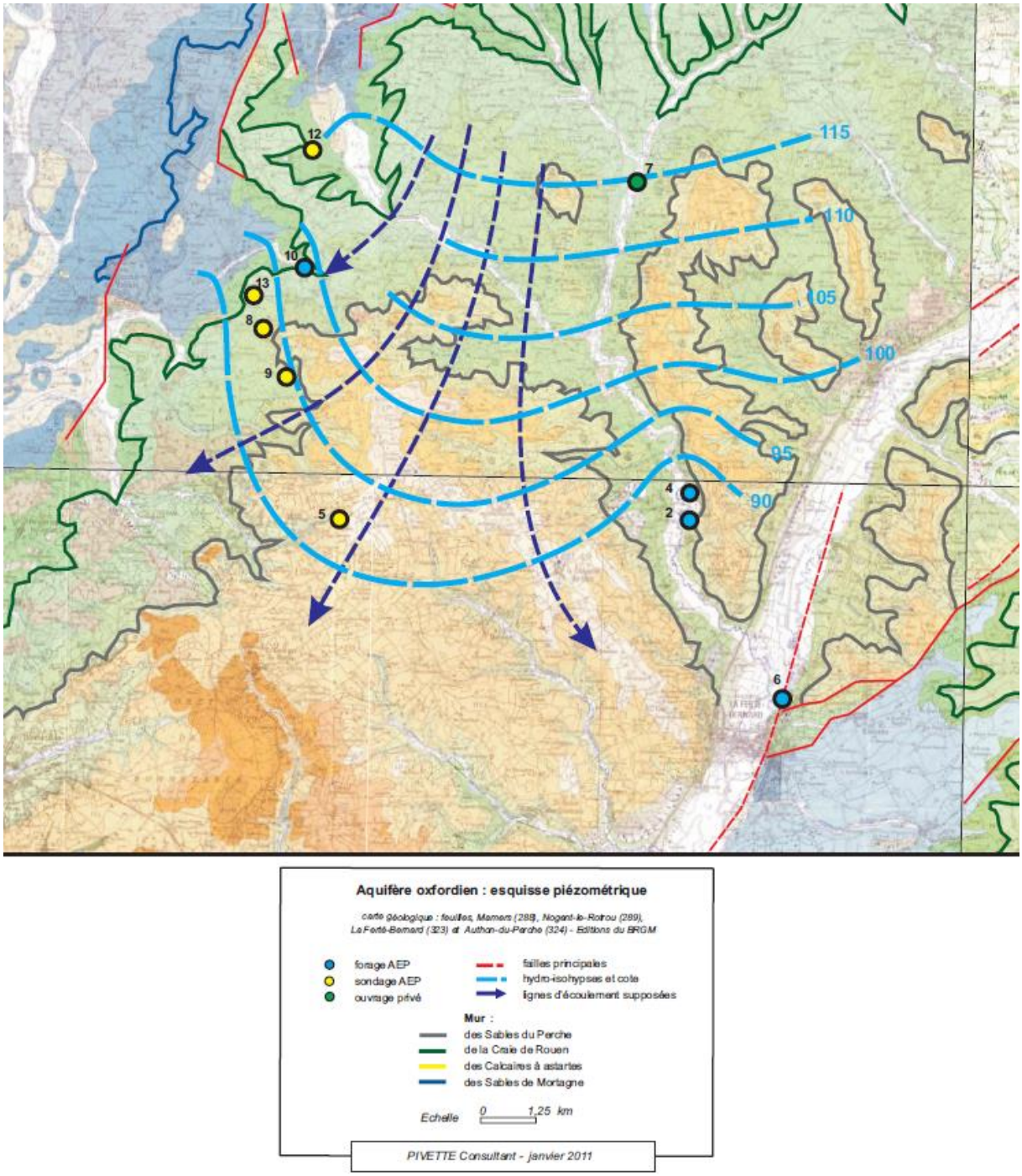


Illustration 68 : Esquisse piézométrique de l'Oxfordien sur le bassin versant de la Même réalisée à partir d'une piézométrie de 2002, Pivette (2011)

SAFEGE (2012) précise, dans sa modélisation du bassin de l'Huisne, que dans sa partie amont, l'aquifère de la craie alimenterait celui du jurassique par drainance descendante. A l'aval, au contraire, l'aquifère du Jurassique serait en charge sous les formations crayeuses. Plus à l'est, le niveau des deux aquifère viendrait s'équilibrer à l'approche de la vallée de l'Huisne. Ceci semblerait donc confirmer que l'Huisne constituerait bien l'exutoire des deux principaux aquifères.

A noter : la partie libre de l'aquifère jurassique dispose de nitrates, alors que ceux-ci disparaissent dans la partie captive plus au sud (processus de dénitrification).

c) Fluctuation du niveau des nappes

Dans la zone captive les niveaux peuvent s'établir au-dessus de la cote du toit du réservoir et même au-dessus du sol (artésianisme) en fonction de la configuration topographique.

Les fluctuations annuelles et interannuelles dans les nappes captives sont peu marquées et sont très réduites : de l'ordre du mètre.

Dans la zone libre, les fluctuations sont plus importantes mais ne semblent pas dépasser la dizaine de mètres de battement entre les situations de hautes et de basses eaux.

Cet aquifère, très compartimenté, fait partiellement l'objet d'un suivi en continu de ses niveaux piézométriques, cf. chapitre 6.1.

d) Paramètres hydrodynamiques et productivité

De par sa forte hétérogénéité et notamment au caractère libre ou captif de ces formations, la productivité de cet ensemble aquifère est très variable : de quelques dizaines de m^3/h à plus d'une centaine de m^3/h.

Les formations sableuses de la base de l'aquifère semblent conduire une grande partie du débit des ouvrages d'exploitations qui les ont rencontrées et constitueraient donc la couche la plus productive de cet ensemble aquifère. Mais la productivité dans les calcaires coralligènes ou oolithiques n'est pas en reste, surtout s'ils sont affectés par une intense fracturation.

Les quelques valeurs de transmissivités calculées sont de l'ordre de 10^{-3} à 10^{-4} m^2/s lors de la mise en œuvre de pompages d'essai sur des ouvrages. Certains ont pu mettre en évidence l'existence de limites étanches (failles colmatées) en particulier sur le secteur de Bellême-Mortagne.

Une analyse statistique de l'ensemble des données bancarisées est fournie au chapitre 1, nous invitons le lecteur à s'y reporter pour plus de détails.

e) Relation avec les cours d'eau, sources

L'aquifère exploité est la plupart du temps captif, ce qui limite par nature les échanges possibles avec les eaux de surface et donc limite la vulnérabilité de la ressource en eau exploitée.

Toutefois, il a pu être mis en évidence lors des pompages sur le forage de Ticheville, dans la vallée de la Touques, la possible existence d'une limite d'alimentation qui pourrait correspondre au drainage de l'aquifère alluvial.

Il appartient alors de faire un point précis à ce sujet lors de la réalisation des études d'incidences pour évaluer l'effet des prélèvements sur les milieux naturels.

f) Karst

Les calcaires oxfordiens sont souvent karstifiés dans leur partie supérieure (période d'émersion et d'érosion entre la fin du Jurassique et du Crétacé). Des formes de karstification sont observables notamment sous forme de poches karstiques. Les poches sont remplies de sables et de limons bruns ou rougeâtres.

Des poches karstiques remplies de sable et de glauconite ont été observées au Nord-Ouest de Crouttes ; les difficultés d'interprétation du forage 2-1, au Sud-Ouest de Vimoutiers (Val-Héland) où le Roussier et le calcaire corallien semblent manquer, pourraient être liées à la présence d'une telle poche (Couëffé et al., 2005).

g) Conditions d'alimentation et de recharge

D'une manière générale ces formations sont alimentées (Pivette, 2011) :

- directement par les pluies efficaces sur la zone d'affleurement ; l'impluvium correspondant est généralement extrêmement limité ;
  A l'échelle du département de l'Orne, les zones d'affleurement des formations oxfordiennes sont très réduites : environ 180 km² (principalement dans les cuestas autour de Bellême, Mortagne au Perche, Moulin-la-Marche et fonds de vallées de la Vie et la Touques), surface estimée à partir de la carte géologique harmonisée (BRGM, 2019).

- par drainance descendante à partir de la nappe de la craie cénomanienne, au travers des formations peu perméables de la glauconie de base ; les émergences naturelles de la nappe de la craie au niveau de la zone de contact entre ces deux formations sont rares. Dans ce cas, l'eau des émergences Crétacé se réinfiltrerait plus ou moins rapidement dans les formations jurassiques sous-jacentes.

  Cette drainance descendante a notamment été montrée par SAFEGE (2012), à partir des calculs du modèle hydrogéologique de l'Huisne amont.

SAFEGE (1997) évalue sur le secteur de Mortagne l'infiltration à plus de 170 mm/an. On ne dispose pas d'autres éléments sur l'infiltration ou la recharge dans les éléments de bibliographie consultés.

4.3.3. Aquifère de la craie cénomanienne et turonienne

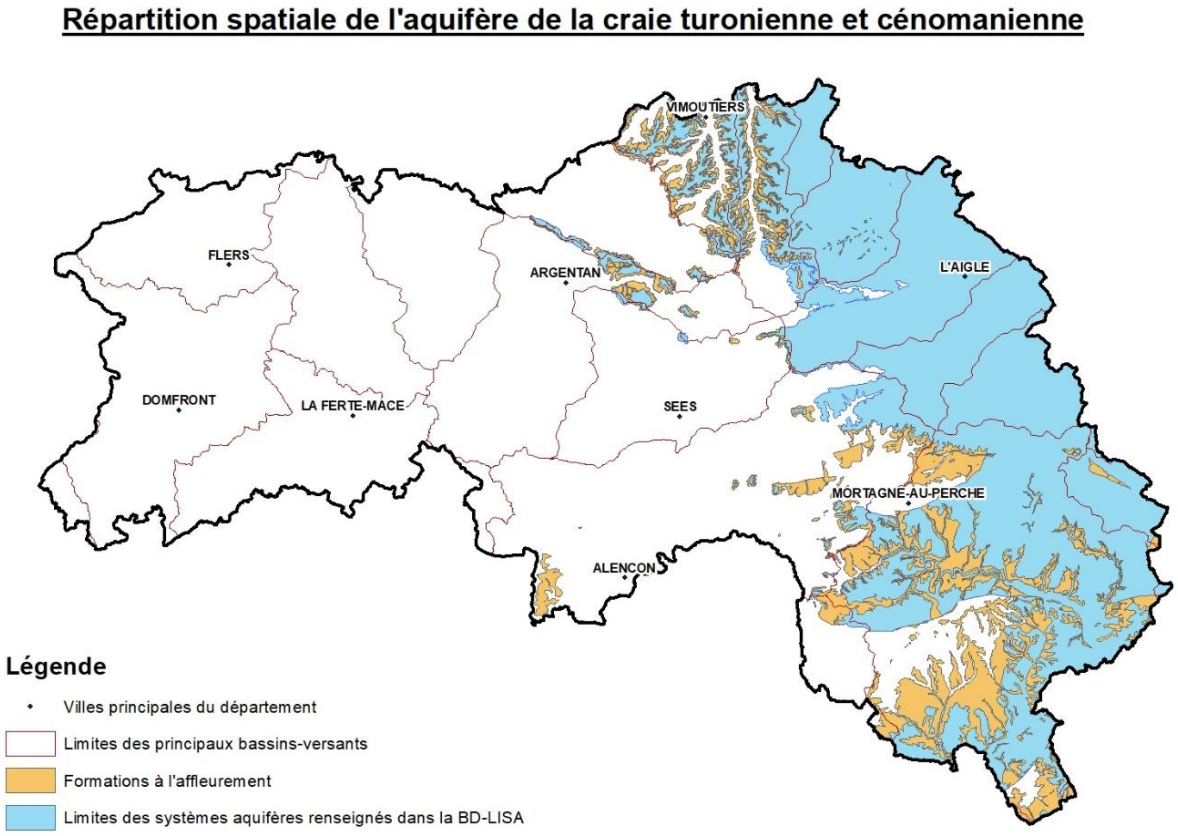


Illustration 69 : Carte d'affleurement des formations crayeuses du Turonien et Cénomanien et limite de son aquifère (d'après la carte géologique harmonisée de l'Orne et la BD-LISA, niveau 3)

a) Caractéristiques générales de l'aquifère

Une nappe se développe dans les fissures et pores des craies cénomaniennes et turoniennes qui présentent une double porosité : en petit dans la matrice, et en grand dans un réseau de fissures plus ou moins agrandies par dissolution (Safege-Horizons, 2004). La puissance du réservoir crayeux est modeste dans le département de l'Orne mais peut tout de même atteindre 60 m au sud-est du département.

L'aquifère de la craie est limité au mur par la « glauconie de base » qui peut donner lieu à des émergences plus ou moins diffuses (mouillères) au niveau des zones d'émergence (rencontre de la surface de la nappe et de la topographie) dans les thalwegs ou directement au niveau des zones d'affleurement de la glauconie (source de contact) (cf. Illustration 71 ; Pivette, 2015). L'épaisseur de la glauconie de base peut atteindre 30 m toujours dans le sud-est du département alors qu'elle est plutôt de l'ordre de la dizaine de mètres ailleurs.

La nappe peut être libre à captive en fonction de la configuration géomorphologique des secteurs : vallées et plateaux du Perche, du pays d'Ouche, Auge, etc… Le caractère captif va s'exprimer notamment lorsque le recouvrement des argiles à silex ou des alluvions ont une composante argileuse dominante et présentent une épaisseur significative (Safege, 2003 ; AD2E, 2006 ; B. Lemoine, 2009 ; O. Chauvière, 2012).

A titre d'exemple pour illustrer le caractère captif on peut citer le forage artésien d'Aspres dans la vallée de l'Iton : l'artésianisme s'est manifesté au moment de la foration, sur 4 m de hauteur, dès l'entrée dans la craie, après avoir traversé les argiles à silex. Cette configuration permet même une dénitrification partielle des eaux (cf. Illustration 70 ; Géotherma,1997).

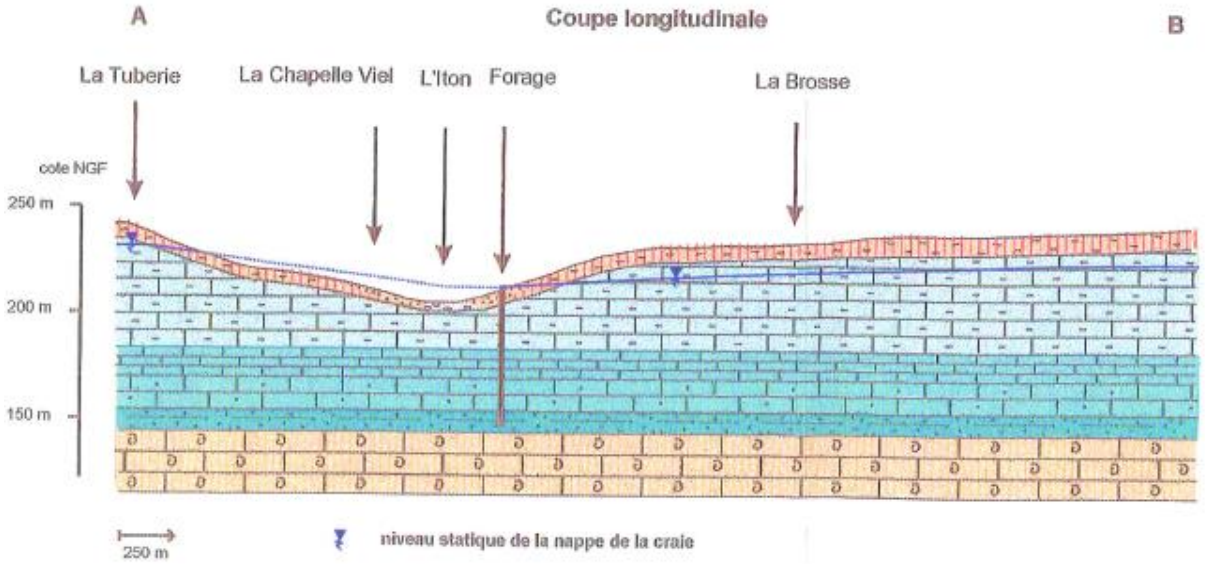
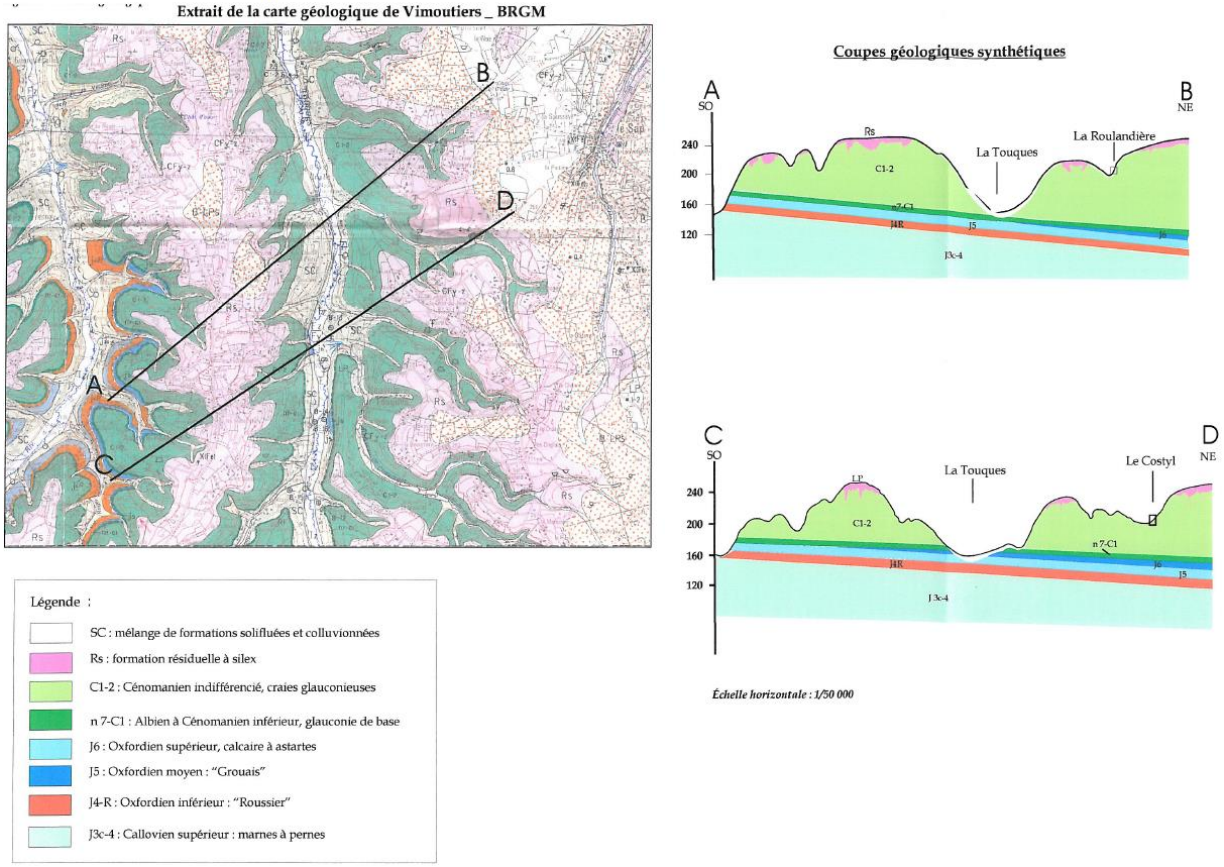


Illustration 70 : Coupe interprétative des conditions hydrogéologiques (nappe captive) de la vallée de l'Iton sur la commune des Aspres, (Géotherma, 1997)

Les circulations libres depuis les plateaux vers les vallées sont également matérialisées sur l'Illustration 71 page suivante dans le pays d'Auge.



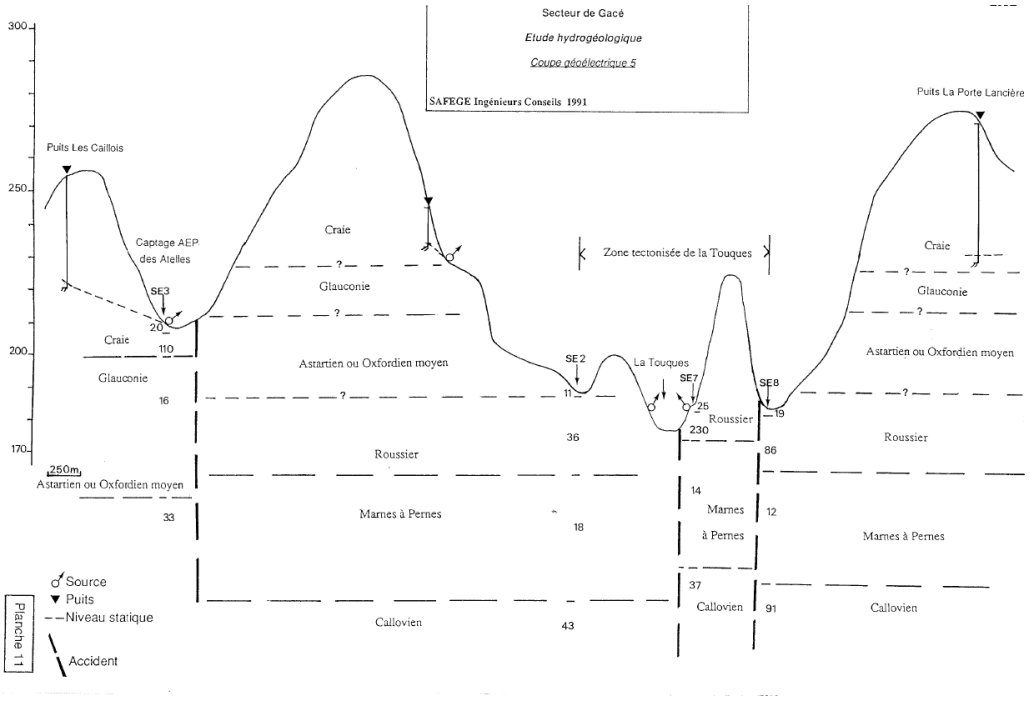


Illustration 71 : Coupes interprétatives du fonctionnement hydrogéologique (nappe libre) du secteur de Gacé, bv de la Touques (SAFEGE, 1991 et Horizons 2002). Les sources des formations crayeuses sourdent librement au niveau de la rencontre avec la topographie (captage AEP des Aulnes) ou au contact avec la glauconie de base

b) Ecoulements

Actuellement, il n'existe pas de carte(s) piézométrique(s) globale(s) de cette unité aquifère, à l'échelle du département de l'Orne (cf. rapport BRGM/RP-69552-FR). Les données locales ont pu être utilisées pour établir cette synthèse. Celles-ci permettent d'apprécier les directions et sens d'écoulement à l'échelle de petits secteurs géographiques.

Ces données partielles ont permis notamment de mettre en évidence que les cours d'eau drainent, le plus souvent, la nappe au niveau des principales vallées, thalweg et couloirs faillés (O. Chauvière, 2012). Le gradient de la nappe est faible sauf au droit d'hétérogénéités lithologiques ou structurales où l'on constate un changement des paramètres hydrodynamiques intrinsèques du réservoir.

- **Secteur du Perche - Huisne**

Les points hauts de la nappe se situent en bordure de l'éperon du Perche (zone de horst). Les écoulements sont orientés vers les principaux drains : l'Avre au nord, l'Eure à l'est et l'Huisne au sud. Les pentes sont relativement importantes aux abords des dômes et s'estompent rapidement à l'aval (CGG, 2001). Ces variations de pente correspondent vraisemblablement aux passages des secteurs faillés.

Au sud du département, SAFEGE (2012) identifie un dôme piézométrique sur le secteur de Bellou-le-Trichard et la Chapelle-du-Bois (Sarthe). Il s'agit d'une limite de partage des eaux délimitant le bassin hydrogéologique de la Même (cf. Illustration 73 pages suivantes).

Habituellement la nappe des sables du Perche est bien individualisée et se trouve au-dessus de la nappe de la craie. La différence de charge hydraulique entre la nappe des sables et de la craie crée une drainance *per descensum*.

A proximité des exutoires naturels que constituent les cours d'eau comme l'Avre, la cote de la nappe de la craie tend à se rapprocher de la cote de la nappe des sables du Perche comme le montrent les observations effectuées dans le secteur de Belle Perche (Pivette, 2012). Sur ces secteurs, la nappe des sables se réinfiltre rapidement dans la nappe de la craie (cf. Illustration 72).

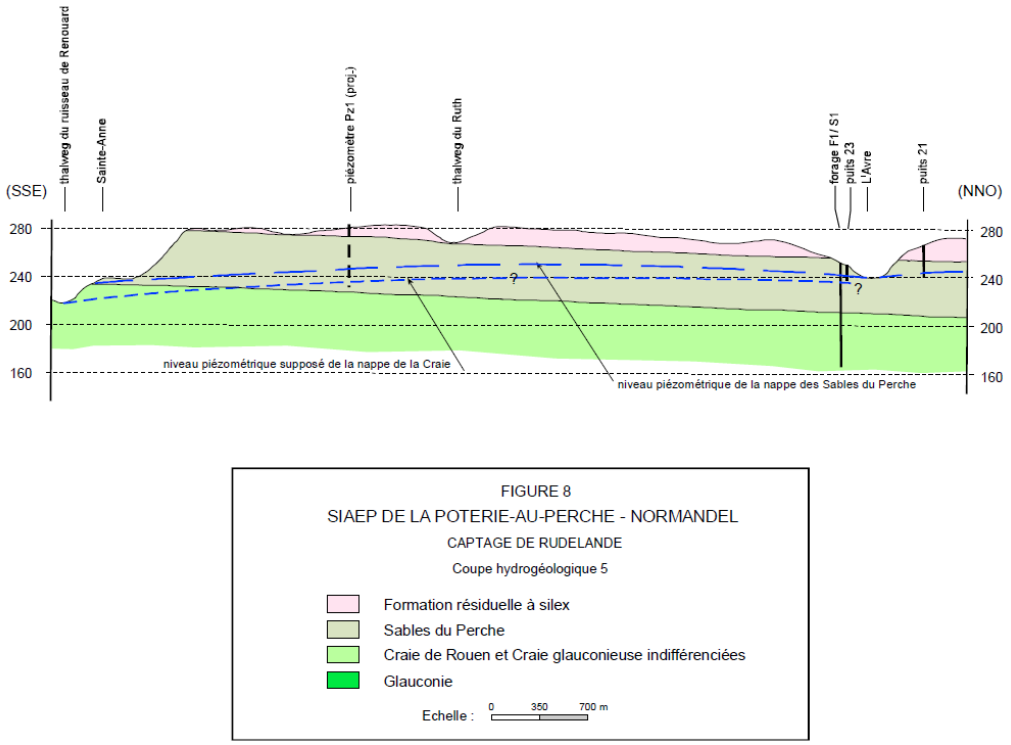


Illustration 72 : Coupe hydrogéologique interprétative du secteur de Normandel (Pivette, 2005)

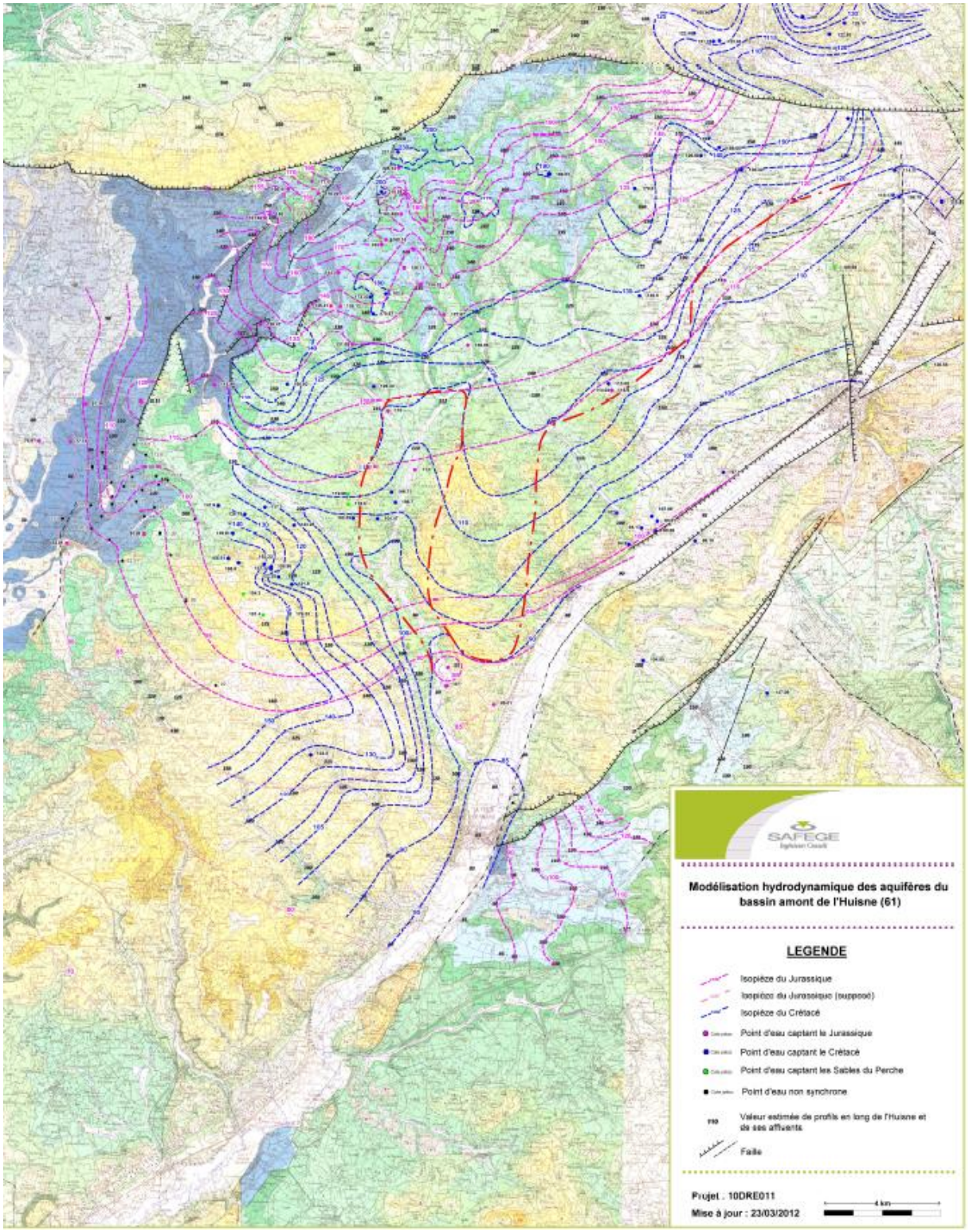


Illustration 73 : Esquisse piézométrique du bassin amont de l'Huisne, les courbes bleues correspondent à la nappe de la craie (SAFEGE, 2012)

- **Secteur du Pays d'Ouche- Avre**

L'Illustration 74 montre qu'il existerait une limite de partage des eaux ténue entre les bassins de la Risle, de l'Iton et de l'Avre axée sur de petits dômes piézométriques (points hauts de la nappe). Les cours d'eau drainent la nappe. L'écoulement général des eaux se fait vers le Nord-Est.

La configuration des isopièzes, sur les bassins versants de l'Avre et de l'Iton, montre que sur les plateaux au sud-est, le gradient y est très faible, de l'ordre de 1 à 2 pour mille. Les vallées sèches présentent des gradients légèrement plus importants : > 5 pour mille (Geotherma, 1997). Ces faibles valeurs impliquent par conséquent que le milieu est relativement homogène. David et al., 2015 ; David et al. 2016 ont pu démontrer, par un suivi sur des piézomètres implantés spécifiquement, qu'en condition de basses eaux, l'amont des deux bassins versants n'en faisait qu'un seul en réalité.

L'amont de ces bassins hydrogéologiques peuvent se confondre ou venir « phagocyter » une partie du bassin voisin en d'autres secteurs de cette zone géographique. C'est le cas par exemple du Rouloir, petit affluent de l'Iton, dont le bassin piézométrique ne correspond pas *a priori* à son bassin hydrologique de surface. Sur l'Illustration 74, on remarque que celui-ci prendrait sa source sur le bassin piézométrique voisin de la Risle.

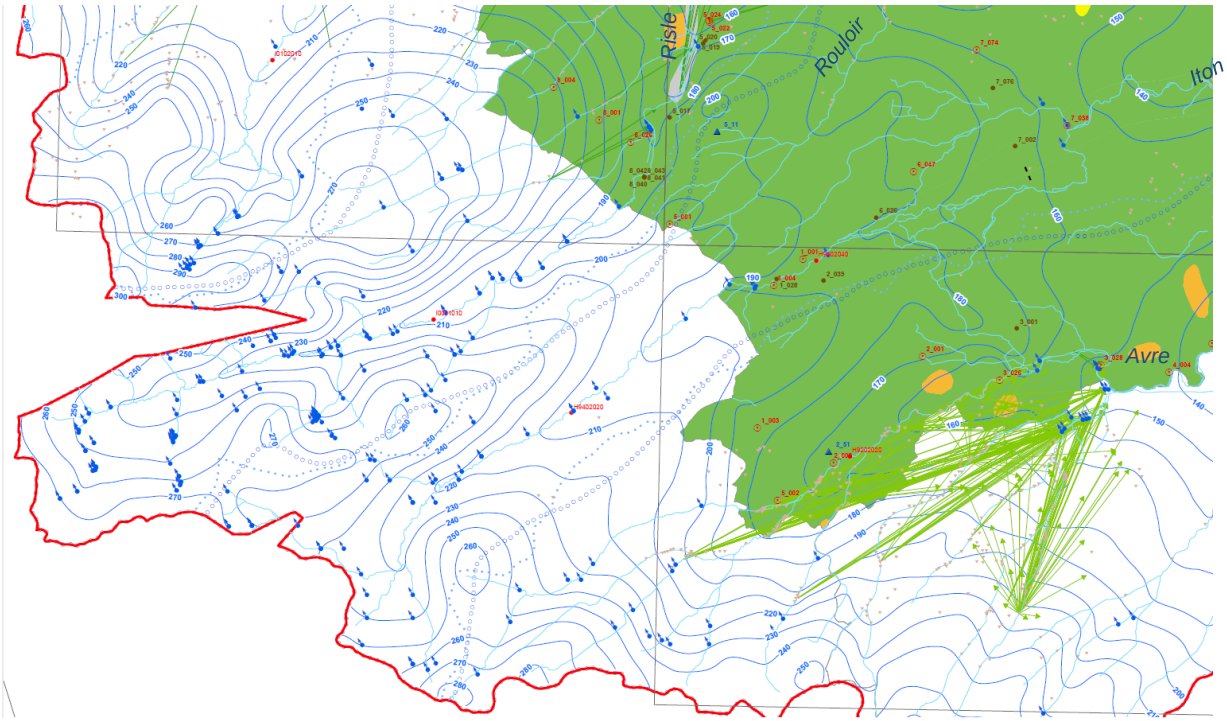


Illustration 74 : Extrait de la carte piézométrique de la nappe de la craie séno-turonienne des bassins amont de la Risle, de l'Iton et de l'Avre (Mougin et al. 2011 - BRGM RP-59301-FR).
Le département de l'Eure est materialisé en vert. Les limites des bassins hydrogéologiques sont matérialisés par des petits ronds bleus, ceux des bassins versants de surface par des petits points bleus

D'autres relevés réalisés en juin 2003 sur le bassin de la Risle, sur la commune de Rai, (SAFEGE-Horizon, 2003) montrent que l'écoulement général se fait du sud-ouest vers le nord-est. La nappe est drainée par la vallée de la Risle : en rive gauche, les écoulements se font vers le sud -sud-est ; en rive droite, vers le nord-nord-ouest.

Les relevés de niveaux réalisés en septembre-octobre 1995 par Pivette (*in* Geo-Log, 1999) sur le bassin amont de l'Iton, montrent également que l'axe d'écoulement des eaux souterraines

s'inscrit selon un axe SW-NE, la rivière draine la nappe (celle-ci est semi-captive sous les alluvions et argiles à silex). A noter : la position du point haut de la nappe, limite de partage des eaux entre les bassins de l'Avre et de l'Iton, serait donc située entre le hameau de la Touche et Gournay-le-Guérin, au droit d'un potentiel axe de drainage : vallée sèche qui aboutit vers le bois de St Christophe, ce qui est curieux.

Des décalages sont observés sur la piézométrie respectivement sur le bassin de la Risle et de l'Iton. Chauvière (2012) et Géotherma (1997) émettent tous deux l'hypothèse qu'ils pourraient être liés au passage de failles.

D'une façon globale, les axes de circulation préférentielle matérialisés sur les cartes piézométriques seraient à mettre en relation avec des phénomènes karstiques au sein de la craie : les traçages réalisés dans la vallée de l'Avre montrent l'existence d'un véritable lacis karstique souterrain.

L'exécution du forage du Hamel, dans la vallée de l'Iton, a mis en évidence la présence de vides karstiques en profondeur (karst noyé). Toutefois, les données disponibles à ce jour sur ce secteur apparaissent donc insuffisantes pour pouvoir caractériser avec certitude la nature des écoulements et les échanges possibles entre l'amont des différents bassins versants.

A titre d'exemple, la coexistence de plusieurs faisceaux de failles de directions différentes, masqués par les altérites et les formations superficielles, permet d'y envisager l'existence de circulations souterraines complexes.

Une partie de ces cheminements préférentiels a pu être mis en évidence par le BRGM sur le secteur de l'Avre. La réalisation à grande échelle d'opérations de traçage et d'une prospection géophysique a permis notamment de révéler l'existence de ces cheminements souterrains et d'expliquer la présence de zones de pertes sur les cours d'eau. Dans un certain nombre de cas, un lien étroit a été mis en évidence entre la piézométrie, les failles, les compartiments abaissés, la situation perchée de certains tronçons de cours d'eau et le développement du karst.

- **Pays d'Auge- Lieuvin**

A noter : à l'inverse des autres secteurs géographiques, il n'existe pas d'étude de synthèse sur le fonctionnement hydrogéologique global (aquifère crayeux et du Jurassique) du secteur amont des cours de la Vie, Touques, Orbiquet et Guiel-Charentonne.

Sur ce secteur, les écoulements suivent globalement la topographie et suivent une direction générale est-ouest. Les vallées drainent les nappes, donc localement les directions d'écoulements sont orientées vers le cœur des vallées : vers l'est en rive gauche et vers l'ouest en rive droite. Les points hauts piézométriques sont situés sous les plateaux (Lemoine, 2007 ; Mougin et al., 2011). On rappelle la particularité de ce secteur où les formations jurassiques affleurent en fond de vallée.

Une crête piézométrique d'axe méridien existerait entre la vallée de l'Orbiquet et de la Touques. Celle-ci passerait à l'ouest de la commune de le Sap, les écoulements se feraient alors à l'est et à l'ouest de part et d'autre de cette limite de partage des eaux (Gaudriot, 2002).

Sur ce secteur, les niveaux de la nappe de la craie seraient bien individualisés de ceux de la nappe des calcaires oxfordiens sous-jacents (cf. Illustration 75 ci-après).

L'écoulement général dans la craie et dans le Roussier de Gacé (jurassique supérieur) se fait vers le Nord. Le gradient hydraulique serait de l'ordre de 1,5 à 2% dans la craie à l'approche des

thalwegs, valeur élevée qui peut s'expliquer par la différence de perméabilité entre les formations crayeuses non fissurées des plateaux et celles plus fissurées des vallées (SAFEGE, 1991 ; Horizons, 2002).

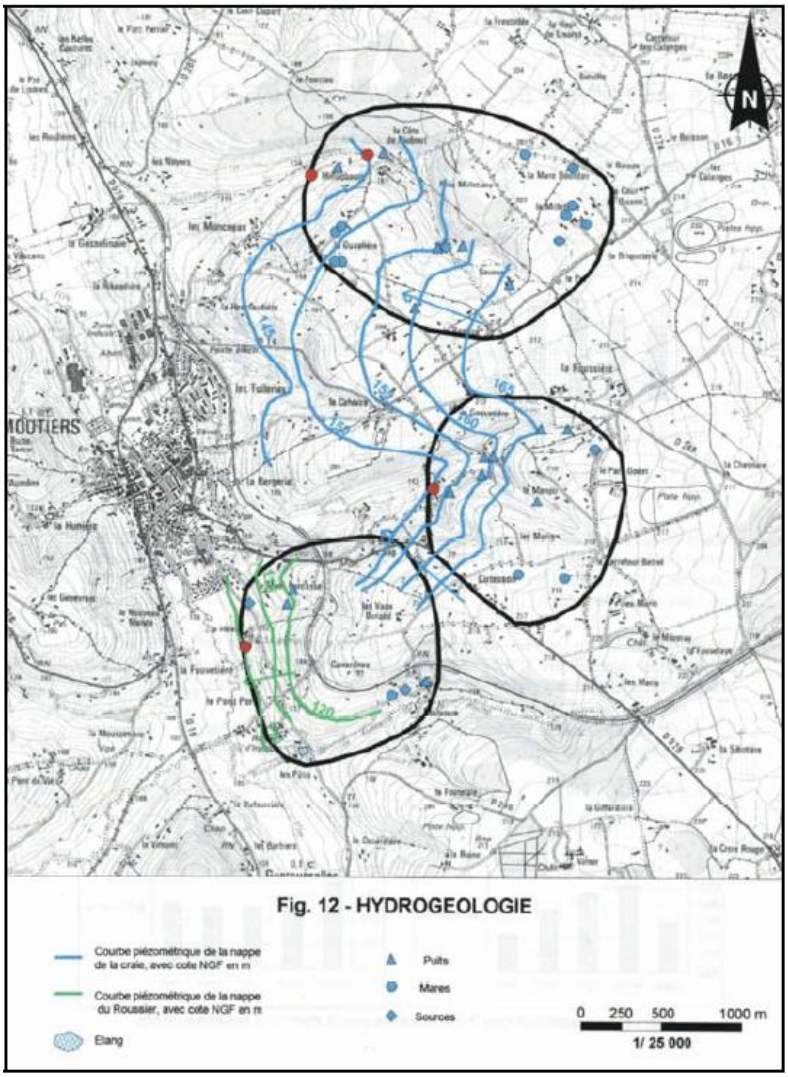


Illustration 75 : Piézométrie du secteur de Vimoutiers, nappe de la craie en bleu et nappe du roussier de Gacé en vert (Ecogee, 2001 in Pivette Consultant, 2015)

c) Fluctuation du niveau des nappes

Sur les secteurs où la nappe est libre, les amplitudes sont fortes, en particulier sur les points hauts de la nappe. Celles-ci deviennent moyennes sur les zones de transition et faibles dans les vallées (CGG, 2001).

A titre d'exemple, les amplitudes enregistrées sur le piézomètre de Villers en Ouche sont relativement importantes : > 20 m pour cet ouvrage situé en plateau entre les vallées de la Guiel et de la Charentonne. L'étiage se fait entre septembre et novembre en décalage de 2 mois avec les débits moyens enregistrés sur la Charentonne (Ecogee, 2000).

Sur les secteurs où la nappe est captive, les mesures effectuées sur plusieurs points montrent que les variations du niveau piézométrique sont relativement faibles (de l'ordre du mètre). Par

ailleurs, un suivi piézométrique effectué en continu depuis 1999 dans le sondage de la Bourgeoiserie (commune de Randonnai) montre un battement annuel moyen d'ordre métrique, avec un maximum de l'ordre de 2 m en 2001, année de fort excédent pluviométrique, et un minimum de l'ordre de 0,7 m en 2005, à la suite d'un cycle hydrologique fortement déficitaire (Pivette Consultant, 2012). Geotherma, (1997) fait le même constat sur l'amont de la vallée de l'Iton.

La recharge intervient de février à avril, puis la vidange s'étire jusqu'en novembre 2010 (Geotherma, 1997).

A noter : les suivis piézométriques montrent une frange basse fréquence correspondant à la recharge de la nappe et dans certains cas une frange haute fréquence montrant l'interférence des ruissellements (CGG, 2001). Certains décalages observés sur les chroniques dans les périodes de recharge pourraient donc être liés à des phénomènes karstiques (mise en charge ou décharge de réseaux) sous l'effet des ruissellements ou bien encore à des déversements de la nappe des sables du Perche sus-jacente sur le secteur sud-est du département.

Cet aquifère, fait partiellement l'objet d'un suivi en continu des niveaux piézométriques (cf. chapitre 6.1).

d) Paramètres hydrodynamiques et productivité

La productivité de l'aquifère de la craie est très bonne : les ouvrages exploités permettent d'obtenir des débits compris entre 65 et plus de 200 m^3/h.

La transmissivité est évaluée par les auteurs entre 1,5 et 5 $.10^{-3} m^2/s$, l'emmagasinement entre 1 et 5 % lorsque la nappe est libre à semi-captive, moins si elle est captive.

L'aquifère est plus productif lorsque celui-ci est affecté par des fissures ou fractures ou lorsqu'il est affecté par des circulations karstiques. Ce qui n'est pas sans poser de problème de vulnérabilité pour ces ressources, surtout lorsque la nappe est libre.

Une analyse statistique de l'ensemble des données bancarisées est fournie au chapitre 1, nous invitons le lecteur à s'y reporter pour plus de détails.

e) Relation avec les cours d'eau, sources

Sur le secteur d'Argentan - le Pin au Haras, les buttes témoins du Crétacé conservées le long de la faille de Grande Gouffern donnent naissance à de nombreuses sources qui vont contribuer à l'alimentation du réseau hydrographique (l'Ure par exemple). Ces sources naissent au contact entre les argiles glauconieuses de la base de la formation et le Callovien (Pivette Consultant, 1999).

D'une manière générale, sur les secteurs où la craie présente une épaisseur conséquente, les sources alimentées par la nappe de la craie ont généralement un débit régulier tout au long de l'année, ce qui montre que cet aquifère a une bonne capacité à stocker l'eau et à la libérer. Sur les secteurs où l'aquifère se présente en butte témoin, les débits provenant de la nappe de la craie semblent à l'inverse diminuer fortement en été.

Dans la plupart des cas, les cours d'eau drainent la nappe. Des phénomènes de drainance des horizons superficiels (alluvions, altérites, sables du Perche) ont pu être mis en évidence par des tests de pompage. Il conviendra alors, lors des études d'incidence, de bien évaluer le

phénomène. Les secteurs où la craie est très fissurée ou karstifiée sont particulièrement concernés, notamment s'il existe une différence de charges importante entre le niveau de la nappe de la craie et le niveau d'eau dans les milieux superficiels.

f) Karst

- **Secteur de Gacé – Pays d'Auge**

L'Orbiquet, petite rivière d'une trentaine de kilomètres, principal affluent de la Touques draine un plateau crayeux recouvert d'argiles à silex dont l'amont du bassin versant se situe dans le département de l'Orne.

Le système présente des pertes temporaires (Douet Arthus, ruisseau du grand fossé), des émergences karstiques (dont l'Orbiquet à la Folletière-Abenon dans le Calvados). La Source de l'Orbiquet (Illustration 76) constitue l'émergence d'un vaste réseau de conduits souterrains.



Illustration 76 : Résurgence de l'Orbiquet à la Folletière Abenon (Calvados), le conduit de résurgence a été reconnu en plongée sur près de 800 m. source : https://www.geocaching.com/geocache/GC5Z2R6

Le paysage de ce secteur est parsemé de dolines karstiques, qui sont des dépressions topographiques par lesquelles l'eau de ruissellement rejoint directement les conduits de l'aquifère (Leblanc, 1998).

Sur ce secteur, Leblanc (1998) signale qu'il existe probablement des connexions entre le karst des bassins versants du Guiel voisin et de l'Orbiquet (Illustration 77 page suivante). Ces connexions ont été mises en évidence par des opérations de traçages réalisées par le BRGM en 1971 autour des pertes de la région de Heugon et Monnai, mais n'ont pas été reproduites depuis.

Ce cas emblématique montre qu'il existe une karstification importante du massif crayeux. D'autres études font référence à la présence d'indices karstiques en surface : présence de dolines et bétoires marqueurs de l'exokarst permettant une mise en contact directe des eaux de surface (ruissellement) avec les eaux souterraines. C'est notamment le cas autour du bassin versant de la Touques et de la Vie au nord de Gacé.

Cette karstification affecterait également les terrains oxfordiens sous-jacents. On rappelle que ces derniers affleurent au cœur des deux vallées.

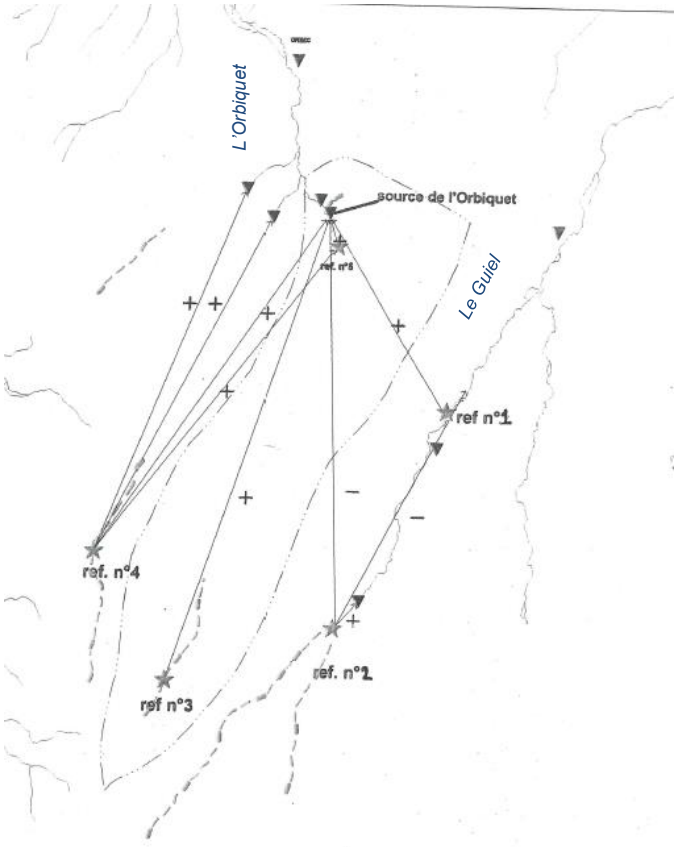


Illustration 77 : Opérations de traçages réalisés autour du bassin d'alimentation des sources de l'Orbiquet (Leblanc, 1998)

- **Secteur de l'Aigle – Lieuvin/Ouche**

Le bassin versant amont de la Guiel, situé à cheval entre l'Orne et l'Eure, voit le développement d'un système karstique particulièrement important.

A l'instar du système de l'Orbiquet, la Guiel se perd et voit ses eaux resurgir environ 2 km en aval de la "perte" (cf. Illustration 78). Il est à noter que la source de la Guiel à Saint Laurent du Tencement (département de l'Eure) est l'une des plus importantes sources de Normandie en termes de débit (370 l/s en 1971 ; Artis et al.,1972).

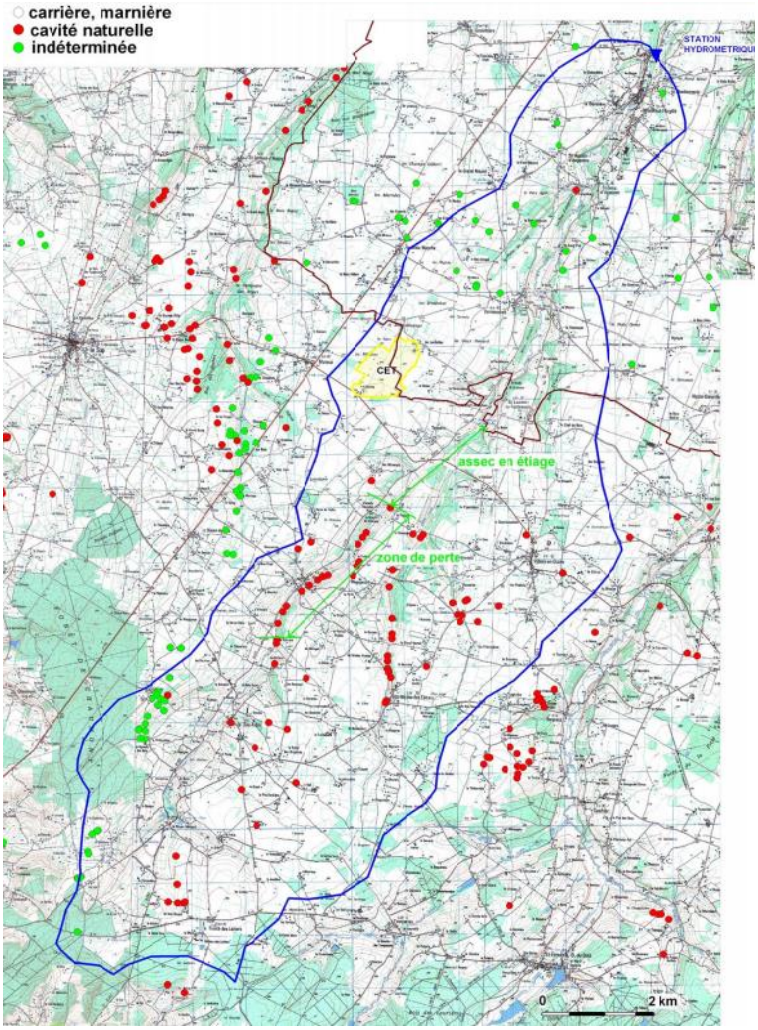


Illustration 78 : Bassin versant de la Guiel, localisation des zones de pertes et de reconnexion de la nappe (P.Stollsteiner, BRGM, 2007)

Des Jaugeages différentiels et des traçages ont été réalisés dès 1971 sur cette rivière (rapport BRGM 72 SGN 217 PNO). Ces opérations ont permis de constater :

- la disparition progressive puis totale du cours d'eau au lieu-dit le Folliard, débit de 105 l/s mesuré à Heugon (La Polinière) ;
- les pertes s'effectuent au droit de bétoires bien localisées mais aussi également de manière diffuse dans le lit mineur du cours d'eau ;
- une vitesse d'écoulement de 300 m/h mise en évidence par l'expérience de coloration à la fluorescéine, au niveau de la résurgence dite de la Fontaine, débit mesuré de 370 l/s.

Les pertes constatées s'expliquent probablement par :

- un abaissement général du substratum cénomanien vers le Nord-Est : +245 m NGF à St Evroult et +182 m NGF à Bocquencé, cet abaissement étant vraisemblablement le résultat du jeu d'une discontinuité structurale majeure orientée N140-150, masquée en surface par les formations superficielles ;
- la présence probable de failles secondaires, N40 parallèles au cours de la Guiel et de deux autres failles N60 et N30 autour de St Denis d'Augeron.

Plus au Sud, sur les bassins versants de la Risle, de l'Iton et de l'Avre, plusieurs indices de la présence d'endo-karst ont été répertoriés dans la craie cénomanienne et turonienne (indice de conduits, craie fissurée).

Là également un réseau karstique parallèle aux cours d'eau s'est développé autour des grands axes de fracturation N40 à 80 (faille du Merlerault, faille de Courtomer-Moulin de Lamarche), ou bien combiné avec des directions N140-150 (comme la faille de Senonches).

Sur le bassin versant de l'Avre, il existe également de nombreuses pertes localisées entre Randonnai, Saint –Maurice les Charencey, Moussonvilliers qui ont fait l'objet d'opérations de traçages et montrent l'existence de systèmes karstiques complexes sur l'amont du bassin versant de l'Avre.

C'est le cas également de l'amont des bassins versants de l'Iton et de la Risle ; pour cette dernière d'autres traçages réalisés par le BRGM dans les années 1969-71 ont mis en évidence des circulations très rapides, dont le cheminement, de l'ordre de 300 m/h, emprunte probablement la même direction que celui de la vallée (David P-Y. et al., 2012-2013-2016 in RP-67677-FR pour la Risle, RP-65618-FR pour l'Iton, RP-60458-FR pour l'Avre).

Le schéma de fonctionnement est globalement identique : la rivière se trouve en situation perchée lors de son passage au droit de zones faillées qui abaissent les compartiments vers le nord-est. La rivière se trouve alors déconnectée de la nappe, ce qui favorise le développement d'un réseau karstique dans et autour du lit du cours d'eau. Les pertes, localisées ou diffuses peuvent conduire à assécher temporairement le cours d'eau, notamment pendant les périodes d'étiage (cf. Illustration 79).

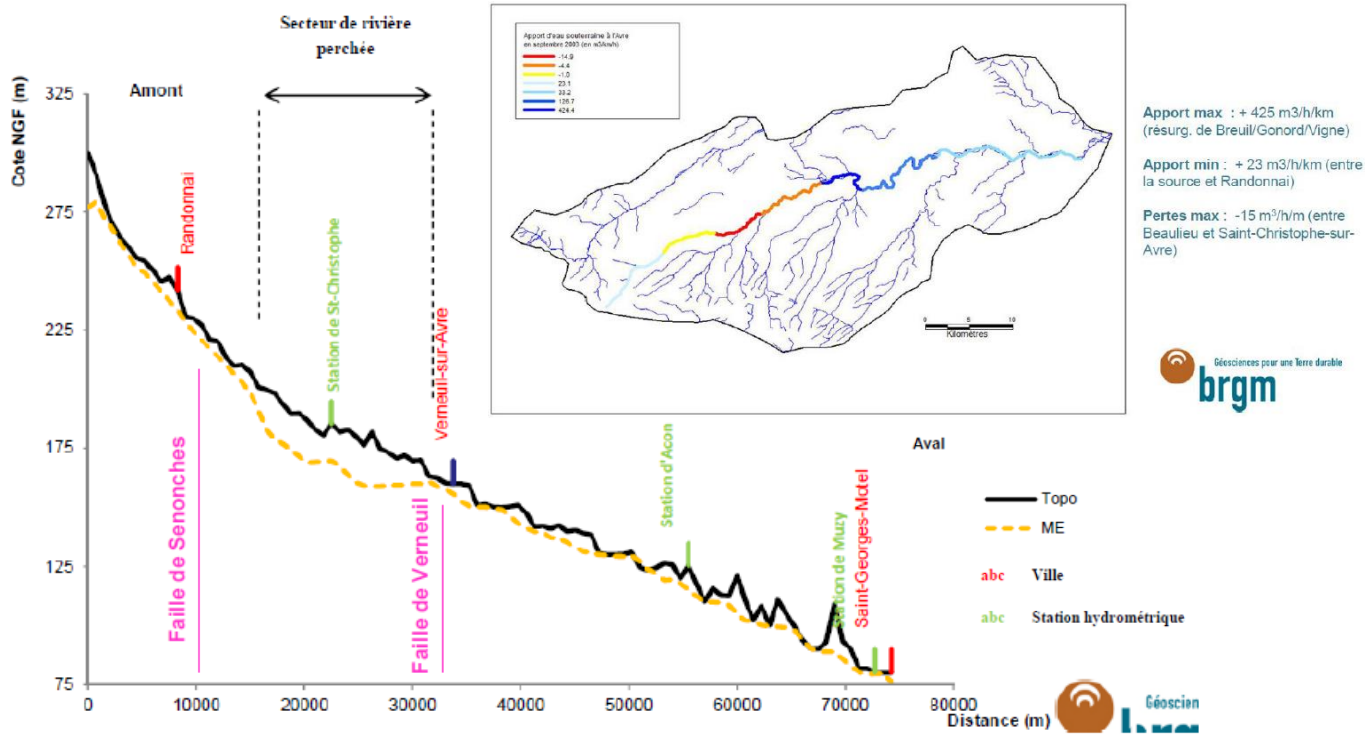


Illustration 79 : Pertes et gains de débit sur le bassin versant de l'Avre. Les pertes se font via des infiltrations dans des bétoires ou des zones de pertes diffuses sur les tronçons perchés du cours d'eau. David P-Y. (2017), modifié

- **Secteur du Mêle-sur-Sarthe**

Sur le secteur du Mêle-sur-Sarthe, la carrière de la Mairie de St-Julien-sur-Sarthe se développe dans le petit massif crayeux (butte témoin, zone d'affleurement réduite). On peut y observer un développement karstique sur des fissures verticales ou sur des joints de stratification horizontaux. L'étude de la carrière réalisée par Rodet J. (1999) montre également que des fissures complexes à comblement argileux affectent l'ensemble de l'établissement souterrain sans présenter d'organisation évidente.

- **Secteur du Perche**

J. Rodet, (2018) indique *« qu'il existe sur ce site* [de la Mansonnière à Rémalard au Perche] *une densité importante de drains naturels recoupés par une carrière souterraine. Si on se limite simplement aux drains qui offrent une section pénétrable à l'homme, nous en dénombrons près de 200 ! » (cf.* Illustration 80 *page suivante).*

Le caractère exceptionnel de ce site tient au *« comblement intégral des fissures, jusqu'à la voûte, même quand elles offrent un élargissement conséquent, et à la modification de la largeur des drains pénétrables : en 2-3 m, la galerie peut passer de 6 m de large à moins de 10 cm, sans qu'aucune fuite ne soit identifiée dans les parois* [fissure, fracture, autre drain]*. Sur plus de 1000 m, pas un seul mètre n'échappe à la fissuration ce qui est exceptionnel dans le karst de la craie* [le site est à proximité immédiate de la faille de Bellême]*.*

Le labyrinthe souterrain de la Mansonnière se révèle être un énorme lacis de fronts d'altération installés sur un réseau tectonique particulièrement dense (des fissures verticales et obliques), alimentés depuis la surface en eau acide permettant la mise en solution de l'encaissant. La dimension verticale des fissures autorise la progression verticale de l'altération qui normalement devrait se développer uniquement le long des failles et diaclases. En fait, la présence d'un niveau d'ennoiement a permis également la diffusion latérale du front d'altération, ouvrant alors l'axe jusqu'à six mètres (maximum observé, cf. Illustration 80*).*

Il en résulte que ces drains ne sont pas des drains mais des galeries, car ils n'ont jamais drainé de flux d'eau concentré [mais percolé *a priori*]. *Ces galeries n'ont donc jamais été vidées et n'ont jamais connu d'écoulement concentré comme dans les cavités karstiques classiques. »* J. Rodet estime *« qu'il s'agit de phases préparatoires de la karstification qui n'ont pas été suivies de celles permettant la structuration et la dynamique karstiques. Il s'agit de phases préliminaires avortées, baptisé de "primokarst". »*

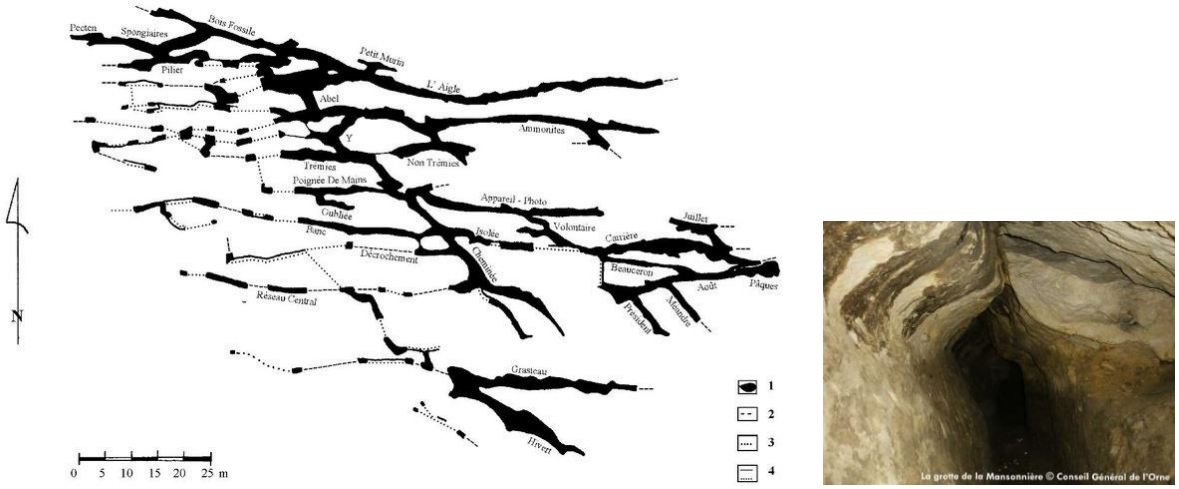


Illustration 80 : Grotte de la Mansonnière (Rémalard-au-Perche, Orne). Topographie du labyrinthe primokarstique développant plus d'un kilomètre de galeries. 1-galerie désobstruée, 2-continuité supposée, 3-galerie recoupée par la carrière, 4-paroi résiduelle dans la carrière (J. Rodet, 2007)

- **Synthèse sur le karst**

La craie dans le département de l'Orne connait une karstification importante, à l'instar de celle connue dans les autres départements de la Normandie crayeuse.

Cette karstification confère à la craie une double voire triple porosité qui va lui donner une excellente capacité productive, mais dans un même temps, rendre la ressource plus vulnérable aux pollutions de surface (cf. Illustration 81).

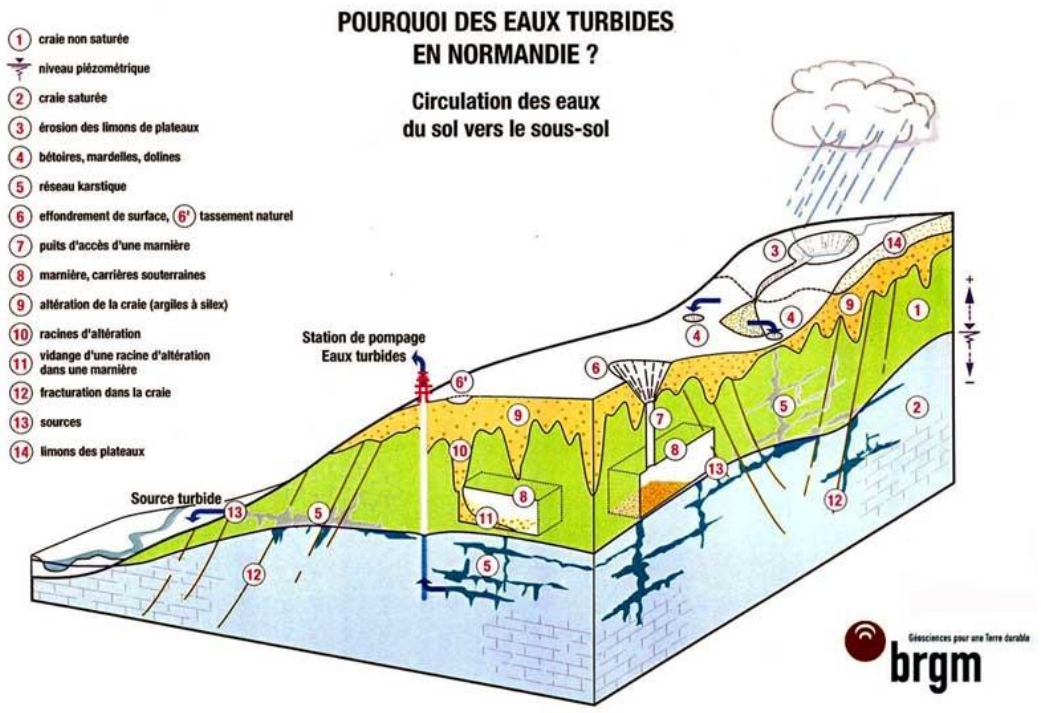


Illustration 81 : Bloc diagramme montrant la vulnérabilité des ressources crayeuses de Normandie, en domaine karstique. En plus de la vulnérabilité hydrologique, cette vulnérabilité s'applique également au génie civil et au domaine des risques ; (source : BRGM)

En effet, les eaux de surface (ruissellement ou les cours d'eau) vont pouvoir s'infiltrer rapidement (jusqu'à plusieurs centaines de mètres par heure), via des fissures ou des réseaux de conduits souterrains et gagner la nappe. L'entrainement de particules depuis la surface jusqu'aux zones d'infiltration, sans filtration efficace, peut ainsi conduire à dégrader la qualité de la ressource.

Dans le paysage, les points d'entrée des systèmes karstiques peuvent être parfois visibles : ils se présentent sous forme de dépressions topographiques ou dolines, encore appelées localement bétoires (cf. Illustration 82).



Illustration 82 : Exemple d'indice de bétoires sur terrains crayeux, secteur de Rémalard (source : BRGM)

Les conduits karstiques souterrains peuvent assurer également un rôle de drainage de la nappe dont l'influence peut se faire ressentir sur la piézométrie ou la chimie des eaux : celle-ci est toutefois rarement mise en évidence sur les documents faute de points de mesures suffisants ou de possibilité d'appréciation du phénomène (le drainage karstique peut se confondre avec le drainage du cours d'eau, ou d'une faille par exemple).

Comme évoqué plus avant dans ce chapitre, l'un des facteurs favorisant le processus de karstification est d'ordre géologique (variations lithologiques et structurales), c'est pourquoi on peut affirmer que le développement de la karstification dans le département de l'Orne suit pour une grande part, les discontinuités géologiques. Les principales ont été mises en évidence dans ce programme d'étude et ont abouti à la délimitation de blocs litho-structuraux homogènes mais il en existe beaucoup d'autres peu ou mal connues à une échelle moins macroscopique (cf. Meire et al., 2019).

A l'échelle du département, des connexions karstiques ont été mises en évidence entre les différentes têtes de bassins (et donc blocs litho-structuraux) : c'est le cas de la Guiel et de l'Orbiquet, de la Risle et des petits Vals (cours d'eau non pérennes), et probablement de l'Iton et de l'Avre (non démontré à ce jour).

Important : dans les compartiments où la proximité d'un niveau de base (cours d'eau) s'établit dans les formations oxfordiennes, où les formations crayeuses se trouvent « perchées », le karst va souvent s'établir jusqu'aux niveaux de la glauconie de base et contribuer au débit des sources. C'est le cas par exemple dans les bassins versants du pays d'Auge : la Vie et la Touques, le secteur de Mortagne au Perche et les rebords de cuesta (secteurs de Sérigny au Sud, Moulins la Marche au centre, Echauffour au Nord).

B. Lemoine suppose l'existence de conduits karstiques traversant à la fois les formations crayeuses et oxfordiennes (cf. paragraphe 4.1.6). Ces observations n'ont toutefois jamais été validées par des expériences de colorations par exemple.

L'existence de karst traversant les formations crayeuses puis oxfordiennes apparait peu probable compte tenu des capacités mécaniques respectives des différentes formations à traverser (notamment les formations sableuses). Ces deux hypothèses restent donc à tester sur le terrain.

Enfin, pour avoir une meilleure compréhension du fonctionnement hydrogéologique des différents bassins versants et donc assurer une protection plus efficace des ressources (origine des eaux, définition des périmètres de protection des captages et délimitation des aires d'alimentation), il nous semble primordial d'identifier ces objets à l'échelle du territoire :

- les éléments du système d'introduction : bétoires, dolines, zones de pertes ;
- les éléments de l'endokarst : vides en forage, conduits, grottes ;
- les éléments du karst de restitution : sources et résurgences (dont jaugeages, suivi du débit, suivi conductivité et température des principaux éléments) ;
- les éléments de connexion : traçages, études hydrochimiques, pollutions.

Nous renvoyons le lecteur au volet de collecte des données et de constitution d'une base de données départementale (volet 2 de l'étude, rapport RP-69332-FR) pour consulter les données actuellement disponibles.

g) Conditions d'alimentation et de recharge

L'alimentation de la nappe de la craie s'effectue par infiltration des pluies efficaces sur les bassins versants : plateau, versants, vallées. La pluie efficace résulte de l'excédent des précipitations sur l'évapotranspiration réelle. Les surfaces où la craie est à l'affleurement (hors zone de présence des limons et altérites) représente environ 500 km².

Sous les plateaux, les pluies s'infiltrent lentement à travers les dépôts limoneux et argileux, avant de traverser la zone non saturée de la craie et de parvenir à la nappe. Localement, la craie peut être fracturée et/ou karstifiée. L'infiltration des eaux vers la nappe y est alors beaucoup plus rapide. A l'inverse, le cheminement de l'eau au travers de la craie massive est extrêmement lent.

Safege-Horizons (2003) estime que la période de recharge de la nappe s'étend en moyenne d'octobre à mars.

La couverture argileuse ou limoneuse favorise localement le ruissellement. Les pluies efficaces sont estimées selon les auteurs entre 150 et 240 mm (Geotherma, 1997 ; Ecogee, 2000 ; AD2E, 2006). La lame d'eau infiltrée n'est pas renseignée faute de pouvoir évaluer de manière objective le ruissellement sur ces différents secteurs.

A signaler : le drainage agricole[15] (notamment dans le pays d'Ouche) peut conduire à un déficit de recharge de la nappe. Il intercepte également parfois le drainage karstique, ce dernier pouvant servir alors d'exutoire au premier. Ce qui, bien entendu, n'est pas sans poser des questions sur la vulnérabilité des ressources.

[15] Signalons à ce sujet la constitution d'une base de donnée BD Drainage couvrant le territoire de l'Eure et de la Seine-Maritime. Ce projet vise la conservation des données sur le drainage agricole (réseau de drainage, parcelles). Cette base de données est consultable sur le site du SIGES : http://sigessn.brgm.fr/

4.3.4. Aquifère des sables du Perche

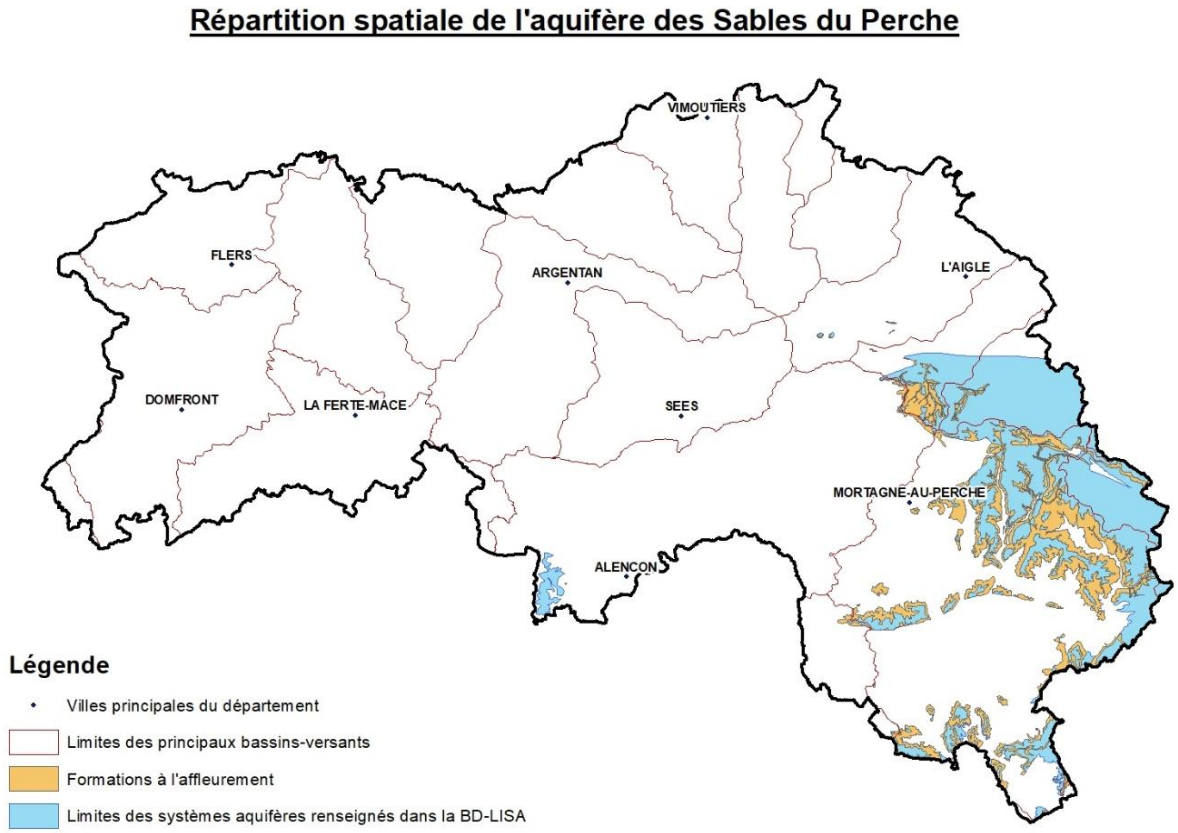


Illustration 83 : Carte d'affleurement des formations du Sables du Perche et limite de son aquifère (d'après la carte géologique harmonisée de l'Orne et la BD-LISA, niveau 3)

a) Caractéristiques générales de l'aquifère

La formation des Sables du Perche est constituée de sables assez grossiers à la base, puis généralement plus fins, avec alternance de lits plus grossiers sur sa partie supérieure ; quelques bancs de grès à ciment calcaire peuvent être observés dans la partie inférieure et supérieure de la formation.

Le mur de cet aquifère est constitué par : les faciès de plus en plus argileux des sables du Perche (jusqu'à 40%) (Moguedet, 1998), et le sommet de la Craie de Rouen. Ces deux ensembles induisent une discontinuité hydraulique (Pivette Consultant, 2012 ; Aster, 2006) suffisante pour différencier cet aquifère de celui de la craie. Au toit, la formation peut être recouverte, selon les conditions d'affleurement : par les altérites à silex (argiles de décalcification) ou par la craie marneuse turonienne.

Cette nappe peut donc, selon les conditions, être libre ou captive.

L'extension des Sables du Perche au nord est mal connue mais s'arrête probablement au niveau de la faille de Senonches. Cependant, des études réalisées par SAFEGE (1993) et SOGREAH (2004-2007) laissent penser que cette formation pourrait s'étendre au-delà de la faille et de l'éperon du Perche (manque de sondages de calage, voir rapport BRGM/RP-60458-FR – David P.-Y., 2012). En l'absence de données complémentaires, cette ressource resterait donc

cantonnée au sud du *horst* délimité par la faille de Senonches et donc limitée au bassin Loire-Bretagne.

Son extension à l'Ouest est marquée par la limite d'affleurement du Cénomanien. Sa limite Sud et Est sort des limites du département.

La faille de Bellême constitue également l'une des limites Sud de l'aquifère. En effet, celle-ci met en contact les sables du Perche avec les sables du Vairais (oxfordiens) affleurant à l'amont du bassin de l'Huisne. Ces derniers peu perméables constituent une discontinuité hydraulique. Les sources de la Calabrière correspondent à des sources de débordement de l'aquifère des Sables du Perche. Localement, la structure de la faille de Bellême apparait nettement plus complexe avec possiblement la présence de lambeaux de calcaires coralligènes pouvant servir de drain aux sables (une faille transversalle N15 recoupe et décroche la faille de Bellême et s'accompagne d'un décalage des formations jurassiques de part et d'autre de son tracé) (Aster, 2004).

La formation des Sables du Perche affleure de part et d'autre des versants de la vallée de l'Huisne entre Nogent-le-Rotrou et la Ferté-Bernard.

La ressource des sables du Cénomanien (Perche dans la partie Ornaise) est couverte par une Zone de Répartition des Eaux (ZRE)[16], sur le bassin Loire-Bretagne (cf. carte en annexe 3).

b) Ecoulements

Les cartes piézométriques disponibles indiquent que les lignes d'écoulement se font depuis les crêtes vers les vallées de l'Huisne, de l'Eure et leurs affluents principaux (SOGREAH, 2004-2009 - hautes eaux de 2003, BRGM, 1995 - hautes eaux de 1994).

[16] Les zones de répartition des eaux (ZRE) sont définies en application de l'article R211-71 du code de l'environnement, comme des "zones présentant une insuffisance, autre qu'exceptionnelle, des ressources par rapport aux besoins".

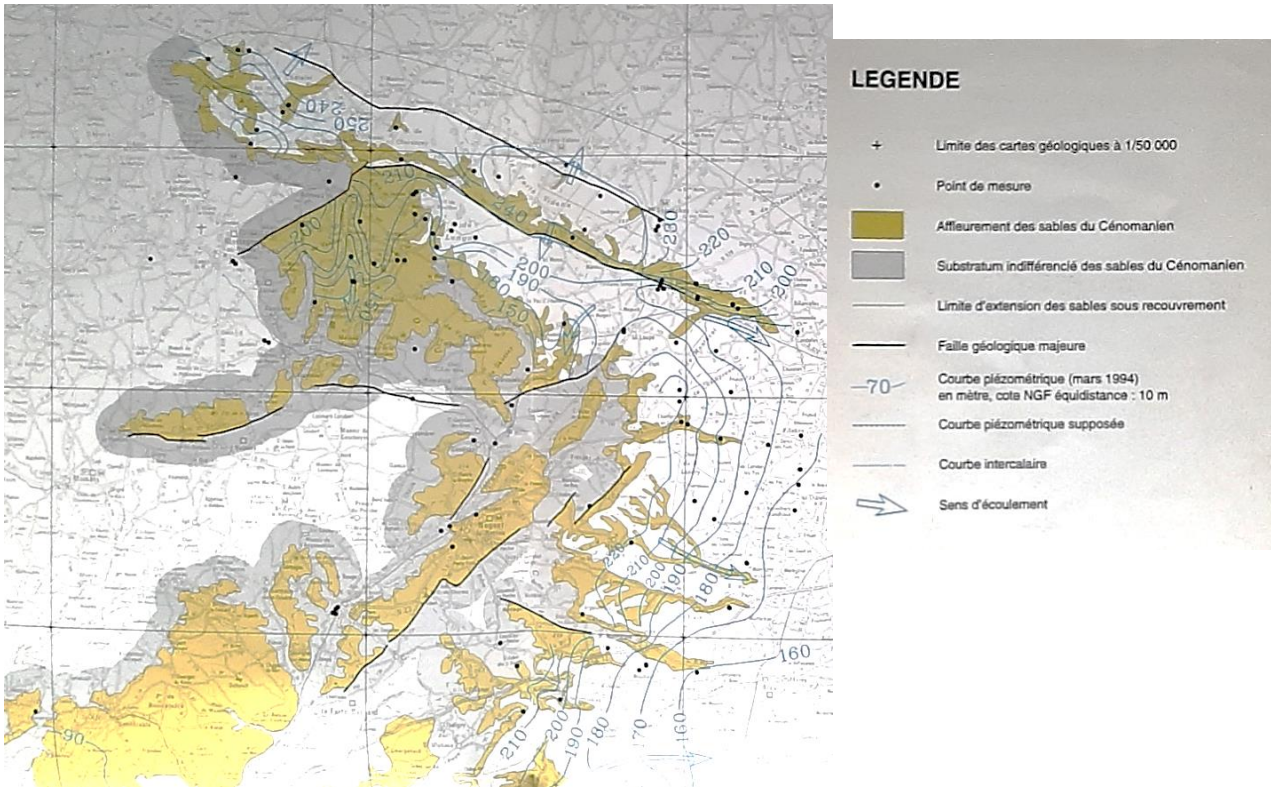


Illustration 84 : Extrait de la carte piézométrique des sables du Cénomanien du bassin Loire-Bretagne (BRGM, 1995)

La campagne de mesures synchrones (21 mars 1994) réalisée par Calligée pour le département de l'Orne, *a priori* en période de hautes eaux, montre qu'il existe un écoulement général vers le bassin versant de l'Eure à l'Est et de l'Huisne vers le Sud (Illustration 83).

Au niveau du *horst* du Perche (bloc situé entre la faille de l'Eure et de Senonches d'axe NW-SE) ; cette structure tectonique engendre un dôme piézométrique (zone haute de la nappe) sur laquelle s'appuie une limite de partage des eaux entre le bassin Loire Bretagne et Seine-Normandie. Les écoulements se font donc de part et d'autre de cette structure : au nord, vers le bassin de l'Avre et au sud vers le bassin de l'Eure.

Lorsque la nappe s'écoule au nord de la structure, où la formation disparait rapidement, la nappe des sables doit se mélanger à celle de la craie pour alimenter l'amont des vallées de l'Avre et de l'Iton (SAFEGE, 2004).

D'après les cartes disponibles, sur les autres secteurs plus au sud et au sud-est, la nappe suit probablement la direction du substratum cénomanien et s'écoule en direction de la vallée de l'Huisne.

Le gradient de la nappe est faible (5 pour mille environ) sur le horst et devient plus important à l'approche de la faille de l'Eure (Illustration 85). D'une manière générale, les gradients sont plus importants à mesure que la nappe s'approche de son exutoire.

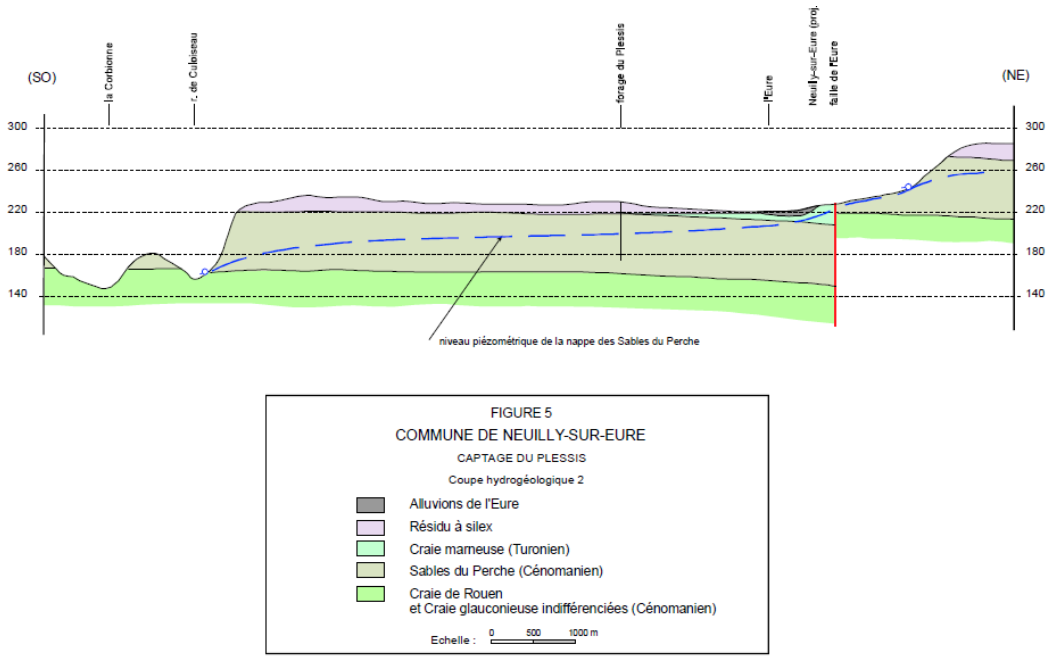


Illustration 85 : Coupe hydrogéologique interprétative du secteur de Neuilly sur Eure (Pivette, 2005)

Sur le secteur de Longy-au-Perche, la pente de la nappe des Sables du Perche est caractérisée par une forte dissymétrie. L'écoulement vers le sud-sud-ouest présente un très fort gradient (>2%), lié probablement à un jeu d'ordre tectonique à l'approche du grabben de Longny, la nappe y est libre. Vers le nord-nord-est, le gradient hydraulique est plus faible (0,9%), la nappe est captive à semi-captive sous les argiles à silex (SAFEGE, 1992).

La nappe de la craie et la nappe des sables sont déconnectées : une différence altimétrique a été mise en évidence dans les études SAFEGE (1993 et 2011) et Lemoine (1998) et Pivette (2005) : le niveau piézométrique de la nappe de la craie se situe à une cote inférieure. Toutefois, cette différence tendrait à diminuer à l'approche des zones d'affleurement ou de déversement de la nappe. On rappelle que la nappe de la craie repose sur la formation de la glauconie de base.

c) Fluctuation du niveau des nappes

Les relevés piézométriques réalisés dans les Sables du Perche, sur plusieurs points et à des périodes différentes (2004, 2007, 2011 et 2012), montrent que les variations de niveau sont relativement limitées et de l'ordre du mètre (Pivette consultant, 2012).

Cet aquifère, fait l'objet d'un suivi en continu des niveaux piézométriques (cf. chapitre 6).

d) Paramètres hydrodynamiques et productivité

La transmissivité de ces formations est globalement comprise entre 5.10^{-6} et 5.10^{-2} m²/s avec une majorité de valeurs situées autour de 5.10^{-3} m²/s (SAFEGE, 2006).

Le coefficient d'emmagasinement est de l'ordre de 10^{-5} à 10^{-1} (SAFEGE, 2006), selon le caractère captif ou libre de l'aquifère.

La productivité des ouvrages est souvent modérée, comprise entre 10 et 60 m^3/h.

Une analyse statistique de l'ensemble des données bancarisées est fournie au chapitre 1, nous invitons le lecteur à s'y reporter pour plus de détails.

e) Relation avec les cours d'eau, sources

Le réseau de drainage est particulièrement bien développé dans le Perche.

Celui-ci n'est toutefois pas régulièrement alimenté par la nappe des sables et bon nombre de ces petits ruisseaux ne présentent qu'un écoulement en période hivernale. Exemple du ruisseau « Rutin » ou « Charencey » (Pivette Consultant, 2012).

Une autre explication viendrait du fait que ces derniers seraient perchés au-dessus de la nappe dans la formation d'altération (argiles à silex). Ces derniers ne seraient alors alimentés que temporairement, principalement par les ruissellements et la nappe des altérites.

La bibliographie consultée ne fait pas état de phénomènes de drainance entre ces petits cours d'eau et la nappe.

f) Karst

Les formes de karstification se développeraient au contact entre les formations sableuses et crayeuses du Cénomanien. C'est le cas dans le Pays d'Ouche (Eure, Eure et loir et Orne) où un ensemble de bétoires ponctue le passage des dépôts de sables argileux (Perche) à la craie. Ainsi le drainage superficiel très organisé dans le Perche, en une multitude de petits cours d'eau, se concentre en quelques rivières qui disparaissent alors en aval des bétoires dans le pays Crayeux (Rodet, 1991, in David et al. 2010).

g) Conditions d'alimentation et de recharge

SAFEGE (2004) estime que la recharge s'effectue par infiltration des pluies efficaces sur le bassin versant concerné : plateau et versants. La pluie efficace résulte de l'excédent des précipitations sur l'évaporation réelle, dont une part (infiltration) constitue l'alimentation de la nappe. Sur les secteurs alimentés librement, la période de recharge de la nappe s'étend d'octobre à mars.

Les précipitations efficaces contribuent à alimenter la nappe phréatique contenue dans les formations "supérieures" (essentiellement Formation résiduelle à silex). Celles-ci sont considérées dans leur ensemble comme peu perméables. Cependant, rien n'autorise à penser qu'elles forment un écran au toit des Sables du Perche. Au contraire, on doit admettre qu'une partie importante de la "nappe" superficielle est drainée en profondeur et que les Sables du Perche constituent son exutoire (Pivette Consultant, 2012).

La surface d'affleurement des formations des Sables du Perche est modeste, elle est estimée à 210 km² environ à l'aide de la carte géologique harmonisée.

Les pluies efficaces seraient globalement comprises entre 200 et 300 mm/an. La part d'infiltration n'est pas connue faute de données sur les ruissellements.

4.4. RESSOURCES EN EAU SOUTERRAINE SECONDAIRES

4.4.1. Formations superficielles et d'altération

A noter : La DREAL Normandie[17] dispose d'une carte régionale représentant le niveau du premier niveau d'eau rencontré (hautes eaux). Par extrapolation celle-ci est souvent représentée par les niveaux d'eau contenus dans les formations superficielles ou d'altération. Cette piézométrie décrit donc la nappe principale dans de nombreuses configurations. Le lecteur pourra se référer à cette cartographie pour évaluer les directions, sens d'écoulement des premières eaux souterraines rencontrées.

Il est important de préciser que, dans les données consultées, il n'existe pas ou peu de données hydrodynamiques ou de suivi piézométrique de ces entités (nappes temporaires ou perchées) dont les capacités ne permettent pas une exploitation à des fins d'alimentation en eau potable. Par conséquent, celles-ci ne feront pas l'objet d'une analyse plus détaillée dans les chapitres suivants.

a) Aquifère des Alluvions

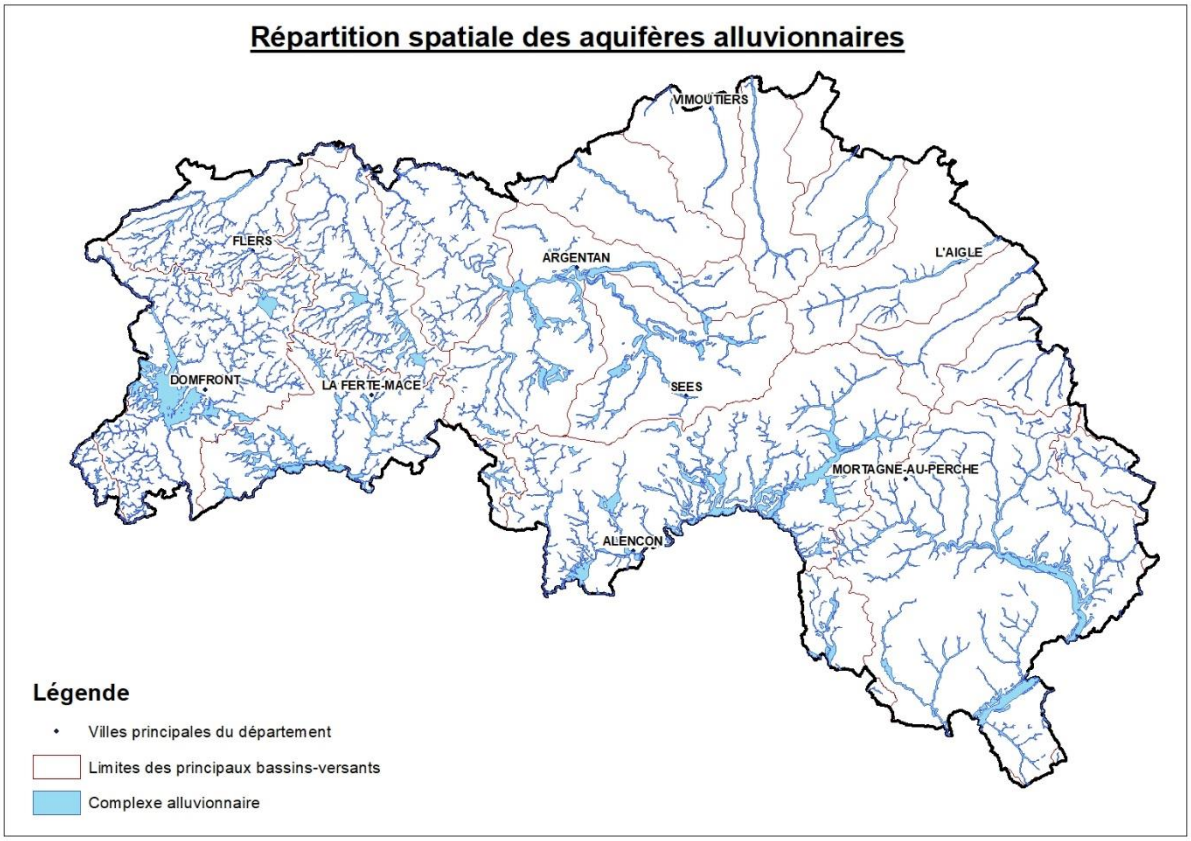


Illustration 86 : Carte d'affleurement des formations d'alluvions d'après la carte géologique harmonisée du département de l'Orne

[17] Donnée disponible : http://www.normandie.developpement-durable.gouv.fr/eau-a256.html

La limite de l'information est que ces formations sont plus ou moins continues et les niveaux pas toujours pérennes dans le temps.

D'une manière générale, on considère l'existence de trois cas principaux de relation hydrodynamique entre la nappe et la rivière, comme le montre l'Illustration 87 :

- Cas 1 : la nappe et la rivière sont en relation : la nappe alimente la rivière (le niveau de la nappe est supérieur à l'altitude de la rivière).
- Cas 2 : la nappe et la rivière sont en relation : la rivière alimente la nappe (le niveau de la nappe est inférieur à l'altitude de la rivière).
- Cas 3 : pas d'échange entre la rivière et l'aquifère (formation imperméable entre le lit du cours d'eau et la nappe).

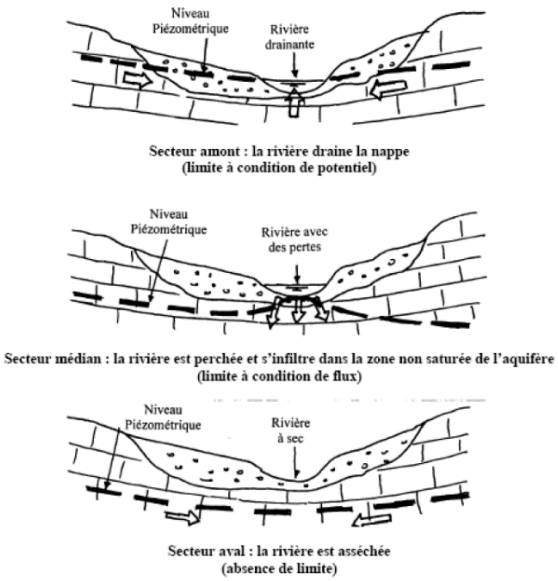


Illustration 87 : Relations hydrodynamiques entre la nappe d'accompagnement du cours d'eau et la nappe, source BRGM

Différents facteurs (nature des berges, des alluvions, des terrains encaissants, …) interviennent dans les relations nappe-rivière. L'Illustration 88 suivante montre l'exemple de relations qui peuvent exister avec les formations encaissantes.

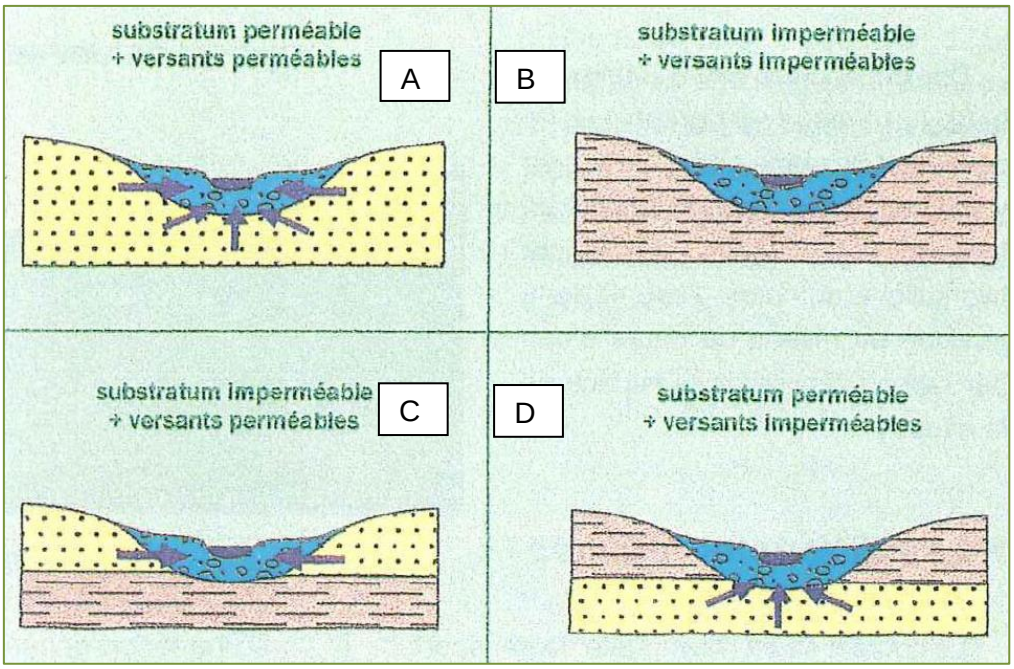


Illustration 88 : Relation d'une nappe alluviale avec les terrains encaissants (Daum et al., 1997 dans Vernoux et al., 2010). L'ensemble des cas peut être rencontré dans le département de l'Orne (exemples A : l'Orne amont, B : La Dives et la Sarthe amont, C : La Touques – l'Eure, D : Le Noireau – la Mayenne)

Lorsque les échanges sont possibles entre la rivière et la nappe des alluvions (berges non-colmatées), ces échanges peuvent évoluer au cours du temps en fonction de la situation hydrologique ou climatique comme évoqué dans l'Illustration 89 ci-après. La rivière peut drainer la nappe ou l'alimenter.

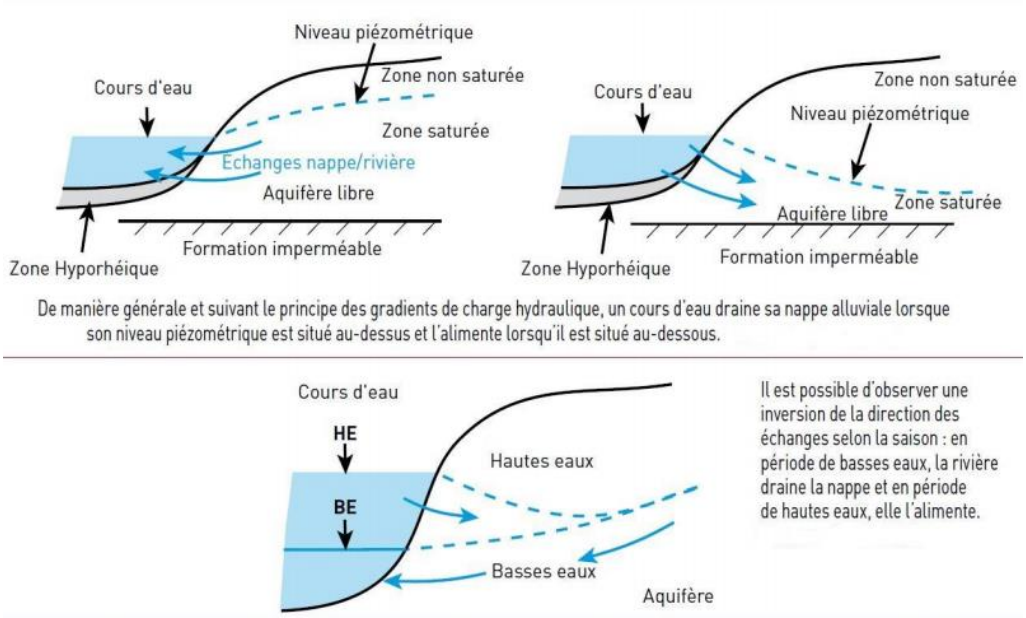


Illustration 89 : Schéma de l'interface nappes/rivières et variabilité des échanges (Bravard et Clémens, 2008)

Dans le cas général, cet aquifère est alimenté librement par infiltration des précipitations, par l'apport des aquifères encaissants et surtout par les échanges avec le cours d'eau. L'importance

de ces échanges va être plus ou moins importante en fonction de la nature des alluvions et de la différence de gradient qui peut exister entre le cours d'eau et la nappe alluviale d'une part et la nappe éventuellement existante dans la formation géologique sous-jacente d'autre part.

Dans le cas où la nature des formations serait plutôt imperméable, celles-ci jouent alors le rôle de barrière étanche avec les aquifères sous-jacents et peut donc, les rendre captifs à semi-captifs. En surface, l'effet de l'infiltration des précipitations peut alors être relativement limité.

Il s'agit d'une zone de support des milieux humides aquatiques et terrestres, dont le rôle hydro-écologique est fondamental.

A l'échelle départementale, on relève que :

- la puissance de ces formations apparait comme relativement réduite et ne dépasse que très rarement la dizaine de mètres d'épaisseur ;
- en termes de surface d'affleurement, il s'agit d'une des zones les plus importantes à l'échelle du département : la surface totale affleurante est estimée à 500 km² environ. Elle constitue donc un réservoir non négligeable ;
- les lithologies rencontrées sont généralement argilo-sableuses. En raison de cette nature, les caractéristiques hydrauliques des alluvions sont le plus souvent médiocres et les écoulements souterrains y sont donc supposés comme limités (Pivette Consultant, 1999). *Exemple des bassins amont de la Risle, de l'Iton et de l'Avre dont le lit repose sur des formations argileuses, la nappe alluviale peut alors être déconnectée de la nappe…*
- les niveaux fluctuent généralement peu : de l'ordre du mètre, entre les hautes et basses eaux.

b) Nappes des Lœss, limons des plateaux et colluvions

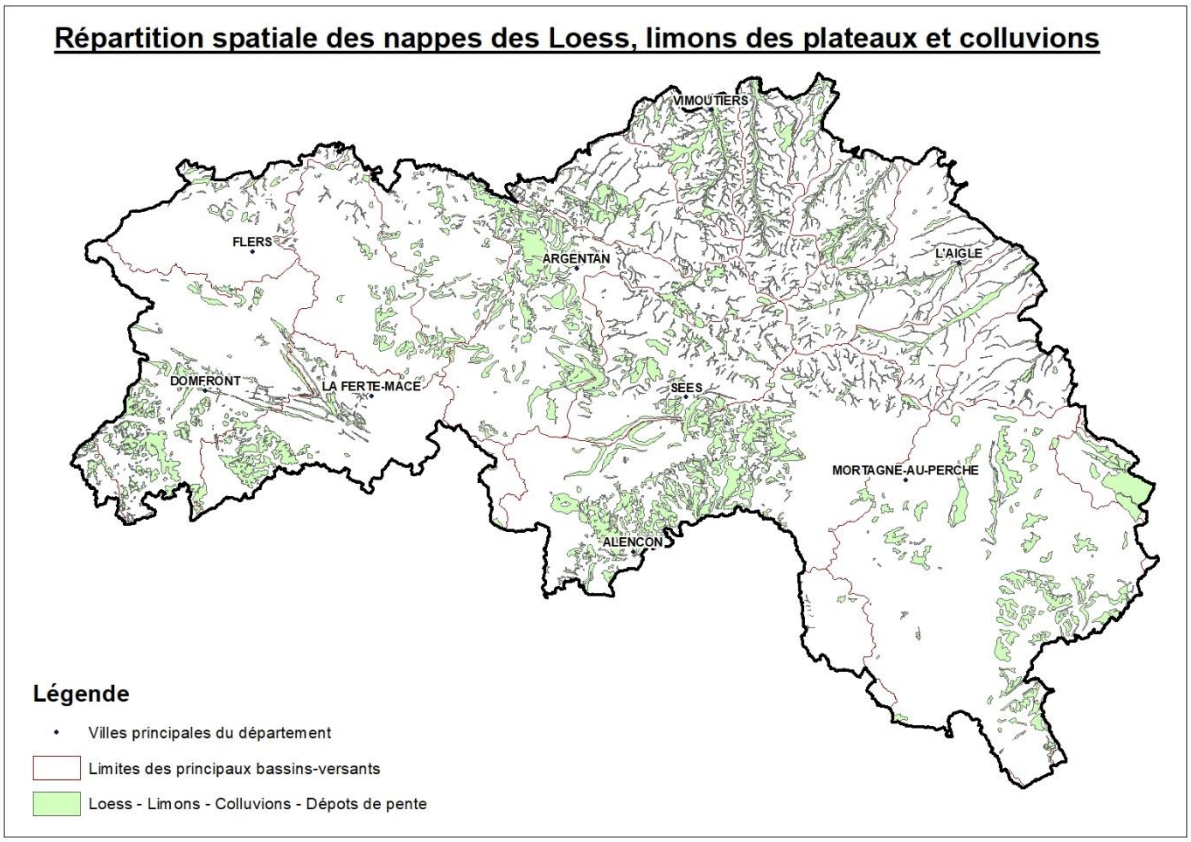


Illustration 90 : Carte d'affleurement des altérites des Loess, limons et colluvions d'après la carte géologique harmonisée du département de l'Orne

D'une manière générale, les formations du régolite sont mal cartographiées à l'échelle du territoire et de façon très hétérogène par les différents auteurs. Leur répartition est donc assez mal appréciée à l'échelle du territoire. Les surfaces estimées à partir de la carte géologique harmonisée donne une surface globale de l'ordre de 345 km² ce qui est somme toute assez faible.

- **Limons et Loess**

Les limons et loess sont composés par des grains de quartz très fins déposés selon des séquences alternatives. Les loess de couleur jaune pâle homogène, renferment 10 à 20 % de carbonates, 5 à 15% d'argile, et les limons bruns, renferment des fragments de quartz plus grossiers, peu carbonatés et contenant des argiles : 10 à 40%. L'épaisseur de ces formations peut atteindre 8 m pour les lœss et jusqu'à 9 m sur Argentan pour les Limons des plateaux. Ils sont essentiellement cartographiés sur les plateaux à l'est du département.

Lautridou (1993) estime que les lœss constituent indéniablement une formation réservoir grâce à leur porosité élevée. L'auteur estime par ailleurs qu'il est nécessaire de prendre en compte la géométrie des discontinuités et des couches argileuses dans les séquences. En effet, la variabilité des faciès et des situations géomorphologiques expliquerait des flux d'eau très différents en sortie du système.

Celui-ci serait notamment affecté par des mouvements capillaires ascendants (en période de sécheresse), des migrations latérales et enfin des percolations vers le substrat. Au final les

expérimentations réalisées sembleraient démontrer que le lœss libère peu d'eau : moins de 25 % et assurerait donc un rôle de filtre, surtout vis-à-vis des pollutions de surface.

- **Colluvions**

Les colluvions sont constituées de matériaux remaniés par le ruissellement, la solifluxion et accumulées sur les versants ou dans les fonds de vallons au Quaternaire. Leur nature est donc très intrinsèquement liée aux formations d'origine. Cette formation possède une matrice souvent argilo-sableuse ou limoneuse qui peut contenir des éléments emballés de craie, calcaire, grès, quartz, etc…

L'épaisseur de ces dépôts est irrégulière : voisine de 0,50 m pour les matériaux brassés mécaniquement en haut des pentes, elle peut atteindre plusieurs mètres dans leur partie inférieure.

Ces formations aussi ont un rôle de réservoir et de tampon pour les pluies efficaces et encore de filtre pour les pollutions de surface. A l'échelle départementale, leur surface estimée est considérable : plus de 830 km², leur rôle hydrogéologique est donc indéniable (rôle capacitif tampon et vidange vers les aquifères sous-jacents).

Lorsque limons-loess et colluvions sont saturés, les écoulements se forment en surface et suivent la pente et donc la topographie (écoulement hypodermique).

Leur faible épaisseur et capacité ne permettent pas une exploitation de leurs ressources à des fins d'alimentation en eau potable. De plus ces ressources sont vulnérables aux pollutions de surface et soumises à l'aléa climatique.

c) Nappes des altérites des formations carbonatées mésozoïques

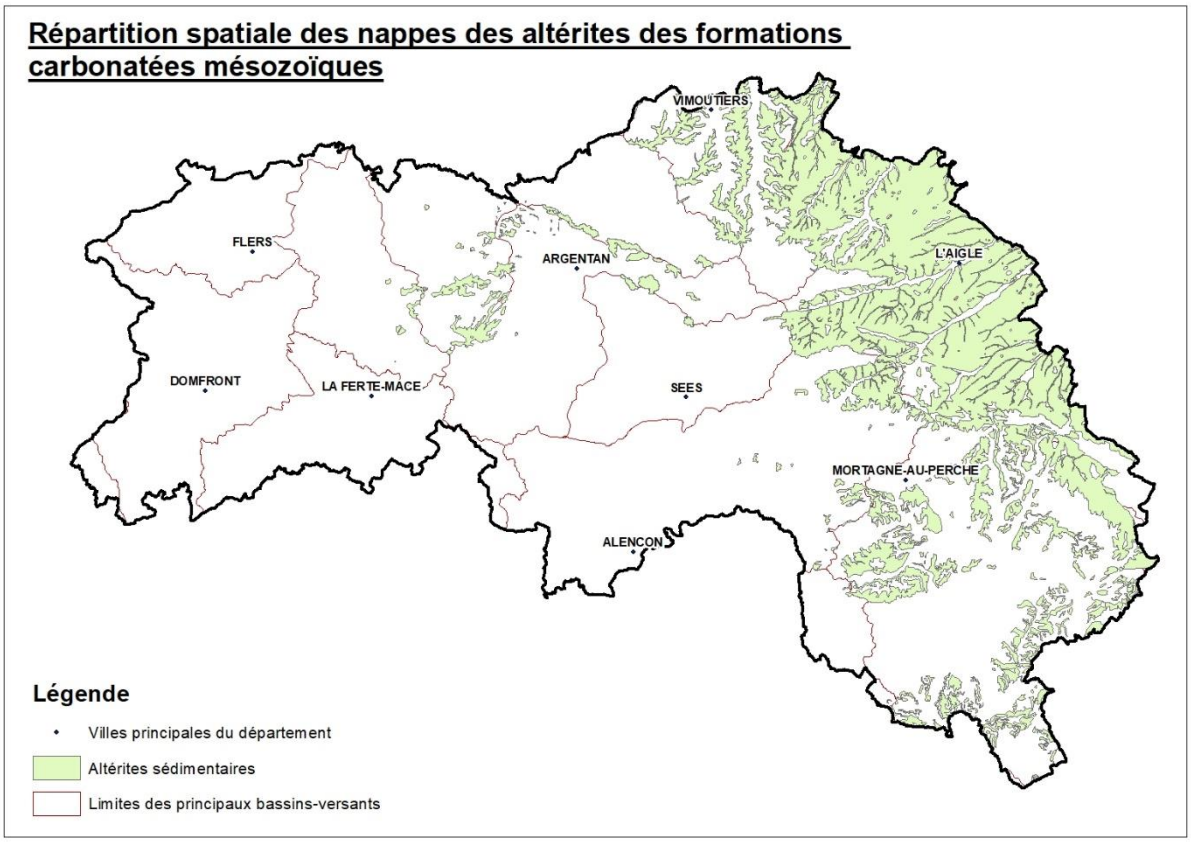


Illustration 91 : Carte d'affleurement des altérites des formations carbonatées mésozoïques d'après la carte géologique harmonisée du département de l'Orne

Les altérites des formations mésozoïques de l'Orne sont principalement constituées d'argiles plus ou moins silteuses ou sableuses, à cherts ou silex. Ces formations correspondent à des altérites autochtones issues pour la plupart de la décalcification des craies du Crétacé supérieur et des calcaires jurassiques sous-jacents. Elles affleurent, de fait, sur le tiers est du département de l'Orne, leur épaisseur varie de quelques décimètres à une dizaine de mètres pour les altérites des calcaires (8 m dans les environs de Sées) et jusqu'à plus de 10 m pour la Formation Résiduelle à silex (voire plusieurs dizaines de mètres au sein des racines d'altération) – (Meire et al., 2019). La superficie couverte par l'ensemble de ces formations est très importante : celle-ci est estimée à 1175 km² environ, à partir de la carte géologique harmonisée du BRGM.

- **Argiles à silex**

Les formations résiduelles à silex recouvrent l'ensemble des plateaux crayeux de l'est du département et sont surmontées par les limons de plateaux.

Les formations résiduelles à silex peuvent renfermer un niveau d'eau et alimenter des émergences temporaires. On ne dispose que de très peu d'éléments d'information concernant cette "nappe". Seuls quelques anciens puits de ferme, peu productifs et dont le niveau peut subir de fortes variations saisonnières, en confirment l'existence. Le niveau aquifère que ces puits atteignent mérite à peine le nom de nappe au sens strict du terme : il s'agit, plutôt que d'une nappe, de niveaux aquifères perchés, d'épaisseur et d'extension variables (Pivette, 2012).

L'université de Rouen a étudié ces processus hydrologiques et plus particulièrement le rôle de stockage des eaux d'infiltration dans les formations superficielles en instrumentant un site atelier sur la commune de Bouville (site situé en Seine-Maritime mais le fonctionnement hydrologique est transposable aux domaines sédimentaires du département de l'Orne sur recouvrement crayeux) (Dupont et al. 2009).

Les sols limoneux surmontant les argiles à silex sont perméables, ce qui favorise l'infiltration des pluies. En profondeur, la compaction des limons est à l'origine d'une diminution de la perméabilité avec la profondeur (Illustration 92). La diminution théorique de la perméabilité des limons des plateaux, avec la profondeur, suit une loi exponentielle, sans réelle rupture avec les argiles à silex, qui sont compactées mais la présence de silex (+/- affectés par le gelifract) introduit une hétérogénéité texturale qui induit une perméabilité non négligeable (David, 2016).

A l'interface craie-argile à silex, la désorganisation de la structure de la craie génère un horizon, localement saturé (observations lors de forages), moins perméable que les argiles à silex qui constituent le mur d'un aquifère de sub-surface, situé dans les formations superficielles constituées par les argiles à silex et les limons (Dupont et al. 2009).

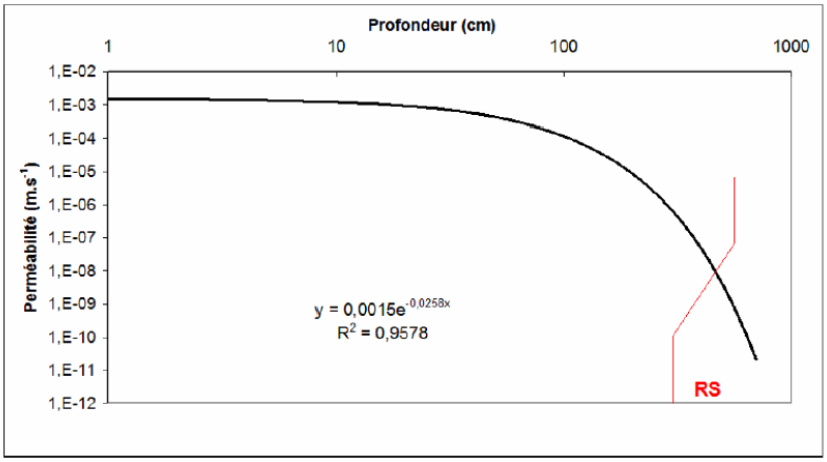


Illustration 92 : Modèle conceptuel d'évolution de la perméabilité des formations superficielles en fonction de la profondeur ; le modèle proposé est fondé sur des mesures de perméabilité réalisées au laboratoire en fonction de quelques valeurs de pression ; en rouge passage de la base des limons aux argiles à silex (Dupont et al. 2009)

Le suivi piézométrique réalisé dans les formations superficielles sur le même site de Bouville en 2007/2008 permet d'illustrer la réponse hydrologique de l'aquifère de sub-surface à la pluviométrie efficace. Au cours du cycle hydrologique suivi (2007/2008), une recharge de l'aquifère superficiel (courbe rouge de l'Illustration 93) est enregistrée pendant l'automne (période pluvieuse qui a débuté en septembre), un maintien de hauts niveaux piézométriques pendant les périodes d'hiver et de printemps (avec des écoulements vers la bétoire qui sont compensés par la recharge par les pluies) pour arriver à l'étiage en été (vidange non compensée par des apports pluvieux conséquents).

La comparaison des chroniques piézométriques de l'aquifère superficiel et de l'aquifère de la craie sous-jacent illustre le décalage entre les cycles crue-étiage de l'aquifère superficiel et de l'aquifère de la craie (respectivement courbe rouge et courbe bleue).

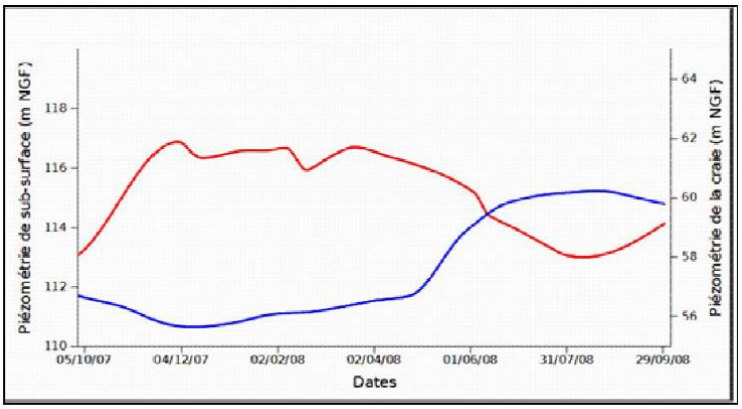


Illustration 93 : Comparaison des chroniques de piézométrie de l'aquifère superficiel (en rouge) et de piézométrie de l'aquifère de la craie (en bleu) – (Dupont et al. 2009)

La recharge de l'aquifère de la craie débute progressivement en hiver pour s'accélérer, au printemps et atteindre les niveaux de crue en été. Ce délai important est lié aux capacités de stockage et d'écoulement dans les formations superficielles. Ce retard peut diminuer localement, en fonction de plus faibles capacités de stockage des formations superficielles et, en particulier des épaisseurs plus faibles de limons des plateaux (Dupont et al. 2009).

- **Altérites des formations jurassiques**

L'épaisseur et la granulométrie des altérites de marnes calloviennes varient selon les différentes assises constituant cet étage. L'épaisseur de ces altérites croît aussi en fonction de la granulométrie. Souvent inférieure au mètre sur le Callovien inférieur argileux, la profondeur des altérites atteint et dépasse souvent 3 m sur le Callovien supérieur (4,8 m au sud-est du Merlerault).

Fragmentés par des phénomènes de dissolution et la gélifraction quaternaire, les calcaires bathoniens et oxfordiens sont disloqués en surface. Ces formations pulvérulentes sont parfois emballées dans une matrice limoneuse. Ces altérites sont discontinues et conservées plus souvent en poches qu'en couverture continue, de profondeur généralement inférieure au mètre : elles sont visibles notamment dans des poches karstiques déformées par cryoturbation. Les limons marrons ou brun-rouges qui recouvrent les calcaires bathoniens et oxfordiens sont d'autant plus riches en gélifracts calcaires que le calcaire altéré est plus dur.

Les altérites sont peu perméables, mais peuvent localement être très capacitives : l'eau des pluies s'infiltre verticalement dans le sol mais dès lors que l'altérite apparaît, elle limite l'infiltration verticale de l'eau qui forme en période de pluie une nappe perchée. Celle-ci circule latéralement à la faveur de la pente dans l'horizon poreux supérieur (BD-LISA, BRGM-AESN, 2012).

L'exploitation des nappes des altérites ne constitue pas un mode d'exploitation intéressant à l'échelle du bassin, dans la mesure où les ouvrages de « type puits » assurent des débits très faibles, et sont particulièrement vulnérables aux pollutions de surface (pollutions accidentelles ou diffuses).

A noter : la coexistence de paléo-altérations infra-crétacées identifiées notamment par Verague (1977) entre Sées et Alençon : une décalcification des marnes du Callovien, des silicifications et meuliérisations des calcaires du Bathonien, une argilisation des calcaires du Bathonien.

d) Nappes des Altérites des formations du socle armoricain

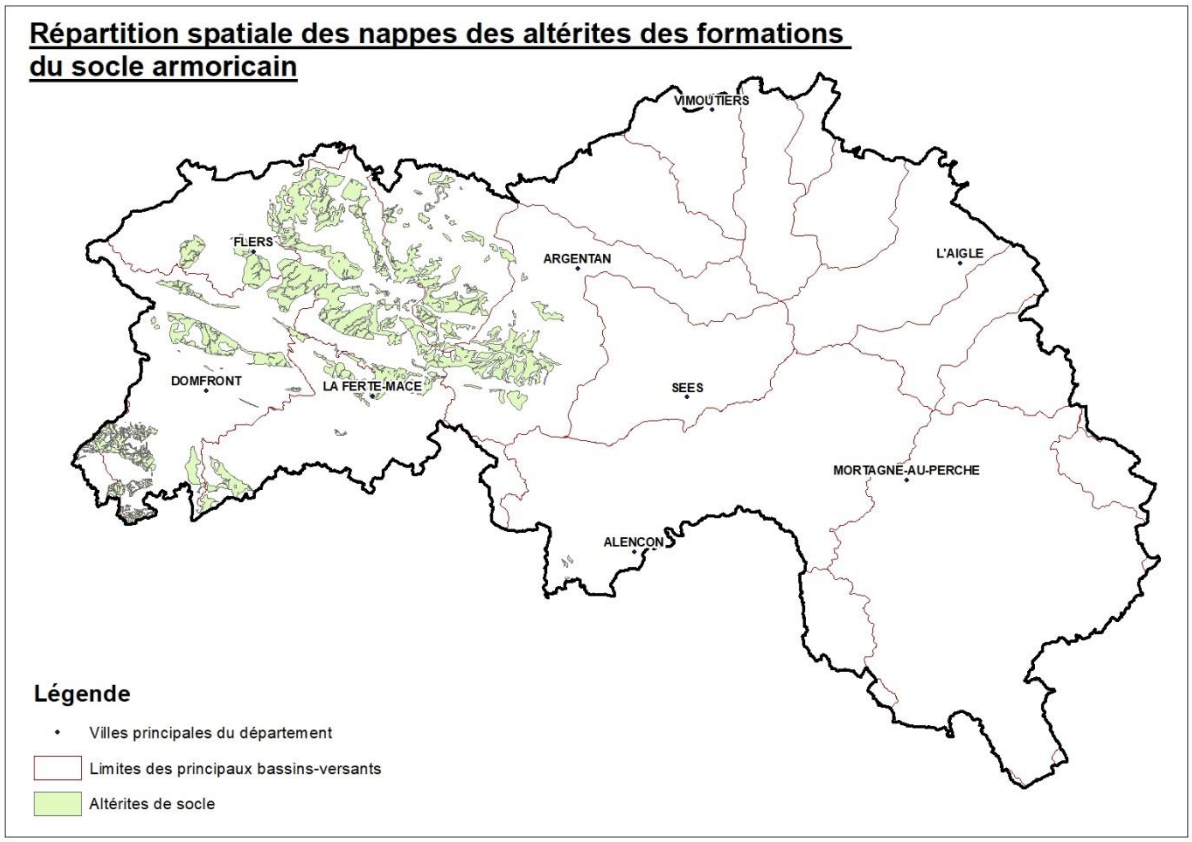


Illustration 94 : Carte d'affleurement des altérites des formations de socle d'après la carte géologique harmonisée du département de l'Orne

A priori, il existe peu ou pas de littérature spécifique traitant de ce sujet spécifique dans le département de l'Orne au SDE61 ou au BRGM. Ces formations ont en outre été cartographiées de façon très hétérogène (leur nature et leur répartition sont donc assez mal connues à l'échelle du département).

Les altérites du socle armoricain, localisées à l'ouest du département, sont principalement de deux types (Meire et al., 2019 ; Verague J., 1977) :

- Les altérites issues de l'altération des granites et granodiorites (socle cristallin) : elles sont constituées de sables, plus ou moins grossiers, et plus ou moins consolidés dans une matrice argileuse (kaolinisation sous l'effet d'une latéritisation). Ces sables sont fréquemment mélangés aux lœss d'origine éolienne qui recouvrent la zone depuis la dernière glaciation (à l'Holocène - Quaternaire).
- Les altérites issues de l'altération des formations plus ou moins métamorphisées des flyschs briovériens (ensemble silto-gréseux). Elles sont caractérisées par une argilisation intégrale ou partielle des formations d'origine et présentent des faciès généralement rubéfiés.

Leur épaisseur varie de quelques décimètres à quelques mètres tout au plus.

- **Altérites des granitoïdes**

Le massif granodioritique d'Athis est en grande partie dépourvu d'arènes. Seuls quelques secteurs disposent d'une couverture non négligeable comme par exemple sur les communes de Saint-Aubert-sur-Orne (5 m au Mensil-Haut) et Rabodanges (8 m à la Trousserie) - Couëffé et al. (2007).

Les arènes sont plus développées sur les granodiorites de Passais - Le Horps et de la Ferté-Massé où elles peuvent dépasser 15 m d'épaisseur.

- **Altérites des schistes et grès**

Sur le secteur du Grand-Hazé, Télosia et Hydriad (2010) ont évalué les paramètres hydrodynamiques d'un certain nombre de ces formations. On rappelle que celles-ci reposent et sont issues des flyschs briovériens.

Formations	Epaisseur	Transmissivité (m^2/s)	Conductivité hydraulique (m/s)	Emmagasinement
Tourbes	0.3 à 1 m	/	/	/
Limons gris	0.5 à 2 m	/	/	/
Argiles bleues	1.5 à 2.5 m	/	10^{-7} à 10^{-9} (Cador) ou 10^{-6} à 10^{-7}	/
Altérites (argiles et schistes argileux)	16 à 25 m	/	10^{-7} à 10^{-9}	$2*10^{-3}$ à $9.7*10^{-2}$

Tableau 3 : Caractéristiques hydrodynamiques des formations d'altération du socle briovérien, Télosia et Hydriad (2010)

Les informations du Tableau 3 montrent que les altérites sont peu perméables mais présentent une capacité d'emmagasinement non négligeable, de l'ordre de : moins de 1 % à 10%. Cette caractéristique leur confère un rôle de stockage des eaux souterraines.

Télosia et Hydriad (2010) ont mis en évidence lors du suivi de piézomètres de sub-surface du marais du Grand-Hazé que les niveaux dans les limons et les altérites évoluent en fonction des conditions hydro-météorologiques et fluctuent entre la surface du sol et la base de la formation d'altération.

- **Formations de versants des terrains paléozoïques**

Les formations de versant (dépôts de pente) sont caractérisées par des formations relativement hétérogènes aussi bien en termes de faciès que d'épaisseur. Elles correspondent à des formations sub-autochtones déposées sur les pentes des versants par des processus gravitaires (head) ou de type solifluxion (glissements de terrain), celles-ci seraient principalement développées au Quaternaire pendant les périodes humides interglaciaires (coulées de blocs). La composition des formations de versant varie en fonction de la nature du « substratum » qui en est à l'origine (schistes, grès etc.) (Meire et al. 2019).

Ces formations sont très localisées, près des zones de reliefs formés par les structures paléozoïques (principalement autour des massif d'Ecouves et de Domfront-Mortain-La ferrière et le long de la Baize-Zone Bocaine). Elles peuvent constituer des accumulations importantes : pierriers, éboulis, presles, grèzes, grâzes, …

Ces accumulations constituent de petits réservoirs aquifères qui vont recevoir les eaux des formations paléozoïques et les restituer, principalement sous forme de sources. De fait celles-ci assurent une fonction capacitive et transmissive du fait de leur faible cohérence. Ces ressources ont pu localement être exploitées pour l'alimentation de petits hameaux par exemple.

- **Synthèse**

Les altérites des formations de socle sont globalement mal cartographiées à l'échelle du territoire et de façon très hétérogène. Les surfaces estimées à partir de la carte géologique harmonisée donnent une surface globale de l'ordre de 345 km².

Dans l'ensemble, la piézométrie des formations d'altérites suit l'allure de la topographie, avec des écoulements orientés des coteaux vers l'axe des vallées.

Ces ressources sont peu productives et vulnérables aux pollutions de surface. Ces formations ont un rôle capacitif important qui offre un soutien d'étiage aux milieux superficiels (zones humides et cours d'eau). Leur rôle transmissif est souvent médiocre et ne permet d'exploiter des ouvrages (puits peu profonds) aux faibles débits, souvent < 10 m^3/h.

4.4.2. Aquifères des formations tertiaires

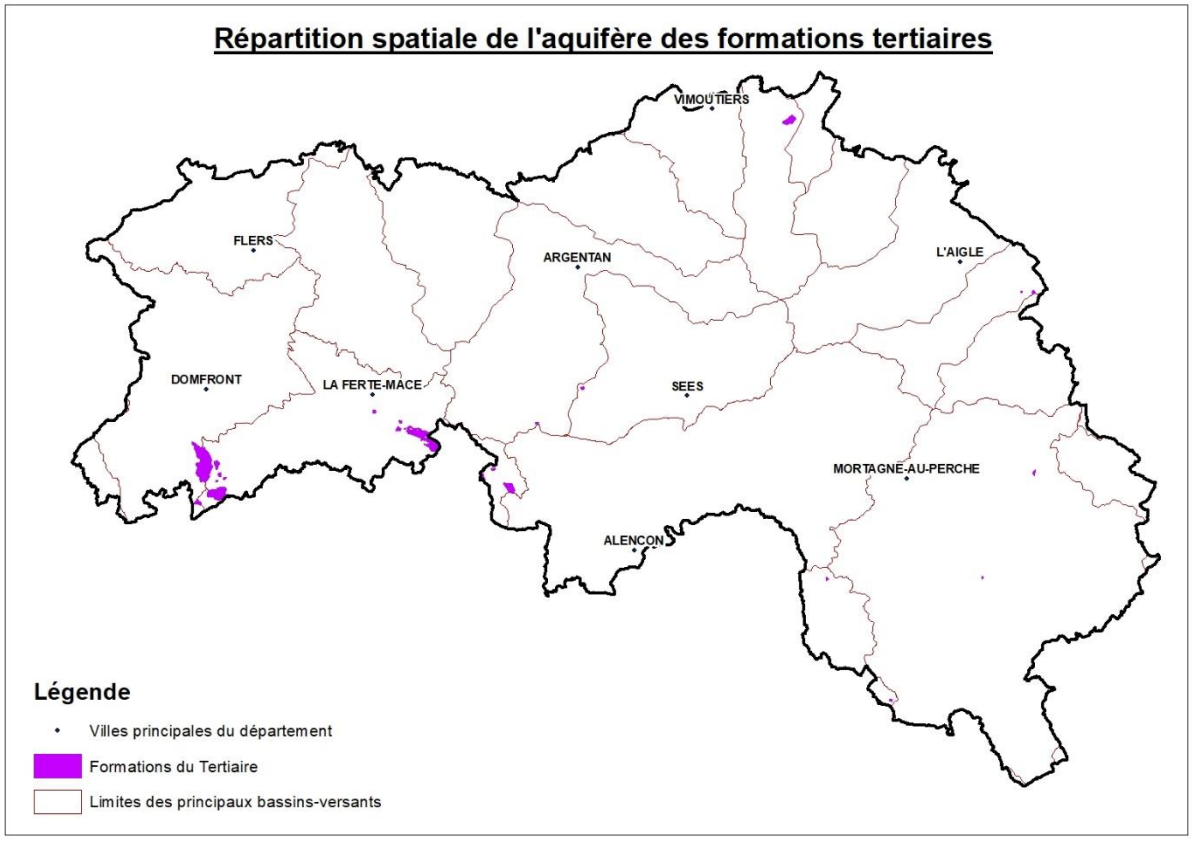


Illustration 95 : Carte d'affleurement des formations tertiaires d'après la carte géologique harmonisée du département de l'Orne

Le Tertiaire affleure très peu dans l'Orne où on le retrouve essentiellement sous forme de petits bassins notamment dans le sud-ouest du département, dans les environs de Céaucé. Il dessine deux ensembles du Paléogène : l'un composé de sables, cailloutis, argiles et calcaires de type

laguno-lacustre, l'autre composé de sables et graviers surmontés par des dalles de grès silicifiés (Lereculey A. et Duriez M. (2008)).

Malgré une succession de roches plutôt perméables dont l'épaisseur totale peut être conséquente, cet ensemble paléogène ne peut constituer qu'un aquifère d'importance locale dans le sens où il n'affleure que de manière éparse, à la faveur de petits fossés d'effondrement. Ces conditions confèrent donc à ces ressources une faible capacité et un intérêt productif très limité, dont les ressources peuvent *a priori* facilement s'épuiser faute d'une réalimentation suffisante sur les zones de recharge et sans un soutien dans l'alimentation des formations « encaissantes » (drainance ou alimentation latérale).

4.4.3. Nappes des marnes et calcaires calloviens

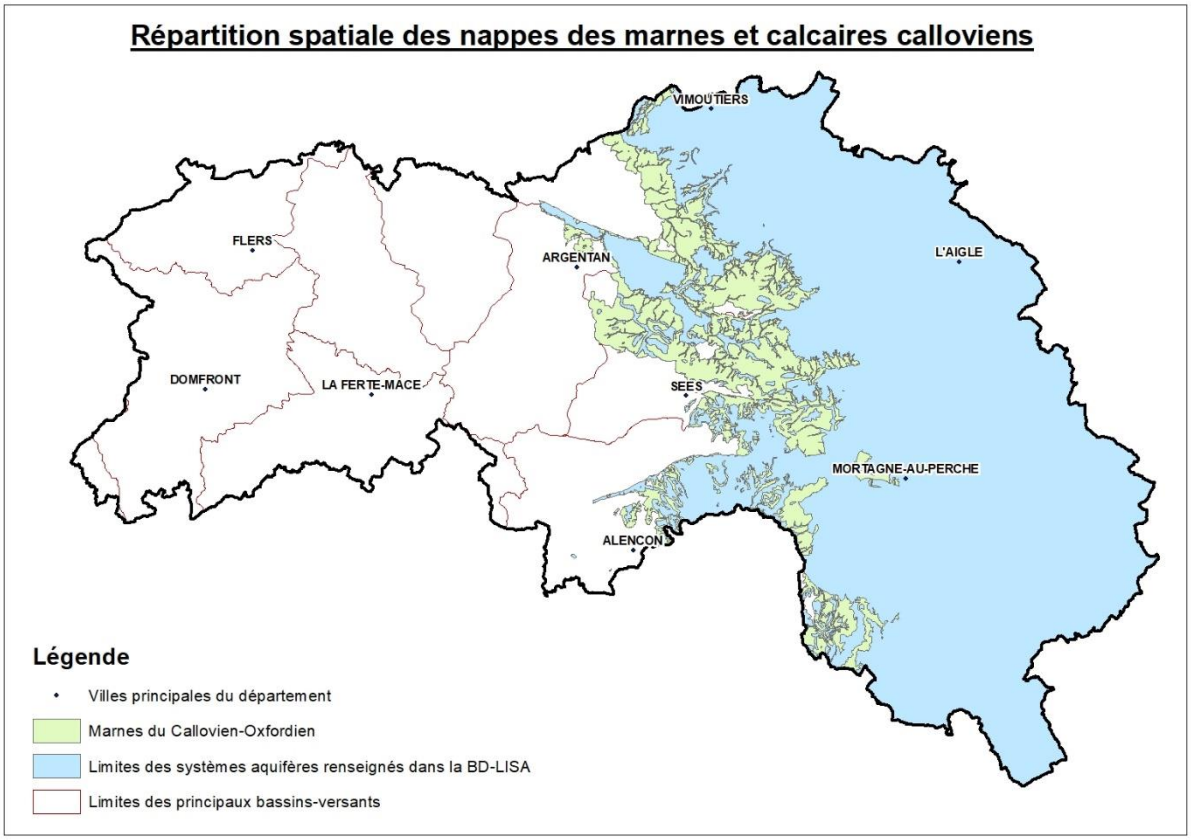


Illustration 96 : Carte d'affleurement des formations des marnes et calcaires calloviens d'après la carte géologique harmonisée du département de l'Orne et limite de son aquifère d'après la BD-Lisa

Il existe au sein de l'ensemble des marnes du Callovien, des intercalations calcaires qui forment de petits niveaux aquifères (libres à captifs). Ces nappes, perchées au-dessus de la nappe du Bathonien, ont une extension et une productivité souvent limitées, qui voit leur utilisation souvent réduite (puits de fermes) – (Lithologic, 2011- Pivette Consultant, 1999).

Les relations hydrauliques se font avec le réseau superficiel, par drainance des cours d'eau et d'autre part par drainance descendante vers l'aquifère bathonien (Antea, 1995 ; Pivette Consultant, 1999).

Cet ensemble reste d'une grande importance pour l'aquifère du Bathonien :

- Il assure une protection en rendant captif (toit « imperméable »), la perméabilité verticale est évaluée à 10^{-8} m/s.
- Il constitue un réservoir non-négligeable (fonction capacitive), qu'il alimente pour partie et permet localement de tamponner les fluctuations pluriannuelles (Pivette Consultant, 1999).

Sur le secteur d'Argentan, des investigations réalisées par Antea (1995) (suivi sur une vingtaine de piézomètres) sur la commune d'Almenêche montrent que :

- les écoulements dans les formations calloviennes suivent la direction régionale, à savoir vers le NW ;
- les fluctuations annuelles sont faibles, de l'ordre de 1 à 2 m.

4.4.4. Aquifère du Lias

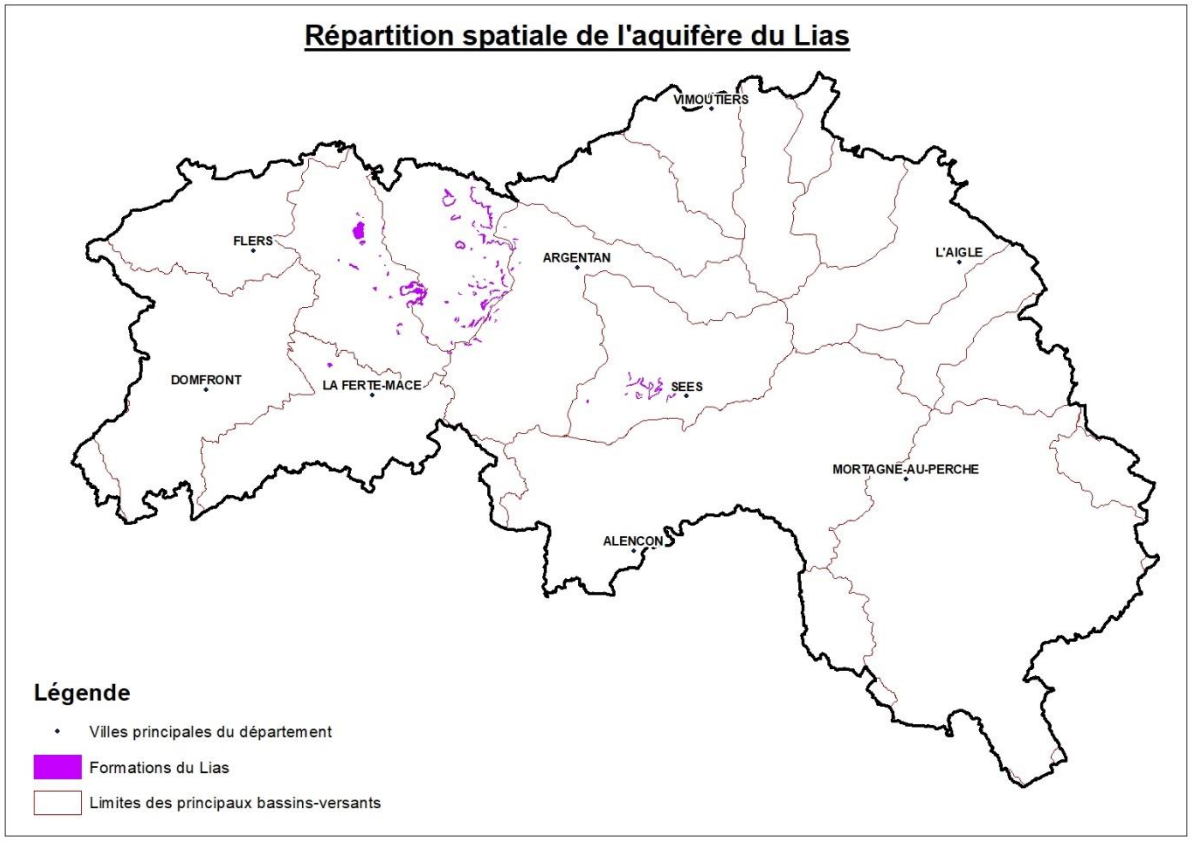


Illustration 97 : Carte d'affleurement des formations du Lias d'après la carte géologique harmonisée du département de l'Orne

La nappe du Lias se développe dans des séquences sableuses à carbonatées (sables argileux, calcaires et marnes à bélemnites), entrecoupées par des séquences marneuses notables (argiles d'Aunou, argiles et marnes à Poissons). Les surfaces d'affleurement sont très restreintes et éparses à l'échelle du département de l'Orne (quelques km² tout au plus) – Lereculey A. et Duriez M. (2008). Ces formations combleraient les fonds de petits bassins d'effondrement et seraient discordantes sur les paléo-reliefs de la bordure est du massif armoricain. L'épaisseur totale de ces formations peut être assez conséquente pour constituer une ressource non négligeable.

Au niveau hydrogéologique cet aquifère est peu connu, bien que certains forages d'eau font état de venues d'eau dans des sables gris sous les calcaires bathoniens près d'Alençon (forage du plan d'eau au Mêle-sur-Sarthe). Il s'agit d'une nappe captive, dont les sables sont probablement attribués au Pliensbachien ou Toarcien (Lithologic, 2009). L'alimentation de ces ressources se fait probablement par drainance descendante depuis les formations du Dogger.

4.4.5. Aquifère des sables du Trias

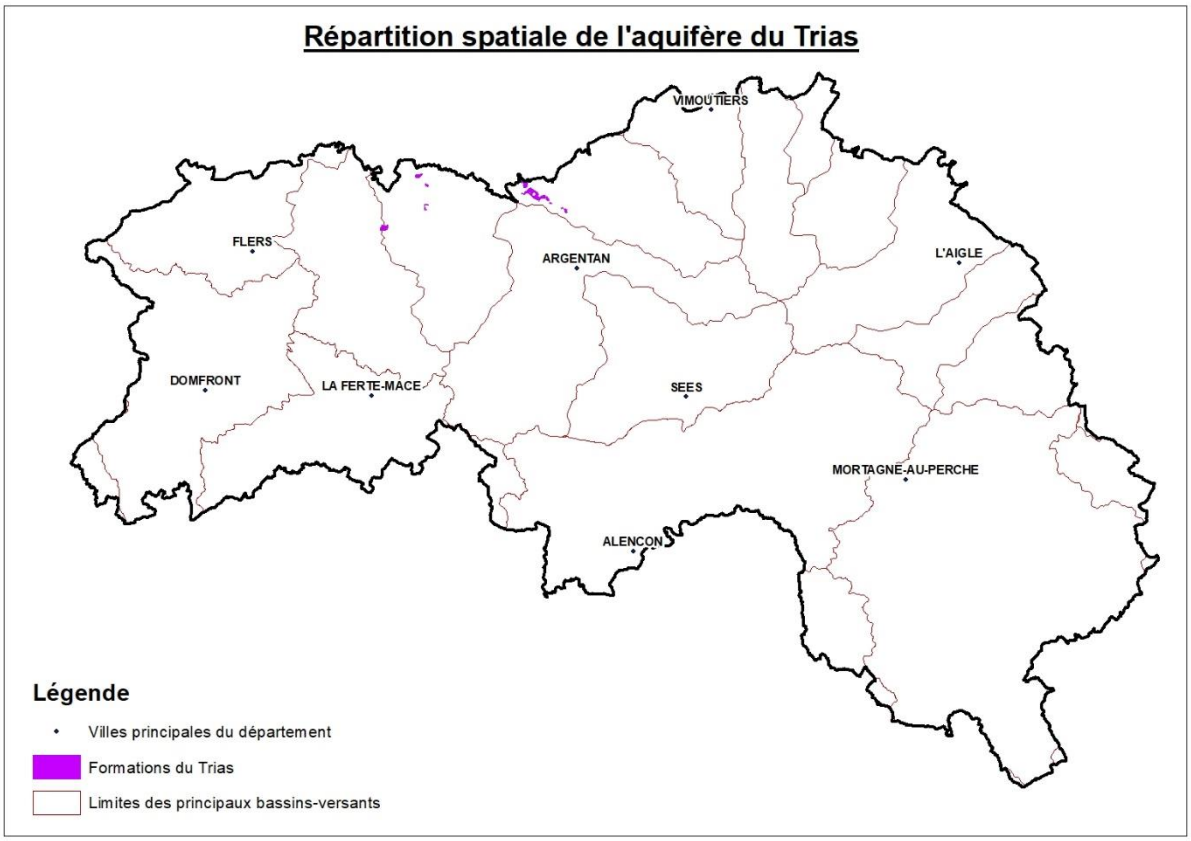


Illustration 98 : Carte d'affleurement des formations Trias d'après la carte géologique harmonisée du département de l'Orne

Cet ensemble détritique constitué d'argiles, de sables et graviers à matrice argileuse ont une extension très limitée dans l'Orne et une épaisseur modérée. Ces formations du Keuper ne sont connues qu'au nord du département (secteur de Nécy) et se présentent le plus souvent sous forme de lentilles ou de paléo-chenaux (Lereculey A. et Duriez M., 2008).

Les conditions d'affleurement de ces formations très hétérogènes et les faibles dépôts, *a priori* conservés dans des compartiments tectoniques, confèrent donc à ces ressources une faible capacité et un intérêt productif très limité. De plus, les ressources semblent facilement s'épuiser faute d'une réalimentation suffisante sur les zones de recharge (lorsque les terrains sont affleurants). Dans le cas contraire, tout ou partie de cette nappe doit être captive sous les formations du Jurassique. Celle-ci doit donc être principalement alimentée par drainance descendante depuis les formations du Jurassique ou par drainance ascendante depuis les formations de socle.

4.5. BILAN DES CONNAISSANCES POUR LES PRINCIPAUX AQUIFERES EXPLOITES POUR L'ALIMENTATION EN EAU POTABLE

Les principales connaissances, issues de la synthèse bibliographique des documents disponibles au SDE 61 et au BRGM, pour les formations aquifères exploitées pour l'alimentation en eau potable sont reprises ci-après.

D'une manière générale on peut ici reprendre le constat d'une disponibilité des ressources bibliographiques moins importantes en domaine de socle (cf. rapport BRGM/RP-69332-FR).

a) Ressources du domaine de socle

- **Les formations paléozoïques**
  Ces structures plissées possèdent des axes subhorizontaux et des plans axiaux déversés vers le sud. La connaissance précise de la géométrie des réservoirs et leur continuité sous les sédiments mésozoïques est encore relativement méconnue. La productivité et la disponibilité de la ressource sous ces formations reste donc à confirmer, notamment au regard des capacités de recharge, a priori limitées.

  Plus généralement, les formations gréseuses ont dans leur ensemble un rôle aquifère intéressant compte tenu de la puissance de ces formations : la ressource se développe principalement dans les zones fissurées. En termes de productivité, les débits exploités sont très variables : de la dizaine de m^3/h à plus de 100 m^3/h. Les écoulements se font a priori dans le sens du pendage des formations ou empruntent les axes fissurés. La nappe est libre au niveau de la zone d'affleurement à captive lorsqu'elle est sous recouvrement.

- **Pour les Granitoides et Cornéennes,** les horizons productifs se développent dans les arènes et altérites et au sein de l'horizon fissuré. Ce dernier est très dépendant de la densité de fracture et du niveau de connexion des fractures entre elles. L'horizon fissuré peut être captif à semi-captif sous les formations d'altération (une dénitrification peut donc se développer).
  Dans l'horizon superficiel, les écoulements suivent globalement la topographie. Dans l'horizon fissuré, la fracturation jouerait le rôle de drain, les informations sont peu disponibles sur ce milieu discontinu.
  Dans les altérites et les arènes les débits sont très modestes et ne dépassent généralement pas plus de quelques dizaines de m^3/h. Dans les milieux fissurés les débits sont plus variables, de quelques dizaines à plus d'une centaine de m^3/h (donc plus favorables à une exploitation). Les eaux de l'horizon superficiel (altérites) sont peu mobilisables et vulnérables car peu protégées.

- **Les Flyschs Biovériens** sont constitués d'une alternance de petits bancs composant des réservoirs très déstructurés (plissés, tordus, faillés) et discontinus (discontinuités tectoniques et lithologiques). Cet agencement implique une forte compartimentation de ce réservoir aquifère.
  Dans ces formations, la présence d'eau souterraine se manifeste principalement dans les altérites et dans la roche fissurée. Ce qui permet tout de même de présenter des coefficients de tarissement des rivières drainant le Briovérien très homogènes.
  Dans la zone superficielle les écoulements sont libres et suivent globalement la topographie. Ils sont par contre beaucoup plus difficiles à appréhender dans la zone fissurée ou fracturée.

A l'échelle du département, la productivité est très variable d'une dizaine à plus d'une centaine de m^3/h. Les eaux de l'horizon superficiel sont vulnérables car peu protégées. Sous les altérites, la nappe peut prendre un caractère captif et une dénitrification peut se produire.

A noter, d'une manière générale, la roche saine non altérée et non fissurée est le plus souvent peu perméable donc peu ou pas du tout aquifère. Il apparait donc primordial de cartographier les épaisseurs et la réparation spatiale des zones altérées et fissurées.

On rappelle que la première constitue la zone de stockage (ou tampon) et la seconde une zone plus transmissive et donc exploitable de l'aquifère, cf. chapitre 3.

b) Ressources du domaine sédimentaire

- **Les formations de l'Aalénien, du Bajocien-Bathonien**
  Ces formations ont une dominante calcaire. Leur épaisseur, modeste sur la zone de bordure au contact du domaine armoricain, augmente vers l'est pour dépasser la cinquantaine de mètres et atteindre plus de 100 m en bordure est du département.
  La nappe des calcaires peut être libre, sur les secteurs où les formations sont affleurantes, puis semi-captive à captive vers l'est, sous le recouvrement de plus en plus important des formations géologiques du Jurassique moyen-supérieur et du Crétacé.
  Les rivières drainent la nappe, les écoulements suivent généralement la topographie dans la partie libre de l'aquifère. Dans la partie captive, rivière et nappe sont le plus souvent déconnectées.

  La productivité de la nappe contenue dans les formations calcaires dépend du couple nature des calcaires/fracturation ; en effet l'aquifère sera d'autant plus développé dans les calcaires lorsqu'ils sont sableux et intensément fracturés permettant un bon emmagasinement et un écoulement facilité. Les débits de production peuvent être très variables d'un secteur à un autre (de moins de 10 m^3/h à plus 200 m^3/h), en fonction du contexte et de la nature captive ou non de la nappe.

- **Les formations de l'Oxfordien-Kimmerdigien**
  Cet ensemble est constitué de différentes unités lithologiques superposées, principalement calcaro-sableuses. Celles-ci présentent des variations latérales de faciès. Leur dépôt a été conditionné par le jeu des failles au Mésozoïque, ce qui implique que l'aquifère est très compartimenté. Le mur de cet ensemble aquifère est constitué par les marnes à pernes. Le toit est constitué par les formations argilo-sableuses de l'Aptien-Albien.
  Les principales formations sont de la base au sommet : Le Roussier de Gacé/Sables de Mortagne, Le Grouais/Calcaires du Bellêmois/Calcaires coralligènes, les sables et grès de l'Ormoie/Calcaires à Astartes. Chacune de ces formations peut constituer un petit ensemble aquifère plus ou moins indépendant des autres. L'épaisseur totale de cet ensemble peut dépasser la centaine de mètres. L'épaisseur des formations augmente vers l'est également.
  La nappe est globalement drainée par les vallées et les cours d'eau.
  Il existe des échanges d'alimentation ascendante (lorsque la nappe est en charge) ou descendante avec les formations crayeuses sus-jacentes.
  De par sa forte hétérogénéité la productivité de cet ensemble aquifère est très variable : de quelques dizaines de m^3/h à plus d'une centaine de m^3/h.

- **Les formations crayeuses cénomaniennes et turoniennes**

Une nappe se développe dans les fissures et pores des craies cénomaniennes et turoniennes qui présentent une double porosité. La puissance du réservoir crayeux est modeste dans le département de l'Orne mais peut tout de même atteindre une soixantaine de mètres au sud-est du département.
La nappe est généralement libre mais elle peut être captive dans certains cas : notamment lorsque le recouvrement des argiles à silex ou des alluvions argileuses va limiter l'extension du réservoir. Cette particularité peut s'exprimer dans des configurations géomorphologiques particulières : à l'amorce ou au cœur des vallées par exemple. Les cours d'eau drainent le plus souvent la nappe.
La productivité de l'aquifère de la craie est très bonne : les ouvrages exploités permettent d'obtenir des débits compris entre 65 et plus de 200 m^3/h.

- **La formation des Sables du Perche**
  La formation des Sables du Perche est constituée de sables plus ou moins argileux. Le mur de cet aquifère est constitué par les faciès argileux et du sommet de la Craie de Rouen qui induisent une discontinuité hydraulique. Au toit, la formation peut être recouverte par les altérites à silex (argiles de décalcification) ou par la craie marneuse turonienne.
  L'extension des Sables du Perche au nord est mal connue mais s'arrête probablement au niveau de la faille de Senonches. La faille de Bellême constitue également l'une des limites sud de l'aquifère.
  Les cartes piézométriques disponibles indiquent que les lignes d'écoulement se font depuis les crêtes vers les vallées.
  La productivité de cette formation est moyenne à modeste et ne dépasse pas les quelques dizaines de m^3/h.

La karstification, si elle est bien connue dans le massif crayeux, se développe aussi au niveau d'autres formations du domaine sédimentaire : les formations oxfordiennes et kimmeridgiennes ainsi que les formations bajociennes et bathoniennes. Pour ces dernières, le développement de karst se fait principalement sous l'effet de certaines discontinuités tectoniques, comme la faille bordière du massif d'Ecouves par exemple, ou au niveau d'anciennes surfaces d'érosion. Dans l'ensemble, le fonctionnement des hydrosystèmes karstiques et leur influence sur les écoulements sont assez mal connus dans l'Orne. A noter : une karstification peut également se développer dans les formations carbonatées anciennes appartenant au domaine de socle comme les calcaires cambriens connus au nord du département et dans le Calvados.

Les blocs lithostructuraux du domaine sédimentaire sont principalement contrôlés par des failles anciennes héritées qui ont pu jouer lors de l'histoire géologique pour créer des objets sédimentaires qui peuvent avoir également une influence sur les écoulements. La cartographie des altérites pourrait être un élément d'aide pour mettre en évidence ces différents compartiments, aussi bien en domaine de socle qu'en domaine sédimentaire : les formations mésozoïques de l'Orne sont en effet réputées pour avoir cette caractéristique.

En ce qui concerne la connaissance sur la géométrie et la succession lithologique des formations aquifères, la stratigraphie séquentielle a apporté ces dernières années beaucoup d'éléments de compréhension utiles à la gestion de ces ressources (exemple des études en cours sur le Cénomanien et le Jurassique des Pays de la Loire : programme MODGEAU). Ces éléments restent à préciser en Normandie Occidentale.

Lorsque les aquifères sont captifs, ceux-ci présentent généralement une dénitrification totale ou partielle (avec présence de Fer et Manganèse en abondance). La vulnérabilité de l'aquifère vis-à-vis des pollutions de surface y est alors généralement moins importante que dans la partie libre,

ce qui (en dehors des minéralisations excessives) est un avantage en termes d'exploitation de la ressource.

Dans la suite du programme OAGPRO61 bis, il sera proposé, en fonction des données disponibles, de davantage préciser les relations entre compartiments : position du mur des formations, des contacts anormaux faillés et leur rôle sur les niveaux de nappes et les écoulements.

Ce second volet du programme (phase 2) devrait permettre de mieux appréhender la notion de vulnérabilité des aquifères, notamment : les directions et sens d'écoulements, la position des nappes par rapport aux eaux superficielles (équilibre ou non), la présence de karst et de circulations karstiques, les épaisseurs des altérites, les épaisseurs de zone non saturée.

Ces éléments à venir devraient donc logiquement bénéficier à la gestion et la protection des ressources en eau souterraine.

5. Analyse des données bancarisées pour les principales formations aquifères

5.1. METHODOLOGIE

5.1.1. Utilisation des informations bancarisées

Suite au travail de collecte effectué par le BRGM dans le volet 1 de l'étude, données issues de la Banque du Sous-Sol (BSS) et des archives du SDE 61 (rapport BRGM/RP-69332-FR), il est intéressant d'essayer de comparer les principales informations ou champs renseignés dans les thématiques suivantes pour les principales formations aquifères :

- Informations générales sur l'aquifère : lithologie rencontrée, profondeur de foration, arrivées d'eau constatées.
- Paramètres hydrodynamiques de l'aquifère : transmissivité, emmagasinement, débit spécifique.

Ces éléments sont étudiés ci-après sous forme de tableaux et de cartes qui rendent compte des spécificités des différents aquifères et de leurs éventuelles hétérogénéités spatiales.

5.1.2. Points d'eau disponibles pour l'analyse

Dans l'Orne, 964 points d'eau sont recensés dans les bases de données (BSS + base locale du SDE61). Il s'agit principalement d'ouvrages liés à la recherche, aux captages d'eau pour l'alimentation en eau potable (collective ou domestique) ou bien encore d'ouvrages dédiés à la surveillance de la ressource en eau souterraine (piézomètres).

Sur ces 964 points d'eau, 68 n'ont aucun renseignement (aucune indication sur l'aquifère capté, la profondeur, les caractéristiques hydrodynamiques, …) : ils n'ont pas été pris en compte dans l'analyse réalisée dans les prochains paragraphes. Le travail a donc été réalisé sur 896 points d'eau.

Ces points d'eau ont été regroupés par grandes familles d'aquifère. Le regroupement s'est fait à partir :

- des informations recueillies dans les études et rapports consultés, les coupes des ouvrages notamment ;
- du recoupement avec la BD LISA (v2 – niveau 3)[18] et de la carte lithologique simplifiée (issue de la carte harmonisée départementale).

Les associations entre les aquifères définis pour cette étude et le référentiel hydrogéologique français BD LISA version 2 sont présentées dans le tableau suivant.

Le résultat est reporté également sur les cartes pages suivantes (Illustration 99 pages suivantes) par faciès et par stratigraphie.

[18] BD LISA : Base de Donnée sur les Limites des Systèmes Aquifères (https://bdlisa.eaufrance.fr/), référentiel hydrogéologique national. La version à jour est la version 2 de Février 2018 (RP-67489-FR). Elle comprend 3 échelles spatiales : une nationale (nv. 1), une régionale (nv.2) et une locale (nv.3)

A noter :

- Les regroupements par aquifère ont été réalisés manuellement sur la base des informations fournies en BSS ou dans les rapports d'études : il est possible que des points d'eau ne soient pas associés au bon aquifère (qualité de la donnée pas toujours vérifiable).
- Certains aquifères sont sous recouvrement : les caractéristiques hydrodynamiques entre la partie libre et captive de l'aquifère diffèrent probablement sensiblement. Cette distinction a été prise en compte lorsque l'identification a été possible.
- Certains forages sont probablement localisés au voisinage de zones de forte hétérogénéité de l'aquifère (karstification, faille, …) modifiant alors les caractéristiques hydrodynamiques globales. L'existence de ces hétérogénéités ne sont que très rarement renseignées ou pas/peu prises en compte dans les documents disponibles.
- Aucun ouvrage ne renseigne sur les propriétés des horizons superficiels. Pourtant ces formations jouent un rôle important dans le fonctionnement des hydrosystèmes et ont un rôle hydro-écologique de tout premier ordre.

Pour plus de détails, nous renvoyons le lecteur à la lecture des fiches des différentes entités (niv. 2 et 3). Ces fiches sont consultables notamment sur le site du SIGES Seine-Normandie :

http://sigessn.brgm.fr/?page=fichesEntiteLISA&id_article=207

BDLISA

Entité Hydrogéologique	Cosde BDLISA V2 - niveau 3
Tertiaire	
Alluvions	040AB97
Formation d'Altération	119AE05
Crétacé	
Cénomanien - craie-sables	121AS01-121AS30-123AC01-123AC05
Cénomanien - sables	123AC01-123AC05
Cénomanien-Turonien-craie	121AS01-121AS30-121AW01-121AW30-121AX01-121AX30-123BA01-123BS01-123BW01-123BX01
Jurassique	
Oxfordien-Kimmeridgien (libre ou captif)	133AA99-135AA51-135AA59-135AA61-135AA65
Callovien-Bathonien (libre ou captif)	139AC03-139AC04-139AC05-139AC06-139AC07
Bajocien-Bathonien (libre ou captif)	139AC03-139AC04-139AC05-139AC06-139AD01-139AP06-139AP07-139AP99
Lias	141AC01
Multi-couches mesozoïque	
Cénomanien- Albien-Oxfordien	135AA61-135AA59-135AA51-127AA99-125AA01-123BW01-121AW30-121AW01
Cénomanien-Albien	127AA99-125AA01-123BW01-121AW30-121AW01
Cénomanien-Oxfordien	135AA61-135AA59-135AA51-133AA99-127AA99-125AA01-123BA01
Albien-Oxfordien	125AA01-135AA61
Callovien-Oxfordien	137AB99
Bajocien-Bathonien-Lias (libre ou captif)	139AC03-139AC04-139AC05-139AC06-139AD01-139AP06-139AP07-139AP99-141AB99-141AC01
Paléozoïque	
Paléozoïque Ordovicien indifférencié	163AA04
Paléozoïque Ordovicien Schisteux	163AA04
Paléozoïque Ordovicien - grès	163AA04
Paléozoïque Cambrien gréseux	163AA04
Paléozoïque Cambrien indifférencié	163AA04
Paléozoïque Cambrien Schisteux	163AA04
Paléozoïque Dévono-Silurien Silto-ampélitique	163AA04
Paléozoïque Volcanites	163AA04
Précambrien	
Briovérien Cornéifié	163AA01-163AA03-163AA04-163AC01-163AC03-163AE01-163AE03
Briovérien gréseux	163AA01-163AA03-163AA04-163AC01-163AC03-163AE01-163AE03
Briovérien indifférencié	163AA01-163AA03-163AA04-163AC01-163AC03-163AE01-163AE03
Briovérien schisteux	163AA01-163AA03-163AA04-163AC01-163AC03-163AE01-163AE03
Granite	
Granite	163AA02-163AC02-163AE02

Tableau 4 : Regroupements proposés pour les différentes entités hydrogéologiques BD-LISA (v2), niveau 3

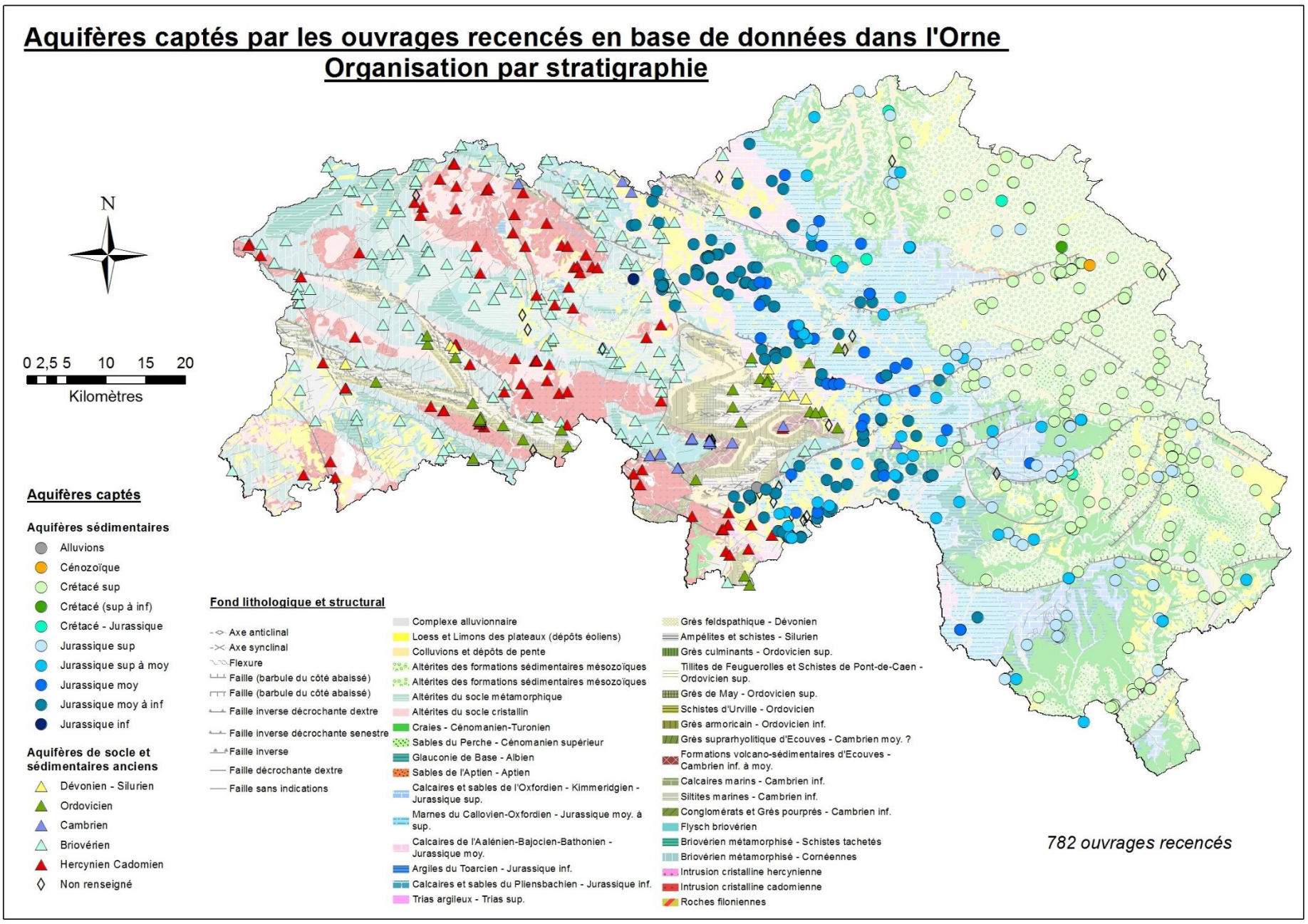


Illustration 99 : Cartes des ouvrages recensés en base de données, regroupés par stratigraphie et faciès

5.2. ANALYSE PRELIMINAIRE

5.2.1. Densité de forage par aquifère

Les informations principales extraites du Tableau 5 page suivante montrent que la densité d'ouvrages est :

- **La plus importante dans les aquifères de la craie céno-turonienne** et **les calcaires bajo-bathoniens** dans la partie sédimentaire du département et dans **les granites** dans la partie socle armoricain.
- **« relativement importante » dans les aquifères des sables du Cénomanien** (Sables du Perche), de **l'Oxfordien-Kimmeridgien** dans la partie sédimentaire du département, et **du Briovérien** dans la partie socle.
- **est la moins importante dans les formations du Paléozoïque.**

Généralement, cet indicateur nous renseigne sur la qualité d'aquifère des différentes unités lithologiques : plus la densité est élevée plus la ressource est a priori abondante (fonction capacitive = bon réservoir) et/ou que celle-ci a une bonne productivité, ce qui rend son exploitation plus facile (bonne capacité à mobiliser l'eau stockée = fonction transmissive).

Quelques forages captent plusieurs aquifères dans le Mésozoïque (multicouches), notamment dans les marnes du Callovien-Oxfordien. Cela pourrait indiquer une capacité aquifère de certaines unités lithologiques considérées dans leur ensemble comme peu ou pas aquifères ou traduire des variations latérales de faciès (environnement de sédimentation différent). Dans les deux cas les unités géologiques marno-calcaires sont vraisemblablement exploitées dans un intérêt local : formations à oolithes situées entre Sées et Gacé, mais également au Sud du département vers Mamers où l'on va trouver des formations sableuses et calcareuses en plus des calcaires oolithiques : les sables de Saint Fulgent (faciès de bordure de plateforme).

A noter : aucun ouvrage d'exploitation des eaux n'est implanté dans les formations du Trias.

Aquifère	Nombre de Points d'eau	Nombre de Profondeur ouvrage (m)	Moyenne de Profondeur ouvrage (m)	Min de Profondeur ouvrage (m)	Max de Profondeur ouvrage (m)
Cenozoïque					
Alluvions	1	1	24	24	24
Formation d'Alteration	3	1	30	30	30
Crétacé					
Cenomanien-Turonien-craie	178	139	46,6	3	150
Cenomanien-craie-sables	1	1	60	60	60
Cenomanien-sables	50	34	36,7	2	100
Jurassique					
Oxfordien-Kimmeridgien	68	51	44,7	4,5	203
Oxfordien-Kimmeridgien captif	15	15	65	34	179
Callovien-Bathonien	11	11	46,2	19	121
Callovien-Bathonien captif	1	1	61	61	61
Bajocien-Bathonien	155	146	45,3	5,4	185
Bajocien-Bathonien captif	35	35	74,6	20	267
Lias	1	1	19	19	19
Multi-couches mesozoique					
Cenomanien- Albien-Oxfordien	2	2	67,5	60	75
Cenomanien-Albien	1	1	60	60	60
Cenomanien-Oxfordien	3	3	65,3	64	66
Albien-Oxfordien	2	2	35	30	40
Callovien-Oxfordien	22	20	43,5	5	84
Callovien-Oxfordien captif	2	2	38	36	40
Bajocien-Bathonien-Lias	7	7	35,1	17	61
Bajocien-Bathonien-Lias captif	3	3	45,2	45	45,5
Paléozoïque					
Paléozoïque Dévono-Silurien Silto-ampélitiqu	10	9	57,4	34	120
Paléozoïque Ordovicien - grès	8	7	52,4	11,9	91
Paléozoïque Ordovicien schisteux	10	10	56,8	6	88
Paléozoïque Ordovicien indiférencié	16	14	64	20,2	136,05
Paléozoïque Cambrien gréseux	7	7	84,4	55	109
Paléozoïque Cambrien schisteux	1	1	55	55	55
Paléozoïque Cambrien indiférencié	15	10	65,4	26,5	133
Paléozoïque Volcanites	2	2	79	61	97
Précambrien					
Briovérien cornéifié	61	58	67,3	5	130
Briovérien gréseux	4	4	86,3	43	136
Briovérien schisteux	45	45	63,6	12	193
Briovérien indiférencié	54	50	50,1	8	120
Granite					
Granite	102	85	64,1	7	217
Total général	896	778	53,4	2	267

Tableau 5 : Profondeur des points d'eau par grand type d'aquifère

5.2.2. Profondeur des ouvrages

Dans l'ensemble, les profondeurs minimum et maximum des ouvrages sont très variables pour les différents aquifères : allant de quelques mètres de profondeur à une centaine de mètres de profondeur et plus (cf. Illustration 100 page suivante).

En moyenne, la profondeur de foration se situe autour de 50 mètres pour l'ensemble des aquifères. Cela implique que les horizons productifs sont la plupart du temps situés à une profondeur relativement faible (productivité satisfaisante dans la zone altérée, fissurée ou karstique). Les formations superficielles ou de recouvrement ne sont pas ici considérées comme des aquifères exploitables, bien que celles-ci jouent un rôle majeur au sein des hydrosystèmes. La profondeur moyenne donnée ci-dessus cache en réalité des écarts entre les formations de socle et les formations sédimentaires.

En effet, pour les ouvrages implantés dans les formations de socle, leur profondeur est le plus souvent comprise entre 50 et 80 m de profondeur ; pour les ouvrages implantés dans les formations sédimentaires, la profondeur d'exploration est le plus souvent inférieure à 50 m.

Ce dernier point est à nuancer toutefois pour les formations du Jurassique, où certains forages captent les aquifères sous couverture d'autres formations : c'est le cas par exemple de l'Oxfordien sous couverture des formations du Crétacé ou des formations du Bajocien-Bathonien avec les marnes callovo-oxfordiennes. Ces derniers peuvent alors présenter un caractère captif. On constate alors qu'en moyenne la profondeur de ces ouvrages est supérieure de 20 m à celle des forages captant l'horizon libre.

Ces informations sur la profondeur sont particulièrement intéressantes à prendre en compte dans le dimensionnement des projets de recherche en eau.

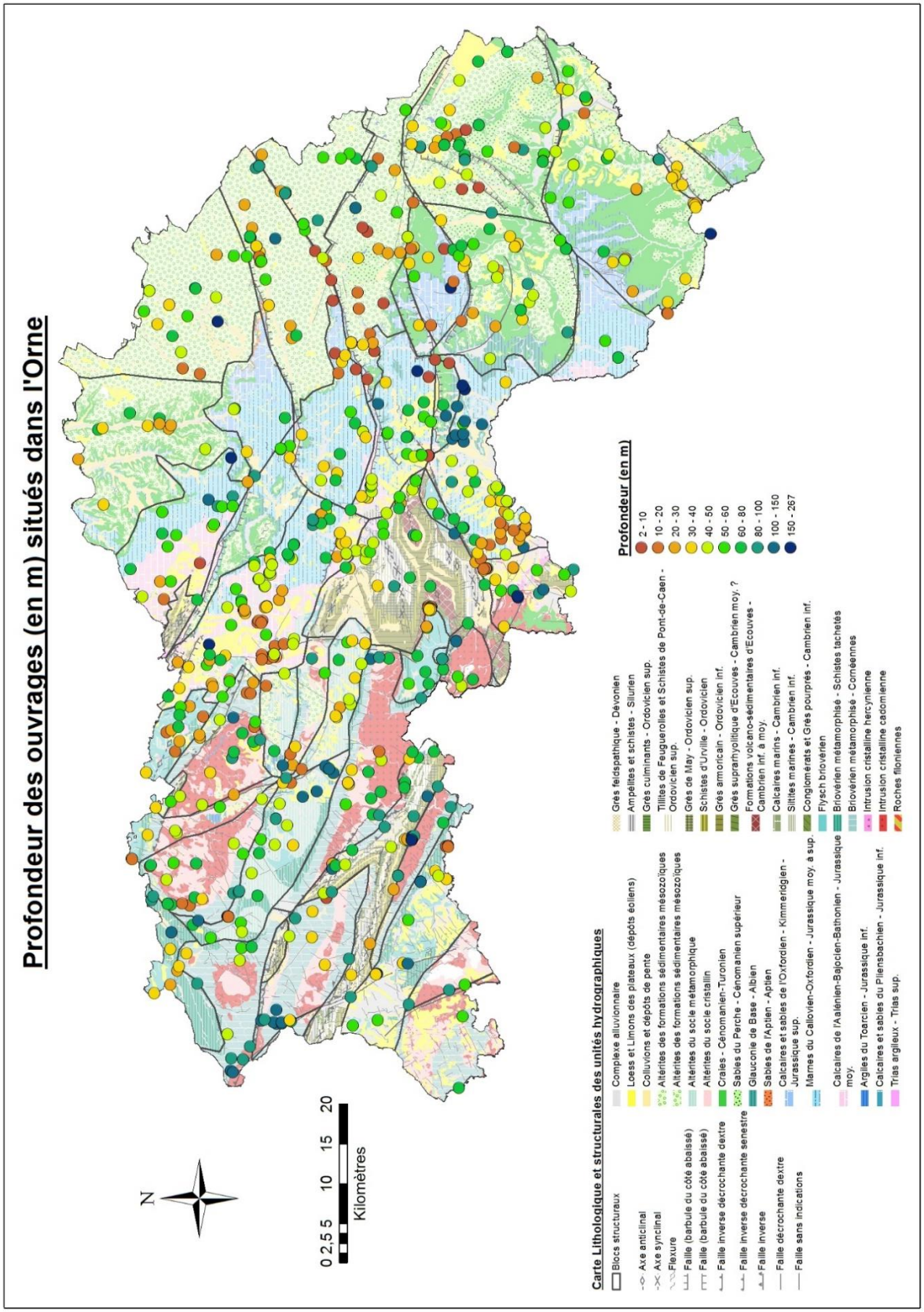


Illustration 100 : Profondeur des forages d'eau recensés dans le département de l'Orne (BSS+SDE61)

5.2.3. Arrivées d'eau

Principaux domaines	Nombre	Moyenne	Min	Max
Socle armoricain				
Brioverien indifférencié	40	57,0	13	121
Brioverien Metamorphisé	46	55,9	13	142
Granite	21	75,8	7	157
Paléozoïque	14	63,8	6	124
Schistes Tachetés	29	68,8	10	145
Sédimentaire Mésozoïque				
Crétacé	63	32,6	7	92
Jurassique	39	33,2	5	69
Total général	**252**	**50,3**	**5**	**157**

Tableau 6 : Profondeur des arrivées d'eau renseignées pour les principales formations géologiques, source : base de donnée hydrogéologique du département de l'Orne

Lorsque l'information était disponible, les profondeurs des principales arrivées d'eau ont été répertoriées (Tableau 6).

Dans l'ensemble, on note que les profondeurs des arrivées d'eau sont plus importantes dans les formations de socle (55 à 75 m en moyenne pour les roches magmatiques et méta-sédimentaires) que dans les formations sédimentaires du Mésozoïque (32 à 33 m en moyenne pour les formations du Jurassique et du Crétacé).

Il existe très peu de différences au sein des membres des deux principaux domaines de socle et sédimentaire. Le premier groupe est caractérisé par une dynamique dite de milieu fissuré. Le second groupe, plus complexe, peut avoir à la fois les caractéristiques de milieux poreux, fissurés ou karstiques selon le contexte.

Rappel : dans les formations de socle, l'horizon fissuré dépasse rarement une cinquantaine de mètres de profondeur dans les conditions d'altération connues en Métropole. Au-delà, il faut compter sur une fracturation d'ordre tectonique, avec parfois des circulations profondes (cf. Illustration 101 page suivante).

Dans les cas présentés, il semblerait donc que la fissuration d'ordre tectonique joue un rôle important dans la productivité des ouvrages. Toutefois, en l'état des investigations, il n'est pas possible de le déterminer avec certitude. Une analyse plus poussée serait nécessaire pour pouvoir l'affirmer.

Pour aller plus loin dans l'analyse, il aurait été nécessaire d'évaluer l'apport de chacune de ces arrivées d'eau à la productivité totale des ouvrages comme dans l'exemple présenté ci-après (Illustration 101). Mais les données récoltées ne le permettent pas toujours.

Ce volet montre l'importance des phases de reconnaissance (sondages géologiques et géophysique notamment), en particulier en domaine de socle (cf. chapitre 4), pour identifier les horizons lithologiques et les structures potentiellement productives. Ces éléments doivent être confirmés en forage lors des phases de reconnaissance par des diagraphies : a minima par des mesures au micro-moulinet et si les conditions le permettent à l'aide d'outils d'imagerie de parois (optique ou acoustique) pour essayer d'identifier les familles de failles (et leur champ de contraintes) ou les horizons producteurs.

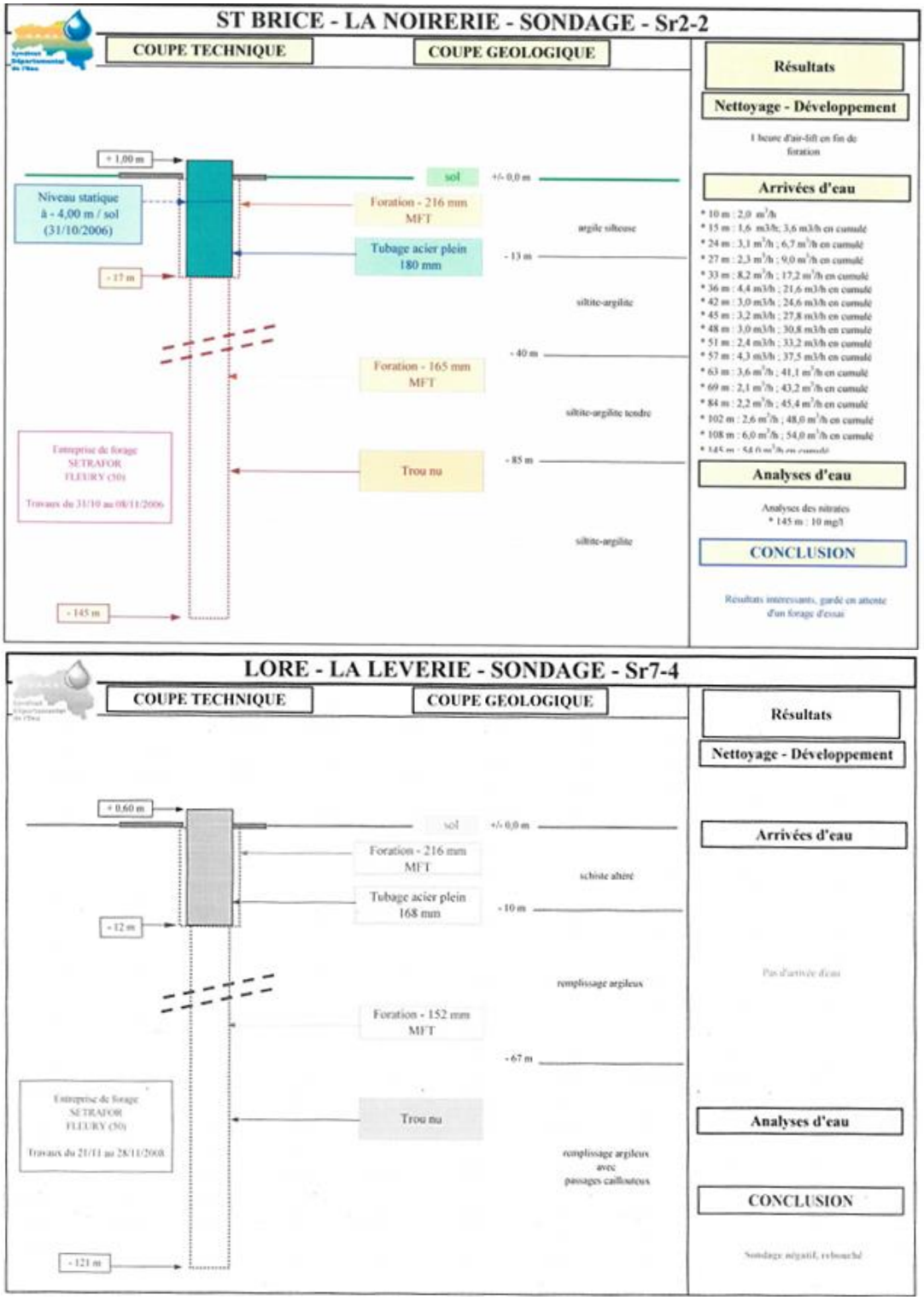


Illustration 101 : Exemple de coupes techniques de deux forages implantés dans les formations schisteuses du Briovérien. Celle du haut montre de nombreuses arrivées d'eau réparties tout le long du profil d'altération, la seconde montre l'absence d'arrivées d'eau sur un profil très argilisé (source : SDE61)

5.3. PARAMETRES HYDRODYNAMIQUES

Dans le cadre de cette étude, les données disponibles pour les différents aquifères ont été compilées dans les paragraphes suivants. Attention : le BRGM ne préjuge pas de la qualité des interprétations (choix des solutions analytiques adaptées au contexte). La synthèse des éléments est donc fournie à titre indicatif.

5.3.1. Rappels et Généralités[19]

Par définition, il s'agit d'un paramètre physique définissant quantitativement le comportement d'un milieu ou d'un corps conducteur vis-à-vis d'un fluide, c'est-à-dire son aptitude à le contenir, à permettre son écoulement et à régir les propagations d'influence.

Ces paramètres peuvent être déterminés au laboratoire ou sur le terrain, notamment lors de tests de pompages dans les puits et forages (SIGES Seine-Normandie).

La réaction de la nappe à un pompage va se traduire par des rabattements au sein de l'aquifère et en particulier dans le forage. Le rabattement sera maximal au point de prélèvement, puis se propagera dans l'espace à partir de ce point. L'importance de la baisse des niveaux est liée aux caractéristiques hydrodynamiques de la nappe (à qualité d'ouvrage et débit de pompage identiques) (cf. Illustration 102 suivante).

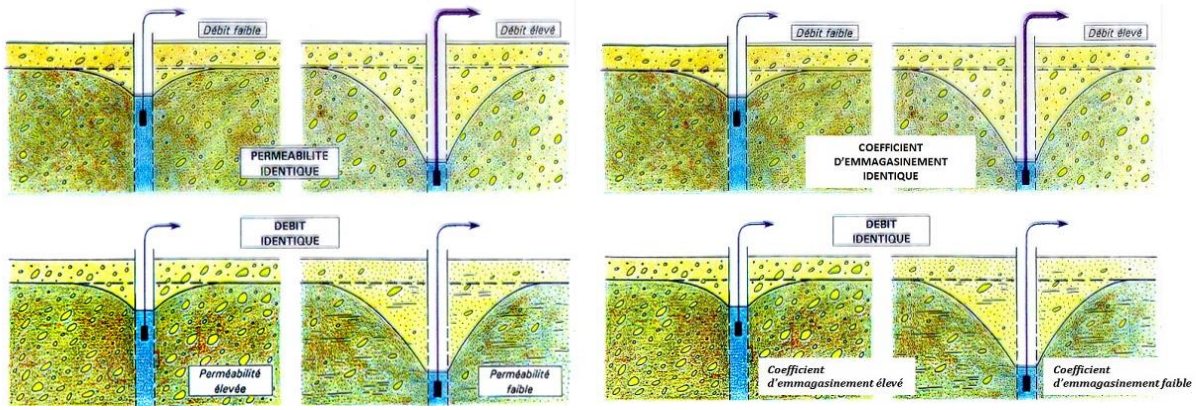


Illustration 102 : Influence des paramètres perméabilité et emmagasinement sur les rabattements (source J.J. Collin 2004). Attention le débit n'impacte pas le rayon d'influence

Les principaux paramètres régissant l'écoulement des eaux souterraines sont la transmissivité, la perméabilité, le coefficient d'emmagasinement et la porosité efficace.

Toutefois les caractéristiques hydrodynamiques des aquifères sont, le plus souvent, associées essentiellement à deux paramètres :

- la capacité de stockage : c'est le **coefficient d'emmagasinement** (S), équivalent à une porosité (efficace) pour les nappes libres : plus les vides dans le terrain sont importants, plus l'eau pourra être emmagasinée dans l'aquifère.
- l'aptitude de l'aquifère à se laisser traverser par l'eau, en lien avec la connexion des vides entre eux. Ce paramètre est appelé « **transmissivité** » (T).

[19] Pour en savoir plus, le lecteur peut consulter le SIGES Seine-Normandie : http://sigessn.brgm.fr/

Certains paramètres sont indispensables pour connaître les débits exploitables par un forage comme **le débit spécifique** mais ils ne sont pas à proprement parler des paramètres hydrodynamiques : il s'agit d'un indicateur de productivité (débit obtenu pour un mètre de rabattement) ; celui-ci dépend de la qualité du couple aquifère+forage.

Important : d'autres aspects de l'aquifère interviennent également sur la relation « débit de pompage / niveau ». Certains peuvent être reconnus lors du pompage d'essai de longue durée (ou essai de nappe) : limite alimentée (tel un cours d'eau alimentant la nappe sous l'effet du pompage), limite étanche (aquifère bordé par une formation argileuse, une faille, un changement de faciès), alimentation par drainance à partir d'un autre aquifère…

Aide à la compréhension

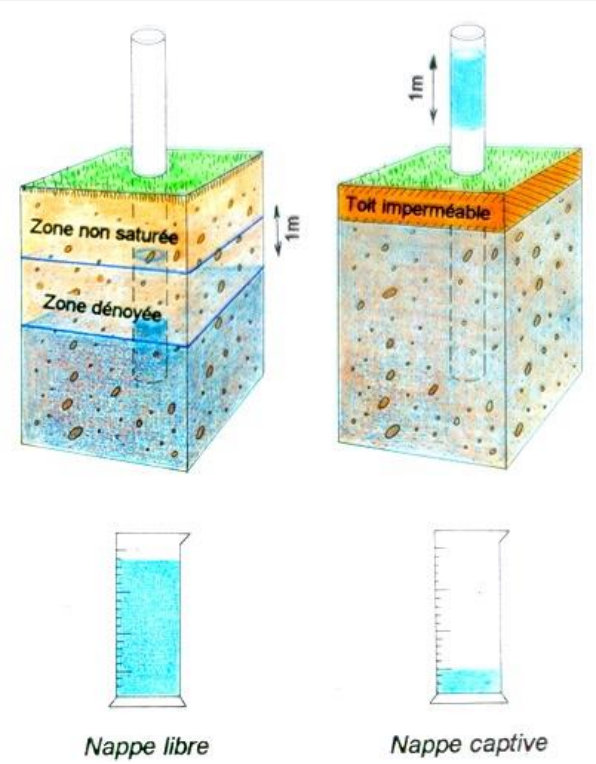


Illustration 103 : Variation de niveau et volume d'eau libéré dans un aquifère libre (gauche) et captif (droite), source : J.J. Collin (2004)

Dans un aquifère captif, l'expulsion de l'eau est le résultat de la compression de l'aquifère et de la baisse du niveau statique lors du pompage provoquant une baisse de pression, une détente élastique et une déformation du solide libérant l'eau (actions d'élasticité de l'eau et du solide).

Les modules d'élasticité étant faibles, le volume d'eau libéré est beaucoup plus petit pour une nappe captive, à caractéristiques égales, que pour les nappes libres. Le coefficient d'emmagasinement S est ici de 100 à 1 000 fois (voire 10 000 fois) plus petit. Les valeurs usuelles se situent entre 0,1 et 0,01 %.

D'une façon générale, pour une même baisse de niveau piézométrique (différence de charge), la quantité d'eau libérée est beaucoup plus grande dans une nappe libre (cf. Illustration 103*).*

Notion : on parle d'aquifère semi-captif lorsque celui-ci est surmonté d'une couche semi-perméable relativement mince à travers laquelle l'eau peut tout de même pénétrer dans la formation aquifère et éventuellement en sortir.[20]

[20] Extrait du SIGES Seine Normandie : http://sigessn.brgm.fr/spip.php?article313

5.3.2. Transmissivité

Sur les 896 points d'eau retenus dans l'Orne, 107 ouvrages possèdent une valeur de transmissivité renseignée dans les bases de données.

Pour certains points d'eau, plusieurs valeurs de transmissivité sont renseignées : lors de l'interprétation de pompages d'essais, plusieurs formules de calcul peuvent être utilisées et indiquer des résultats différents. Les calculs peuvent porter également sur la courbe de descente ou de remontée des niveaux de nappe. Dans ce cas, la valeur la plus importante a été prise en compte (la plus favorable).

Aquifère	Nombre deTransmissivité T (m2/s)	Moyenne de Transmissivité T (m2/s)	Min de Transmissivité T (m2/s)	Max de Transmissivité T (m2/s)
Crétacé				
Cenomanien-Turonien-craie	34	7,6E-03	1,4E-03	3,0E-02
Cenomanien - sables	5	3,3E-03	1,0E-03	4,7E-03
Jurassique				
Oxfordien-Kimmeridgien	15	4,9E-03	1,0E-04	1,4E-02
Oxfordien-Kimmeridgien captif	5	3,4E-03	4,0E-04	6,4E-03
Bajocien-Bathonien	17	8,1E-03	2,1E-04	2,8E-02
Bajocien-Bathonien captif	6	6,6E-03	1,3E-04	3,0E-02
Multi-couches mesozoïque				
Cenomanien-Oxfordien	1	1,4E-03	1,4E-03	1,4E-03
Bajocien-Bathonien-Lias	1	1,5E-01	1,5E-01	1,5E-01
Bajocien-Bathonien-Lias captif	2	3,4E-04	3,4E-04	3,4E-04
Paléozoïque				
Paléozoïque Cambrien gréseux	3	1,3E-03	9,0E-04	2,2E-03
Paléozoïque Cambrien indifférencié	5	8,4E-04	5,5E-04	9,8E-04
Précambrien				
Briovérien Cornéifié	5	5,2E-04	4,5E-04	6,7E-04
Briovérien indifférencié	1	2,0E-03	2,0E-03	2,0E-03
Briovérien schisteux	4	3,8E-04	2,0E-04	5,0E-04
Granite				
Granite	3	1,3E-03	2,1E-04	3,3E-03
Total général	107	6,7E-03	1,0E-04	1,5E-01

Tableau 7 : Informations sur la transmissivité disponibles pour les principaux aquifères du département de l'Orne

Les informations collectées sur le paramètre transmissivité (T) montrent que :

- En moyenne, pour l'ensemble des formations aquifères du département, les valeurs de transmissivité sont comprises entre 10^{-4} et 10^{-2} m²/s pour les 107 points d'eau de la base de données.
  Dans la partie sédimentaire, les valeurs sont de l'ordre de 10^{-3} m²/s à 10^{-2} m²/s et celles de la partie socle sont de l'ordre de 10^{-4} m²/s à 10^{-3} m²/s. La capacité à mobiliser l'eau est donc plus importante dans les formations sédimentaires du Mésozoïque que dans les formations anciennes du socle armoricain.

- Les meilleures transmissivités sont mesurées dans les couches cénomaniennes crayeuses, dans les calcaires et sables de l'Oxfordien-Kimmeridgien et enfin dans les calcaires du Bajocien-Bathonien : de l'ordre de 10^{-3} m²/s à 10^{-1} m²/s au maximum.

- Les valeurs les moins satisfaisantes sont observées dans les formations briovériennes et les cornéennes : de l'ordre de 10^{-4} m²/s à 10^{-3} m²/s.

- Pour les formations du Jurassique, il est possible de noter que les valeurs de transmissivité des forages captant les horizons captifs sont en moyenne plus faibles que les forages captant l'horizon libre (différence d'environ - 25 %). En théorie, les productivités y seraient donc moindres.

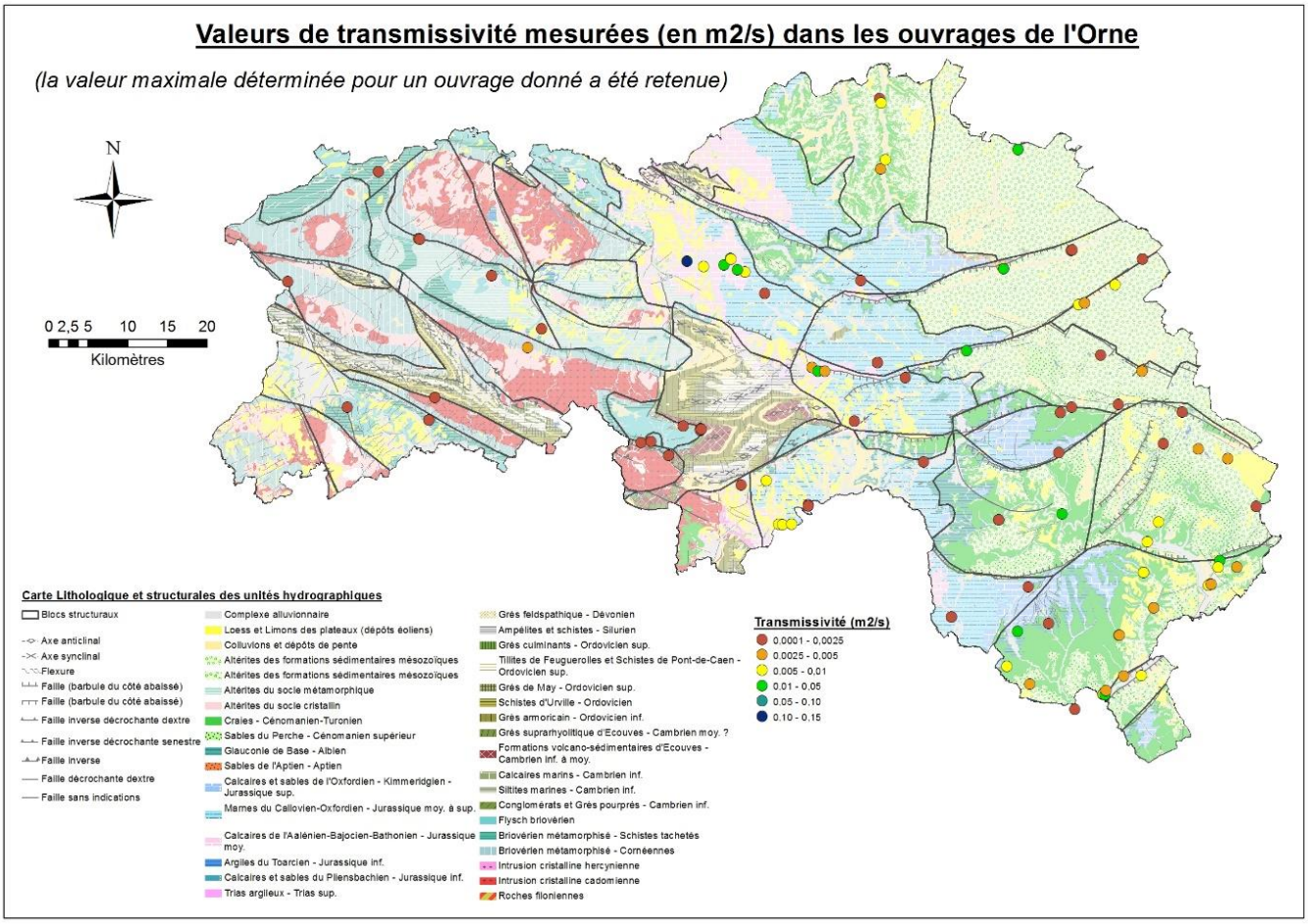
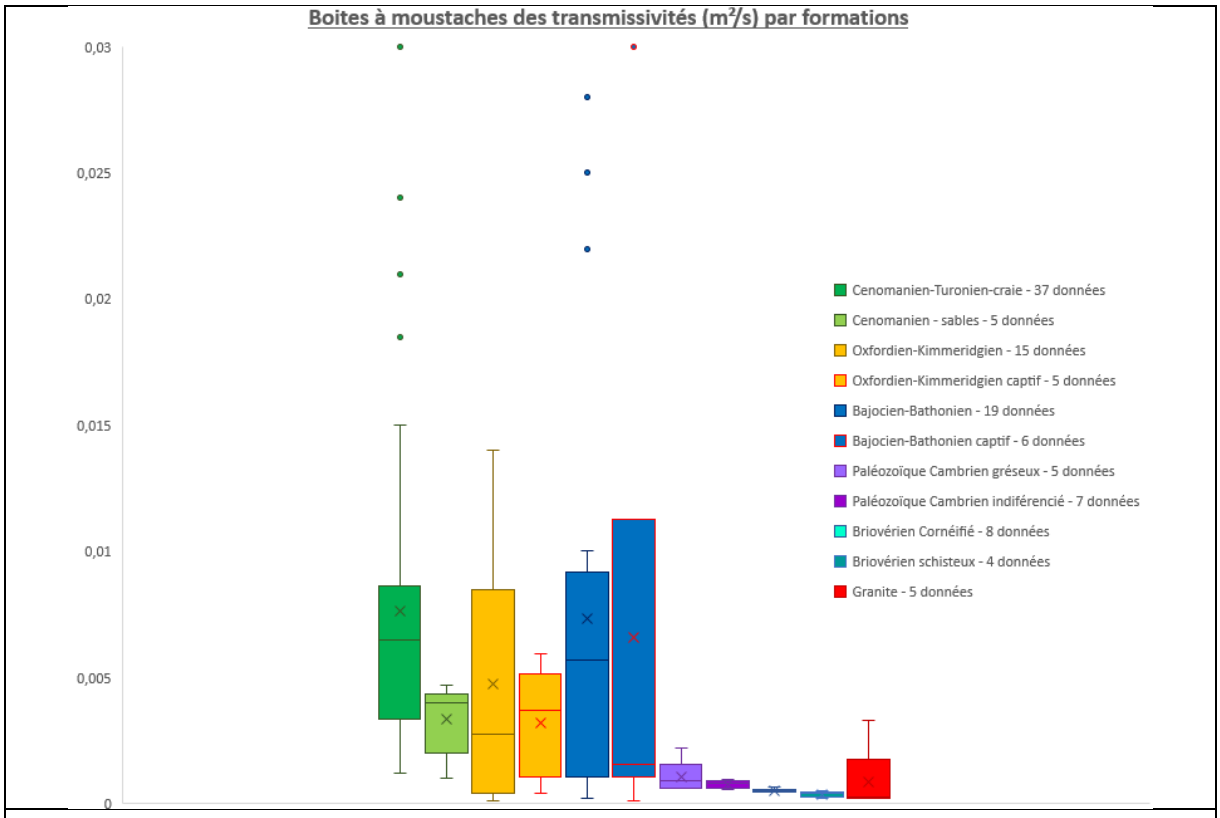
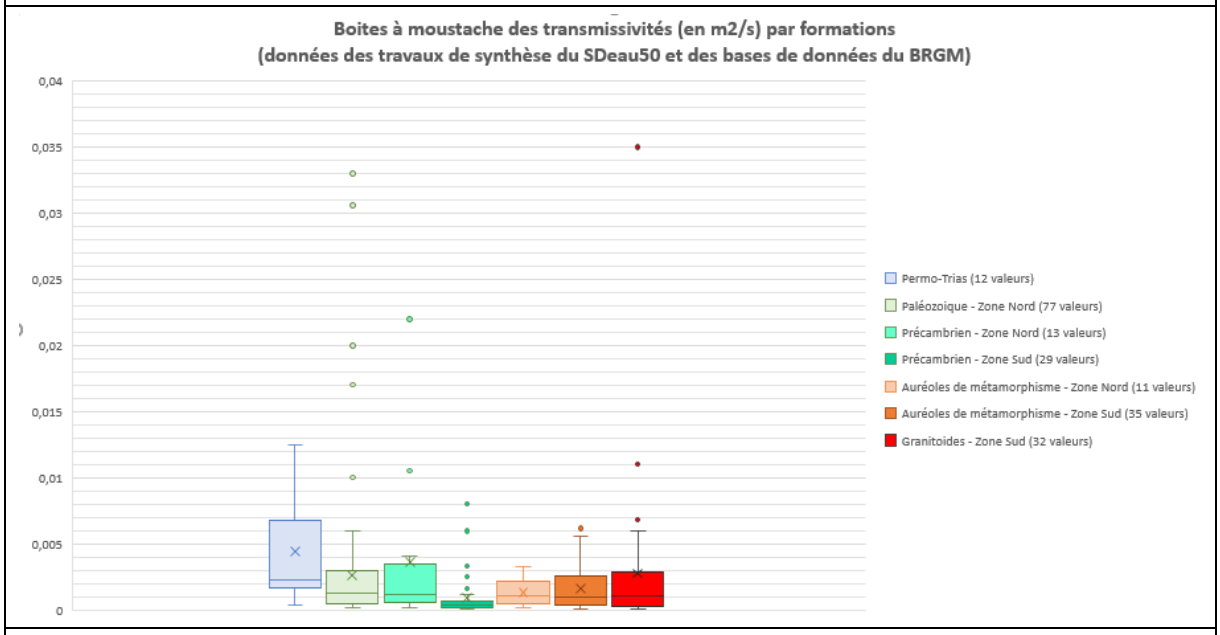


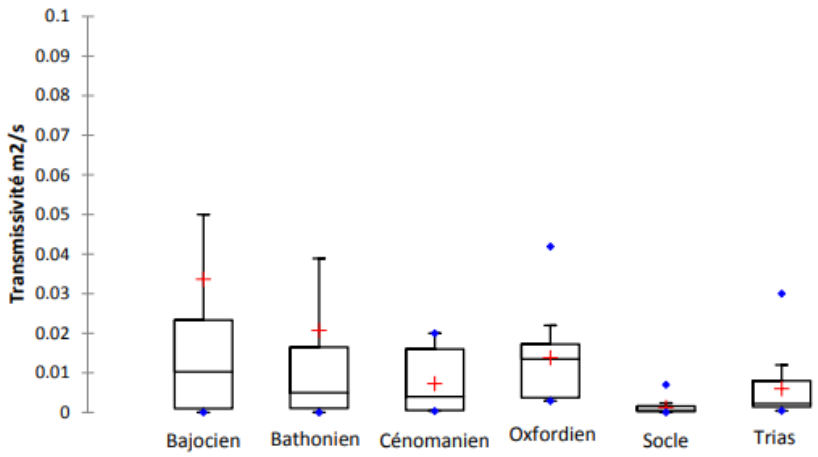
Illustration 104 : Carte de répartition des valeurs de transmissivité disponibles dans le département de l'Orne



Transmissivités dans le département de l'Orne, source : BD BRGM et SDE61



Transmissivités dans le département de la Manche (RP-69128-FR), source : BD BRGM et SDEAU50



Transmissivités dans le département du Calvados (RP-62002-FR)

Tableau 8 : Comparaison des valeurs de transmissivité (en m²/s) dans les départements de Normandie Occidentale, évantail des valeurs présenté à l'aide des « boites à moustaches »

Dans le département du Calvados, l'étude du BRGM place également en tête les formations du Bajocien et du Bathonien, de l'Oxfordien et enfin du Cénomanien pour les plus fortes valeurs de transmissivité. Ce qui est cohérent avec les valeurs observées dans le département de l'Orne, bien que dans ce dernier les valeurs relevées y soient en moyenne plus faibles.

Dans le département de la Manche, les flysch briovériens et les cornéennes sont les formations qui possèdent la transmissivité la plus faible. Là également, les données du département de l'Orne sont cohérentes avec celles de la Manche. On notera que le Permo-Trias est quasi-absent dans la stratigraphie du département de l'Orne, il n'est donc pas possible de le comparer.

5.3.3. Coefficient d'emmagasinement

L'analyse des paramètres hydrodynamiques des principaux aquifères du département de l'Orne a porté par la suite sur le coefficient d'emmagasinement des aquifères (conditionne l'emmagasinement de l'eau souterraine mobile dans les vides du réservoir et est utilisé pour caractériser le volume d'eau exploitable par un forage).

Sur les 896 points d'eau recensés dans l'Orne, nous ne disposons d'une valeur de coefficient d'emmagasinement uniquement que pour 57 ouvrages. Cette disponibilité moindre s'explique, en partie, par le fait qu'il est nécessaire de disposer d'un puits d'observation pour pouvoir évaluer ce paramètre lors de l'interprétation de pompages d'essais.

Aquifère	Nombre de Emmagasinements	Moyenne de Emmagasinements	Min de Emmagasinements	Max de Emmagasinements
Cénomanien				
Cenomanien-Turonien-craie	16	4,24E-03	2,00E-04	3,60E-02
Cenomanien - sables	3	3,00E-04	1,50E-04	5,00E-04
Jurassique				
Oxfordien-Kimmeridgien	3	3,58E-03	5,00E-05	9,00E-03
Oxfordien-Kimmeridgien captif	2	5,30E-03	1,60E-03	9,00E-03
Bajocien-Bathonien	9	1,30E-02	7,50E-05	7,20E-02
Bajocien-Bathonien captif	5	5,64E-03	1,00E-04	2,60E-02
Multi-couches Mesozoïque				
Cenomanien-Oxfordien	1	1,10E-04	1,10E-04	1,10E-04
Bajocien-Bathonien-Lias captif	3	1,50E-05	1,50E-05	1,50E-05
Paléozoïque				
Paléozoïque Cambrien gréseux	1	1,60E-03	1,60E-03	1,60E-03
Paléozoïque Cambrien indiférencié	3	2,45E-03	1,00E-04	6,82E-03
Précambrien				
Briovérien Cornéifié	5	6,32E-04	7,00E-08	2,80E-03
Briovérien schisteux	1	8,00E-03	8,00E-03	8,00E-03
Granite				
Granite	5	1,82E-02	1,00E-06	9,00E-02
Total général	57	6,08E-03	7,00E-08	9,00E-02

Tableau 9 : Informations sur les valeurs du coefficient d'emmagasinement disponibles pour les principaux aquifères du département de l'Orne

Les informations relatives au coefficient d'emmagasinement (Tableau 9) montrent que :

- En moyenne dans l'Orne, pour l'ensemble des formations aquifères du département, les valeurs du coefficient d'emmagasinement sont comprises entre 10^{-5} et 10^{-2} (paramètre sans unité). Les très faibles valeurs dans les cornéennes peuvent poser question de la représentativité des mesures et de la fiabilité des calculs effectués.

- Les valeurs du coefficient d'emmagasinement des ouvrages situés en domaine sédimentaire sont généralement de l'ordre de 10^{-4} à 10^{-2}. Ils sont relativement homogènes, excepté pour les formations du Jurassique, dont les coefficients d'emmagasinement pour l'aquifère Bajocien-Bathonien vont de $7{,}5.10^{-5}$ pour le minimum à $7{,}2.10^{-2}$ pour le maximum. Les valeurs les plus faibles marquent probablement le caractère captif de l'aquifère ou la présence d'un milieu fissuré.

- Les ordres de grandeur pour les coefficients d'emmagasinement moyens en domaine socle sont de l'ordre de 10^{-4} à 10^{-2}. Ils présentent une hétérogénéité notable entre les valeurs minimales et maximales pour les granites (minimum de 10^{-6} et maximum de 9.10^{-2}) et le briovérien cornéifié (minimum de 7.10^{-8} et maximum de $2{,}8.10^{-3}$). Le caractère de stockage des formations de socle est très dépendant des formations d'altération et de la densité de fractures connectées.

- Les coefficients d'emmagasinement les plus importants sont mesurés dans les formations du Bajocien-Bathonien libres, la craie céno-turonienne et les granites (leur frange altérée).

Le caractère captif dans son ensemble n'est pas ici mis en évidence par les données disponibles.

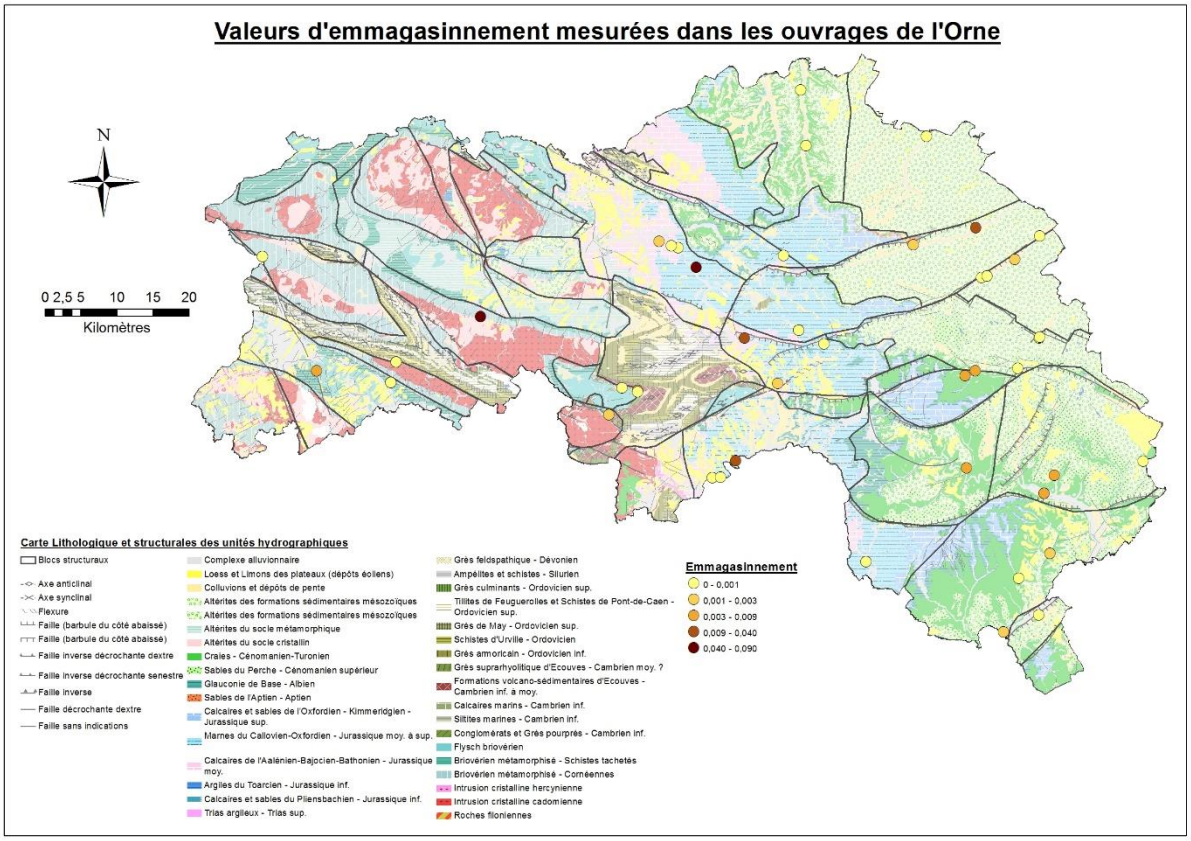


Illustration 105 : Carte de répartition des informations sur le coefficient d'emmagasinement

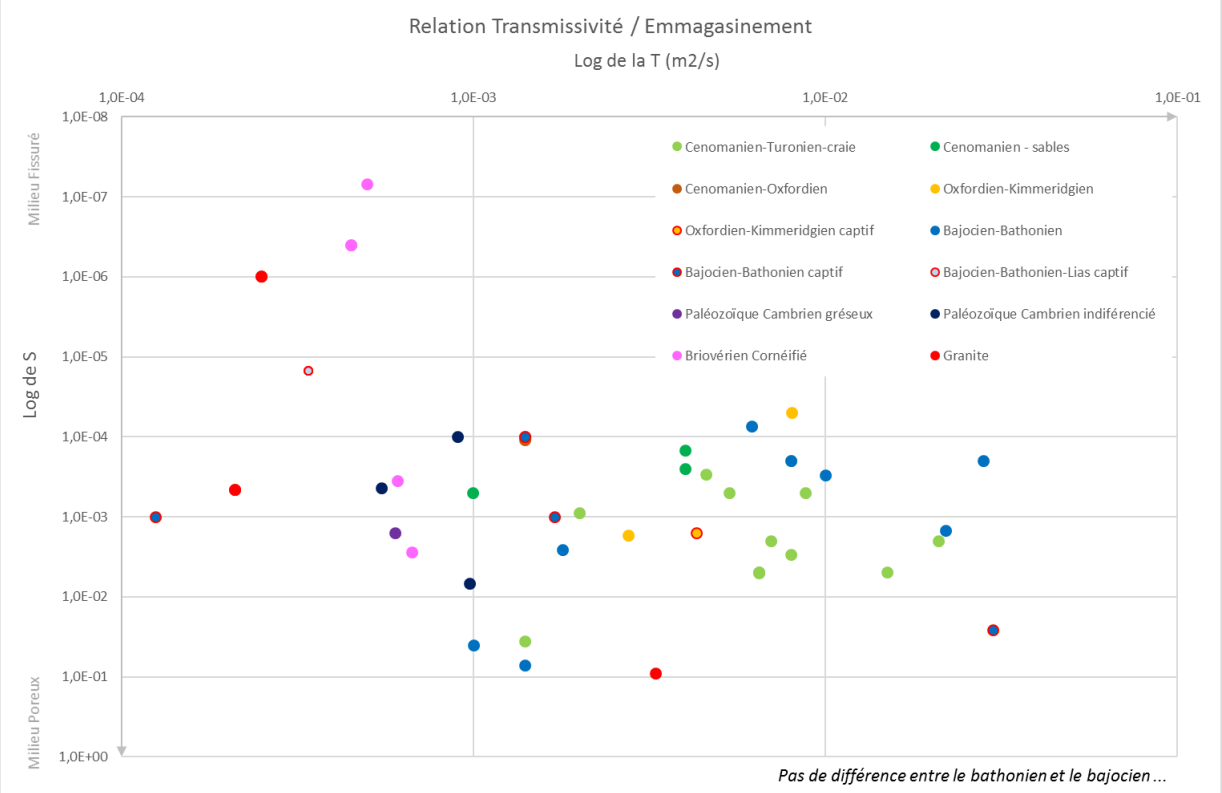


Illustration 106 : Transmissivité versus Emmagasinement (échelles logarithmiques)

La Diffusivité caractérise la propagation d'influence dans un aquifère. On peut estimer ce paramètre à partir du rapport T/S (transmissivité sur emmagasinement). L'Illustration 106 ci-avant montre que ce sont les formations sédimentaires qui possèdent la diffusivité la moins bonne (craie et calcaires jurassiques), traduisant une forme d'inertie de ces systèmes aquifères. A noter : la diffusivité est toujours plus importante dans les nappes captives.

A contrario les formations du domaine de socle ont une diffusivité moins importante qui se traduit par une propagation d'influence plus importante (cf. paragraphe 6.3).

	Sables dunaires	Bassins tertiaires	Permo-Trias	Paléozoïque	Précambrien	Auréoles de métamorphisme	Granitoïdes
Médiane	**0,05**	**0,03**	0,0013	**0,001**	**0,00055**	0,002	0,01
Moyenne	**0,062531**	**0,0398**	0,002923	0,013814	**0,001538**	**0,00567**	0,03064
Max	0,147	0,15	0,012	0,1	0,005	0,03	0,1
Min	0,000015	0,0006	0,000035	0,000001	0,00005	0,00005	0,0022
Nombre de valeurs	7	11	6	30	4	9	5

Coefficient d'Emmagasinement dans le département de la Manche (RP-69128-FR)

Emmagasinement	Cénomanien	Oxfordien	Bathonien	Bajocien	Trias	Socle
Nb. d'observations	2	10	39	9	16	2
Minimum	2.0E-03	3.5E-05	1.0E-05	7.4E-08	1.0E-05	6.5E-02
Maximum	4.0E-03	5.0E-03	1.0E-01	3.0E-02	5.2E-02	1.0E-01
1er Quartile		8.1E-05	1.8E-04	2.0E-04	3.5E-05	
Médiane		1.6E-04	1.0E-03	8.0E-04	1.1E-03	
3ème Quartile		3.9E-03	8.5E-03	2.0E-03	1.5E-02	

Coefficient d'Emmagasinement dans le département du Calvados (RP-62002-FR)

Tableau 10 : Comparaison des valeurs moyennes des coefficients d'emmagasinement connues pour les principales formations géologiques des départements de Normandie Occidentale

On retrouve là également des données cohérentes entre les valeurs obtenues pour le département de l'Orne et celles des départements voisins (Manche et Calvados).

5.3.4. Débit spécifique

L'analyse des caractéristiques des principaux aquifères du département de l'Orne a enfin porté sur les caractéristiques de productivité potentielle des aquifères avec notamment l'analyse des débits spécifiques.

Sur les 896 points d'eau de l'Orne disponibles en base de données, 241 permettent d'avoir une valeur de débit spécifique. Pour certains points d'eau, plusieurs valeurs de débit spécifique sont renseignées : dans ce cas le débit le plus important a été pris en compte (le plus favorable).

Aquifère	Nombre de Débit spécifique	Moyenne de Débit spécifique	Min de Débit spécifique	Max de Débit spécifique
Crétacé				
Cenomanien-Turonien-craie	66	26,5	0,1	266,1
Cenomanien - sables	16	6,4	0,0	25,3
Jurassique				
Oxfordien-Kimmeridgien	24	39,0	0,2	216,9
Oxfordien-Kimmeridgien captif	7	10,0	0,7	28,6
Callovien-Bathonien	1	1,5	1,5	1,5
Bajocien-Bathonien	63	20,4	0,1	77,9
Bajocien-Bathonien captif	14	9,7	0,0	71,9
Multi-couches mesozoique				
Cenomanien-Albien	1	1,8	1,8	1,8
Cenomanien- Albien-Oxfordien	1	11,0	11,0	11,0
Bajocien-Bathonien-Lias	2	43,7	1,6	85,7
Bajocien-Bathonien-Lias captif	2	2,6	1,7	3,5
Paléozoïque				
Paléozoïque Dévono-Silurien Silto-ampélitique	2	1,0	0,2	1,8
Paléozoïque Cambrien gréseux	3	4,0	1,3	6,0
Paléozoïque Cambrien indiférencié	6	43,1	3,2	153,8
Précambrien				
Briovérien Cornéifié	12	4,6	0,1	11,7
Briovérien indiférencié	1	4,7	4,7	4,7
Briovérien schisteux	8	9,3	1,3	29,0
Granite				
Granite	12	3,5	0,1	14,0
Total général	241	20,1	0,0	266,1

Tableau 11 : Informations sur le débit spécifique disponible pour les principaux aquifères du département de l'Orne (en $m^3/h/m$)

Les formations qui possèdent les débits spécifiques les plus importants sont par ordre d'importance celles du : Bajocien-Bathonien-Lias, le paléozoïque, l'Oxfordien-Kimmeridgien et la craie céno-turonienne. En moyenne, ces formations ont toutes un débit spécifique supérieur à 20 $m^3/h/m$.

A noter : l'écart entre les valeurs moyennes et maximales est très important, dans un certain nombre de cas. Cet écart peut dépasser 100 m^3/h pour la craie, les formations oxfordiennes et les grès du Cambrien. Il est fort probable que ces ouvrages interceptent un système faillé important ou un karst.

Cette fois-ci, le caractère captif est dans son ensemble mis en évidence par les données disponibles : les débits spécifiques des formations concernées sont plus faibles que celles des mêmes formations libres.

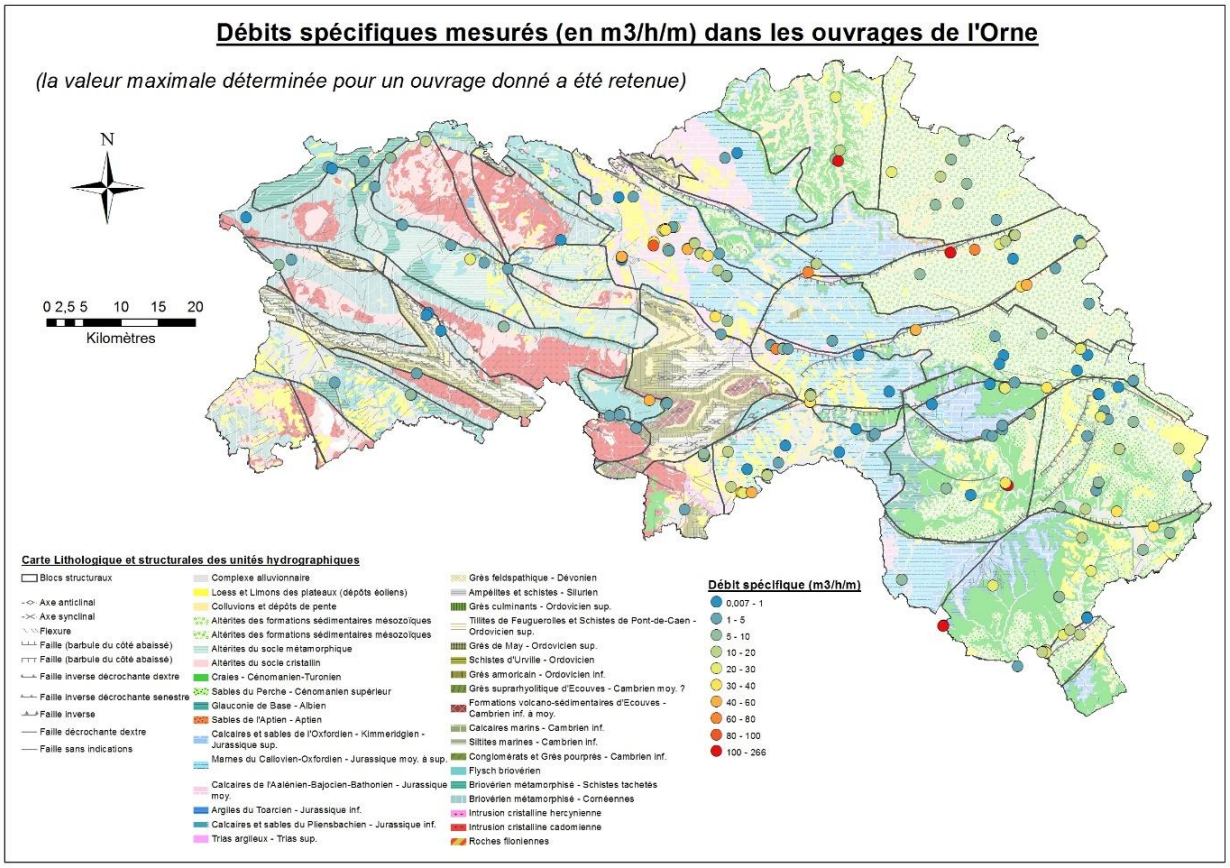
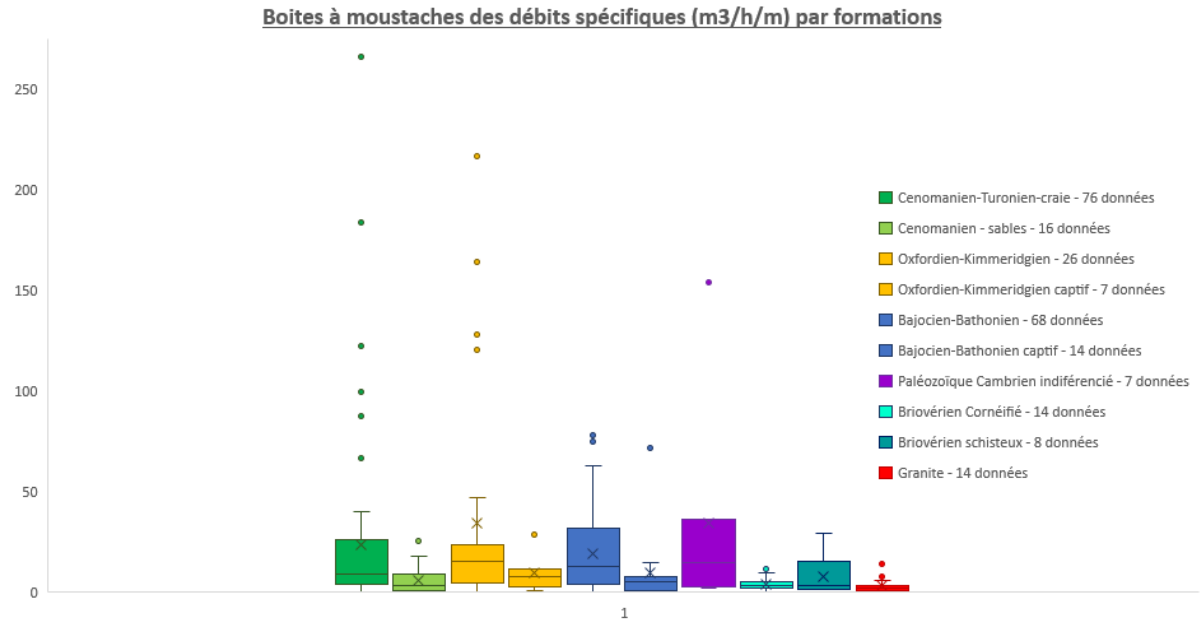
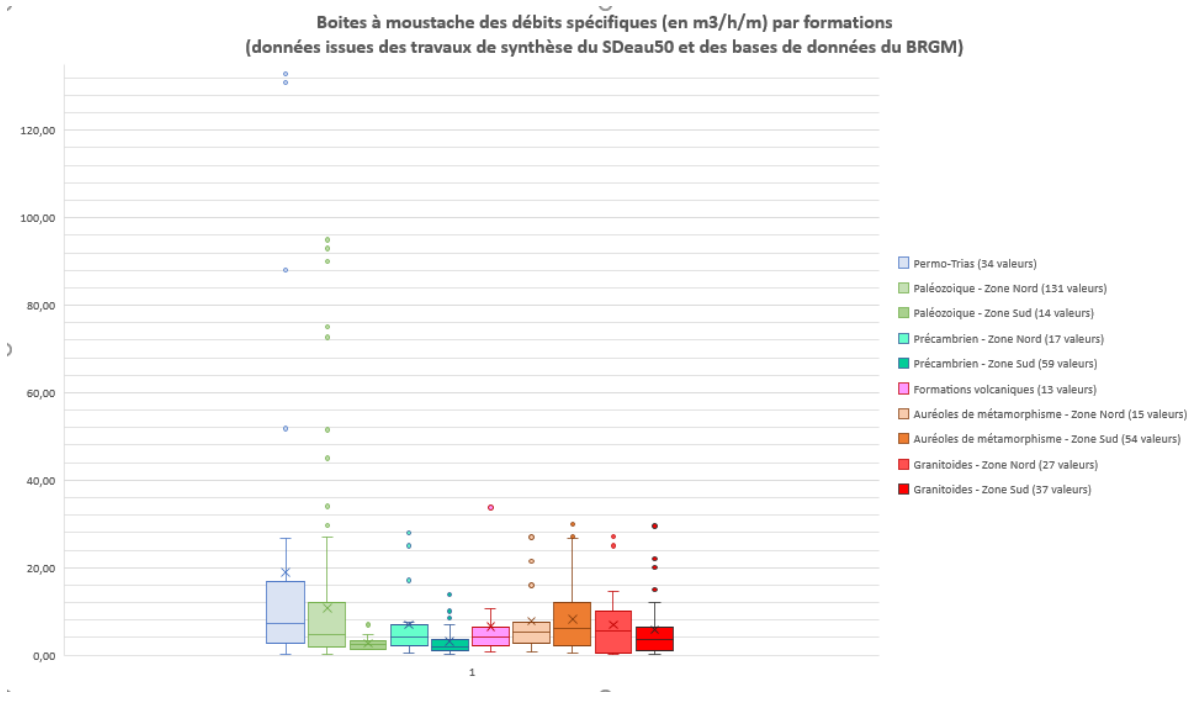


Illustration 107 : Carte de répartition des valeurs recensées sur le débit spécifique

Important : Il est nécessaire ici de nuancer cette analyse en précisant que ces données ne correspondent pas à des durées de pompage équivalentes. Mais cet indicateur reste un bon indice pour évaluer la productivité des différents aquifères.



Débits spécifiques dans le département de l'Orne



Débits spécifiques dans le département de la Manche (RP-69128-FR)

Tableau 12 : Comparaison des débits spécifiques pour les principales formations géologiques exploitées pour l'alimentation en eau dans les départements de l'Orne et de la Manche, éventail des valeurs présenté sous forme de « boites à moustaches »

Nota : les formations du Permo-Trias sont quasi-absentes de la zone d'étude, elles ne sont pas connues dans l'Orne, à l'inverse de la Manche et du Calvados où celles-ci renferment un aquifère exploité pour l'alimentation en eau potable.

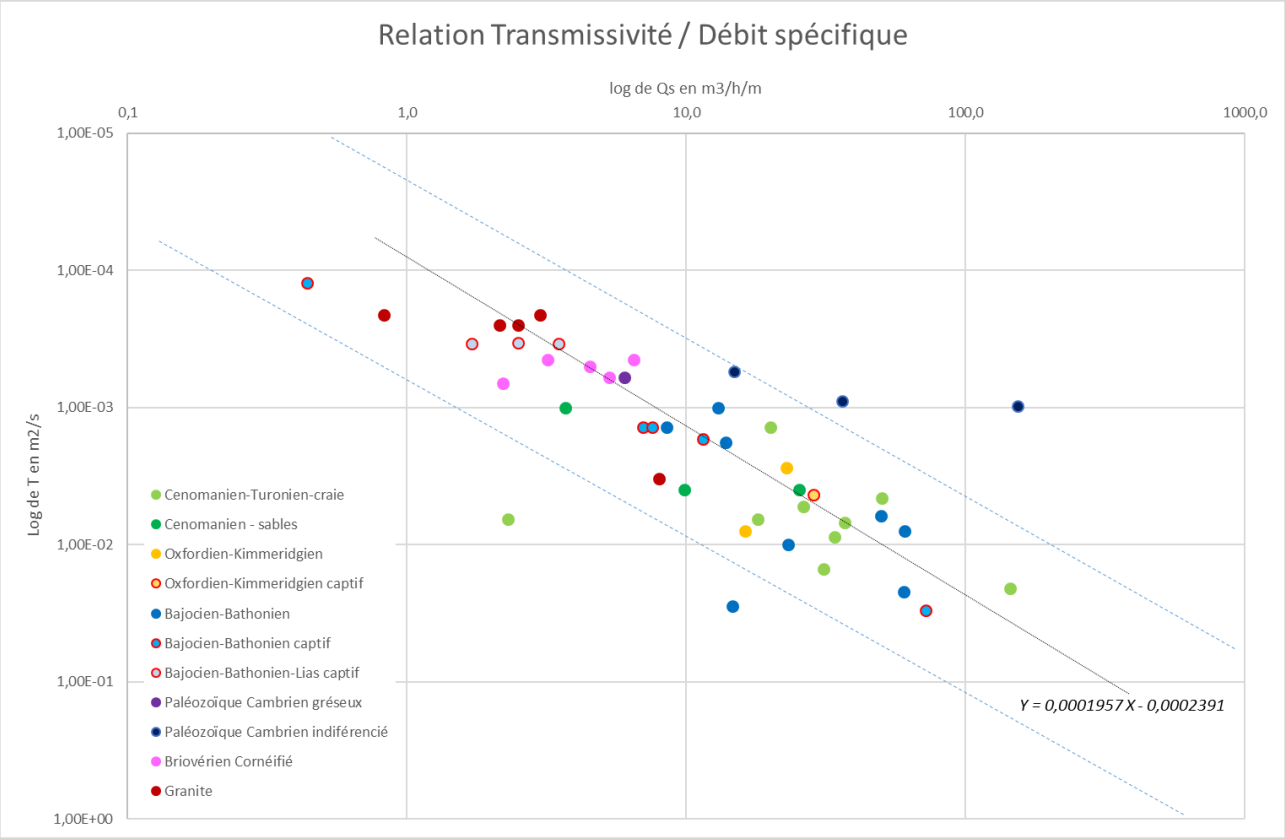


Illustration 108 : Relation empirique entre transmissivité et débit spécifique

Pour les formations aquifères du département de l'Orne, la relation empirique entre la transmissivité et le débit spécifique est de type log/log (Illustration 108). Aussi, à partir de cette information, il semble possible d'estimer l'un des deux paramètres pour rendre la donnée sur les propriétés hydrauliques beaucoup plus dense.

Ceci permettra par exemple de faire des interpolations, sans pour autant disposer de valeurs issues de tests de pompages (notamment à partir des données de forage et recherche en eau), ces interpolations permettront par exemple d'établir des cartes du champ de transmissivité ou de conductivité hydraulique, lesquelles sont utiles pour définir les valeurs de paramètres d'entrée pour les modèles régionaux de simulations numériques par exemple (S. Richard, 2015).

5.3.5. Complément : débit critique et débit au soufflage

En complément du débit spécifique d'un puits, les informations concernant les débits critiques (débit maximal d'exploitation recommandé au-delà duquel les pertes de charges deviennent prépondérantes) et le débit au soufflage (débit observé lors du nettoyage du puits par l'entreprise de forage) ont été étudiées. Le débit critique est évalué à partir des pompages d'essai par paliers de débit (essai de puits).

Là également il ne s'agit pas de paramètres hydrodynamiques mais ces éléments renseignent sur la productivité des ouvrages traversant les principaux aquifères.

Sur le département de l'Orne, 375 points d'eau permettent d'avoir une information sur le débit au soufflage, et 70 sur le débit critique. Les données sont reportées dans les tableaux 13 et 14 pages suivantes.

Aquifère	Nombre de Débit au soufflage (m3/h)	Moyenne de Débit au soufflage (m3/h)	Min de Débit au soufflage (m3/h)	Max de Débit au soufflage (m3/h)
Cénozoïque				
Alluvions	1	2,0	2,0	2,0
Formation d'Alteration	2	12,9	10,8	15,0
Crétacé				
Cenomanien-Turonien-craie	31	27,3	2,0	150,0
Cenomanien - sables	1	5,4	5,4	5,4
Jurassique				
Oxfordien-Kimmeridgien	29	22,7	2,5	150,0
Oxfordien-Kimmeridgien captif	9	13,7	3,0	50,0
Callovien-Bathonien	10	13,0	4,5	36,0
Callovien-Bathonien captif	1	6,0	6,0	6,0
Bajocien-Bathonien	52	25,2	2,5	120,0
Bajocien-Bathonien captif	17	14,8	3,0	75,0
Lias	1	2,0	2,0	2,0
Multi-couches mesozoique				
Cenomanien- Albien-Oxfordien	1	3,0	3,0	3,0
Cenomanien-Oxfordien	2	76,5	76,5	76,5
Callovien-Oxfordien	13	7,7	1,6	30,0
Callovien-Oxfordien captif	2	6,0	5,0	7,0
Bajocien-Bathonien-Lias	4	25,5	2,0	45,0
Albien-Oxfordien	2	6,5	5,0	8,0
Paléozoïque				
Paléozoïque Dévono-Silurien Silto-ampélitique	5	3,2	1,9	6,0
Paléozoïque Ordovicien - grès	7	17,1	1,0	100,0
Paléozoïque Ordovicien Schisteux	9	5,7	1,1	11,0
Paléozoïque Ordovicien indiférencié	11	14,6	0,5	61,0
Paléozoïque Cambrien gréseux	7	32,6	3,0	50,0
Paléozoïque Cambrien schisteux	1	20,0	20,0	20,0
Paléozoïque Cambrien indiférencié	2	15,5	13,0	18,0
Paléozoïque Volcanites	2	3,8	3,5	4,0
Précambrien				
Briovérien Cornéifié	26	7,8	0,3	83,0
Briovérien gréseux	4	13,5	3,0	25,0
Briovérien indiférencié	39	10,9	0,6	72,0
Briovérien schisteux	29	23,1	0,5	130,0
Granite				
Granite	55	6,8	0,2	35,0
Total général	375	16,3	0,2	150,0

Tableau 13 : Informations sur le débit au soufflage disponibles pour les principaux aquifères du département de l'Orne

Aquifère	Nombre de Débit critique Qc (m3/h)	Moyenne de Débit critique Qc (m3/h)	Min de Débit critique Qc (m3/h)	Max de Débit critique Qc (m3/h)
Crétacé				
Cenomanien-Turonien-craie	20	103,4	18,0	220,0
Cenomanien - sables	1	60,0	60,0	60,0
Jurassique				
Oxfordien-Kimmeridgien	7	77,4	23	140
Oxfordien-Kimmeridgien captif	1	42,0	42	42
Bajocien-Bathonien	9	77,2	49,8	120
Bajocien-Bathonien captif	5	79,4	52	130
Multi-couches mesozoique				
Bajocien-Bathonien-Lias captif	3	25,7	22,5	27,5
Paléozoïque				
Paléozoïque Cambrien gréseux	5	27,6	20	36
Paléozoïque Cambrien indiférencié	2	39,0	18	60
Précambrien				
Briovérien Cornéifié	7	58,3	28	70
Briovérien schisteux	5	113,0	37	220
Granite				
Granite	5	32,5	27,5	37,0
Total général	70	74,7	18,0	220,0

Tableau 14 : Informations sur le débit critique disponible pour les principaux aquifères du département de l'Orne

Les résultats des tableaux 13 et 14, relatifs aux débits (soufflage et critique) des principales formations aquifères, montrent que :

- **Cénozoïque** : le faible nombre de points d'eau présents dans ces formations ne permet pas de faire ressortir des potentiels fiables. Les seules informations disponibles tendent à montrer que la productivité des formations rencontrées est faible.
- **Cénomanien :**
  - Les débits au soufflage sont très variables dans les **formations crayeuses** (entre quelques m^3/h à plusieurs centaines de m^3/h) : en effet, la productivité peut être limitée dans les craies saines et marneuses et à l'inverse très importante dans les craies fissurées ou karstiques. Le maximum de débit critique pour l'ensemble des points d'eau, tout aquifère confondu, est observé dans cet aquifère du céno-turonien crayeux : 266 m^3/h dans la vallée de l'Huisne (02888X0023/S4), 220 m^3/h dans la partie amont de la vallée de l'Iton (02144X0046/F2) sur des craies a priori fissurées.
  - Les débits au soufflage comme les débits critiques sont faibles (inférieurs à 10 m^3/h) dans les **formations sableuses** et ne dépassent pas les quelques dizaines de m^3/h (60 m^3/h en moyenne) pour les débits critiques. L'exploitation de ces formations ne permet pas d'avoir des débits aussi conséquents que ceux de la craie.
- **Jurassique :**
  - Les débits au soufflage sont très variables dans les aquifères du Jurassique (entre quelques m^3/h à plusieurs centaines de m^3/h) pour les aquifères du Bajocien-Bathonien et de l'Oxfordien-Kimmeridgien.

- L'Oxfordien-Kimmeridgien et le Bajocien-Bathonien libres sont les aquifères avec les meilleures productivités. Les débits critiques observés sont en moyenne de 77 m^3/h mais peuvent dépasser dans certains cas les 100 m^3/h dans l'Oxfordien du Perche (Bellême, Mortagne), vraisemblablement à proximité de systèmes faillés.
- L'Oxfordien-Kimmeridgien et le Bajocien-Bathonien captifs ont des débits au soufflage en moyenne deux fois plus faibles que les horizons libres. Les données ne sont pas suffisantes sur le débit critique pour pouvoir comparer.
- Un seul ouvrage nous renseigne pour le Lias, les débits rencontrés au soufflage sont très faibles et permettent difficilement d'apprécier les capacités productives de cet aquifère.

- **Multi-couches mésozoïque :**
  - Les caractéristiques de productivité des puits semblent légèrement moindres par rapport aux puits forés dans le Cénomanien ou le Jurassique uniquement. Cela pourrait s'expliquer par la nature peu productive des terrains rencontrés localement, ce qui a conduit le conducteur des travaux de forage à poursuivre la foration et ainsi à réaliser un forage captant plusieurs aquifères.
- **Paléozoïque :**
  - Le nombre de forages captant les formations du Paléozoïque est peu élevé par rapport aux autres formations.
  - Les débits critiques sont généralement plus homogènes que pour les formations du Mésozoïque (quelques m^3/h à plusieurs dizaines de m^3/h).
  - Ponctuellement, il semblerait que des débits au soufflage de l'ordre de la centaine de m^3/h soient observés.
- **Précambrien schisto-gréseux :**
  - Les débits au soufflage indiquent des potentiels de productivité variables (entre quelques m^3/h à une centaine de m^3/h).
  - Les formations schisteuses du Briovérien semblent avoir les potentiels de productivités les plus importants, pouvant dépasser les 100 m^3/h (Qc = 220 m^3/h sur le captage 02114X0017/F2 au Nord-Ouest de Briouze dans les schistes fracturés).
  - Contrairement à ce que l'on pouvait imaginer, ce potentiel n'est pas meilleur dans les cornéennes.
- **Granite :**
  - Les formations granitiques ont des débits variant de quelques m^3/h à quelques dizaines de m^3/h.

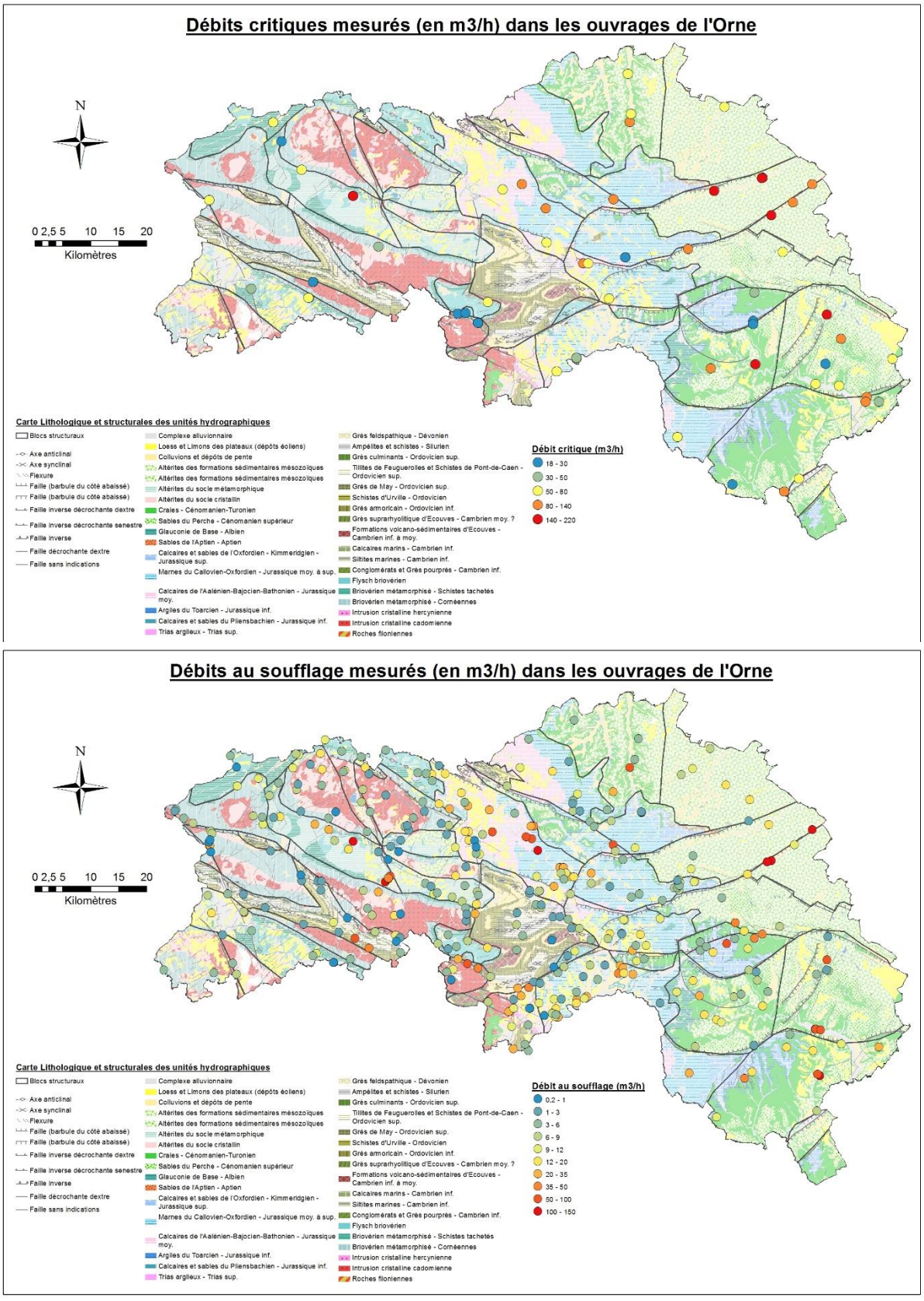


Illustration 109 : Cartes de répartition des valeurs de débit critique et de débit au soufflage évalués

Aquifère	Profondeur < 40 m et Débit < 50 m3/h	Profondeur < 40 m et Débit entre 50 et 100 m3/h	Profondeur < 40 m et Débit > 100 m3/h	Profondeur Entre 40 et 80 m et Débit < 50 m3/h	Profondeur Entre 40 et 80 m et Débit entre 50 et 100 m3/h	Profondeur Entre 40 et 80 m et Débit > 100 m3/h	Profondeur > 80 m et Débit < 50 m3/h	Profondeur > 80 m et Débit entre 50 et 100 m3/h	Profondeur > 80 m et Débit > 100 m3/h	Total
Cénozoïque										
Alluvions	1									**1**
Formation d'Alteration	1									**1**
Crétacé										
Cenomanien-Turonien-craie	4	1		13	2	2	2		1	**25**
Jurassique										
Oxfordien-Kimmeridgien (libre ou captif)	7	2		12	1	1	4	1		**28**
Callovien-Bathonien (libre ou captif)	6			4			1			**11**
Bajocien-Bathonien (libre ou captif)	14	2	1	36	3	1	12			**69**
Lias	1									**1**
Multi-couches mesozoïque										
Cenomanien- Albien-Oxfordien	1			1						**2**
Cenomanien-Oxfordien					2					**2**
Albien-Oxfordien										**0**
Callovien-Oxfordien	3			10			1			**14**
Bajocien-Bathonien-Lias (libre ou captif)	2			2						**4**
Paléozoïque										
Paléozoïque Ordovicien indifférencié	2			5			2	1		**10**
Paléozoïque Ordovicien Schisteux				8			1			**9**
Paléozoïque Ordovicien - grès	1			4			1			**6**
Paléozoïque Cambrien gréseux				4				3		**7**
Paléozoïque Cambrien indifférencié				2						**2**
Paléozoïque Cambrien Schisteux				1						**1**
Paléozoïque Dévono-Silurien Silto-ampélitique	1			3			1			**5**
Paléozoïque Volcanites				1			1			**2**
Précambrien										
Briovérien Cornéifié	5			9			11	1		**26**
Briovérien gréseux				2			2			**4**
Briovérien indifférencié	9			25			4	1		**39**
Briovérien schisteux	3			19			2	3	2	**29**
Granite										
Granite	9			33			13			**55**
Total	**70**	**5**	**1**	**194**	**8**	**4**	**58**	**10**	**3**	**353**

Tableau 15 : Comparaison entre profondeur et débit au soufflage pour les différentes formations aquifères. Colonnes bleues sont favorables pour les projets de recherche en eau en termes de coût bénéfice, puis vert, jaune et enfin orange et rouge pour le plus défavorable

Le Tableau 15 ci-dessus permet d'évaluer le rapport « profondeur-débit » pour les projets de recherche en eau : c'est-à-dire d'identifier les forages les moins profonds et les plus productifs.

L'analyse montre que ce rapport est moins bon dans le Bajocien-Bathonien sous couverture (captif) et également pour les cornéennes du Briovérien dont le rapport apparait sous cet angle assez aléatoire.

Dans l'ensemble l'indicateur proposé entre profondeur et débit apparait ici bien moins favorable pour les formations de socle. Il s'agit là également d'un paramètre à intégrer dans le cadre du dimensionnement des campagnes de recherche en eau.

5.4. PROXIMITE D'UN SYSTEME FAILLE

Les points d'eau se trouvant dans une zone tampon de 500 m autour des failles principales de l'Orne ont été sélectionnés : un total de 103 points d'eau sur les 968 points d'eau recensés dans l'Orne par le BRGM a été identifié.

Sur ces 103 points d'eau, 93 ont des paramètres hydrodynamiques renseignés. Sur ces 93 points, les répartitions des informations disponibles sont les suivantes :cf. Tableau 16 ci-dessous.

Aquifère	Nombre par Aquifère	Nombre de Profondeur ouvrage (m)	Nombre de débit spécifique (m3/h/m)	Nombre de Débit au soufflage (m3/h)	Nombre de Débit critique Qc (m3/h)	Nombre de Transmissivité T (m2/s)	Nombre de Emmagasinement S
Tertiaire							
Alluvions	1	1		1			
Crétacé							
Cenomanien-Turonien-craie	17	16	6	5	2	4	3
Cenomanien - sables	7	4	1				
Jurassique							
Oxfordien-Kimmeridgien	14	11	7	5	2	3	
Oxfordien-Kimmeridgien captif	2	2		2			
Callovien-Bathonien	1	1		1			
Bajocien-Bathonien	12	11	4	2	1	1	
Bajocien-Bathonien captif	5	5	4		2	2	1
Multi-couches mésozoïque							
Callovien-Oxfordien	3	2		2			
Bajocien-Bathonien-Lias	1	1					
Paléozoïque							
Paléozoïque Dévono-Silurien Silto-ampélitique	3	2	1	1			
Paléozoïque Ordovicien - grès	1			1			
Paléozoïque Ordovicien schisteux	1	1		1			
Paléozoïque Cambrien gréseux	7	7	4	7	5	5	1
Paléozoïque Cambrien schisteux	1	1		1			
Précambrien							
Briovérien Cornéifié	8	7	2	3	1		
Briovérien indifférencié	1	1		1			
Granite							
Granite	8	8	1	6			
Total général	93	81	30	39	13	15	5

Tableau 16 : Données disponibles pour les ouvrages situés à proximité des principales structures faillées

Les points d'eau dans le voisinage des principales failles de l'Orne ont peu de renseignements sur l'ensemble de leurs caractéristiques, mis à part la profondeur de l'ouvrage et dans une moindre mesure le débit spécifique ou au soufflage. Ces données ne sont pas suffisantes pour effectuer un quelconque travail de comparaison, encore moins statistique.

Dans le cadre de cette étude il n'a donc pas pu être mis en évidence d'amélioration des caractéristiques hydrodynamiques par la proximité avec un système faillé connu. En effet, le nombre de points disponibles en base de données, reconnus comme localisés à proximité de structures majeures, et pour lesquelles l'information sur les paramètres hydrodynamiques est renseigné est actuellement insuffisante pour pouvoir effectuer des corrélations à l'échelle des grands ensembles aquifères.

Dans l'ensemble, l'information géologique et hydrogéologique relative aux failles et la fracturation est assez mal renseignée ou pas assez mise en évidence dans les études, le plus souvent faute de pouvoir évaluer de manière objective l'effet des structures sur la productivité des ouvrages. Il conviendra à l'avenir de s'appuyer sur les propositions du paragraphe 3.4 pour pouvoir mieux apprécier le rôle de ces structures sur le comportement des ressources exploitées.

5.5. BILAN DE L'ANALYSE DES DONNEES HYDROGEOLOGIQUES DE CARACTERISATION DES AQUIFERES

a) Pour le domaine sédimentaire :

Les formations mésozoïques présentent les caractéristiques les plus intéressantes d'un point de vue du potentiel productif des nappes d'eaux souterraines et formations exploitées, en particulier les formations crayeuses du Céno-turonien, de l'Oxfordien-Kimmeridgien et du Bajocien-bathonien. Les débits exploités sont bien souvent supérieurs à 50 m^3/h et dépassent fréquemment les 100 m^3/h. Ces capacités permettent une exploitation plus aisée des ressources en eau souterraine qui se corrobore par le nombre plus élevé de points d'eau dans ces formations du domaine sédimentaire que dans celles du domaine de socle.

Les Sables du Perche ont des capacités aquifères un peu moins bonnes que celles des trois autres formations citées ci-dessus. En effet, la productivité des ouvrages ne dépasserait pas quelques dizaines de m^3/h.

Si dans l'ensemble les caractéristiques hydrodynamiques des formations sédimentaires sont relativement homogènes (valeurs de transmissivité de l'ordre de 10^{-4} m^2/s à 10^{-2} m^2/s, emmagasinement de l'ordre de 10^{-4} à 10^{-2}) et confirment une bonne capacité à stocker et à restituer les eaux, il existe néanmoins quelques différences notables : liées principalement au caractère libre ou captif de l'aquifère (pour ce dernier les valeurs seront plus faibles).

En outre, ces différences s'expliquent probablement par des spécificités locales : notamment par la présence d'une karstification, de failles/fissures, par la géométrie des formations et leur agencement dans l'espace (conditionnant par exemple le caractère libre ou captif des aquifères). Ces particularités se font alors ressentir sur les débits disponibles et ont, le plus souvent, une influence notable sur la vulnérabilité des aquifères (et donc la qualité des eaux).

Dans le cadre de la seconde phase du programme OAGPRO61bis, le croisement des données piézométriques et hydrodynamiques d'une part et avec la géologie d'autre part permettra d'identifier cartographiquement ou de supposer l'existence de ces phénomènes (karstification, fissuration, caractère libre ou captif).

b) Pour le domaine de socle :

Les formations de socle en Normandie occidentale et dans l'Orne présentent des potentiels aquifères non négligeables, qui se manifestent à travers le soutien aux débits d'étiage des cours d'eau et qui diffèrent selon la nature des roches. On distingue :

- **Les granites et leurs auréoles de métamorphisme** : dans l'ouest de l'Orne, les complexes granitiques peuvent fournir des débits atteignant 30 m^3/h et dépassant même parfois les 50 m^3/h dans les cornéennes : par exemple dans le massif d'Athis.

  Les formations granitiques ont des caractéristiques hydrodynamiques (notamment débits) peu satisfaisantes. Un nombre relativement important de forages y est toutefois recensé dans l'Orne : il semblerait que le choix d'exploiter de nombreux forages/sources ou puits avec des débits modestes ait été retenu au regard des fonctions capacitives de cet aquifère (emmagasinement favorable), faute d'autres ressources disponibles.

  A l'inverse les cornéennes ont un rôle plus faiblement capacitif et plus transmissif fournissant, le plus souvent, de meilleurs débits que dans les granites.

- **Les roches méta-sédimentaires** (schistes, grès, siltites) : constituent une part importante du socle armoricain de Normandie. Leur structuration est complexe ce qui explique la grande variabilité dans les débits obtenus : de quelques dizaines à quelques centaines de m^3/h.

  Les formations paléozoïques sont peu exploitées dans l'Orne mais présentent des caractéristiques hydrodynamiques qui peuvent être tout à fait intéressantes.

  Les fyschs briovériens gréso-schisteux indifférenciés ont des caractéristiques hydrodynamiques satisfaisantes, et un nombre important de forages y est recensé.

Les débits produits en zone de socle restent modestes (quelques dizaines de m^3/h) et le potentiel productif assez localisé géographiquement autour des zones fracturées. En effet, ce type d'aquifère constitue une mosaïque de petits systèmes imbriqués et plus ou moins connectés entre eux. Les ressources disponibles et mobilisables sont donc difficiles à apprécier régionalement (voir paragraphe 3.1).

Les paramètres hydrodynamiques des formations de socle sont dans l'Orne de l'ordre de 10^{-4} à 10^{-3} m^2/s en moyenne pour la transmissivité et également de l'ordre de 10^{-4} à 10^{-2} en moyenne pour l'emmagasinement.

Les caractéristiques (géométrique, capacitive, transmissive) de ces différents horizons vont déterminer la capacité de l'aquifère à fournir de l'eau. Un forage, pour être productif, devra recouper l'horizon fissuré et si possible être adossé à des structures majeures.

Dans les aquifères de socle, les arrivées d'eaux profondes (30-100 m) sont généralement de bonne qualité car 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 plomb/nickel/arsenic et/ou les radionucléides peut contraindre la mise en exploitation de la ressource.

Pour finir on précisera que la connaissance sur les caractéristiques géométriques (épaisseur notamment) et hydrodynamiques des différents horizons (altération et zone fissurée) ainsi que les connaissances sur les ressources profondes des formations de socle, du type de celles mises en évidence en Bretagne (projets RAPSODI et GASPAR), sont assez mal connues à l'échelle de la Normandie et plus particulièrement de l'Orne. Ces éléments restent encore à acquérir.

6. Analyses statistiques des chroniques piézométriques dans le département de l'Orne

Ce chapitre a pour objectif de décrire, à partir des chroniques piézométriques disponibles, le comportement des principaux aquifères suivis à l'échelle du département de l'Orne. L'état étudié correspond à celui de fin 2018.

L'objectif second était de caractériser sommairement la représentativité du suivi mis en œuvre par les réseaux de surveillance de l'état quantitatif des aquifères (réseau du SDE61 et réseau DCE BRGM/AFB). Le conseil départemental de l'Orne, puis le SDE61, dispose en effet depuis de nombreuses années d'un réseau piézométrique développé à l'échelle départementale.

Dans la suite du programme OAGPRO61bis à venir, des préconisations seront faites au sujet du réseau de suivi, au regard notamment de la caractérisation détaillée du fonctionnement des aquifères des domaines sédimentaires et de socle (intégration des données piézométriques).

6.1. RESEAU DE SUIVI PIEZOMETRIQUE DU DEPARTEMENT DE L'ORNE

Nous nous sommes intéressés dans un premier temps à la répartition géographique de ces ouvrages.

6.1.1. Bassins versants suivis

Les entités suivies actuellement :	Les entités qui ne sont pas suivies :
Pour le Bassin Seine Normandie	
3 Points sur le BV du Noireau	BV Charentonne
6 Points sur le BV de la Rouvre	BV de la Vie
2 Points sur le BV Avre Amont	BV Orne en Aval Argentan
1 Point sur le BV Risle – Iton Amont	BV de l'Orbiquet
2 Points sur le BV de la Touques	
1 Point sur le BV de la Dives	
1 Point sur le BV de l'Eure Amont	
5 Points sur le BV de l'Orne en amont d'Argentan	
4 Points sur le BV de l'Orne autour d'Argentant	
Pour le Bassin Loire Bretagne	
1 Point sur le BV de la Varenne	BV de la Bienne
2 Points sur le BV de la Mayenne	
13 Points sur le BV de l'Huisne	
6 Points sur le BV de la Sarthe	

Tableau 17 : Nombre de piézomètres suivant les bassins versants superficiels

A l'échelle du département, le suivi de l'ensemble des unités hydrographiques n'est pas tout à fait complet. En effet comme le montrent le Tableau 17 et l'Illustration 110 suivante, quelques bassins majeurs comme celui de l'Orne à l'aval d'Argentan ou de la Charentonne ne sont pas suivis.

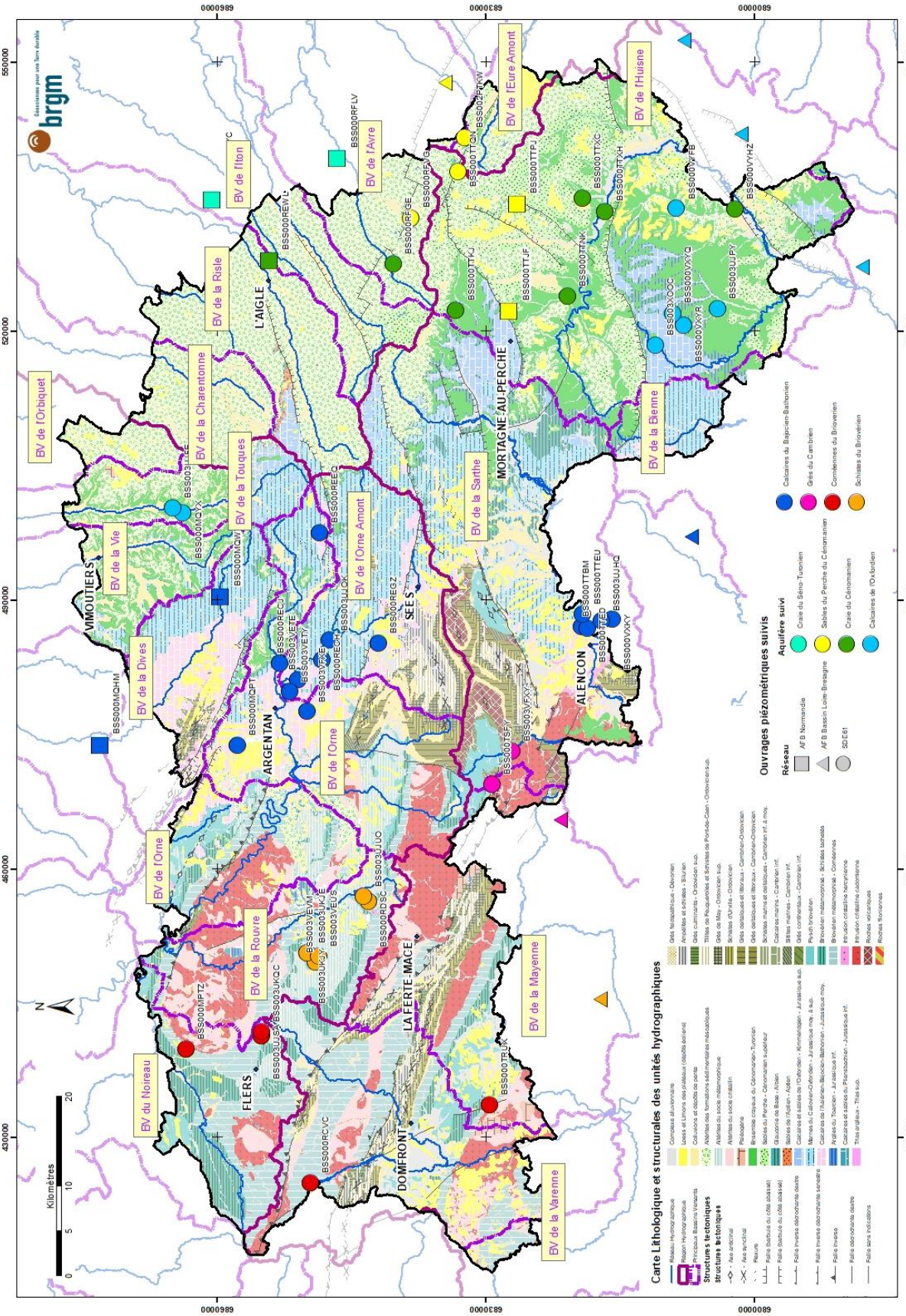


Illustration 110 : Répartition des ouvrages de suivi piézométrique sur fond géologique

On peut également s'interroger sur l'intérêt de disposer de plus de deux points de suivi par bassin versant pour pouvoir décrire l'évolution de la situation hydrogéologique. Il serait judicieux dans ce cadre de disposer de points de suivi à l'amont et à l'aval des bassins versants ou dans différentes unités lithologiques, comme par exemple : les grès paléozoïques, les flysch briovériens et les granites des bassins de la Varenne et de la Mayenne, qui peuvent avoir une réponse hydrologique tout à fait différente pour un même évènement climatique (cf. paragraphe 2.2).

A l'échelle des grands bassins versants, comme celui de la Sarthe, il est tout à fait probable de rencontrer de fortes disparités en termes de précipitation entre les massifs situés au nord d'Alençon et ceux situés aux confins du Perche plus à l'est (cf. Illustration 111Illustration 111 ci-dessous).

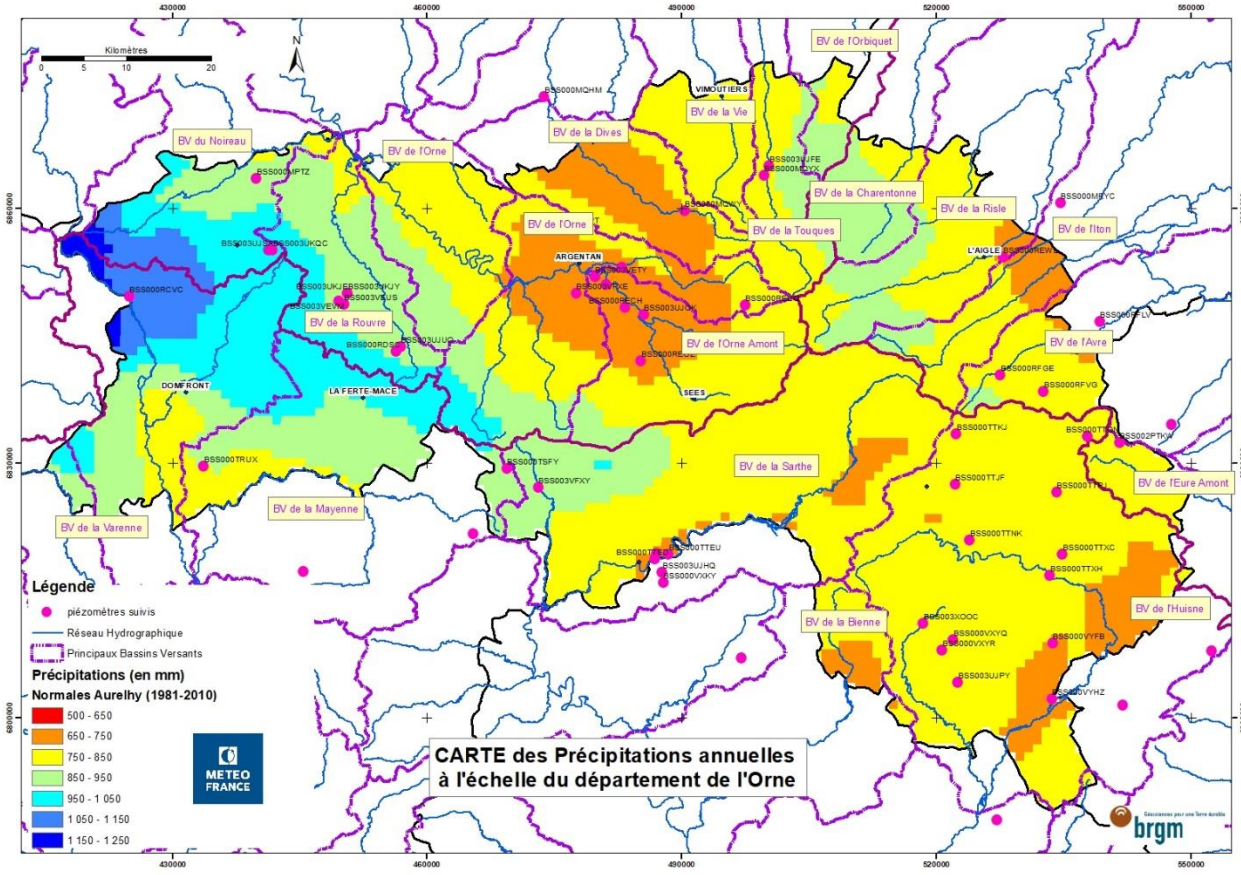


Illustration 111 : Moyenne des précipitations annuelles, période de 1981 à 2010 (source : Météo France)

De façon plus globale, la carte des précipitations moyennes annuelles montre qu'il existe un réel contraste entre l'ouest du département, la région de bocage plus arrosée (jusqu'à 1000 mm par an) et l'est où les plaines d'Argentan et les collines du Perche sont beaucoup moins arrosées (jusqu'à 650 mm/an). L'implantation du réseau piézométrique et l'interprétation des valeurs enregistrées doit donc également tenir compte de ce paramètre.

6.1.2. Masses d'eau souterraines suivies

Le Tableau 18 et l'Illustration 112 suivante présentent la situation de la représentation du suivi effectué pour les masses d'eau souterraines (version rapportage 2016).

On note que les principales masses d'eau souterraines sont suivies, ce qui a priori serait suffisant pour pouvoir évaluer leur état quantitatif. Cependant le suivi n'est pas effectué de façon homogène : certaines masses d'eau possèdent 1 seul point de suivi quand d'autres en possèdent 5 ou plus.

On peut donc légitimement se poser la question de la représentativité du suivi des masses d'eau qui ne possèdent qu'un seul point de suivi.

Les entités suivies actuellement :	Les entités qui ne sont pas suivies :
Pour le Bassin Seine Normandie	
FRHG211 – Craie Altérée du Neubourg Iton Plain de St André, 1 points	
FRHG212 –Craie du Lieuvain Ouche, BV Risle, 1 point	
FRHG213 – Craie et Marnes du Lieuvain, Ouche, Pays d'Auge, Bv Touques, 2 points	
FRHG308 – Bathonien Bajocien de la Plaine de Caen et du Bessin, 10 points	
FRHG502 – Socle du BV de la Seules et de l'Orne, 9 points	
Pour le Bassin Loire Bretagne	
FRGG018 – BV Mayenne, 3 Points	
FRGG019 – BV Sarthe Amont, 1 Point	
FRGG081 – Sables et Grès du Cénomanien sarthois libre et captif, 5 points	
FRGG120 – Calcaires du Lias et du Dogger Mayennais et Sarthois captif, 5 points	
FRGG124 – Calcaires de L'Oxfordien dans l'Orne et la Sarthe libre, 3 points	
FRGG141 – Calcaires de l'Oxfordien dans l'Orne et Sarthe captif, 7 points	

Tableau 18 : Masses d'eau souterraines actuellement suivies par les réseaux piézométriques du BRGM/AFB et du SDE61 (état à fin 2018)

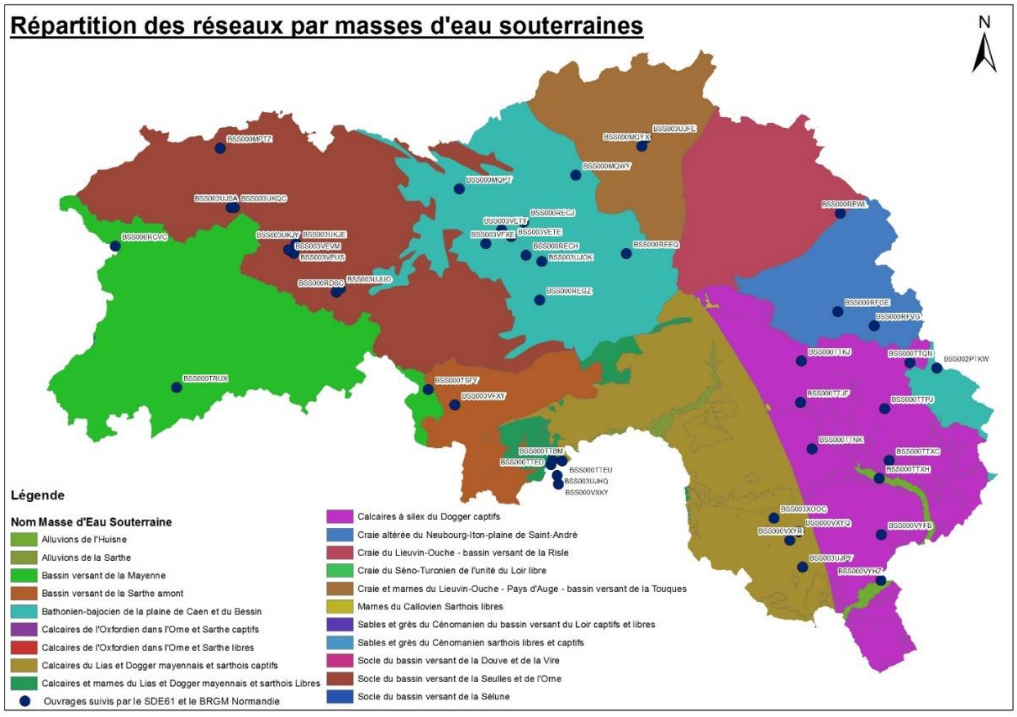


Illustration 112 : Répartition des ouvrages de suivi en fonction des masses d'eaux souterraines, version rapportage 2016

6.1.3. Les blocs litho-structuraux

Au niveau des ensembles litho-structuraux, le Tableau 19 et l'Illustration 113 montrent que la répartition des ouvrages de suivi n'est pas tout à fait homogène. Il existe en effet une majorité de blocs qui ne sont pas suivis.

Les entités suivies actuellement :	Les entités qui ne sont pas suivies :
3 – Bloc de l'Huisne, 6 points	1- Nogent le Rotrou
4 – Bloc de l'Eure, 6 points	2 – Bloc de Céton
5 – Bloc du Perche, 4 points	6 – Bloc de l'Avre et de l'Iton
7 – Bloc de la Risle, 1 point	8 – Bloc d'Ecouves
9 – Bloc du Massif d'Athis, 2 points	10 – Bloc de la Forêt d'Aunay
11 – Bloc de Flers, 7points	12 – Bloc de la Baize
16 – Bloc de St Remy, 2 points	13 - Bloc d'Avoine
17 – Bloc des Pays d'Auge et d'Ouche, 2 points	14 - Bloc d'Ecouché
18 – Bloc de la Dives, 1 point	15 - Bloc du Noireau
20 - Bloc d'Argentan, 9 points	19 - Bloc de la zone Bocaine
21 – Bloc de Lonlay l'Abbaye, 1 point	22 - Bloc de St Clair de Halouze
26 – Bloc de la Mayenne, 1 point	23 - Bloc des Synclinaux de Domfront Mortain, La Ferière
29 – Bloc de Sarthe, 2 points	24 - Bloc de Tessé la Madeleine
29 (?) Hors Département, 3 points	25 - Bloc de Carrouges, St Martin des Landes
	27 - Bloc de Passais-Le-Horps
	28 - Bloc du Sarthon

Tableau 19 : Répartition des piézomètres de suivi par bloc litho-stratigraphique

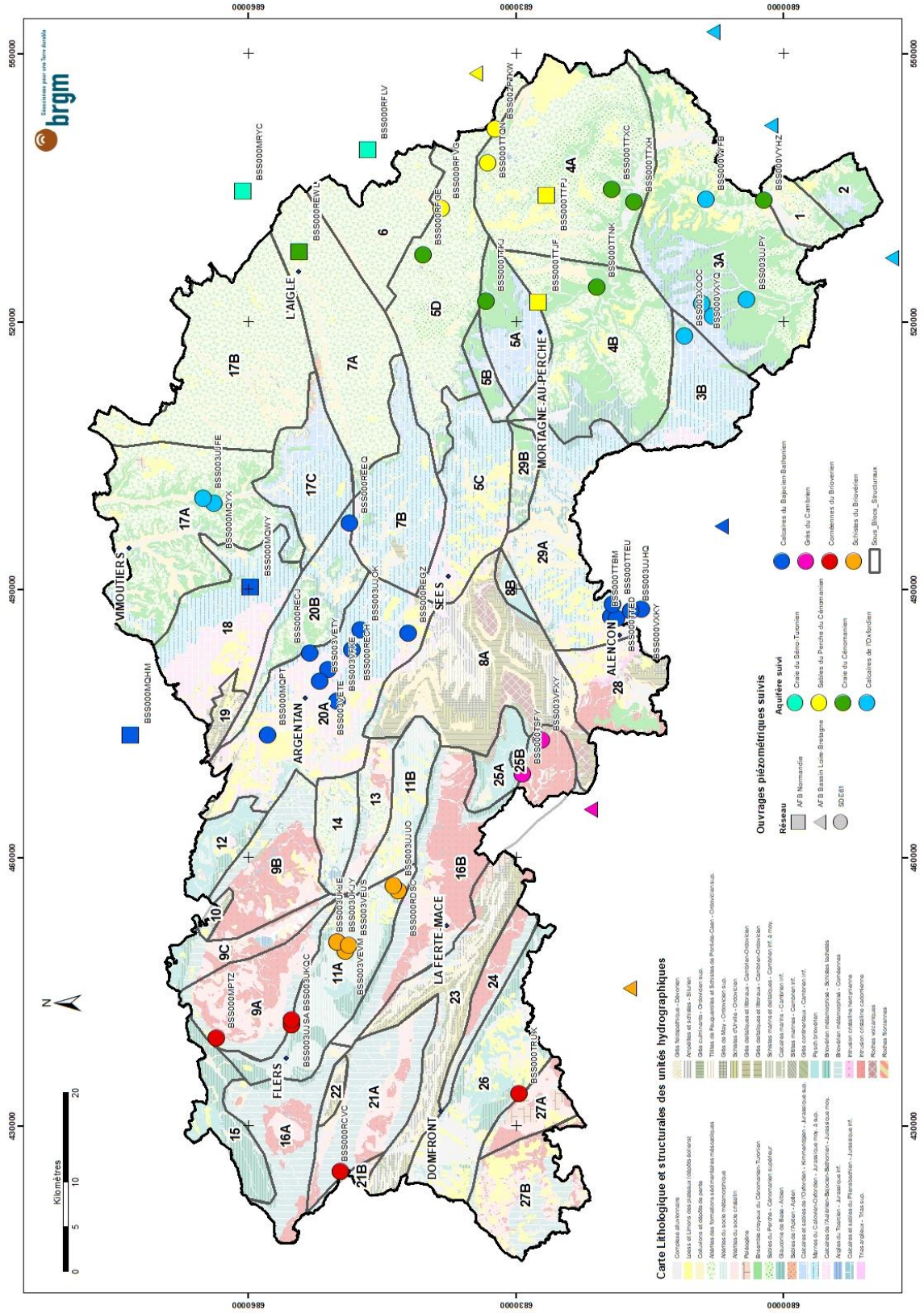


Illustration 113 : Carte de répartition des piézomètres des réseaux du SDE61 et du BRGM/AFB par bloc litho-stratigraphique

6.2. METHODOLOGIE D'ANALYSE STATISTIQUE DES CHRONIQUES PIEZOMETRIQUES

Afin de caractériser le comportement des ouvrages, des analyses statistiques ont été réalisées pour étudier selon le type d'aquifère suivi si l'appartenance à un même bloc litho-structural, sa position topographique et géographique se traduisent dans les chroniques piézométriques et dans le but de démontrer (ou non) l'existence de certaines analogies.

Ces analyses ont été réalisées avec le logiciel ESTHER (Etude de Séries Temporelles en Hydrogéologie avec le logiciel R – Rapport BRGM/RP-67518-FR). Ce logiciel, développé en interne par le BRGM, est un outil de calcul dédié à l'analyse de série temporelle (niveaux piézométriques, débits et pluies). Il permet en outre d'analyser la dynamique d'une nappe et de détecter des tendances, informations utiles pour décrire l'état quantitatif des masses d'eau.

Ce paragraphe s'attèle à présenter la méthodologie d'analyse des chroniques fournies par le SDE61 et celles suivies par le BRGM dans le cadre de la DCE.

6.2.1. Analyse descriptive

L'analyse descriptive permet de caractériser rapidement une chronique piézométrique, quelle que soit sa longueur. Il est cependant nécessaire qu'une année comporte plus de 36 données pour être prise en compte dans le calcul (soit 3 données par mois).

Les statistiques résultant de cette analyse sont :

- des graphiques d'évolution des données au pas de temps journalier, mensuel et annuel avec le nombre d'années de mesure, le nombre de jours de données par année, la moyenne, l'écart-type, le minimum et le maximum des valeurs ;
- des boites à moustaches qui permettent de représenter la dispersion des données ;
- des histogrammes, des distributions cumulées des fréquences et des corrélogrammes (au pas de temps annuel).

6.2.2. Tests statistiques

Au préalable il est indispensable de s'assurer que la chronique qui sera analysée répond aux exigences des différents tests statistiques qui seront effectués. Notamment, il est important de noter que ces tests ne peuvent être réalisés pour des chroniques de moins de 10 ans (en prenant toujours en compte un minimum de 36 données par année).

Le seuil de risque appliqué (risque de rejeter les hypothèses de stationnarité, d'homogénéité et d'indépendance alors qu'elles sont vraies) pour les chroniques piézométriques a été fixé à 5%.

Ces tests sont :

- Test de tendance ou stationnarité

Ce test a pour objectif de vérifier l'absence de tendance monotone. Le test le plus souvent employé est le test de Mann-Kendall.

- Test d'homogénéité

Ce test est réalisé à l'aide du test de Wilcoxon, permettant de vérifier si deux échantillons indépendants sont extraits de la même population parente (ils sont distribués par la même loi).

- Test d'indépendance

Ce test peut être réalisé par le test de Wald-Wolfowitz ou à l'aide d'un corrélogramme. Ce test permet de s'assurer que les valeurs de l'échantillon (c'est-à-dire de la chronique) sont bien indépendantes les unes des autres (absence d'autocorrélation). Le test de Wald-Wolfowitz étant cependant très sévère, il lui sera préféré le corrélogramme pour les niveaux piézométriques.

En effet pour les nappes, le niveau piézométrique d'un mois donné est très généralement lié aux niveaux des mois précédents. Ainsi les nappes fortement inertielles ont souvent des chroniques qui correspondent peu aux critères nécessaires aux analyses fréquentielles.

6.2.3. Détection des tendances

Dans les tests statistiques le terme de « tendance » désigne un changement graduel, observable sur une période de temps suffisamment longue, de la valeur de la variable d'une série temporelle.

Si une chronique répond aux critères d'homogénéité et d'indépendance mais pas au test de Mann-Kendall, il est alors possible d'utiliser la Pente de Sen afin de déterminer sa tendance. Cependant il est nécessaire de réaliser ces tests sur plusieurs paramètres : moyenne, maximale, minimale et médiane.

L'interprétation de ces tendances est cependant à prendre avec précaution. En effet, la détection d'une tendance peut parfois être détectée à tort à la place d'une pente. Ce qui est en particulier le cas des nappes à cycles pluriannuels pour lesquelles la chronique est trop courte (nombre de cycles insuffisant).

6.2.4. Analyse spectrale

L'analyse spectrale permet de détecter les périodicités d'une chronique notamment la superposition de cycles à différentes échelles de temps (annuelles et pluriannuelles).

L'outil utilisé pour cette analyse est le périodogramme de Lomb-Scargle car il s'applique à des séries irrégulières, c'est-à-dire non-échantillonné régulièrement comme c'est souvent le cas des chroniques piézométriques.

Ce périodogramme est réalisé au pas de temps mensuel et annuel. La puissance des cycles est également indiquée ce qui permet de réaliser des rapports entre les cycles. Les cycles pluriannuels compris entre 6 et 7 ans correspondent à l'Oscillation Nord-Atlantique visible dans les variations piézométriques de certains aquifères.

Il est à noter que le périodogramme ne nécessite pas que les chroniques piézométriques répondent aux critères des tests statistiques. Cependant il est nécessaire que les chroniques soient les plus longues possibles afin de détecter au mieux les cycles pluriannuels. Pour bien détecter un cycle, il est ainsi nécessaire que la chronique soit 2 à 3 fois plus longue que le cycle pluriannuel détecté. Ainsi pour notre étude, seules les chroniques d'une longueur supérieure à 15 ans ont été prises en compte.

Afin de déterminer l'importance de chaque cycle par rapport aux autres, notamment entre le cycle annuel et les cycles pluriannuels, un ratio est calculé à partir de la puissance spectrale déterminée pour chaque cycle.

6.2.5. Corrélogramme croisé

Le corrélogramme croisé permet de comparer des séries de valeurs 2 à 2, dans notre cas des chroniques piézométriques. Les chroniques sont superposées au pas de temps mensuel et annuel.

Le corrélogramme croisé permet d'obtenir une valeur de corrélation maximale. Ainsi, plus cette valeur est proche de 1, plus la corrélation entre les 2 chroniques piézométriques est importante et plus les chroniques se ressemblent.

6.3. ANALYSE DES CHRONIQUES PIEZOMETRIQUES

Dans ce paragraphe, il est proposé une analyse des chroniques piézométriques de l'ensemble des points suivis dans le département de l'Orne par le BRGM (dans le cadre du suivi DCE) et par le SDE61. Chaque ouvrage est rattaché au suivi d'un aquifère en particulier.

6.3.1. Chroniques analysées

Les données disponibles sont les chroniques piézométriques de 47 ouvrages fournies par le SDE61 (43 chroniques) et le BRGM dans le cadre du réseau DCE (4 chroniques). Sept aquifères sont suivis par ces chroniques et leur longueur est très variable (de 3 à 46 années), tout comme la densité de points de mesures.

Le Tableau 20 et l' Illustration 114 suivante présentent la répartition des chroniques en fonction de l'aquifère suivi et de la longueur de la chronique et donc de la possibilité ou non de réaliser un périodogramme.

Aquifères	Nombre total de chroniques	Longueur de la chronique		
		Inf. à 10 ans / Périodogramme non réalisable	Entre 10 et 15 ans / Périodogramme limité	Sup. à 15 ans / périodogramme réalisable
Calcaires du Bajocien-Bathonien	15	1	6	8
Calcaires de l'Oxfordien	7	1	0	6
Craie du Cénomanien	7	1	0	6
Sables du Perche du Cénomanien	5	1	0	4
Grès du Cambrien	2	0	0	2
Schistes du Briovérien	6	2	4	0
Cornéennes	5	2	2	1
TOTAL	**47**	**8**	**12**	**27**

Tableau 20 : Répartition des chroniques piézométriques analysées statistiquement en fonction de l'aquifère suivi et de la longueur de la chronique

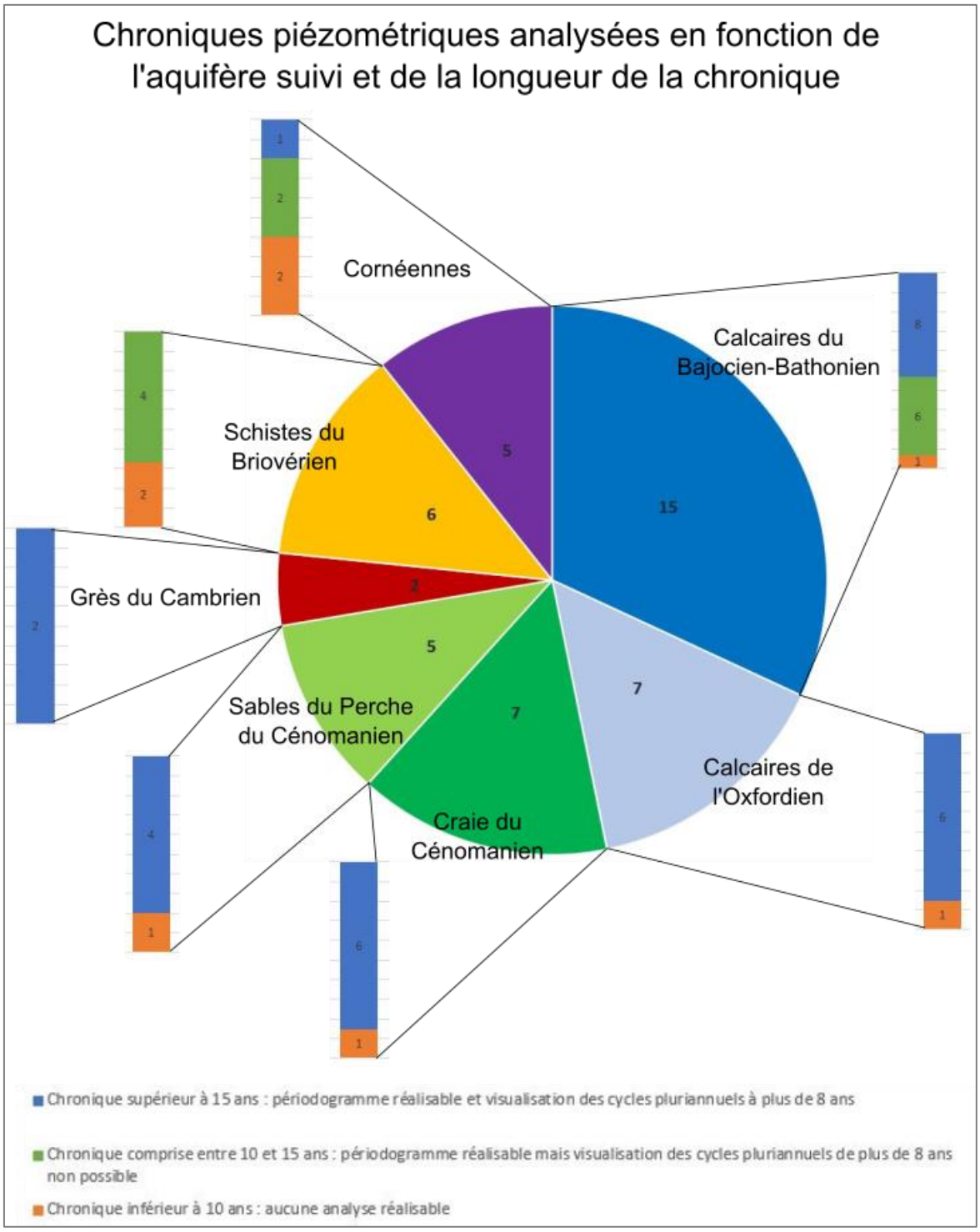


Illustration 114 : Répartition des chroniques piézométriques analysées statistiquement en fonction de l'aquifère suivi et de la longueur de sa chronique

Les résultats de l'analyse des tendances proposées par le logiciel ESTHER sont reportés en annexe 2.

L'analyse des chroniques se veut à la fois descriptive et statistique (tel que détaillé au paragraphe 6.2 précédent). Pour chaque aquifère suivi, elle est présentée ci-après de la façon suivante : analyse des cycles, période de recharge, tendance, et corrélation.

6.3.2. Aquifère des calcaires bathoniens-bajociens

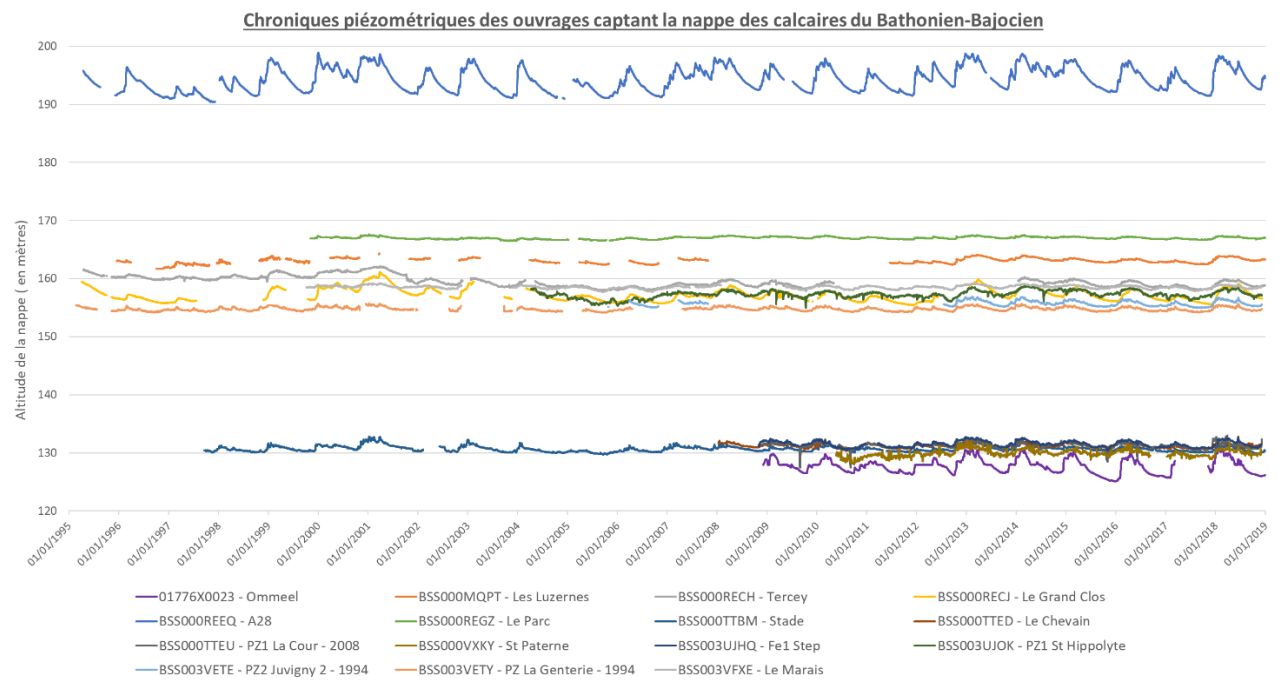


Illustration 115 : Chroniques piézométriques des ouvrages suivant la nappe des formations bathoniennes et bajociennes

- **Analyse des cycles**

2 groupes se distinguent d'un point de vue de l'analyse des cycles pour l'aquifère du Bathonien-Bajocien (*Rappel analyse réalisée pour les ouvrages dont la chronique est suffisamment importante, > 15 ans)* :

Un premier groupe, correspondant à une nappe à faible inertie où les cycles annuels sont dominants et les cycles pluriannuels secondaires :

- Un sous-groupe avec un cycle annuel dominant, un cycle secondaire NAO[21] et un troisième cycle > 12 ans

  BSS000RECH (Tercey), BSS000REGZ (Le Parc), BSS000TTBM (Stade)

  Ces ouvrages sont situés aussi bien dans la vallée de l'Orne que dans la haute vallée de la Sarthe

- Un sous-groupe avec un cycle annuel dominant, un cycle secondaire NAO et un troisième cycle < 6 ans

  BSS000REEQ (A28), BSS000MQPT (Les Luzernes), BSS003VETY (Pz La Genterie1994), BSS000RECJ (Le Grand Clos),

[21] NAO : *North Atlantic Oscillation :* oscillation nord-atlantique, variation affectant le système climatique océan atmosphère présentant un cycle court admis généralement comme ayant une période de retour de 7 à 8 ans.

Tous sont situés dans le secteur de la plaine d'Argentan

Un deuxième groupe avec un cycle annuel et pluri-annuel fort : BSS003UJOK (PZ1 - St Hippolyte). Il est à souligner que cet ouvrage est captif.

Les variations d'amplitude entre hautes et basses eaux atteignent 3 à 9 m sur les versants des vallées et 1 à 6 m au cœur des vallées, elles sont relativement faibles. A noter : aucun point d'observation n'est situé en plateau.

- **Périodes de recharge**
  - Un groupe termine sa recharge en Décembre/Janvier : BSS003VETY, BSS003VFXE, BSS000TTBM, BSS000TTED, BSS000TTEU, BSS000VXKY
  - Un autre groupe termine sa recharge plus tardivement en Février/Mars : BSS000REGZ, BSS003UOJK, BSS00MQPT, BSS000RECH, BSS000RECJ, BSS003VETE, BSS003UJHQ

Il n'existe pas de lien géographique entre les points de ces deux groupes répartis aussi bien au nord ou au sud du département.

Les ouvrages BSS000TTBM (stade), BSS000REEQ (A28) et BSS000RECJ (le grand clos) ont une réponse à la recharge très marquée (grandes amplitudes).

Dans l'ensemble, une majorité de points termine leur vidange sur la période de Septembre à Novembre.

Dans la Haute Vallée de la Sarthe, la durée de vidange de l'ensemble des ouvrages est comprise entre 4 et 5 mois. La nappe sur ce secteur est captive à semi-captive (aquifère sous recouvrement des marnes calloviennes).

Pour les ouvrages situés dans la vallée de l'Orne, la situation est beaucoup plus hétérogène, la durée de vidange étant comprise entre 4 et 8 mois. Il semblerait que les ouvrages captifs aient la durée de vidange la plus longue (entre 6 et 8 mois : effet capacitif).

- **Tendance**

Les tests statistiques ne permettent pas de distinguer de tendance sur cet aquifère.

Toutefois, pour les piézomètres BSS000RECH (Tercey) et RECJ (Le Grand Clos), il existe probablement une tendance à la baisse sur la période 2001-2019 (à dire d'expert) car l'étude statistique ne peux pas être réalisée (nappe captive et test autocorrélation non-satisfaisant). Il ne peut toutefois pas être exclu l'influence de pompages.

- **Corrélation des chroniques entre elles – homogénéité de réponse de l'aquifère**

Les ouvrages BSS000TTED (Le Chevain) et BSS003VETY (La Genterie) ont une très forte corrélation, leur courbe est quasi identique bien qu'ils soient situés dans des secteurs très éloignés : Bv de la Haute Sarthe et Bv de l'Orne. On constate également une bonne corrélation pour les ouvrages suivants : BSS000MQPT, BSS003VETY, BSS003VETE, BSS003VFXE, BSS000RECH pour le bloc d'Argentan et BSS000TTBM, BSS000TTED, BSS003UJHQ pour le bloc de la Sarthe. Dans l'ensemble la réponse impulsionnelle à un évènement climatique est assez identique qu'on se situe au Nord ou au Sud du département.

Dans le détail : dans le bloc d'Argentan, il existe une bonne corrélation entre les ouvrages suivants :

- BSS003VETY, BSS003VFXE, BSS000MQPT, BSS000RECJ, BSS000REGZ
- BSS000MQPT, BSS003UJOK également

Les ouvrages BSS000TTBM vallée de la Sarthe se corrèlent bien également avec les ouvrages BSS00MQPT, BSSRECJ, BSS000REGZ, BSS003VETY et BSS003VFXE de la vallée de l'Orne.

Les piézomètres BSS000RECJ, BSS003UJIOK et BSS000REGZ ne se corrèlent pas du tout ensemble alors qu'ils sont dans le même bloc litho-structural (plaine d'Argentan). Probablement car situés dans des contextes géologiques et structuraux très différents : parmi les hypothèses pour expliquer cette absence de corrélation on peut avancer le recouvrement callovien, l'influence de pompage, la proximité d'un cours d'eau.

- **Conclusion**

De manière très globale, les ouvrages réagissent de la même manière qu'ils soient situés au nord ou au sud du département : la nappe assez réactive, avec une saisonnalité bien marquée.

La répartition des points de suivi ne permet malheureusement pas d'avoir une vision d'ensemble du comportement de l'aquifère. En effet, on constate à ce titre l'absence de point d'observation autour de Sées sur les blocs 5c, 7b et l'amont du bloc 29a (le Mêle sur Sarthe).

Enfin d'un point de vue géologique il n'est pas fait de vraie distinction lithologique entre les différentes unités captées : calcaires sableux de l'Aalénien et Bajocien, calcaires bioclastiques et oolithiques du Bathonien inf. et moy., caillasses et calcaires du Bathonien supérieur. Dans le détail, les caractéristiques hydrodynamiques de ces différentes unités sont très probablement différentes ainsi que le caractère captif ou non. Ce qui pourrait expliquer certaines des différences de comportement observées notamment en termes d'amplitude et de période de recharge.

6.3.3. Aquifère des formations oxfordiennes

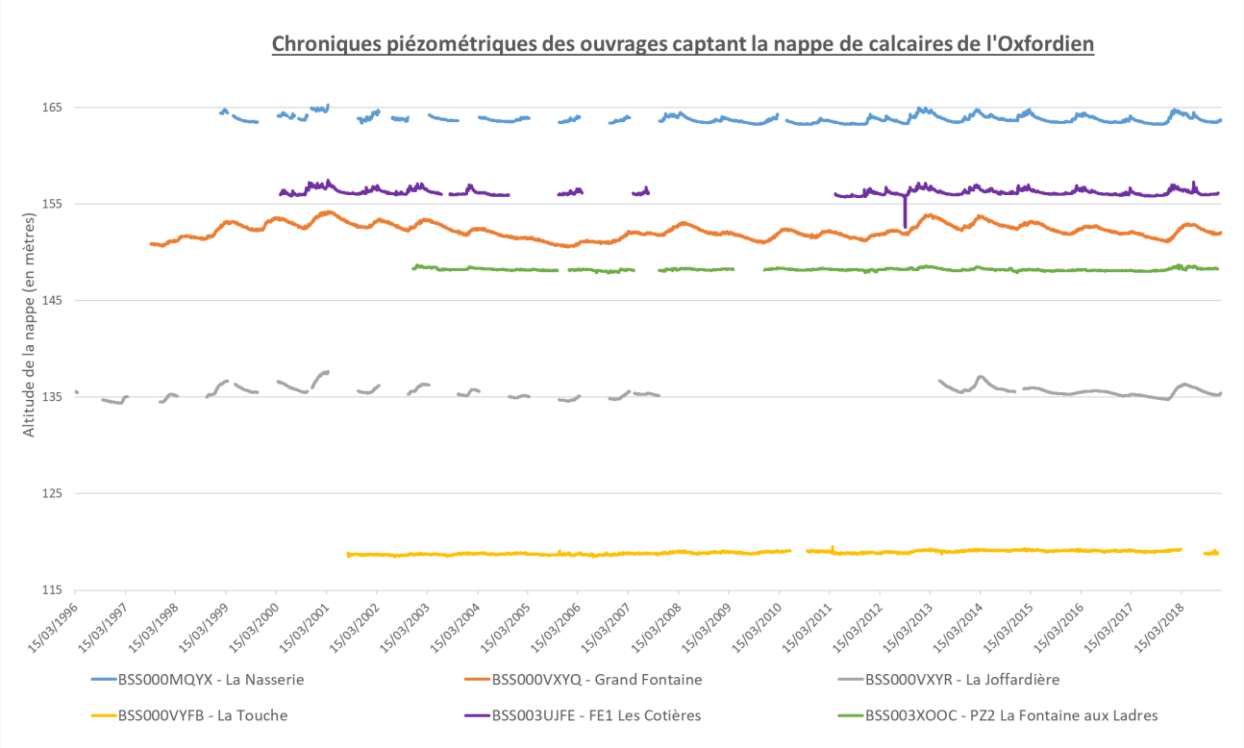


Illustration 116 : Chronique piézométrique des ouvrages suivant la nappe des formations oxfordiennes

- **Analyse des cycles**

Les tests de corrélation ne sont pas homogènes, dans l'ensemble, les chroniques manquent de profondeur pour pouvoir effectuer une analyse statistique fiable.

Le cycle annuel est dominant, toutefois on distingue également des cycles pluriannuels forts (signal plus fort que dans le Bathonien-Bajocien). On distingue pour ces derniers, un cycle > 12 ans principal et un autre correspondant à un cycle type NAO (voir même inférieur à 6 ans), secondaire.
Les variations d'amplitude observées sur les ouvrages entre hautes et basses eaux atteignent 1 à 5 m sur les versants des vallées et 1 à 4 m au cœur des vallées, elles sont faibles. A noter, aucun point d'observation ne se situe en plateau.

- **Périodes de recharge**

La fin de recharge intervient en Février/Mars et la fin de la vidange en majorité de Juillet à Septembre.

La durée de vidange la plus courte : 4 mois de vidange pour BSS000VXYR (La Joffardière) et BSS000VXYQ (Grand Fontaine) dans la haute vallée de l'Huisne (Bloc 3A). L'aquifère y est libre ou semi-captif, la réponse aux pluies efficaces est plus importante et les points sont éloignés des cours d'eau en tête de bassin versant, on peut faire l'hypothèse qu'ils possèdent un caractère capacitif moins bon que les autres ouvrages. C'est sur ces deux ouvrages qu'on observe les plus fortes amplitudes (de l'ordre de 4 m).

5 à 6 mois pour la vallée de la Touques : BSS003UJFE (Les Cotières), BSS000MQYX (La Nasserie) sur le bloc 17A du Pays d'Auge et BSS003XOOC (Fontaine les Ladres) dans le bloc 3B de la Même, ces ouvrages sont libres à semi-captifs avec un niveau de base proche (proximité du cours d'eau et faible amplitude entre hautes et basses eaux).

8,5 mois pour le BSS000VYFB (La Touche) dans le bloc de l'Huisne 3A, captif, où l'on observe également les plus faibles amplitudes entre hautes et basses eaux (de l'ordre de 1 m voire moins), marqueur de l'effet capacitif.

- **Tendance**

Pas de calcul statistique réalisable pour les ouvrages BSS000VYFB et BSS000MQYX car le test d'autocorrélation n'est pas satisfaisant. Pour les autres, le test statistique ne montre pas de tendance significative.

Néanmoins, il semblerait que les niveaux de l'ouvrage BSS000VYFB (La Touche) soient à la hausse sur la période d'observation (à dire d'expert).

- **Corrélation des chroniques entre elles – homogénéité de réponse de l'aquifère**

Il existe une très forte corrélation entre les ouvrages suivants :
  - BSS000VXYQ avec BSS000VXYR, tous deux implantés dans la vallée de l'Huisne ;
  - BSS000MQYX et BSS003UJFE tous deux implantés dans la vallée de la Touques.

La corrélation s'explique par la proximité géographique des ouvrages entre eux. Les ouvrages BSS003XOOC (bloc de l'Eure) et BSS000VYFB (bloc de la Même) ont des comportements similaires, bien qu'ils soient situés dans des blocs différents.

- **Conclusion**

A nouveau, la profondeur des chroniques n'est pas suffisante pour pouvoir bien caractériser le fonctionnement de cet aquifère, qui est par ailleurs très différent du Bathonien-Bajocien et de la Craie.

Là également il existe un problème de répartition géographique : en effet, on constate l'absence de point de suivi sur les blocs 5A, 5C, 7B, 17C, 18 et une proximité trop immédiate entre certains ouvrages dont le signal est quasi identique.

6.3.4. Aquifère de la craie

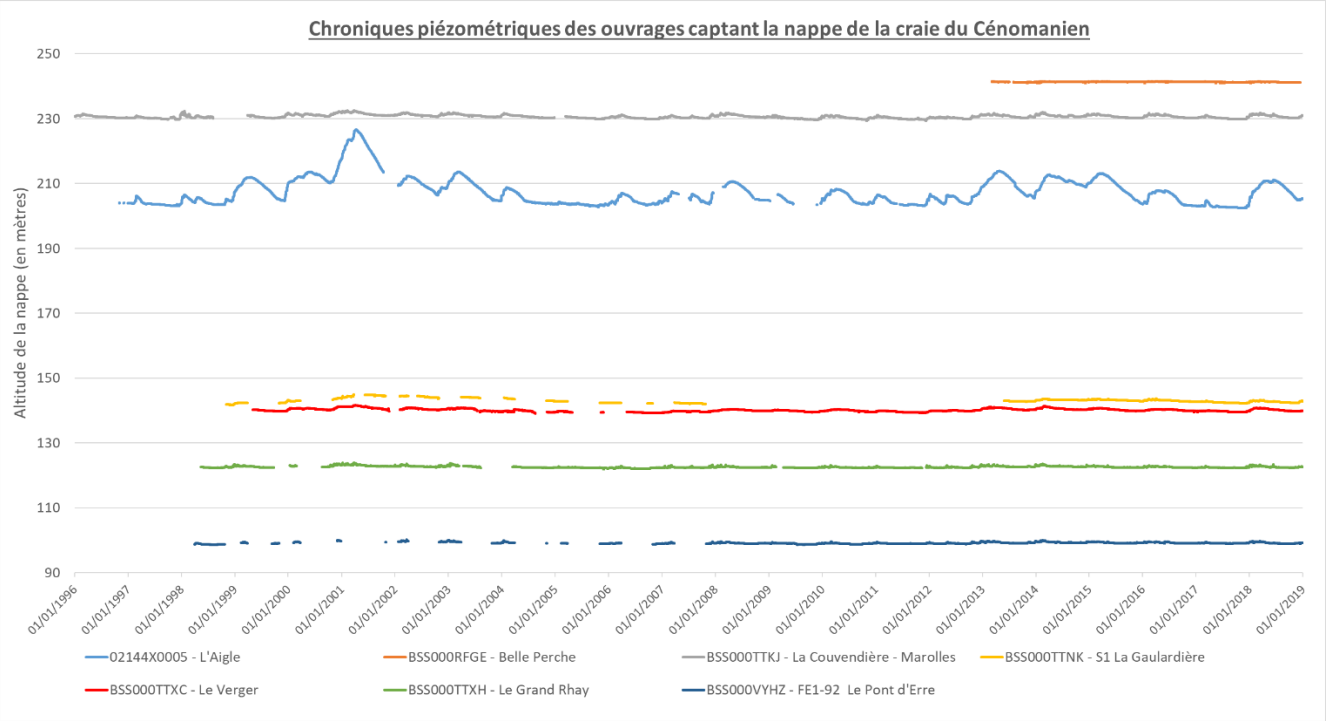


Illustration 117 : Chroniques piézométriques des ouvrages suivant la nappe de la craie

- **Analyse des cycles**

L'ensemble des ouvrages possède des cycles annuels dominants et un cycle secondaire de type NAO. Enfin, il existe également une forte probabilité d'avoir un troisième cycle de plus de 10 ans mais la profondeur des chroniques ne permet pas de les quantifier.

Les variations d'amplitude entre hautes et basses eaux dépassent les 20 m en plateau et sont comprises entre 1 et 4 m au cœur des vallées, comme on peut le voir sur l'Illustration 117. Les plateaux constituent des zones « réservoir » importantes.

- **Périodes de recharge**

La fin de la recharge intervient entre Mars/Avril et la fin de vidange intervient plutôt entre Novembre/Décembre.

La durée de la vidange est de l'ordre de :

- 4 et 6 mois pour les ouvrages BSS000REWL (l'Aigle), BSS000RFGE (Belle Perche), BSS000TTKJ (La Couvendière) et BSS000TTNK (La Gaulardière).
- 6 et 7 ans pour les ouvrages BSS000TTXC (le Verger), BSS000TTXH (le Grand Rhay), BSS000VYHZ (le Pont d'Erre). La nappe est probablement libre à semi captive sous la nappe alluviale de l'Huisne dans les blocs 4A et 3A.

Il existe des amplitudes très variables entre les chroniques des différents ouvrages. Ces différences s'expliquent notamment avec la position géographique en plateau (fortes amplitudes) ou en fond de vallée (faibles amplitudes). Par exemple, le piézomètre de l'Aigle, situé en plateau, possède une amplitude de plus de 23 m entre les hautes et basses eaux alors que les autres ouvrages, situés en vallée ou en versant de vallée humide ont une amplitude entre hautes et basses eaux comprise entre 0,5 et 3,5 m.

Le piézomètre de l'Aigle permet par ailleurs de voir la double porosité de la craie sur certaines phases de vidange lente et sur des phases de recharge et de vidange beaucoup plus rapide.

- **Tendance**

Les tests statistiques ne permettent pas de dégager de tendance particulière, pour deux ouvrages BSS000TTNK et BSS000VYHZ l'autocorrélation ne permet pas de faire le calcul.

- **Corrélation des chroniques entre elles – homogénéité de réponse de l'aquifère**

Dans l'ensemble, toutes les chroniques se corrèlent bien entre elles. On note une très bonne corrélation entre les ouvrages suivants : BSS000TTXH, BSS000TTXC, BSS000TTKJ et BSS000VYHZ tous implantés dans le bassin versant de l'Huisne.

Dans l'ensemble le signal enregistré pour cet aquifère est relativement homogène dans sa réponse.

- **Conclusion**

Actuellement il n'existe pas de suivi sur les blocs 6 (Avre et Iton) et 17A et 17B (Pays d'Auge-Ouche) et sur les buttes témoins des blocs 5 B, 20B (Champeau et Forêt de Gouffern).

NB : Par défaut, le piézomètre de St Christophe sur Avre, situé dans le département de l'Eure voisin, pourrait a priori être représentatif du bloc N°6.

Là également il est important de posséder des chroniques avec une profondeur suffisante pour permettre d'évaluer l'existence de cycles de plus de 10 ans. On rappelle que ce sont les cycles annuels qui sont prépondérants.

6.3.5. Aquifère des sables du Perche

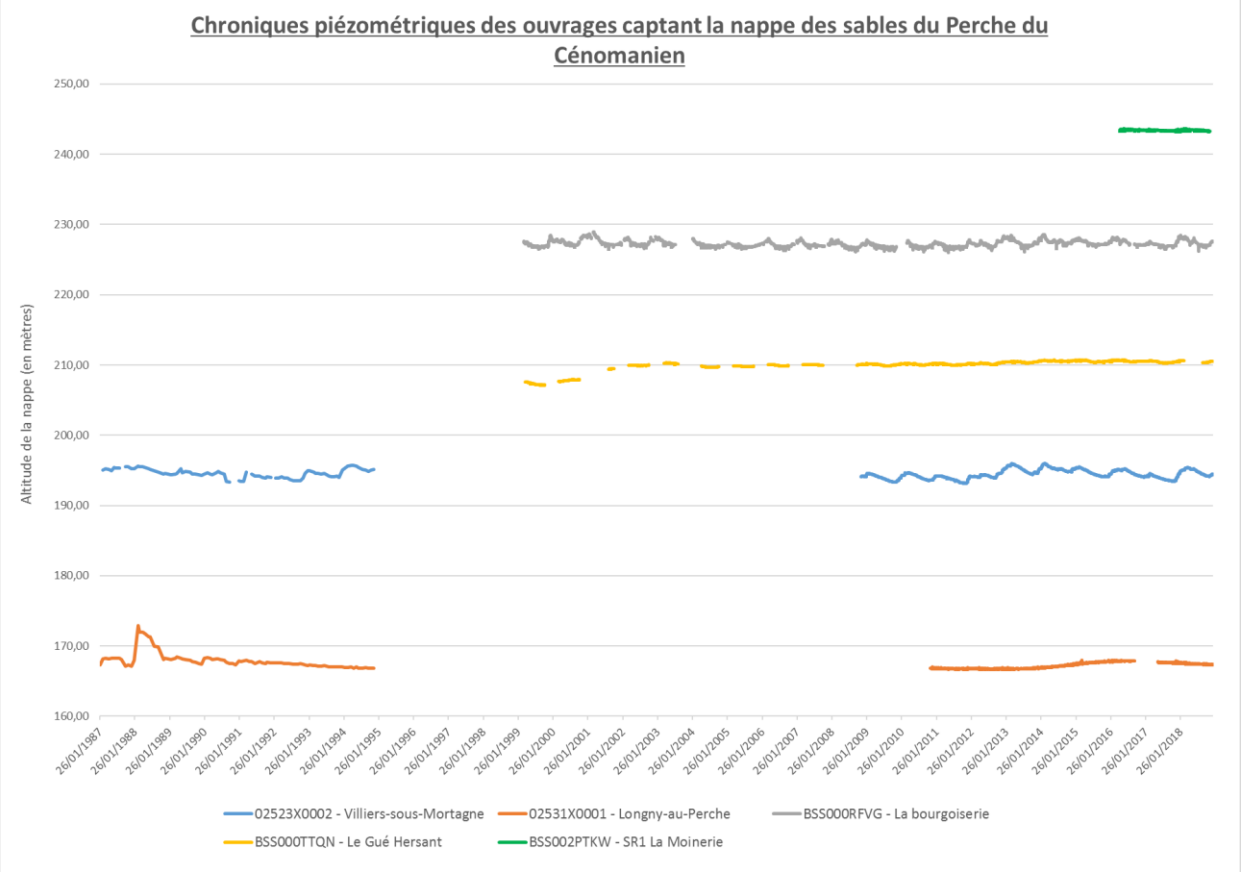


Illustration 118 : Chroniques piézométriques des ouvrages suivant les formations des sables du Perche

- **Analyse des cycles**

Deux groupes se distinguent :

- Un premier où le cycle annuel est dominant, on distingue également un cycle secondaire de type NAO mais de puissance forte, pour l'ouvrage BSS000TTJF (Villiers sous Mortagne) et BSS000RFVG (la Bourgeoiserie) avec pour ce dernier un cycle NAO de puissance faible.
- Un second où les ouvrages BSS000TTPJ (Longny au Perche) et BSS000TTQN (Le Gué Hersant) ont un cycle pluriannuel dominant avec une puissance forte (cycle > 10 ans), le cycle annuel est ici secondaire avec une puissance faible. Ces deux ouvrages sont situés dans le bloc 4A de Longny au Perche. On peut s'interroger sur la captivité de la nappe pour ces deux ouvrages.

Les variations d'amplitude entre hautes et basses eaux atteignent 2 à 7 m sur les versants des vallées et 1 à 4 m au cœur des vallées, ce qui est faible. A noter, qu'il n'existe aucun ouvrage implanté en plateau.

- **Périodes de recharge**

La fin de la recharge intervient en moyenne entre Décembre et Mars et la vidange intervient principalement entre Septembre et Novembre.

Cet état montre que la recharge intervient de façon non-régulière entre les années.

- **Tendance**

Les tests statistiques ne permettent pas de dégager de tendance particulière, pour l'ouvrage BSS000TTQN, l'autocorrélation ne permet pas de faire le calcul.

- **Corrélation des chroniques entre elles – homogénéité de réponse de l'aquifère**

Il existe une bonne corrélation entre les chroniques des piézomètres BSS000TTJF et BSS000RFVG situés pourtant dans deux blocs différents, respectivement les blocs 4B (Bellême) et 5D (Trappe).

Les chroniques sont très différentes entre les ouvrages suivants BSS000TTQN, BSS000TTPJ et BSS000TTJF et BSS000RFVG. Cette différence s'explique pour partie par une position dans des blocs litho-structuraux différents.

- **Conclusion**

On constate une forte hétérogénéité dans le fonctionnement de cet aquifère qui se traduit par une réponse impulsionnelle très différente aux évènements climatiques.

Par ailleurs, il est nécessaire de poursuivre le suivi de cet aquifère pour posséder des chroniques plus longues, ce qui permettra d'améliorer l'analyse statistique. De plus, on souligne qu'il n'existe pas de point de suivi vers le Sud-Est du département (extrémité des blocs 3A et 4A, 1 et 2 en direction de Nogent le Rotrou).

6.3.6. Aquifère des formations cambriennes

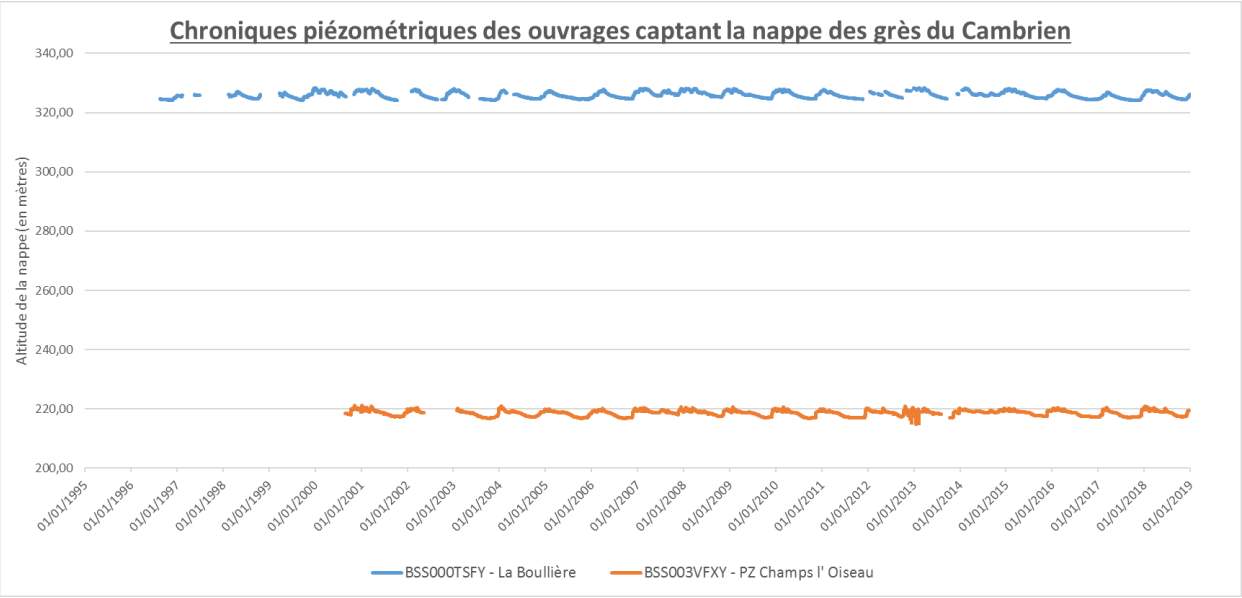


Illustration 119 : Chroniques piézométriques des ouvrages suivant les formations des grès du Cambrien

- **Analyse des cycles**

Pour les deux ouvrages, il existe un cycle annuel prépondérant et un cycle secondaire de type NAO, faible.

Les variations d'amplitude entre hautes et basses eaux atteignent 3 à 7 m sur les versants des vallées humides. A noter, il n'existe pas de point de suivi sur les plateaux et reliefs de cette formation.

- **Périodes de recharge**

La fin de la recharge intervient en janvier/février et la fin de la vidange entre octobre et novembre. Soit une durée de vidange de l'ordre de 4 à 5 mois. Ce qui est cohérent pour un aquifère libre à semi-captif.

Les amplitudes entre hautes et basses eaux sont moyennes, de l'ordre de 5 m.

- **Tendance**

Le test statistique montre qu'il n'existe pas de tendance significative pour ces ouvrages.

- **Corrélation des chroniques entre elles – homogénéité de réponse de l'aquifère**

Il existe une corrélation forte entre ces deux ouvrages situés tous deux dans le bloc 25B (St Ellier des Bois).

- **Conclusion**

Il est difficile de parler de réponse homogène des différents aquifères, seuls deux ouvrages suivent ce type de formation. En termes de répartition, les blocs 8A (Ecouves), 10 (Foret Auvray), 19 (Zone Bocaine), 22 (St Clair de Halouze) et 23 (Domfront Mortain et la Ferrière) ne sont pas suivis.

6.3.7. Aquifère des flyschs briovériens

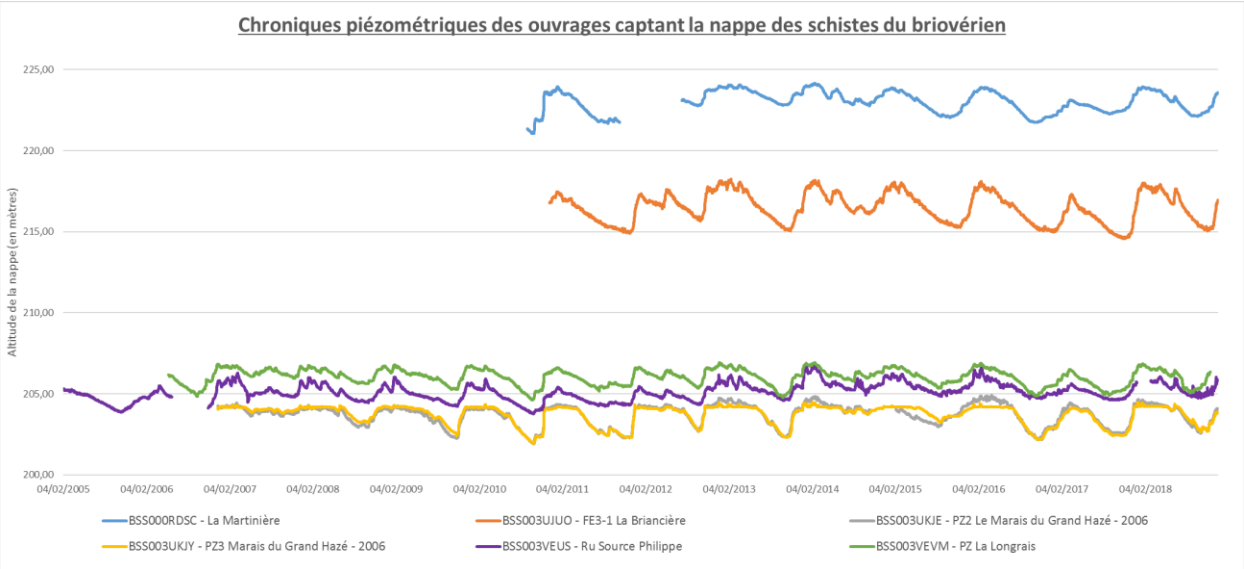


Illustration 120 : Chroniques piézométriques des ouvrages suivant la nappe des flyschs briovériens

- **Analyse des cycles**

Toutes les chroniques font moins de 15 ans, il n'est donc pas possible de caractériser les cycles.

A noter : le piézomètre BSS003UKJY (Marais du Grand Hazé) possède un niveau dit de débordement qui peut être lié à un drainage de l'aquifère superficiel ou à un débordement de la nappe en dehors de l'ouvrage.

Les variations d'amplitude entre hautes et basses eaux atteignent 2 à 4 m sur les versants des vallées humides et sont faibles.

- **Périodes de recharge**

La période de recharge se termine en moyenne en janvier/février. La vidange se termine en moyenne vers Septembre/Octobre.

La durée de la vidange est comprise entre 5 et 6 mois. L'amplitude moyenne entre hautes et basses eaux est de l'ordre de 3 m en contexte de nappe semi-captive proche de milieux humides.

Les courbes de suivi montrent que la recharge et la vidange sont très marquées au début de la recharge et à la fin de la vidange. L'intermédiaire montre des plus petits cycles, ce qui traduit vraisemblablement l'aspect très compartimenté de cet aquifère fissural (plusieurs transmissivités : grès et schistes et/ou altérites et zone fissurée ?.

- **Tendance**

Les calculs statistiques ne permettent pas de dégager de tendance.

- **Corrélation des chroniques entre elles – homogénéité de réponse de l'aquifère**

L'ensemble des chroniques se corrèlent très bien entre elles. Cet état est dû au fait que les ouvrages sont tous implantés sur un même secteur géographique.

- **Conclusion**

Il est nécessaire de poursuivre le suivi pour permettre l'analyse des cycles et d'étendre géographiquement leur répartition. En effet, l'ensemble des ouvrages sont situés dans le bloc 11 A (Flers).

Il n'existe pas de suivi notamment dans les 8B (St Nicolas du Perron), 11B (Briouze), 12 (Baize), 13 (Avoine), 14 (Ecouché), 15 (Noireau), 16A (Chanu), 21A (St Bômer), 25A (St Martin des Landes), 26 (Mayenne).

6.3.8. Aquifères des cornéennes

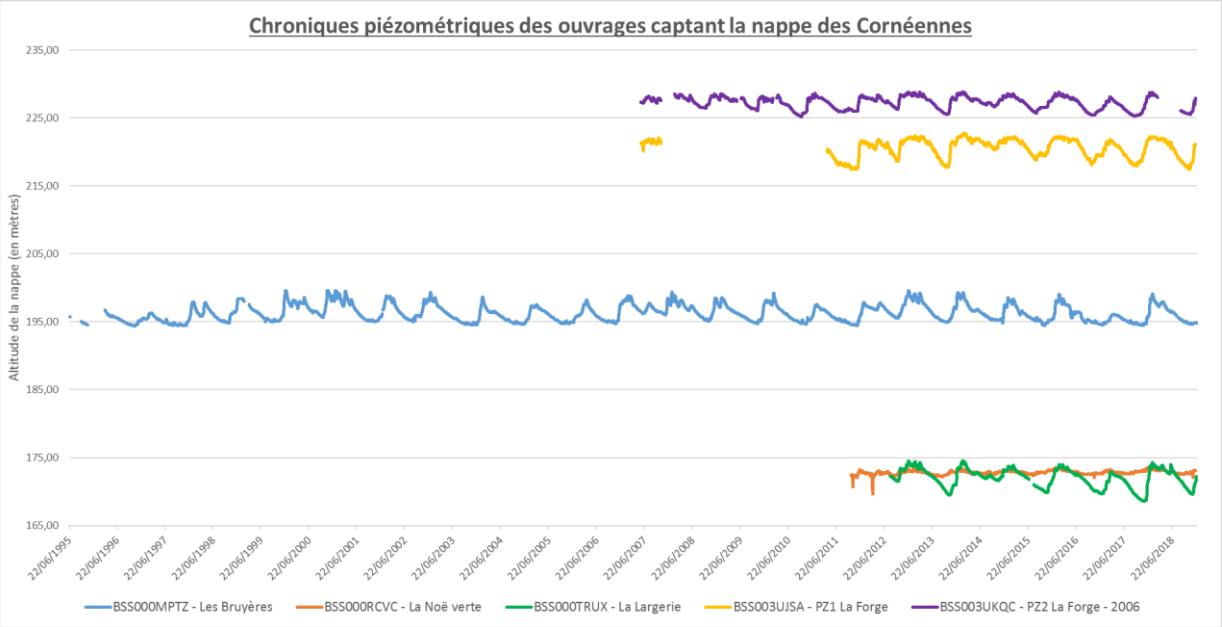


Illustration 121 : Chroniques piézométriques des ouvrages suivant la nappe des cornéennes

- **Analyse des cycles**

Seul l'ouvrage BSS000MPTZ (Les Bruyères) est analysable. L'analyse des chroniques montre un cycle annuel prépondérant et un cycle pluriannuel secondaire de type NAO, de puissance faible.

Les variations d'amplitude entre hautes et basses eaux atteignent 3 à 7 m sur les versants des vallées humides ce qui est faible.

- **Périodes de recharge**

La fin de la recharge intervient majoritairement en février et la fin de la vidange en octobre. La durée de la vidange est d'environ 5 mois. L'amplitude entre hautes et basses eaux est comprise entre 3 et 5 m en contexte de nappe libre en vallée humide.

L'analyse des courbes montre que la recharge et la vidange s'effectuent en deux temps : un premier temps rapide avec une recharge ou vidange très marquée puis un second temps avec des petits cycles de remplissage ou de vidange peu marqués. Cela souligne la compartimentation de l'aquifère fissuré avec probablement la sollicitation de plusieurs réservoirs aux propriétés hydrodynamiques différentes (altérites, zone fissurée par exemple).

- **Tendance**

Il n'existe pas de tendance significative détectée par le calcul. Pour deux ouvrages dont les chroniques sont inférieures à 10 ans le calcul n'est pas possible.

- **Corrélation des chroniques entre elles – homogénéité de réponse de l'aquifère**

L'ensemble des chroniques se corrèlent bien entre elles bien que les points d'observations soient situés dans des blocs différents : 9A (Athis Ouest), 11A (Flers), 21A (St Bômer) et 26 (Mayenne).

- **Conclusion**

Dans l'ensemble, les chroniques manquent de profondeur pour pouvoir réaliser des analyses statistiques. En termes de répartition on peut regretter l'absence de suivi sur l'Est du massif armoricain et notamment sur les blocs : 9B, 9C (Massif d'Athis), 16A (Chanu), 16B (Ferté Massé), 24 (Tessé-la-Madeleine), 27B (St Fraimbault).

Par ailleurs on peut regretter également l'absence de suivi des batholites et de leurs formations d'altération pour expliquer et suivre le fonctionnement de ces unités.

6.4. BILAN SUR LE SUIVI DES NIVEAUX PIEZOMETRIQUES

L'analyse des données disponibles (SDE61 et BRGM) a permis de mettre en avant :

- A l'échelle du département de l'Orne, **les ouvrages sont marqués par des cycles annuels forts (dominants).** Le cycle annuel (12 mois) prépondérant avait déjà été mis en évidence dans le rapport d'analyse sur le bassin Seine-Normandie (RP-60402-FR), ce qui confirme donc nos récentes observations. Les nappes suivies sont donc essentiellement des nappes faiblement inertielles avec un « effet mémoire » limité.

  Les cycles pluri-annuels sont plus « faibles », dans la grande majorité des cas, la fréquence qui revient le plus souvent est celui de la NAO (6-8 ans). Dans d'autres cas, il a pu être mis en évidence des cycles de fréquence supérieure à 10 ans. D'autres encore ont des cycles de fréquence inférieure à 6 ans.

  Il a pu être relevé quelques exceptions dans les sables du Perche et le Bajocien-Bathonien où le cycle pluriannuel était prépondérant. On peut faire l'hypothèse que ces cycles pluriannuels sont d'autant plus importants que l'aquifère présente un caractère captif à semi-captif.

- **Aucune tendance n'a pu être calculée avec les tests statistiques**. Toutefois, il a été relevé une baisse sur la période 2001-2019 sur les ouvrages BSS000RECH et RECJ captant l'aquifère du Bajocien-Bathonien du bassin versant de l'Orne (sud-est d'Argentan) et une hausse sur cette même période 2001-2019 dans l'ouvrage BSS000VYFB suivant l'aquifère Oxfordien dans le bassin de l'Huisne ; à dire d'expert (tendances à confirmer).

  Sur 47 ouvrages de suivi : 25 sont implantés en fond de vallée humide. 16 sont sur des versants de vallées humides ou sèches (proches du niveau de base), 4 en plaine, 2 en plateau.

  Cette situation n'est donc pas favorable à la caractérisation des tendances d'évolution du niveau piézométrique. En effet, les réserves en eau souterraines se constituent le plus souvent sous les plateaux et les reliefs pour lesquels les propriétés hydrodynamiques sont souvent très différents de ceux des vallées ; c'est-à-dire à proximité du niveau de base imposé *a priori* par le cours d'eau (supposé drainant la nappe). Les amplitudes entre hautes et basses eaux sont donc *a fortiori* plus faibles à proximité des cours d'eau que lorsqu'on s'en éloigne.

- **Les chroniques des aquifères des cornéennes, des flyschs briovériens et des grès paléozoïques du domaine de socle sont caractéristiques des milieux fissurés : ils présentent un remplissage et une vidange très marqués**, d'une durée de 4 à 6 mois, traduisant un aspect compartimenté et probablement l'effet d'une double porosité. Les amplitudes enregistrées ne dépassent pas plus de 6 m entre les hautes et basses eaux.

  Les chroniques des ouvrages du domaine sédimentaire sont davantage caractéristiques des milieux poreux : ils présentent en effet une plus forte inertie (effet capacitif plus important), mais présentent parfois des pics plus ou moins prononcés pouvant traduire la présence de zones fissurées ou karstiques (Bajocien-Bathonien, Oxfordien, Craie). Les périodes de remplissage et de vidange de ces aquifères sont généralement plus longues que celles des aquifères de socles (6 à 8 mois). cf. Illustration 122 page suivante. Les amplitudes enregistrées entre hautes et basses eaux sont plus importantes : jusqu'à 8,5 m dans les calcaires du bajocien-bathonien et même plus de 20 m pour la nappe de la craie.

L'Illustration 122 ci-après montre que l'hiver est la période la plus favorable à la recharge des nappes. On remarque que celle-ci démarre plus tôt à l'ouest (en domaine de socle) qu'à l'est (en

domaine sédimentaire), notamment en raison d'une pluviométrie plus abondante, mais également en raison de l'inertie plus grande des aquifères sédimentaires (composante du fonctionnement matriciel).

L'ensemble des informations présentées au chapitre 6.3 ont été regroupées dans un tableau synthétique reporté en annexe 2.

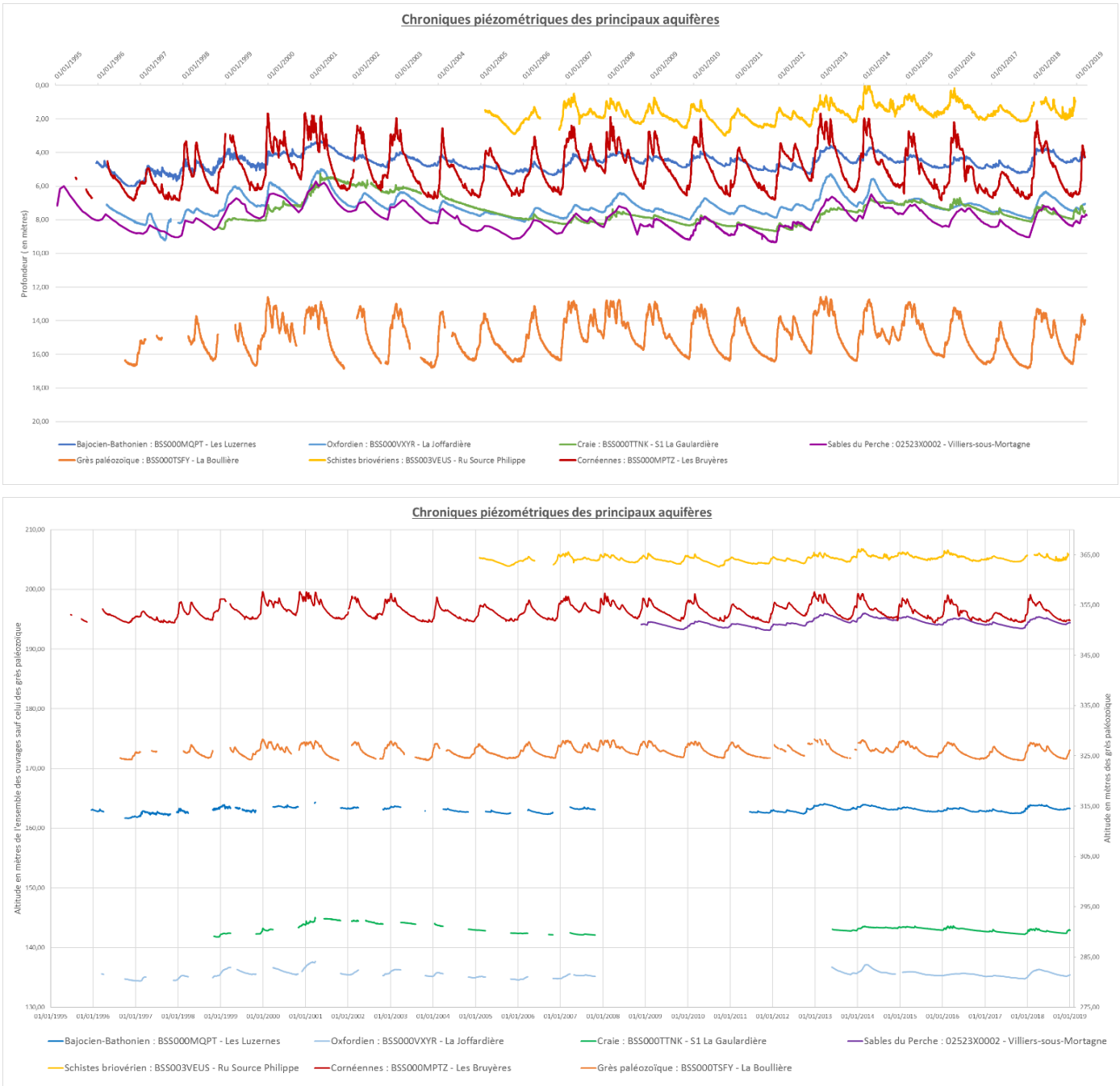


Illustration 122 : Exemples de chroniques types des différents ensembles aquifères suivis

Dans l'ensemble, les chroniques disponibles dans le département de l'Orne souffrent d'un problème de longueur de période disponible. Car il est nécessaire de disposer d'une profondeur de chronique la plus importante possible (au moins supérieure ou égale à 15 ans) pour avoir une bonne caractérisation du fonctionnement de l'aquifère suivi. En conséquence il est donc nécessaire de poursuivre le suivi des ouvrages les plus représentatifs.

Enfin on pourra parler d'un problème de représentativité du réseau de suivi : certains blocs litho-structuraux ou aquifères ne sont peu ou pas suivis. C'est le cas en particulier des grands batholites et de compartiments aquifères importants du domaine de socle notamment le grand massif d'Ecouves et le synclinal de Domfront-la Ferté Macé, à titre d'exemple.

Cette analyse a permis de mettre en évidence que la répartition géographique des points sur les bassins versants, notamment entre l'amont et l'aval, les zones de plateaux ou reliefs et les vallées, n'était pas optimum. En l'état il est donc particulièrement difficile de décrire s'il existe un effet de « stock » sur l'amont des bassins versants et également de décrire comment celui-ci évolue dans le temps en réponse aux épisodes climatiques. Cette information est pourtant particulièrement utile en ce qui concerne : la gestion des ressources en eau disponibles et plus particulièrement pour la prévision des épisodes de crues ou de sécheresses. La suite du programme OAGPRO61bis s'attachera à fournir des indicateurs pour la meilleure gestion du réseau de suivi des eaux souterraines.

7. Synthèse générale

Les principales informations relatives aux grands ensembles aquifères du département de l'Orne, qui ont pu être mis en avant dans ce rapport ont été regroupées ci-après sous forme de tableau, voir page(s) suivante(s).

Rappel : Ces informations ne sont données qu'à titre indicatif, cette synthèse reposant sur l'analyse bibliographique d'éléments non vérifiables, principalement issues de programmes de recherche en eau potable donc à priori caractérisant les zones les plus productives.

EN BREF	Bathonien-Bajocien	Oxfordien-Kimméridgien	Craie Cénomanien et Turonien	Sables du Perche
Géométrie et principales caractéristiques lithologiques	• Formations à dominante calcaire ; • Epaisseur modeste à l'ouest du département et de plus de 100 m à l'est ;	• Principalement des formations calcaro-sableuses ; • Aquifère très compartimenté ; • Mur de l'aquifère : marnes à pernes ; • Toit de l'aquifère : formations argilo-sableuses de l'Aptien-Albien ; • Epaisseur total pouvant dépasser les 100m ;	• Puissance du réservoir modeste (mais atteint 60 m au SE de l'Orne) ; • Double voire triple porosité = fissures/karst + pores des craies ;	• Constitués de sables plus ou moins argileux ; • Mur de l'aquifère : faciès argileux de la Craie de Rouen ; • Toit de l'aquifère : altérites à silex ou craie marneuse turonienne ; • Extension mal connue ;
	• Développement de karsts dans ces formations ; • Influence des karsts sur la piézométrie et les écoulements des nappes mal connue ;			
Ecoulements	• Nappe libre quand les formations sont affleurantes • Nappe semi-captive à captive sous recouvrement • Partie libre : écoulement suivant la topographie et nappe drainée par les cours d'eau • Partie captive : nappe et cours d'eau déconnectés (le plus souvent)	• Nappe libre quand les formations sont affleurantes (surface réduite) ; • Nappe semi-captive à captive sous recouvrement ; • Partie libre : écoulement suivant la topographie et nappe drainée par les cours d'eau ; • Partie captive : nappe et cours d'eau déconnectés (le plus souvent) ;	• Nappe généralement libre ; • Nappe captive en cas de recouvrement par les argiles à silex ou des alluvions argileux ; • Cours d'eau drainent la nappe (le plus souvent) ; • Les réseaux karstiques peuvent modifier les écoulements ;	• Nappe libre à captive ; • Ecoulement de part et d'autre du horst du Perche, des crêtes vers les vallées ; • Déversement dans la nappe de la craie (nappe perchée) ou à l'équilibre avec les autres hydrosystèmes. ;
Fluctuation du niveau des nappes	• En plateaux, variations entre les hautes et basses eaux inf. à 10 m ; • En vallée et en talwegs, variations entre les hautes et basses hautes entre 4 et 5 m ; • Nappe captive : variations très faibles (inf. à 1m) ;	• Nappe libre : fluctuations importantes, battement entre les basses et hautes eaux inf. à 10 m ; • Nappe captive : fluctuations annuelles et interannuelles peu marquées et très réduites (1 m environ) ;	• Nappe libre : amplitudes fortes (peut être > 10m) sur les plateaux, moyennes dans les zones de transition et faibles dans les vallées ; • Nappe captive : variations piézométriques relativement faibles (1 m) ;	• Variations relativement limitées, inf. à 10 m
	• Cycles annuels forts ; • Nappes faiblement inertielles avec un « effet mémoire » limité ; • Cycles pluriannuels plus « faibles », correspondant majoritairement à la NAO (6-8 ans) ;			
Paramètres Hydrodynamiques et productivité	• Productivité dépend de la nature des unités traversées et de la fracturation ; • Débit de production très variable d'un secteur à l'autre (entre 10 et plus de 100 m^3/h) ; • En plateaux : transmissivité entre 10^{-5} et 10^{-3} m^2/s et débits fréquemment inf. à 10 m^3/h ; • En vallées : transmissivité entre 10^{-3} et 10^{-1} m^2/s et débits fréquemment sup. à 100 m^3/h ; • Coefficient d'emmagasinement entre 10^{-5} et 10^{-2} (peut souligner le caractère captif si faible) ;	• Productivité très variable ; • Formations sableuses de la base : couche la plus productive à priori ; • Débit entre 10 et plus de 100 m^3/h • Transmissivité : entre 10^{-3} et 10^{-4} m^2/s ; • Coefficient d'emmagasinement entre 10^{-5} et 10^{-3} (peut souligner le caractère captif si faible) ;	• Productivité très bonne ; • Débits d'exploitation compris entre 65 et plus de 200 m^3/h ; • Transmissivité : entre 10^{-3} et 10^{-2} m^2/s moins dans les zones non productives ; • Coefficient d'emmagasinement : entre 10^{-4} et 10^{-2} (peut souligner le caractère captif si faible) ;	• Productivité moyenne à modeste ; • Débits entre 10 et 60 m^3/h ; • Transmissivité entre 5.10^{-6} et 5.10^{-2} m^2/s mais majoritairement autour de 5.10^{-3} m^2/s ; • Coefficient d'emmagasinement entre 10^{-5} et 10^{-4} (peut souligner le caractère captif si faible) ;
Conditions d'alimentation et recharge	• Surface à l'affleurement = 230 km^2 • Alimentation par infiltration des pluies efficaces • Alimentation par infiltration au niveau des zones de fractures et des contacts faillés, échanges possibles au travers des alluvions et formations de socle • Nappe captive : alimentation par drainance des unités sus-jacentes ; • Période de recharge : Septembre-Mars ;	• Surface à l'affleurement = 180 km^2 • Alimentation directe par les pluies efficaces sur les zones d'affleurement ; • Echange d'alimentation ascendant quand la nappe est en charge ; • Echange d'alimentation descendante avec les formations sus-jacentes ; • Période de recharge : Septembre-Mars ;	• Surface à l'affleurement = 500 km^2 environ • Alimentation par infiltration des pluies efficaces ; • Infiltration lente pour la craie massive ; • Infiltration plus rapide dans les zones fracturées/karstifiées ; • Période de recharge entre Novembre et Avril ;	• Surface à l'affleurement = 210 km^2 environ • Alimentation principalement par infiltration des pluies efficaces • Période de recharge entre Octobre et Mars
Autres caractéristiques	• Karstification encore mal identifiée (sauf sur certains secteurs comme Vingt-Hanaps par exemple) ; • Echanges avec les formations de socle encore mal identifiés ;	• Présence de karst dont le rôle et les effets hydrogéologiques restent à préciser/confirmer (drainance possible de l'aquifère crétacé ?)	• Zone karstifiée : excellente capacité productive mais plus forte vulnérabilité aux pollutions de surface (vitesse de circulation rapide)	

EN BREF	Formations Paléozoïques	Flyschs Briovériens	Granitoïdes et Cornéennes
Géométrie et principales caractéristiques lithologiques	• Structures plissées et fissurées ; • Formations gréseuses : rôle aquifère important si fissuré ; • Formations schisteuses moins perméables ; • Développement de la ressource dans les zones fissurées ; • Réservoirs puissants mais peu étendus, géométrie complexe ;	• Réservoirs très déstructurés et discontinus ; • Nappe dans les altérites et roches fissurées ;	• Horizons productifs : arènes, altérites (faiblement) et zones fissurées (potentiel plus intéressant en forage) ; • Horizon fissuré dépendant de la densité de fracture et du niveau de connexion entre les fractures ;
	De manière générale réservoirs compartimentés : • Roche non altérée et non fissurée = peu perméable et donc pas ou peu aquifère ; • Horizon superficiel de l'aquifère = zone de stockage peu mobilisable mais ressource peut être importante ; • Horizon fissuré/fracturé de l'aquifère (discontinu) = zone plus transmissive et donc plus exploitable en forage ;		
Ecoulements	• Ecoulements se fait principalement dans le sens du pendage ou des axes fissurés ; • Nappe libre au niveau des zones d'affleurement ; • Nappe captive sous recouvrement ;	• En superficie : écoulement libre suivant la topographie ; • Zones fissurées : écoulement plus difficile à appréhender ; • Nappe pouvant être captive sous les altérites ;	• Horizon superficiel : écoulement suivant la topographie ; • Horizon fissuré : fracturation joue le rôle de drain ; • Nappe captive à semi-captive dans les horizons fissurés sous les formations d'altération ;
Fluctuation du niveau des nappes	• Nappe de faible profondeur, faibles variation des niveaux • Bordure des synclinaux : variations rapides pour la recharge et la vidange et amplitude entre les basses et les hautes eaux relativement faibles (inf. 10 m) • Nappe captive : artésianisme peut se manifester avec une charge ascensionnelle importante (pouvant dépasser les 100 m)	• Formations superficielles : niveau statique proche du sol et varie peu ; • En vallée, nappe sub-affleurante et faibles variations des niveaux ; • Sur les coteaux : niveaux plus profonds et varitions entre 5 et 7 m entre les hautes et basses eaux ; • Horizons fissurés : nappe peut être captive et être en charge et donc artésienne sous les formations superficielles/d'altération ;	• Formations généralement libres très réactives aux pluies ; • En vallée, nappe sub-affleurante et faibles variations des niveaux ; • Sur les reliefs, nappe pouvant être profonde et variations de quelques mètres entres les hautes et les basses eaux ; • Horizons fissurés : nappe peut être captive et être en charge et donc artésienne sous les formations superficielles/d'altération ;
	• Cycles annuels forts ; • Nappes faiblement inertielles avec un « effet mémoire » limité ; • Cycles pluriannuels plus « faibles », correspondant majoritairement à la NAO (6-8 ans) ;		
Paramètres Hydrodynamiques et productivité	• Débits exploités très variables (entre 10 et plus de 100 m^3/h) • Milieux très hétérogènes • Transmissivité entre 10^{-3} et 10^{-4} m^2/s • Coefficient d'emmagasinement : non évalué mais probablement faible	• Productivité très variable (10 à plus de 100 m^3/h) ; • Horizons superficiels : transmissivité entre 10^{-5} et 10^{-8} m^2/s ; • Horizons fracturés : transmissivité entre 10^{-3} et 10^{-4} m^2/s et coefficient d'emmagasinement de 0,1 à 0,2 % ;	• Altérites et arènes : débits très modestes, pas plus de 10 m^3/h ; • Cornéennes et granites fissurés : débits variables, de 10 à 100 m^3/h ; • Cornéennes et granites fissurés : transmissivité entre 10^{-3} et 10^{-4} m^2/s ; • Emmagasinement faible, non évalué ;
Conditions d'alimentation et recharge	• Surface à l'affleurement = 170 km^2 pour les formations gréseuses et 300 km^2 pour les formations schisteuses ; • Alimentation par infiltration des précipitations sur les zones d'affleurement et via les zones fissurées/fracturées et par drainance descendante depuis les horizons supérieurs ; • Période de recharge : Novembre-Février ;	• Surface à l'affleurement = 130 km^2 ; • Formations superficielles/d'altération : alimentation par infiltration des précipitations ; • Réservoir souterrain : alimentation par infiltration des précipitations sur les zones d'affleurement, via les fissures/fractures et par drainance descendante depuis les formations superficielles/d'altération ; • Période de recharge entre Décembre et Mars ;	• Surface à l'affleurement = 750 km^2 environ (370 Batholite et 380 Cornéennes) ; • Formations superficielles/d'altération : alimentation par infiltration des précipitations ; • Réservoir souterrain : recharge par infiltration via les fissures/fractures et par drainance descente depuis les formations superficielles/d'altération ; • Recharge annuelle d'Octobre à Février ;
	• Remplissage et vidange très prononcés marquant l'effet d'une double porosité, ressources pouvant être sensibles aux déficits hydriques importants (en particulier les horizons superficiels) ;		
Autres caractéristiques	• Développement de karsts possibles dans les formations carbonatées (ex : calcaires cambriens, zone bocaine uniquement) ; • Drainage minier sur certains secteurs ;	Rôle majeur pour ces aquifères des zones d'altération et de la fracturation (+connexions entre les fissures)	
	• La productivité des aquifères situés dans les formations de socle dépend en grande partie de la fracturation et fissuration des roches, mais également de la présence ou non d'une formation d'altération. Ainsi les formations fortement fracturées et surmontées d'une épaisse zone d'altération (jusqu'à plusieurs dizaines de mètres) présentent un meilleur potentiel de productivité. En effet, la présence de la zone d'altération permet de stocker l'eau et de réalimenter efficacement la nappe via le réseau de fractures dans lesquelles l'eau circule. En dehors de ces zones, les roches saines sont peu productives (faible circulation de l'eau et pas de stockage). • Arrivées d'eau profondes (30-100 m) sont généralement de bonne qualité car protégées des pressions anthropiques (dénitrification naturelle ou captivité sous les altérites), à l'inverse les horizons superficiels sont généralement plus vulnérables et les ressources de moins bonne qualité ; • Certaines directions de fracturation et les zones de contacts lithologiques sont généralement plus productives. Des alimentations profondes peuvent être possibles pour ces aquifères mais ces phénomènes sont encore mal connus (ex : sources thermales au contact entre le granite et faille N120-N140 du synclinal paléozoïque de Domfront) ;		

8. Conclusions et perspectives

8.1. CONCLUSION

L'objectif principal de cette synthèse hydrogéologique était de recueillir et valoriser les informations facilement disponibles au Syndicat Départemental des Eaux de l'Orne et au BRGM afin de proposer une synthèse bibliographique des connaissances hydrogéologiques sur le fonctionnement des grands aquifères du domaine sédimentaire et de socle :

- Les aquifères du Briovérien, des granitoïdes et de leur auréole de métamorphisme, les formations paléozoïques pour le domaine de socle.
- La craie céno-turonienne, les sables du Perche, les formations oxfordiennes et enfin les calcaires du Bajocien-Bathonien pour les formations du domaine sédimentaire.

Ce travail s'est appuyé sur le socle des connaissances actuelles afin de préciser de manière générale et pour chacun des grands aquifères :

- Leur fonctionnement général (aquifère à nappe libre ou captive, rôle de la fracturation ou du karst et les conditions d'alimentation et de recharge).
- Les directions des principaux écoulements, lorsqu'une piézométrie était disponible.
- Les fluctuations des niveaux, dont l'analyse des chroniques piézométriques (SDE61 et BRGM).
- Les paramètres hydrodynamiques et autres indicateurs de productivité.

Ce travail a également permis de réaliser une synthèse générale des connaissances sur le fonctionnement des aquifères du socle armoricain et de proposer une méthodologie de caractérisation de ces derniers transposable au domaine Nord-Armoricain et plus particulièrement au contexte du département de l'Orne.

8.2. PERSPECTIVES

Un certain nombre de lacunes mises en évidence : absence d'informations précises sur les sens et directions d'écoulement, de la position des eaux souterraines par rapport aux eaux superficielles (niveaux perchés, à l'équilibre, drainant), de l'absence d'évaluation des épaisseurs d'altérites et d'horizon fissuré, du rôle de drain ou non des principales fractures « tectoniques », etc… ne permettent pas d'avoir une vision complète du fonctionnement des aquifères sédimentaires et de socle.

Cette vision est pourtant essentielle pour fournir les indicateurs opérationnels de gestion des ressources en eau souterraine (comme par exemple : zone d'alimentation/protection, vulnérabilité, risque inondation et sécheresse, secteurs productifs, suivi des eaux souterraine, etc…).

Pour répondre à ces enjeux, la suite du programme OAGPRO61bis (phase 2) s'attachera donc en conséquence à fournir les informations utiles à une meilleure gouvernance :

- L'élaboration de cartes piézométriques à l'échelle départementale pour chaque grand ensemble aquifère (piézométrie reconstituée à partir des données existantes et d'hypothèses de travail qui seront formulées).

- La caractérisation des propriétés et du fonctionnement des systèmes aquifères sédimentaires et de socle, au regard notamment :
    - Des secteurs où existe un manteau d'altération et/ou un horizon fissuré susceptible d'indiquer la présence d'un aquifère à perméabilité significative.
    - Des secteurs où prédomine un réseau de fractures et failles d'origine tectonique pouvant favoriser la circulation et l'altération de la roche.
    - D'un bilan du fonctionnement des aquifères par ensemble litho-structural, mise en évidence d'éventuelles interactions.
    - De la réalisation de bilans quantitatifs, en s'appuyant sur une dizaine de modèles globaux à l'échelle des grands bassins versants.
    - D'un bilan général de la qualité des eaux des principaux aquifères.
- L'établissement d'indicateurs de gestion des ressources, de l'ordre de grandeur du potentiel des ressources en eau en termes de volumes théoriques disponibles et de cartes thématiques utiles mettant en évidence les propriétés des aquifères, leurs secteurs vulnérables ou sensibles sur le plan « qualité des eaux », les secteurs présentant un potentiel de développement, notamment.

Enfin, un volet de valorisation et de diffusion des résultats permettra de communiquer, à un large public, les résultats de l'ensemble du programme.

9. Bibliographie

Bibliographie Générale

Arnaud L. (2007) - Atlas hydrogéologique numérique du Calvados - Volet quantitatif.. BRGM/RP-55672-FR, 108 p. 3 ann.

Arnaud L., Tourliere B., Coueffe R., Mardhel V. (2007) - Atlas hydrogéologique numérique du Calvados - Volet cartographique.. BRGM/RP-55670-FR, 152 p. 1 ann., 21 pht

Cador J.-M. (2014) Les pays Hydrologiques de Basse-Normandie. Document de travail, 5 p. GEOPHEN-UMR Caen

Collin J.-J. (2004) Les eaux souterraines - Connaissance et gestion, 170p., Ed. BRGM

DREAL Normandie (2014), L'hydrologie de la Basse-Normandie, 532 p.

DREAL Normandie (2015), Profil environnemental de la Basse-Normandie, l'EAU, 124 p.

Fetter C. W (2001) Applied hydrogeology. - Fourth edition. Upper Saddle River, New Jersey : Prentice Hall, 598 p.

Gürbüz A. (2014) Pull-Apart Basin. In: Harff J., Meschede M., Petersen S., Thiede J. (eds) Encyclopedia of Marine Geosciences. Springer, Dordrecht

Idée E., Jallais N. (2019) Synthèse des connaissances géologiques et hydrogéologiques du département de l'Orne, volet bancarisation des données, programme OAGPRO61, Rapport BRGM/RP-69332-FR.

Jallais N., David P.-Y., Pennequin D., Hamel M. (2019) – Etat des lieux des connaissances sur les ressources en eaux souterraines du département de la Manche. Rapport final. BRGM/RP-69128-FR, 159 p., 92 ill., 2 ann.

Lopez B., Baran N., Bourgine B., Brugeron A., Gourcy L. (2012) Pollution diffuse des aquifères du bassin Seine-Normandie par les Nitrates et produits phytosanitaires : temps de transfert et tendances ; Rapport final BRGM/RP-60402-FR, 326 p.

Meire B., Caritg S., Idée E. (2019) – Synthèse géologique et hydrogéologique du département de l'Orne. Volet géologique et structural. Rapport final. BRGM/RP-69292-FR, 115 p., 74 ill., 1 ann.

Pauwels.H. (2000) - Synthèse des cas de dénitrification naturelle dans les eaux souterraines en France : Intérêt du processus pour restaurer la qualité des eaux. BRGM/RP-50304-FR, 39 p

Richard.S (2015) représentativité des valeurs de transmissivité estimées à partir d'essais hydrauliques pour les aquifères rocheux fracturés : effet d'échelle et connexions hydrauliques. Thèse de doctorat en sciences de la terre et de l'atmosphère, Université du Québec

SEGUIN.J.J., ALLIER.D., CROISET.N., KLINKA.T., MANCEAU.J.C. (2018) - ESTHER. Etude de Séries Temporelles en Hydrogéologie avec le logiciel R. Guide d'utilisation. BRGM/RP-67518-FR, 299 p., 10 ann.

WUILLEUMIER A., ALLANIC C., BOUDET M., BOURGINE B., CROISET N., MACHARD DE GRAMONT H., PANNET P., TOURLIERE B., DUGUE 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. BRGM/RP-62002-FR, 178 p., 24 ann.

Fonctionnement des Aquifères de socle

Aquilina L., Roques C., Boisson A., Vergnaud-Ayraud V., Labasque T., Pauwels H., Pételet-Giraud E., Pettenati M., Dufresne A., Bethencourt L., Bour O. (2018). Autotrophic denitrification supported by biotite dissolution in crystalline aquifers (1): New insights from short-term batch experiments. Science of The Total Environment 619–620, 842–853. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.11.079

Baïsset, M., Gutierrez, A., Mathieu, F., Gandolfi, J.-M., Dewandel, B., Boisson, A., Bechelen, L., (2015). Connaissance de l'aquifère de socle migmatitique de Grand-Santi (Guyane Française) / The Grand-Santi Fre nch Guyana migmatitic hard rock aquifer. Presented at the Vingtièmes journées techniques du Comité Français d'Hydrogéologie de l'Association Internationale des Hydrogéologues. « Aquifères de socle : le point sur les concepts et les applications opérationnelles », La-Roche-Sur-Yon.

Bense, V.F., Gleeson, T., Loveless, S.E., Bour, O., Scibek, J., (2013). Fault zone hydrogeology. Earth-Science Reviews 127, 171–192. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.09.008

Boisson A., (2011). Etude multi-échelles des réactions de dénitrification dans les aquifères hétérogènes : Approches expérimentales de l'influence des écoulements sur la réactivité biogéochimique. Université de Rennes 1.

Boisson A., De Anna P., Bour O., Le Borgne T., Labasque T., Aquilina L. (2013). Reaction chain modeling of denitrification reactions during a push–pull test. Journal of Contaminant Hydrology 148, 1–11. https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2013.02.006

Boisson A., Villesseche D., Baisset M., Perrin J., Viossanges M., Kloppmann W., Chandra S., Dewandel B., Picot-Colbeaux G., Rangarajan R., Maréchal J.C. and Ahmed. (2014) Questioning the impact and sustainability of percolation tanks as aquifer recharge structures in semi-arid crystalline context. Submitted to Environmental Earth Sciences.

Boisson A., Guihéneuf N., Perrin J., Bour O., Dewandel B., Dausse A., Viossanges M., Ahmed S., Maréchal J.C. (2015). Determining the vertical evolution of hydrodynamic parameters in weathered and fractured south Indian crystalline-rock aquifers: insights from a study on an instrumented site. Hydrogeol J 23, 757–773. https://doi.org/10.1007/s10040-014-1226-x

Bourdet D., Whittle T.M., Douglas A.A., Pirard Y.M. (1983). A new set of type curves simplifies well test analysis. World oil 95–106.

Dewandel B., Amraoui N., Baltassat J.M., Boisson A., Caballero Y., Mougin B. (2019) - Projet de recherche MORPHEUS - MéthOdologie de Régionalisation des Propriétés HydrogEologiques des aqUifères de Socle. BRGM – A Paraitre

Dewandel B., Caballero Y., Perrin J., Boisson A., Dazin F., Ferrant S., Chandra S., Maréchal J.-C., (2017a). A methodology for regionalizing 3-D effective porosity at watershed scale in crystalline aquifers. Hydrol. Process. n/a-n/a. https://doi.org/10.1002/hyp.11187

Dewandel B., Jeanpert J., Ladouche B., Join J.-L., Maréchal J.-C. (2017b). Inferring the heterogeneity, transmissivity and hydraulic conductivity of crystalline aquifers from a detailed water-table map. Journal of Hydrology 550, 118–129. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.03.075

Dewandel B., Lachassagne P., Wyns R., Maréchal J.C., Krishnamurthy N.S. (2006). A generalized 3-D geological and hydrogeological conceptual model of granite aquifers controlled by single or multiphase weathering. Journal of Hydrology 330, 260–284. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.03.026

Dewandel B., Lachassagne P., Zaidi F.K., Chandra S. (2011). A conceptual hydrodynamic model of a geological discontinuity in hard rock aquifers: Example of a quartz reef in granitic terrain in South India. Journal of Hydrology 405, 474–487. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.05.050

Dewandel B., Maréchal J.C., Bour O., Ladouche B., Ahmed S., Chandra S., Pauwels H. (2012). Upscaling and regionalizing hydraulic conductivity and effective porosity at watershed scale in deeply weathered crystalline aquifers. Journal of Hydrology 416–417, 83–97. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.11.038

Ferroud A., Rafini S., Chesnaux R. (2019). Using flow dimension sequences to interpret non-uniform aquifers with constant-rate pumping-tests: A review. Journal of Hydrology X 2, 100003. https://doi.org/10.1016/j.hydroa.2018.100003

Gleeson T., Novakowski K. (2009). Identifying watershed-scale barriers to groundwater flow: Lineaments in the Canadian Shield. Geological Society of America Bulletin 121, 333–347. https://doi.org/10.1130/B26241.1

Gringarten A. (2008). From straight lines to deconvolution: the evolution of the state of the art in well test analysis. SPE Reservoir Evaluation & Engineering 41–62.

Guihéneuf N., Boisson A., Bour O., Dewandel B., Perrin J., Dausse A., Viossanges M., Chandra S., Ahmed S., Maréchal J.C. (2014). Groundwater flows in weathered crystalline rocks: Impact of piezometric variations and depth-dependent fracture connectivity. Journal of Hydrology 511, 320–334. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.01.061

Gutierrez A., Dewandel B. (2013). L'interprétation des pompages d'essai : quelles nouveautés ? Géologues, 178, 49-52.

Jiménez-Martínez J., Longuevergne L., Le Borgne T., Davy P., Russian A., Bour O. (2013). Temporal and spatial scaling of hydraulic response to recharge in fractured aquifers: Insights from a frequency domain analysis: Temporal and Spatial Scaling in Fractured Aquifers. Water Resources Research 49, 3007–3023. https://doi.org/10.1002/wrcr.20260

Kolbe T., De Dreuzy J.-R., Abbott B.W., Aquilina L., Babey T., Green C.T., Fleckenstein J.H., Labasque T., Laverman A.M., Marçais J., Peiffer S., Thomas Z., Pinay G. (2019). Stratification of reactivity determines nitrate removal in groundwater. Proceedings of the National Academy of Sciences 116, 2494–2499. https://doi.org/10.1073/pnas.1816892116

Le Borgne T., Bour O., Paillet F.L., Caudal J.-P. (2006). Assessment of preferential flow path connectivity and hydraulic properties at single-borehole and cross-borehole scales in a fractured aquifer. Journal of Hydrology 328, 347–359. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.12.029

Mougin B., Allier D., Blanchin R., Carn A., Courtois N., Gateau C., Putot E., Jegou J.P., Lachassagne P., Stollsteiner P., Wyns R., (2008a). SILURES Bretagne (Système d'Information pour la Localisation et l'Utilisation des Ressources en Eaux Souterraines) - Rapport final - Année 5. BRGM.

Mougin B., Baltassat J.M, Blanchin R., Putot E., Schorëtter J.M., Wyns R. (2008b) SILURES bassins versants Ille-et-Vilaine – Bassin du Nançon. BRGM/RP-56318-FR

Mougin B., Thomas E., Mathieu F., Blanchin R., Wyns R. (2005a) – SILURES Bassins Versants – Dourduff (29), Oust (56), Yvel (56), Maudouve et Noë Sèche (22) – Rapport Final Année 2 – BRGM/RP-53742-FR.

Mougin B., Jegou J.P. (2005b) Atlas du réseau piézométrique de Bretagne. SILURES Suivi. BRGM/RP-53662-FR, 49p.

Mougin B., Jegou J.P., Marmu (2010). SILURES Suivi - Gestion du réseau de surveillance piézométrique régional de Bretagne - Valorisation des données des 52 piézomètres et annuaire 2010. Rapport final BRGM/RP-59329-FR 67 p., 36 ill., 2 ann.

Pauwels H., Kloppmann W., Foucher J.-C., Martelat A., Fritsche V. (1998). Field tracer test for denitrification in a pyrite-bearing schist aquifer. Applied Geochemistry 13, 767–778. https://doi.org/10.1016/S0883-2927(98)00003-1

Perrin J., Ahmed S., Hunkeler D. (2011). The effects of geological heterogeneities and piezometric fluctuations on groundwater flow and chemistry in a hard-rock aquifer, southern India. Hydrogeology Journal 19, 1189–1201. https://doi.org/10.1007/s10040-011-0745-y

Petit V., Lachassagne P., Arnaud L., Coueffë R., Tourlière B. (2007) – Atlas hydrogéologique numérique du Calvados. Volet Relatif aux aquifères de socle. Rapport BRGM/RP-55671-FR, 78p., 33 illustrations, 2 annexes.

Renard P., Glenz D., Mejias M. (2009). Understanding diagnostic plots for well-test interpretation. Hydrogeology Journal 17, 589–600. https://doi.org/10.1007/s10040-008-0392-0

Roques C., Aquilina L., Boisson A., Vergnaud-Ayraud V., Labasque T., Longuevergne L., Laurencelle M., Dufresne A., De Dreuzy J.-R., Pauwels H., Bour O. (2018). Autotrophic denitrification supported by biotite dissolution in crystalline aquifers: (2) transient mixing and denitrification dynamic during long-term pumping. Science of The Total Environment 619–620, 491–503. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.11.104

Roques C., Aquilina L., Bour O., Maréchal J.-C., Dewandel B., Pauwels H., Labasque T., Vergnaud-Ayraud V., Hochreutener R. (2014). Groundwater sources and geochemical processes in a crystalline fault aquifer. Journal of Hydrology 519, 3110–3128. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.10.052

Roques C., Bour O., Aquilina L., Dewandel B., Leray S., Schroetter J.-M., Longuevergne L., Le Borgne T., Hochreutener R., Labasque T., Lavenant N., Vergnaud-Ayraud V., Mougin, B. (2014). Hydrological behavior of a deep sub-vertical fault in crystalline basement and relationships with surrounding reservoirs. Journal of Hydrology 509, 42–54. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.11.023

SCHROËTTER J.-M., BADER A-G., BECCALETTO l., BOISSON A., LUCASSOU F., OUERGUI, Y. et TOURLIERE B. (2017) - ANAFORE : ANAlyse multicritère des données de FORages les plus productifs de bretagnE, Rapport intermédiaire 2017, BRGM/RP-68479-FR, 77p., 45 ill., 2 annexes.

Tarits C., Aquilina L., Ayraud V., Pauwels H., Davy P., Touchard F., Bour O. (2006). Oxido-reduction sequence related to flux variations of groundwater from a fractured basement aquifer (Ploemeur area, France). Applied Geochemistry 21, 29–47. https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2005.09.004

Theis C.V., (1935). The relation between the lowering of the Piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using ground-water storage. Eos, Transactions American Geophysical Union 16, 519–524. https://doi.org/10.1029/TR016i002p00519

Wyns R., Baltassat J., Lachassagne P., Legchenko A., Vairon J., Mathieu F. (2004). Application of proton magnetic resonance sounding to groundwater reserve mapping in weathered basement rocks (Brittany, France). Bullletin de la société geologique de France 175, 21–34.

AQUIFERES DES FLYSCHS BRIOVERIENS

Chauvière O. (2012) - Recherche en eau sur le secteur de la dépression du Houlme, Note de synthèse sur les travaux de forage et pompage, forage d'essai de la Briançière, Syndicat Départemental des Eaux de l'Orne

Lemoine B. (2006) - Analyse synthétique géologique et hydrogéologique de l'aquifère des schistes tachetés, forage de la Rouillerie à Caligny, Syndicat Départemental des Eaux de l'Orne

Lemoine B. (2006) - Analyse synthétique géologique et hydrogéologique de l'aquifère des schistes tachetés, forage du Pont de Vère à Caligny, Syndicat Départemental des Eaux de l'Orne

Lithologic (2013), Notice d'incidence relative à l'exploitation du captage de l'Hivernière, Commune de Frênes, SIAEP de Frênes-Montsecret, Syndicat Départemental des Eaux de l'Orne

Telosia et Hydriad (2011), Impact des prélèvements d'eau souterraine sur le fonctionnement hydraulique du marais du Grand Hazé, Note de Synthèse, Syndicat Départemental des Eaux de l'Orne

AQUIFERES DES GRANITOÏDES ET CORNEENNES

Aster (1998) : Etude de vulnérabilité et des risques de pollution, forages de la chiennerie, de la métaierie et de la hanterie, commune de la Chapelle d'Andaine – Juvigny-sous-Andaine, Conseil Général de l'Orne

Dassibat C. et Pareyn C. (1979), Renforcement des ressources en eau du canton de Tinchebray, BRGM-DDA de l'Orne, Rapport 79-SGN-067-BNO. 13p.

Etapes Environnement (2006) Etude de vulnérabilité sur le forage de la Noë-Verte situé sur le territoire de la commune de Beauchene, SER du pays de Tinchebray, Syndicat Départemental des Eaux de l'Orne

Lemoine B. (1993), Etude de vulnérabilité et d'évaluation des risques de pollution, forage AEP du Grais, demande d'autorisation d'utilisation d'eau prélevée dans le milieu naturel et destinée à la consommation humaine, conseil général de l'Orne

Lemoine B. (1995), Document d'incidence, forage de l'Etre, Commune de St Pierre du Regard, SMPE de l'Etre

Lithologic (2013), Notice d'incidence relative à l'exploitation des captages de la PommeraieCommunes de Mesnil Ciboult et de Tinchebray, Syndicat d'Etudes et de Réalisation du Pays de Tinchebray, Syndicat Départemental des Eaux de l'Orne

AQUIFERES DES SYNCLINAUX PALEOZOÏQUES

AD2E (2006) ETUDE HYDROGEOLOGIQUE ET ENVIRONNEMENTALE PREALABLE A LA DELIMITATION DES PERIMETRES DE PROTECTION DE CAPTAGE AEP, Forage du Bois de Magny, Commune de Magny-le-Désert, Syndicat Départemental des Eaux de l'Orne

Lemoine B. (2001), Note Synthétique des travaux de forage et essais de pompage du site de La Bouillière (Commune de Ciral) - site des Ebrûlés et site du Pré Chauvron (St Ellier des Bois), SIAEP du Val d'Ecouves, Syndicat Départemental des Eaux de l'Orne

Lemoine B. (2008), Analyse synthétique géologique et hydrogéologique de l'aquifère des grès feldspathiques et armoricains, sources des vallées et des vollées, SIAEP du Val D'Ecouves, Syndicat Départemental des Eaux de l'Orne

Pivette Consultant (2011), interprétation des pompages d'essais, Forage Fe1 de St Ursin, Syndicat Départemental des Eaux de l'Orne

Pivette Consultant (2011) - Note de synthèse sur l'interprétation de pompages d'essai, Forage d'essai de Bousance, commune de St Denis sous Ecouves, Rapport 575/11/Ra.420, Syndicat départemental des Eaux de l'Orne

AQUIFERES DES CALCAIRES AALENIENS, BAJOCIENS ET BATHONIENS

Dassibat C., Pascaud.P (1975) – Modèle de gestion des ressources en eau du bassin de l'Orne, Aquisition des données hydrogéologiques, BRGM – Agence Financière de Bassin Seine Normandie. Rapport 75 SGN 341 PNO

Geotherma (1993), Etude de vulnérabilité et d'évaluation des risques de pollution, Captage de la Luzerne, Commune de Sées, Conseil Général de l'Orne.

Lemoine B. (1990), Recherche d'eau par forages sur la commune de Mortrée, campagnes de 1989 - 1990, Synthèse des résultats, Service Régional des Eaux de Basse Normandie

Lithologic (2009) – Synthèse hydrogéologique de l'Aquifère des calcaires bajo-bathoniens entre Alençon et le Mêle-sur-Sarthe. Syndicat Départemental des Eaux de l'Orne.

Oyo RGS (1998). Synthèse sur les expériences de traçages à Vingt-Hanaps et Radon, Protection de la Ressource en Eau à Vingt Hanaps et Radon. Phase 2 Résultats des expériences de traçages. Syndicat Départemental des Eaux de l'Orne.

Pierson (2002), Etude de Vulnérabilité et d'évaluation des risques de pollution, Commune de Mortrées, Syndicat Départemtal des Eaux de l'Orne

Pivette et Baumann (1999). Analyse Hydrogéologique et faisabilité d'un modèle mathématique pour la gestion de la ressource, aquifère Bathonien de la région d'Argentan-Sées

Pivette et Baumann (2001) – Rapport de synthèse tome 1, Modélisation mathématique pour la gestion de la ressource, aquifère bathonien de la Région d'Argentan-Sées, Conseil Général de l'Orne.

Rodet J. (2011) Campagne d'Argentan : 1 - grotte des Monts (Sentilly, Orne) – Centre Normand d'Etude du Karst : www.cnek.org

AQUIFERES DES FORMATIONS OXFORDIENNES

ASTER (1992), Etude de Vulnérabilité et d'évaluation des risques de pollution du Forage des Feugerets, Appenai sous Belleme, Conseil Général de l'Orne

Aster (1993) Etude de Vulnérabilité et d'évaluation des risques de pollution, forage du blanc buisson, commune de Mardilly, Conseil Général de l'Orne

COUEFFE.R., ARNAUD.L., CHOUTIER.J.P., LEBRET.P., PASQUET.J.F., HUGOT.V., CHASSEIGNE.R., DURIEZ.M., JAVELLE.S. (2005) - Inventaire préliminaire des mouvements de terrain du département du Calvados (Basse-Normandie). Rapport final. BRGM/RP-54388-FR, 146 p. 6 fig., 1 pht., 1 carte**Lemoine B.** (1994) Note synthétique des travaux et essais de pompage Forage de production la Pelterie, Commune de Bivilliers, SMPE du Haut Perche, Conseil Général de l'Orne

Lemoine B. (1997) – Etude d'impact des rejets accidentels sur une forage AEP, Commune d'Appenai sous Bellême, Forage des Feugerets, Document d'incidence, Conseil Général de l'Orne.

Pivette Consultant (2004) Etude d'incidence des prélèvements sur la ressource en eau, captage de la Fontaine aux Ladres, Rapport Ra 343, SIAEP de Belleme, Syndicat départemental des eaux de l'Orne.

Pivette Consultant (2006) Etude d'incidence des sources du Bourg à St Hilaire le Chatel, SMAEP du Haut Perche, Syndicat Départemental des Eaux de l'Orne.

Pivette Consultant (2011) - BASSIN DE L'HUISNE AMONT AQUIFERES CENOMANIENS ET JURASSIQUES MODELISATION MATHEMATIQUE Analyse des résultats de la deuxième phase d'étude (Rapport SAFEGE, octobre 2011), Rapport Ra417

SAFEGE (1997), Etude de vulnérabilité et d'environnement préalable à la définition des périmètres de protection, forages des communes du Pin la Garenne et Saint Jouin de Blavou, Syndicat Départemental des eaux de l'Orne

AQUIFERE DE LA CRAIE CENOMANIENNE ET TURONIENNE

AD2E (2006), Etude hydrogéologique et environnementale préalable à la délimitation des périmètres de protection du captage AEP Puits Feugeurou, Commune de Ste Gauburge Ste Colombe, SIAEP Planches Ste Gauburge, Syndicat Départemental des Eaux de l'Orne.

Artis H. De la Querière P. Van Den Avenne S. (1972) – Assainissement du Pays d'Ouche (Orne et Eure), Etude Hydrogéologique, BRGM-Direction Départementale de l'Eure-Direction Départementale de l'Orne. Rapport 72 SGN 217 PNO, 37 p.

CGG (2001) Etude Hydrogéologique de l'aquifère de la Craie, Conseil Général d'Eure et Loir, Direction de l'Espace et du Développement Rural

Chauvière O. (2012), Descriptif technique du forage le souchet, SIAEP Aube Beaufrais Rai, Syndicat Départemental des Eaux de l'Orne

David P.-Y., Loiselet C., Lasseur E., Matthieu F., Pannet P., Serviere M. (2015) Modélisation hydrodynamique du bassin versant de l'Avre – Phase 3 : Aquisition de données complémentaires, Phase 4a Construction du Modèle Géologique – Rapport BRGM/RP-64817-FR. 135 pages, 53ill, 6 annexes

David P.-Y., Meire B., Cary L., Charlier J.-B., Ladouche B., Lemesnil M. (2016) Etude du fonctionnement et de la vulnérabilité du bassin versant de l'Iton – Etat des connaissances, analyse des données et premiers résultats. Rapport Final, BRGM/RP-65618-FR, 401 p., 246 ill., 22 tabl., 12 ann.

ECOGEE (2000), Etude de Vulnérabilité et d'évaluation des risques de pollution, Forage de la Trigardière, Commune d'Anceins Syndicat Départemental des Eaux

ECOGEE (2000), Etude de vulnérabilité et d'évaluation des risques de pollution, forage de la Cucuyère, Commune du Mage, Syndicat Départemantal des Eaux de l'Orne

Gaudriot (2002) - Piézométrie des points d'engouffrement, commune d'Orville, captage de la Roulandière, Syndicat Départmental des Eaux de l'Orne,SIAEP de St Germain d'Aunay

Geo-Log Conseil (1999) Etablissement des périmètres de protection des points d'eau potable, captage de Chandai « le Hamel », étude de vulnérabilité et d'environnement préalabel à la définition des périmètres de protection. Syndicat Départemental des Eaux de l'Orne

Geotherma (1997), Etude de Vulnérabilité du Forage d'essai des Aspres, Syndicat Départemental des Eaux de l'Orne

Horizon (2002) Etude de vulnérabilité des ouvrages de production du SIAEP de St Germain d'Aunay, sources de la Roulandière et du Costil, Conseil Général de l'Orne

Horizon (2002), Etude de vulnérabilité de l'ouvrage de production du SIAEP de Champeaux en Auge, Source de l'Ortier, Syndicat Départemental des Eaux de l'Orne

Leblanc M. (1998) – Le système karstique de l'Orbiquet. DIREN de Basse-Normandie. 98p.

Ledun J., David P.-Y., Morel O., Husson F. (2016) – Parcelles drainées et réseaux publics de drainage de Haute-Normandie - Recensement, cartographie, bancarisation et mise en ligne sur le SIGES Seine-Normandie - Phase 1 : étude de faisabilité. Rapport final. BRGM/BRGM/RP-65533-FR, 133 p., 51 ill., 1 tabl., 5 ann.

Lemoine B. (2007), Analyse synthétique géologique et hydrogéologique de l'aquifère de la craie du Cénomanien, Forage des Brocteux, SIAEP de Bocquencé, Syndicat Départemental des Eaux de l'Orne

Lemoine B. (2009) - Note de Synthèse sur les essais de pompage du forage d'essais du Grand Rhay, Commune de Remalard, Syndicat Départemental des Eaux de l'Orne

Mougin B., Branellec M., David P.-Y., Zammit C., Bourgine B. (2011) – Atlas hydrogéologique regional de Haute-Normandie, Cartes piézométriques de l'aquifère crayeux – Rapport Final – BRGM/RP59301-FR, 102 p., 51 ill., 2 ann., 1 CD

Pivette Consultant (2005) - Aquifères du bassin amont de l'Huisne, Modélisation Hydrodynamique, Phase 1 : Etude Préliminaire de faisabilité, Rapport de synthèse Ra.247

Pivette Consultant (2012) Etude Préalable à la définition des périmètres de protection du forage de Belle Perche (Randonnai), 612/12/Ra447, Syndicat Départemental de l'Orne

Pivette Consultant (2015) Etude d'incidence du prélèvement sur la ressource en eau, Captages de Millaubourg, de Cutesson et du Home, Commune de Vimoutiers, Syndicat Départemental des Eaux de l'Orne, Rapport 527/09

Pivette Consultant (2015) Incidence du prélèvement sur la ressource en eau, le milieu aquatique, l'écoulement, le niveau et la qualité des eaux, Captages de Millaubourg, de Cutesson et du Home, Commune de Vimoutiers, Syndicat Départmental des Eaux de l'Orne, ref : 527/09/Résumé

RODET J. & AUDAM J.-L. (1999). La carrière souterraine de la Mairie (Saint Julien sur Sarthe, Orne). Hypogées, 16 : 10-15 [1163-7358].

Rodet J. (2007). Les fantômes de la Mansonnière (Bellou-sur-Huisne) ou comment l'Orne est devenu un département "spéléologeable". Spelunca, 108 : 23-32.

Rodet J. (2018) Labyrinthe de la Mansonnière, Commune de Rémalard au Perche/Bellou-sur-Huisne –CNEK

SAFEGE (1991) Recherche de nouvelles ressources en eau pour le SIAEP de GACE, Conseil Général du Département de l'Orne

SAFEGE (2003) Definition des conditions d'alimentation des sources des Perrines à St Maurice sur Huisne et de la Chaloudière à Boissy-Maugis, Rapport Mu030 pour le Syndicat Départemental des Eaux de l'Orne

SAFEGE (2012) – Modélisation Hydrodynamique des aquifères du bassin amont de l'Huisne

SAFEGE-HORIZON (2003) Etude de vulnérabilité des ouv ages de production d'eau potable de la ville de l'Aigle, Forage des Vautioux, Rapport Final MD36, Syndicat Départemental des Eaux de l'Orne

SAFEGE-Horizon (2004) Etude de Vulnérabilité des ouvrages de production d'eau potable de la commune de Rémalard, source et puits de la Lunandière et Forage du Grand Rhay, Rapport final Na26

Stollsteiner P. (2007) – Etat de la connaissance sur le réseau karstique du bassin versant du Guiel (Orne). Rapport final BRGM/RP-55398-FR. 26p.

AQUIFERE DES SABLES DU PERCHE

Aster (2004), Etude de vulnérabilité, Source de la Calabrière, Commune du Gué de la Chaine, Conseil Général de l'Orne, Syndicat Départemental des Eaux de l'Orne

Aster (2006) Etude de vulnérabilité de la source de la Chaloudière (Boissy-Maugis), Syndicat Départemental de l'Orne

BRGM (1995) Piézométrie 1994, Nappe des sables du Cénomanien du bassin Loire-Bretagne, Rapport BRGM R38582

David P.-Y. (2012) Elaboration d'un outil de gestion des prélèvements d'eau sur le bassin de l'Avre : phase 1 Etat de la connaissance et phase 2 Analyse des données – Rapport Final. BRGM/RP-60458-FR, 204 p., 122 ill., 7 ann.

David P.-Y., Moisan J., Nachbaur A., Dörfliger N. (2010) – Aménagement des bétoires en Haute-Normandie – Etat de l'art et préconisations de bonnes pratiques – Rapport final. Rap. BRGM/RP-58795-FR, 218 p., 39 ill., 10 ann.

Lemoine B. (1998) Captage AEP de la Pilleterie, Etude de Vulnérabilité et évaluation des risques de pollution, SIAEP de Soligny la Trappe, CG61

Moguedet G. (1998) – Notice Explicative, Carte Géol. France (1/50 000), feuille de Mortagne au Perche (252), Orléans : BRGM. 87 p.

Pivette Consultant (2005) - Aquifères du bassin amont de l'Huisne, Modélisation Hydrodynamique, Phase 1 : Etude Préliminaire de faisabilité, Rapport de synthèse Ra.247

Pivette Consultant (2012) - Etude prélable à la définition des périmètres de protection, Forage de Belle Perche à Randonnai, Rapport 612/12/Ra.447, Syndicat Départemental des Eau de l'Orne,

RODET J. (1991) – La craie et ses karsts – Centre Normand d'études du karst et des cavités du sous-sol et Groupe Seine.

SAFEGE (1993) Etude hydrogéologique de la région du Perche, reconnaissance géophysique dans la région de Senonches

SAFEGE (1993) Reconnaissance géophysique des sables du Perche dans la Région de Senonches

SAFEGE (2004), Etude de vulnérabilité des ouvrages des forages de la Luandière et du Grand Rhay, Commune de Rémalard, Rapport Final NA26, Syndicat Départemental des Eaux de l'Orne

Safege-Horizon (2004) Etude de vulnérabilité des ouvrages de production d'eau potable du SIAEP de BELLOU-LE-TRICHARD/POUVRAI, Forage de la Joustière, Rapport Na25, Syndicat Départemental des Eaux de l'Orne

Sogreah (2004) - Programme d'étude et de modélisation pour la gestion de la nappe du Cénomanien - rapport de fin de phase 1.

SOGREAH (2004-2007) - Programme d'étude et de modélisation pour la gestion de la nappe du Cénomanien. Rapport définitif N°2730117 R3V2

RESSOURCES EN EAU SECONDAIRES

Bravard J.-P., Clémens A. (2008) Le Rhône en 100 questions. GRAIE – Agence de l'Eau RMC.

David P.-Y., Meire B., Cary L., Charlier J.-B., Ladouche B., Lemesnil M., Richard M. Yecora Zorzano L. (2016) – Etude du fonctionnement et de la vulnérabilité du bassin versant de l'Iton, Etat des connaissances, analyse des données et premiers résultats, Rapport final. BRGM/RP-65618-FR, 401 p., 246 ill., 22 tabl., 12 ann.

Dupont J.-P, Valdès D., Slimani S., Jardani A., Brown J., Mouhri A., Rodet J., Masséi N., Laignel B. (2009) – Programme de suivi des poits d'eaux potables affectés par les problèmes de turbidité au sein du département de l'Eure. Synthèse du contexte du fonctionnement hydrologique et de la vulnérabilité des ressources en eaux du département de l'Eure. UR Rouen –CNRS Laboratoire M2C. 55p.

Lautridou J.-P. (1993) L'eau dans les Loess de Normandie, Quaternaire 4, (2-3), p. 91-96

Lereculey A. et Duriez M. (2008), Cartographie de l'aléa retrait-gonflement des sols argileux dans le département de l'Orne. Rapport BRGM/RP-56594-FR, 115 p., 26 ill., 4 ann., 3 cartes h.t.

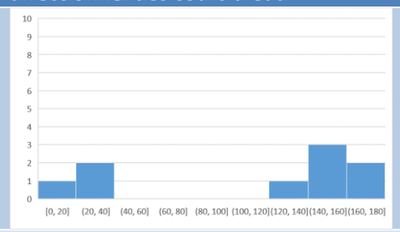
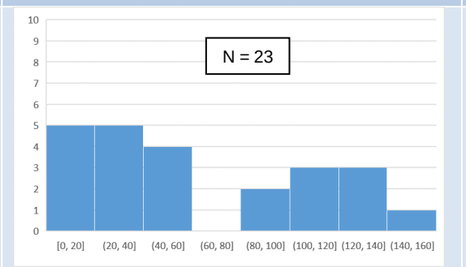
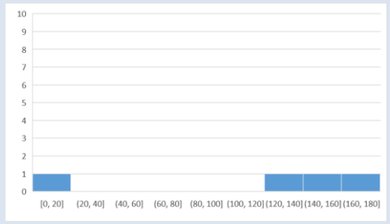
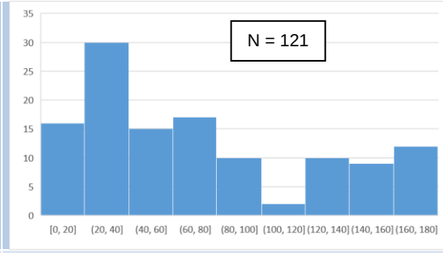
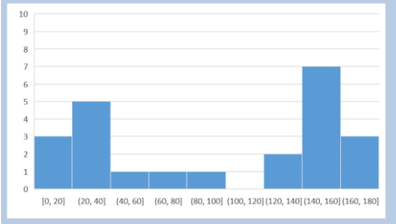
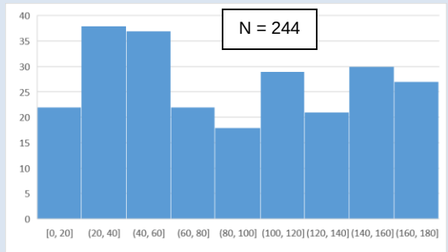
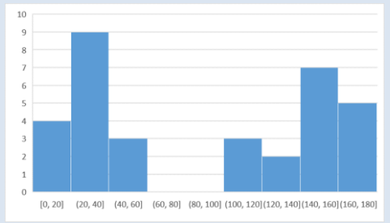
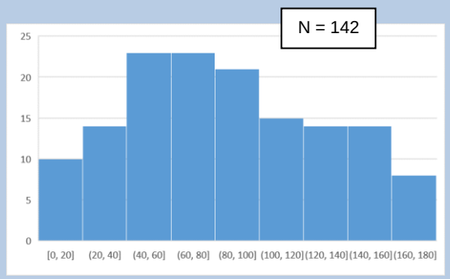
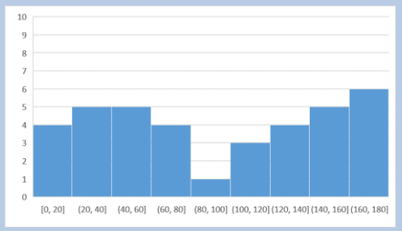
Pivette Consultant (2012) Etude Préalable à la définition des périmètres de protection du forage de Belle Perche (Randonnai), 612/12/Ra447, Syndicat Départemental de l'Orne

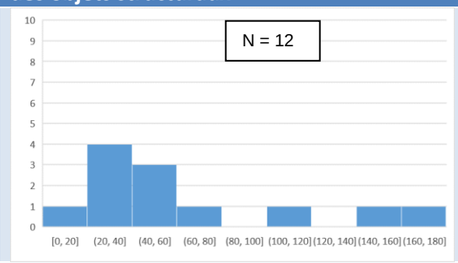
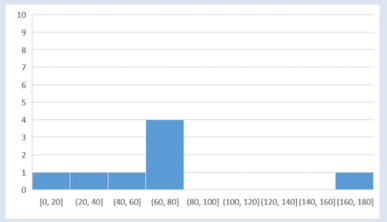
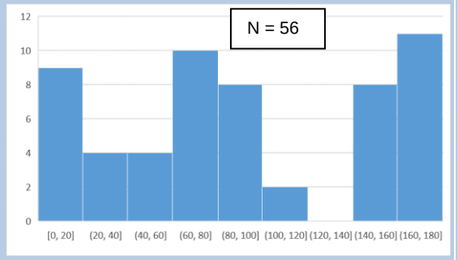
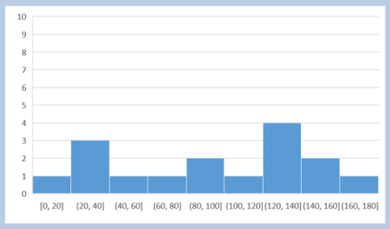
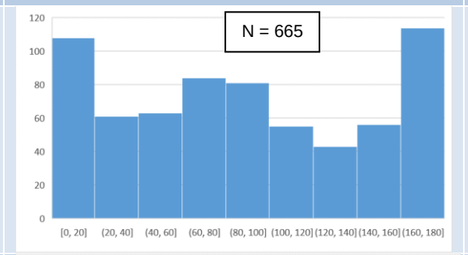
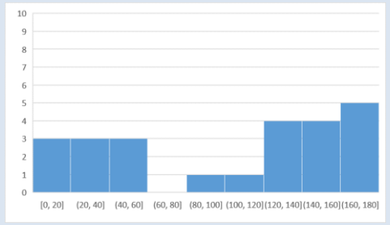
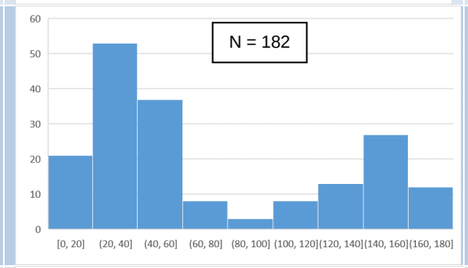
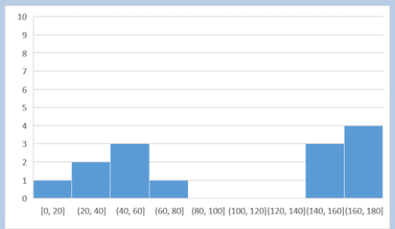
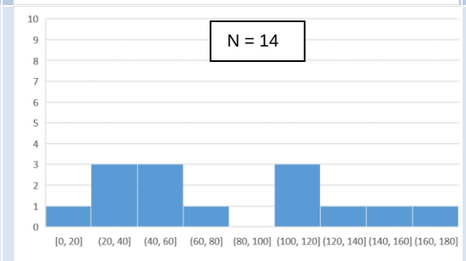
Vérague J. (1977) Les altérations des roches du socle armoricain : relictes morpho-climatiques de la continentalisation post hercynienne entre Sées et Alençon (Basse-Normandie). In: Norois, n°94, Avril-Juin 1977. pp. 251-269;

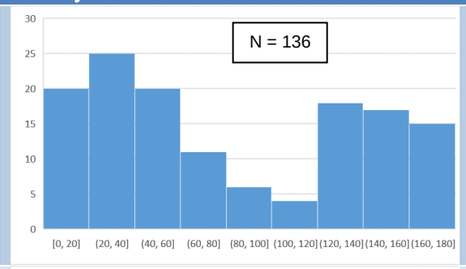
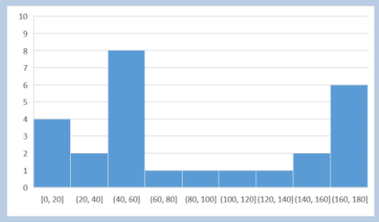
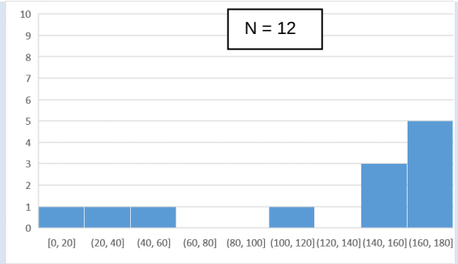
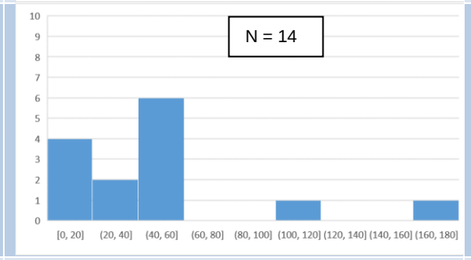
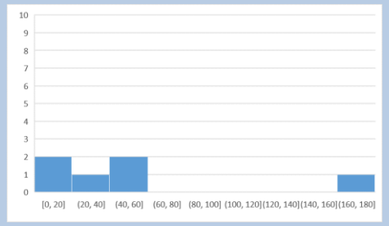
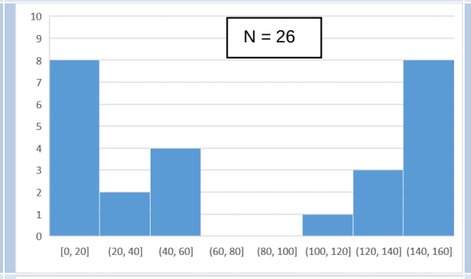
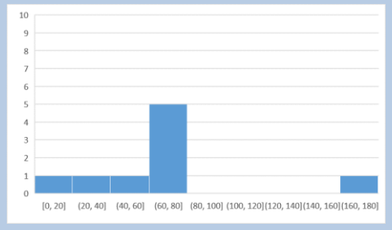
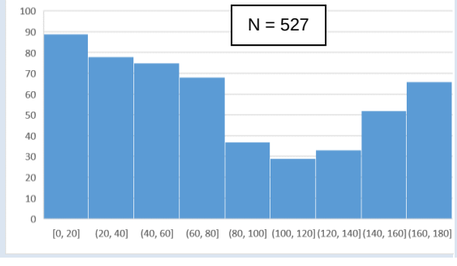
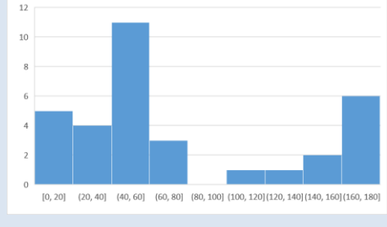
Vernoux J F., Lions J., Petelet-Giraud E., Seguin J.J., Stollsteiner P., Lalot E. (2011) – Contribution à la caractérisation des relations entre eau souterraine, eau de surface et écosystèmes terrestres associés en lien avec la DCE, rapport BRGM/RP-57044-FR, 207 p., 91 ill., 1 ann.

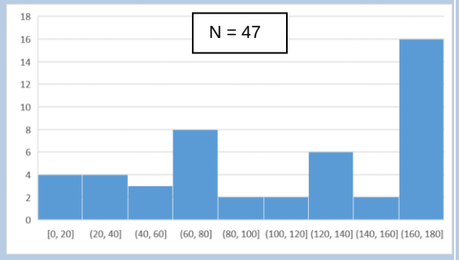
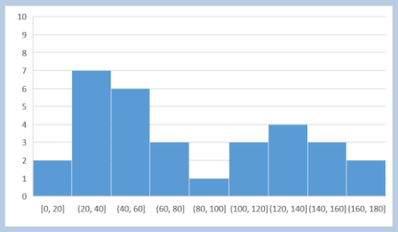
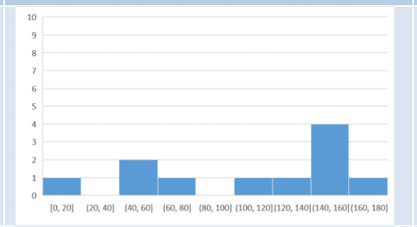
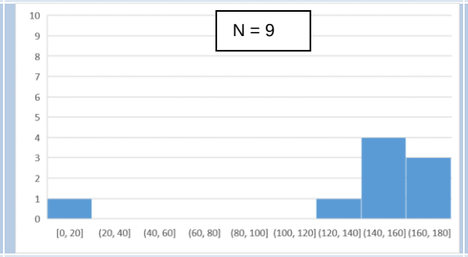
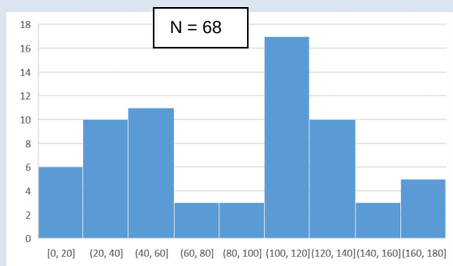
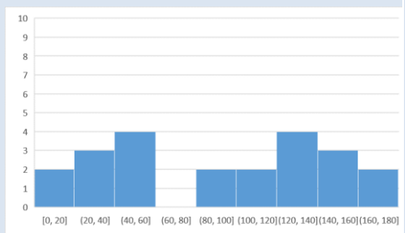
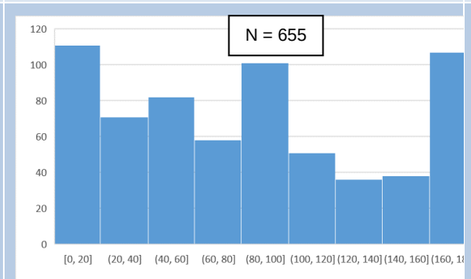
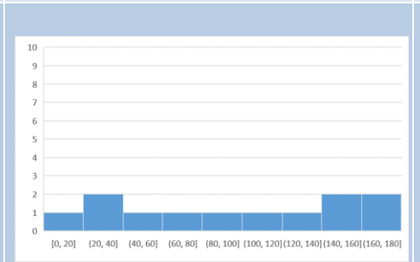
Annexe 1

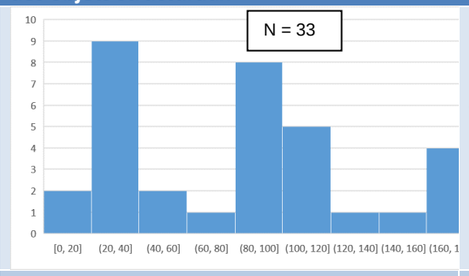
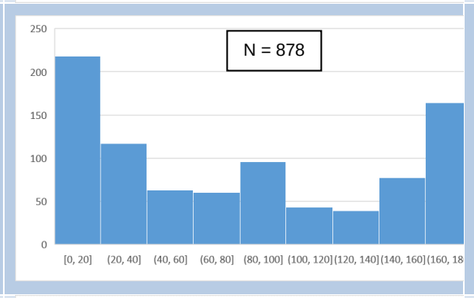
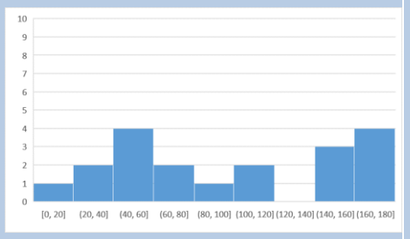
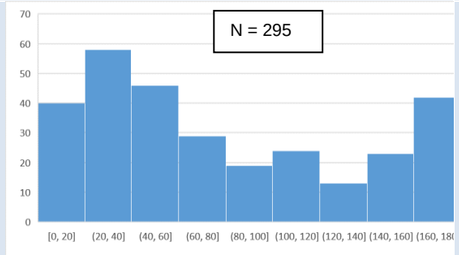
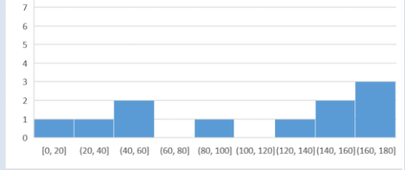
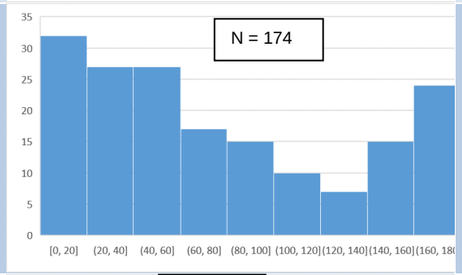
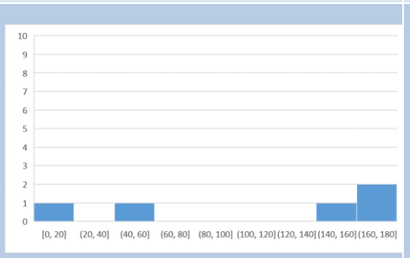
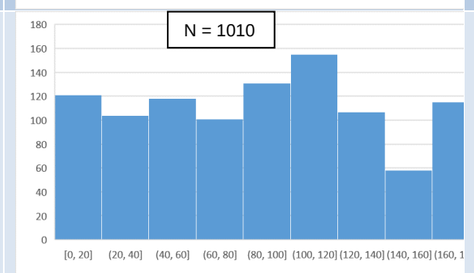
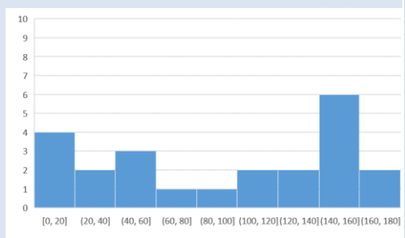
Caractéristiques des blocs lithostructuraux homogènes

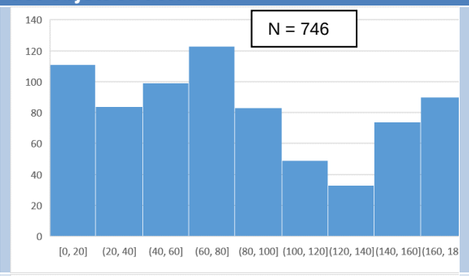
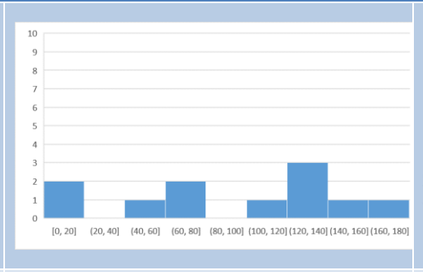
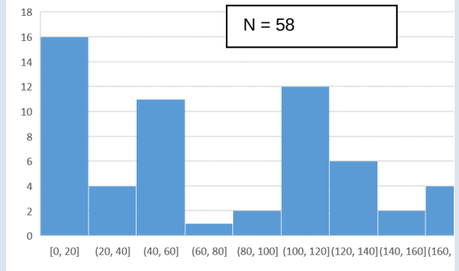
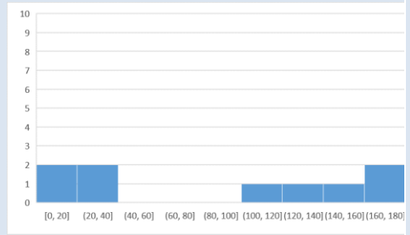
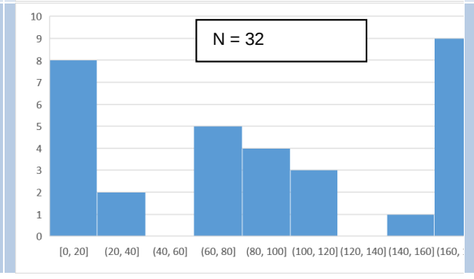
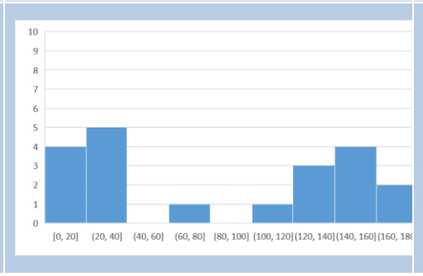
ID	NOM	CARACTERISATION STRUCTURALE	Histogramme directionnel de répartition des objets structuraux	Commentaire	Histogramme directionnel des cours d'eau	Caractérisation hydrologique
1	Nogent le Rotrou		5 objets seulement entre N40 et N60	Fossé d'effondrement d'axe N45-60		Caractère drainant des directions N20-40 et N140-160 ? L'écoulement général de l'Huisne se fait vers le SW
2	Bloc de Céton	Faille N45-60 Pendage vers le Sud-Est ?		2 familles principales entre N0 à 60 et N100 à 140		Ecoulement général du petit cours d'eau de la Maroisse se fait vers le NW vers le bloc 1 de Nogent le Rotrou
3	Bloc de l'Huisne	Système de faille de Nogent de direction N45, faille de Bellême en arc de cercle. Pendage vers le Sud-Est		1 famille ressort en particulier N20-40, les autres directions sont assez bien représentées dans l'ensemble sauf N100-120		Caractère drainant des directions N0-40 et N140-160 ? L'écoulement général des cours d'eau : Coudre, Ravine, Rougette, l'Erre se fait vers le SE
4	Bloc de l'Eure	Fossé d'effondrement bordé par deux systèmes de failles à regard opposé N40-60 et N120, léger pendage en direction des failles bordières ? 4A : <u>Sous-Bloc de Longny,</u> présence d'un fossé d'effondrement N45 et probablement de blocs en touches de piano dans la même direction, plus à l'Est 4B : <u>Sous-Bloc de Bellême</u>		3 familles principales se distinguent : N20-60, N100-120 et N140 à 180		Caractère drainant des directions N20-40, N140-160 et N160-180 ? L'écoulement général des cours d'eau se fait selon une direction principales : le SE et une secondaire : le SSW
5	Bloc du Perche	5A : Sous-Bloc de Mortagne, délimité au Sud par la faille de Mortagne (N150 à N40) et au Nord sur la faille de Laleu (N60) 5B : Sous-Bloc de Champeau, Fossé d'effondrement délimité par les failles à regard opposé de Laleu et Champeau N60 Ces deux blocs sont délimités à l'Est par une limite topographique reposant probablement sur une flexure et ont un pendage vers le Nord-Nord-Est		Distribution bien organisée autour des directions N40-100.		Caractère drainant des directions N20-60 et N140-180 ? Cette zone constitue une limite de partage des eaux ou les écoulements divergent dans toutes les directions : sur le bloc 5A vers le SE ; sur le Bloc 5B et 5C vers le SW ; sur le bloc 5D se fait vers le NE (vers le bloc 6).

ID	NOM	CARACTERISATION STRUCTURALE	Histogramme directionnel de répartition des objets structuraux	Commentaire	Histogramme directionnel des cours d'eau	Caractérisation hydrologique
6	Bloc Avre Iton	Faillles de Courtomer et de Senonches délimitent un bloc effondré, pendage vers le Nord-Est		Une famille s'exprime principalement N20-60		Caractère drainant des directions N40-60 ? Les écoulements de l'Avre et l'Iton se font en direction du NE
7	Bloc Risle	Délimité par les failles de Courtomer et du Merlerault N60 à regard SE Léger Pendage vers le Nord ou le Nord-Nord-Est		Deux familles principales s'expriment N60-100 et N140 à N20		Caractère drainant des directions N20-40 et N120-140 ? L'écoulement général de la Risle (bloc7A) se fait en direction du NE et change de direction à la limite du dpt61 et 27 pour aller vers le N Les écoulements sur le bloc 7B se font en direction de l'ouest vers le Bloc 20
8	Bloc d'Ecouves	Succession d'Anticlinaux et synclinaux, d'axes N60 à N110		Deux familles principales s'expriment N60 à 100 et N160 à 20		Caractère drainant des directions N160 et N20 (méridiennes) ? Les écoulements se font en direction du NNE , de l'Est ou vers le Sud
9	Bloc d'Athis	Ensemble limité au Nord par la faille N120 de Montgaroult 9C : Fossé d'effondrement de St Hilaire, bordé par deux failles majeures N150 9A : Massif Ouest 9B : Massif Est		Deux familles principales s'expriment N20-60 et N140-160		Caractère drainant des directions N40-60 et N140-180 ? Les écoulements traversent le massif en direction du NNE
10	Bloc de la Forêt Auvray	Synclinal Paléozoïque d'axe N120, faillé sur son flanc Nord		Deux familles se distinguent N20 à 60 et N100-120	2 objets seulement entre N160-170	L'Orne s'écoule le long du synclinal vers le NW

ID	NOM	CARACTERISATION STRUCTURALE	Histogramme directionnel de répartition des objets structuraux	Commentaire	Histogramme directionnel des cours d'eau	Caractérisation hydrologique
11	Bloc de Flers	11A : Sous-Bloc de Flers, à l'Ouest de la faille de St Hilaire 11B : Sous-Bloc de Briouze, à l'Est de la faille		Belle distribution autour de deux familles principales N20-40 et N120 à 160		Caractère drainant des directions N40-60 et N160 à N20 (méridienne) ? Les écoulements se font globalement vers le NE. La Rouvre suit la faille de St Hilaire vers le NW
12	Bloc de la Baize	Faille de Corday-Rhonai en limite Nord, et Anticlinal de la Baize tous deux N120		Une famille principale se distingue N140 à N180	3 objets N110-N120 et 1 objet N50	Les écoulements se font globalement vers le NW (la Baize) mais aussi vers le SW
13	Bloc d'Avoine	Limite Ouest sur la faille de St Hilaire de direction N150, Limite Est sur la faille de la Cance de direction N10 Nombreuses petites structures secondaires N20 à N50		Deux familles se distinguent N0-20 et N40-60		Les écoulements se font globalement vers le NNE : Gosu, Udon, Maire en direction des blocs 14 et 20
14	Bloc d'Ecouché	N 60 Structuration Flysch ???	7 objets seulement sur ce secteur principalement autour de N30-50		3 objets N20-40 et 1 objet N160	Les écoulements de la Maire se font vers le NE en direction du bloc 20
15	Bloc du Noireau	Limite Sud-Est avec le bloc de Flers appuyé sur une limite morpho-structurale N45 ? Important système de failles N20-40 et N60-80		On distingue une famille principale N160 à 20		Caractère drainant des directions N40-60 ? Les écoulements se font en direction du NE ou NNE (Noireau et ses affluents)
16	Bloc St Remy	Contact au Sud avec la faille bordière du Synclinal de St Clair de Halouze, N120 Les deux sous-blocs sont séparés par une structure d'axe N45-60 (cluse)		Il existe une assez bonne distribution des familles sauf entre N80 et 140		Caractère drainant des directions N40-60 et N160 à N20 (méridien) ? Les écoulements se font principalement vers le NE (Noireau) ou le SW (Varenne) et dans une moindre mesure vers le NW

ID	NOM	CARACTERISATION STRUCTURALE	Histogramme directionnel de répartition des objets structuraux	Commentaire	Histogramme directionnel des cours d'eau	Caractérisation hydrologique
17	Bloc Pays d'Auge-Ouche	- 17B Sous-Bloc : Pays d'Ouche, Faille à regard Sud d'axe N120 et N60 en limites Sud. - Pendage général vers le Nord-Nord-Est. - Direction de structuration principalement méridienne sur le sous-bloc 17A et N20-40 pour le sous-bloc 17B Limite Sud du sous-bloc 17C dans le prolongement supposé de la faille de Grand-Gouffern d'axe N120		On distingue une famille principale N160-180 et deux secondaires N60-80 et N120-140		Caractère drainant des directions N20-60 et N120-140 ? Les écoulements sur le bloc 17A et 17C se font globalement vers le Nord (Touques, Vie) Les écoulements sur le Bloc 17B se font vers le NE (Guiel, Charentonne)
18	Bloc Dives	Faille Ste Eugénie et Grande-Gouffern direction N120-150 Pendage globalement orienté vers le Nord-Est	6 objets seulement N100-120 et N150-160			Caractère drainant des directions N40-60 et N140-160 ? L'écoulement général se fait vers le NW (Dives) et de façon secondaire selon un axe NNE-SSW
19	Bloc zone Bocaine	Faille de Grande-Gouffern N120 au Sud et son prolongement (St Pierre du Bû), Faille de Ste Eugénie N150 et son prolongement. Axes de plis anticlinaux et synclinaux N120 des terrains paléozoïques		On distingue une famille principale N140 à 180	3 Objets seulement N40-60	Les écoulements se font en direction du NNE vers le bloc 18
20	Bloc Argentan	La limite Sud est positionnée sur la faille bordière du Massif d'Ecouves (synclinal de la Coudrée), d'axe N120 La limite Nord est positionnée sur la faille de Grande-Gouffern, d'axe N120 A l'Est la flexure de Nonant le Pin à un axe N20-40. Le pendage général est vers le Nord-Est. Le bloc est affaissé par rapport à celui de la Risle et de la Dives.		On distingue deux familles de failles principales N20-60 et N100-140		Caractère drainant des directions N40-60 et N120-140 ? Sur le bloc 20A et 20B les écoulements se font vers le SE et l'NE-NW (Ure, Orne), l'écoulement général se fait vers l'Ouest.
21	Bloc de Lonlay l'Abbaye	Les failles bordières Nord et Sud sont d'axe N120. La faille de la Mayenne-Egrenne N150-160 qui recoupe le Massif sépare le massif en deux sous-blocs 21A : <u>Sous-bloc de St Bômer.</u> A noter un filon N160-170 doléritique recoupe le massif 21B : <u>Sous-bloc de Beauchêne</u>		On distingue 2 familles de failles principales N160-N20 et N80-100 et une direction secondaire N40-60		Caractère drainant des directions N20-40 et N140-180 ? L'écoulement principal se fait vers le SW (Varenne) et l'écoulement secondaire vers le SE (Egrenne)

ID	NOM	CARACTERISATION STRUCTURALE	Histogramme directionnel de répartition des objets structuraux	Commentaire	Histogramme directionnel des cours d'eau	Caractérisation hydrologique
22	Bloc de St Clair de Halouze	Faille Bordière N120, petit synclinal paléozoïque		On distingue 2 familles de failles principales N20-40 et N80-120 et une direction secondaire N160-180	1 Objet seulement N170	Les écoulements sont soit NE-SW ou orientés le long de l'axe de ce petit synclinal
23	Bloc des Synclinaux de Domfront-Mortain-La Ferrière	- Faille Bordière N120 à N140, synclinaux paléozoïques forment un « Y » - La faille de la Mayenne-Egrenne d'axe N150-160 décale horizontalement de 3 km (décrochement dextre) les formations		On distingue une famille principales N160-N20 et une direction secondaire N80-100		Caractère drainant des directions N40-60 et N140-180 ? Les écoulements se font dans deux directions principales SE et NW (Varenne et Egrenne), il existe une direction secondaire vers l'ESE qui longe le massif. Les écoulements sont dirigés vers les blocs 24 et 26
24	Bloc de Tessé-la-Madeleine	La limite ouest de ce bloc pincé, vient se refermer sur la faille de la Mayenne-Egrenne N150		Il existe une bonne distribution autour de 2 familles de failles principales N20-60 et N160-180 et une direction secondaire N100-120		Caractère drainant des directions N40-60 et N140-180 ? Les écoulements se font en direction du Sud-Sud-Est et dans une moindre mesure vers le SW vers le bloc 26.
25	Bloc de Carrouges St Martin des Landes	- faille bordière d'axe N110-N130, - à noter la faille de la Cance traverse les terrains et décale les formations au Nord, son axe est sub-méridien		Il existe une bonne distribution des directions qui s'organisent en une grande famille N160 à N60		Caractère drainant des directions N160 à N20 (méridien) ? Les écoulements principaux se font vers le NW (Udon) ou le SSE (Sarthon). Il existe une direction secondaire NE-SW
26	Bloc de la Mayenne	Bloc affecté par la faille de la Mayenne-Egrenne N150-170 et des fracturations secondaires N40-60		Il existe une répartition relativement homogène des distributions sauf pour N140-160		Caractère drainant des directions N0-20, N40-60 et N140-160 ? Les écoulements se font majoritairement selon une direction NE-SW (Mayenne et Varenne) et NW-SE

ID	NOM	CARACTERISATION STRUCTURALE	Histogramme directionnel de répartition des objets structuraux	Commentaire	Histogramme directionnel des cours d'eau	Caractérisation hydrologique
27	Bloc de Passais-Le Horps	La faille de la Varenne d'axe N150-160 affaisse le compartiment Nord-Ouest 27A : Sous-Bloc de Céaucé 27B : Sous-boc de St Fraimbault A noter filons doléritiques ou de quartz subméridiens recoupent le massif		Il existe une bonne distribution autour de 2 familles de failles principales N40-80 et N140-N20		Caractère drainant des directions N120-140 ? Les écoulements se font vers le SSE le long des failles de la Varenne et de la Mayenne
28	Bloc du Sarthon	- Ensemble affecté par les failles de Magny le Desert et St Samson d'axe N140 - Limite Nord sur la faille bordière N60. - Il existe probablement une faille méridienne à l'Est masquée par les sédiments mésozoïques		Il existe 3 directions principales qui s'expriment : N0-20, N40-60 et N100-120		Globalement les écoulements se font en direction de l'WNW (Sarthe) et du SSE
29	Bloc de la Sarthe	Pendage général vers le Nord-Est des formations mésozoïques. limité au Nord sur la faille de Laleu (N80-100) et la faille Bordière du massif d'Ecouves (N40-60)		Il existe une direction principale N160 à N20 et une secondaire N60-120		Caractère drainant des directions N0-40 et N120-160 ? L'écoulement principal se fait vers le SW (Sarthe) mais également vers l'ESE

Annexe 2

Analyse des chroniques piézométriques

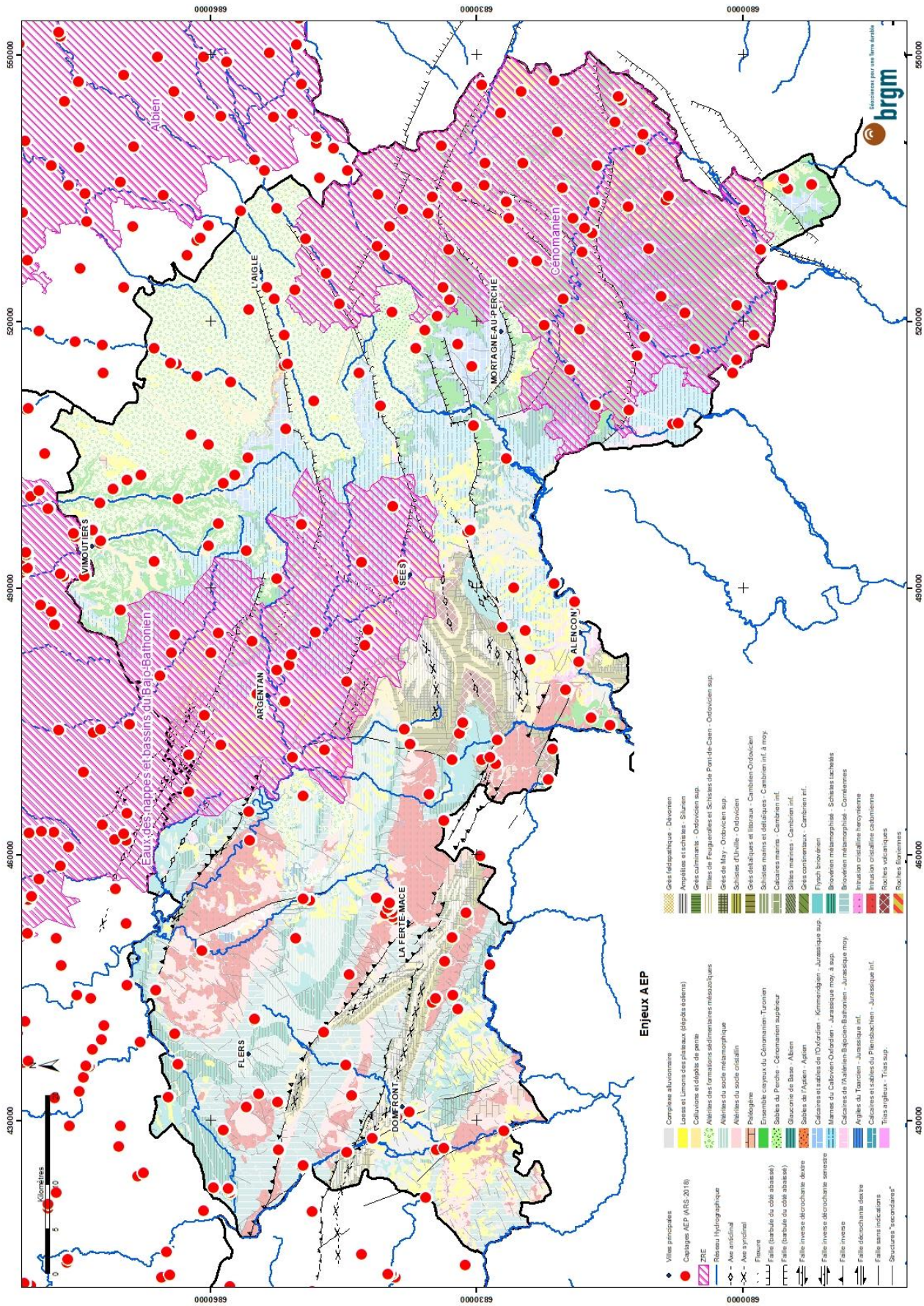
	Domaine Sédimentaire Bassin Parisien																				
Aquifere	Calcaires du Bajocien-Bathonien															Calcaires de l'Oxfordien					
Indentifiant national	**BSS000MQWY**	**BSS000REEQ**	**BSS000MQPT**	**BSS000RECH**	**BSS000RECJ**	**BSS000REGZ**	**BSS003UJOK**	**BSS003VETE**	**BSS003VETY**	**BSS003VFXE**	**BSS000TTBM**	**BSS000TTED**	**BSS000TTEU**	**BSS000VXKY**	**BSS003UJHQ**	**BSS000MQYX**	**BSS003UJFE**	**BSS003UJPY**	**BSS000VXYQ**	**BSS000VXYR**	**BSS000VYFB**	**BSS003XOOC**
Ancien code	01776X0023/P	02133X0008/S1-92	01768X0022/52	02131X0018/S4	02131X0019/S8	02135X0016/S4	BSS003UJOK/X	BSS003VETE/X	BSS003VETY/X	BSS003VFXE/X	02516X0071/P3-90	02516X0501/S2	02516X0516/PZ1	02872X0552/F	BSS003UJHQ/X	01778X0015/F	BSS003UJFE/X	BSS003UJPY/X	02883X0017/F3	02883X0018/FE2	02891X0007/PZ	BSS003XOOC/X
Commune ancienne	Omméel	Saint-Germain-de-Clairefeuille	Occagnes	Saint-Loyer-des-Champs	Sai	Mortrée	Almenêches	Juvigny-sur-Orne	Juvigny-sur-Orne	Sarceaux	Alençon	Le Chevain	Cerisé	Saint-Paterne	Saint-Paterne	Mardilly	Neuville-sur-Touques	La Chapelle-Souëf	Dame-Marie	Appenai-sous-Bellême	Dancé	Saint-Martin-du-Vieux-Bellême
Commune actuelle	Gouffern en Auge	Saint-Germain-de-Clairefeuille	Occagnes	Boischampré	Sai	Mortrée	Almenêches	Juvigny-sur-Orne	Juvigny-sur-Orne	Sarceaux	Alençon	Saint-Paterne-Le Chevain	Cerisé	Saint-Paterne-Le Chevain	Saint-Paterne-Le Chevain	Mardilly	Neuville-sur-Touques	La Chapelle-Souëf	Dame-Marie	Appenai-sous-Bellême	Perche en Nocé	Saint-Martin-du-Vieux-Bellême
Intercommunalité	Argentan Intercom	Argentan Intercom	Argentan Intercom	Argentan Intercom	Argentan Intercom	CC Sources de l'Orne	CC Sources de l'Orne	Argentan Intercom	Argentan Intercom	Argentan Intercom	CU Alençon	CU Alençon	CU Alençon	CU Alençon	CU Alençon	CC Vallées d'Auge et du Merlerault	CC Vallées d'Auge et du Merlerault	CC Collines du Perche Normand	CC Collines du Perche Normand	CC Collines du Perche Normand	CC Cœur du Perche	CC Collines du Perche Normand
Lieu-dit	La Taupinière	Le Colombier	Le Moulin de Brévaux	La Huarderie	Le Grand Clos	Château d'Ô	La Pelterie	Les Quatre Acres du Moulin	La Genterie	Le Marais	Courteille	Bel Air	La Cour	Les Deserts	Malèfre	La Nasserie	Les Côtières	La Petite Filochère	Grand-Fontaine	La Joffardière	La Touche	La Hégronnière
Nom	Puits de l'ancienne école (Ommeel)	A28	Les Luzernes	Tercey	Le Grand Clos	Le Parc	PZ1 St Hippolyte	PZ2 Juvigny 2 - 1994	PZ La Genterie - 1994	Le Marais	Stade	Le Chevain	PZ1 La Cour - 2008	St Paterne	Fe1 Step	La Nasserie	FE1 Les Cotières	PZ1 - La Petite Filochère	Grand Fontaine	La Joffardière	La Touche	PZ2 La Fontaine aux Ladres
Réseau	AFB Normandie	SDE61	SDE61	SDE61	SDE61	SDE61	SDE61	SDE61	SDE61	SDE61	SDE61	SDE61	SDE61	SDE61	SDE61	SDE61	SDE61	SDE61	SDE61	SDE61	SDE61	SDE61
Point BSH	Seine Normandie		Seine Normandie	Seine Normandie							Loire Bretagne											
Point DDT	AFB	SDE61	SDE61	SDE61		SDE61					SDE61					SDE61			SDE61	SDE61		
Point SDE	BRGM	Patrimonial	Patrimonial	Patrimonial	Complémentaire	Patrimonial	Zone d'alimentation	Zone d'alimentation	Zone d'alimentation	Complémentaire	Patrimonial	Complémentaire	Complémentaire	Complémentaire	Complémentaire	Patrimonial	Complémentaire	Complémentaire	Patrimonial	Patrimonial	Complémentaire	Complémentaire
Masse Eau Souterraine	FRHG308										FRGG079, FRGG120					FRHG213		FRGG124				
Code BD Lisa	139AC, 139AD, 139AF, 139AP																	135AA				
Masse d'eau superficielle	BV Dives	BV Orne									BV Sarthe					BV Touques		BV Huisne				
Sous Bloc Géologique	18 - Dives	20D - Forêt de Gouffern	20A - Plaine Argentan								29A - Plaine Alençon					17A- Pays d'Auge		3A- Nocé				3B- Meme
Capitivité nappe	Captive	Libre	Semi-captive	Semi-captive	Libre	Semi-captive	Captive	Semi-captive	Semi-captive	Semi-captive	Semi-captive	Semi-captive	Captive	Captive	Captive	Semi-captive	Semi-captive	Artésienne	Semi-captive	Semi-captive	Captive	Libre
Nature	Puits	Forage	Forage	Forage	Forage	Forage	Forage	Forage	Forage	Forage	Forage	Forage	Forage	Forage	Forage	Forage	Forage	Forage	Forage	Forage	Forage	Forage
Diam. int. tube tête (mm)	1000	170	262	100	100	46	178	113	113	115	125	181	184	160	205	178	195	193,7	168	273	168	115
Cote Sol (m NGF)	135,00	210,00	169,00	167,00	162,50	177,50	160,00	163,60	155,15	157,76	136,64	133,00	136,00	135,00	143,00	166,00	158,58	120,78	163,00	145,00	132,00	163,00
Profondeur (m)	37,5	57	48	48	61	40	70	50	50	40	22,5	19	32	42	53	23,5	24	107	61	34,5	80	34
Début de la chronique	01/03/2006	13/04/1995	15/12/1995	13/04/1995	06/04/1995	04/11/1999	08/04/2004	25/10/2005	22/02/1995	06/10/1999	15/09/1997	11/01/2008	07/11/2008	22/05/2010	30/10/2008	04/02/1999	14/04/2000	Pas de données non disponibles	15/09/1997	14/03/1996	15/08/2001	05/12/2002
Nbre d'années disponibles	14	25	25	25	24	21	15	14	24	20	23	11	11	9	11	21	19		23	24	18	17
Altitude moyenne de la nappe	127,73	194,23	163,06	159,52	157,21	166,99	157,28	155,74	154,76	158,52	130,69	131,26	131,28	129,95	131,53	163,79	156,22		152,22	135,56	118,91	148,22
Minimum	125,10	190,37	161,67	157,84	155,42	166,48	154,99	154,94	154,15	157,72	129,73	130,34	127,46	128,09	130,40	163,25	152,69		150,56	134,39	118,49	147,87
Date du minimum	31/12/2015	25/11/1997	28/10/1996	13/10/2009	08/12/2011	20/10/2003	12/10/2009	30/08/2017	24/09/2005	11/09/2006	15/10/2005	03/08/2010	31/08/2009	27/09/2010	02/11/2015	21/09/2010	17/09/2012		03/01/2006	06/02/1997	23/08/2001	23/10/2006
Maximum	131,15	198,89	164,34	162,12	161,15	167,64	158,86	156,88	155,76	159,20	132,77	132,76	132,98	132,10	132,67	165,27	157,49		154,25	137,68	119,50	148,71
Date du maximum	01/03/2006	01/01/2000	25/03/2001	30/03/2001	29/03/2001	06/01/2001	01/04/2014	13/02/2013	07/01/2001	25/03/2001	06/01/2001	14/06/2018	26/03/2018	31/12/2012	23/12/2012	29/03/2001	25/03/2001		29/03/2001	25/03/2001	07/04/2011	03/01/2003
Mois du max mensuel (fin recharge)	Février	Février	Mars	Mars	Mars	Février	Février	Février / Mars	Janvier	Décembre	Janvier	Janvier / Mars	Décembre	Mars	Février	Mars	Février		Mars	Mars	Février / Mars	Février / Mai
Mois du min mensuel (fin vidange)	Septembre	Novembre	Octobre	Septembre	Novembre	Octobre	Juillet / Septembre	Septembre	Septembre	Septembre	Septembre / Novembre	Octobre	Septembre	Septembre	Octobre	Octobre	Septembre		Décembre	Décembre	Juillet	Novembre
Amplitude maximale (Max - Min)	6,05	8,52	2,67	4,28	5,73	1,16	3,87	1,94	1,61	1,48	3,04	2,42	5,52	4,01	2,27	2,02	4,80		3,69	3,29	1,01	0,84
Analyse statistique	Chronique trop courte pour réaliser un périodogramme (<15ans)	Analyse réalisable	Analyse réalisable	Analyse réalisable mais test d'autocorrélation non satisfaisant	Analyse réalisable	Analyse réalisable	Analyse réalisable	Chronique trop courte pour réaliser un périodogramme (<15ans)	Analyse réalisable	Analyse réalisable	Analyse réalisable	Chronique trop courte pour réaliser un périodogramme (<15ans)	Chronique trop courte pour réaliser un périodogramme (<15ans)	Chronique trop courte pour toute analyse (<10ans)	Chronique trop courte pour réaliser un périodogramme (<15ans)	Analyse réalisable mais test d'autocorrélation non satisfaisant	Analyse réalisable		Analyse réalisable	Analyse réalisable	Analyse réalisable mais test d'autocorrélation non satisfaisant	Analyse réalisable
Tendance	Pas de tendance significative détectée	Tendance à la hausse détectée pour les valeurs maximales mensuelles (+6,1 cm/an)	Pas de tendance significative détectée													Pas de tendance significative détectée			Pas de tendance significative détectée			
Comportement Hydrodynamique : Simple Cycle, Double Cycle long prépondérant, Double Cycle court prépondérant	Chronique trop courte pour être caractériser	Cycle annuel fort - Cycle pluriannuel dominant compris entre 6 et 7 ans de puissance modérée	Cycle annuel fort - Cycle pluriannuel dominant compris entre 6 et 7 ans de puissance modérée	Cycle annuel fort - Cycle pluriannuel dominant compris entre 6 et 7 ans de puissance modérée	Cycle annuel fort - Cycle pluriannuel dominant compris entre 6 et 7 ans de puissance modérée	Cycle annuel fort - Cycle pluriannuel dominant compris entre 6 et 7 ans de puissance modérée	Cycle annuel fort - Cycle pluriannuel dominant inférieur à 6 ans de puissance forte	Chronique trop courte pour être caractériser	Cycle annuel fort - Cycle pluriannuel dominant compris entre 6 et 7 ans de puissance faible	Cycle annuel fort - Cycle pluriannuel dominant compris entre 6 et 7 ans de puissance faible	Cycle annuel fort - Cycle pluriannuel dominant compris entre 6 et 7 ans de puissance modérée	Chronique trop courte pour être caractériser	Chronique trop courte pour être caractériser	Chronique trop courte pour être caractériser	Chronique trop courte pour être caractériser	Cycle annuel fort - Cycle pluriannuel dominant compris entre 6 et 7 ans de puissance faible	Cycle pluriannuel dominant compris entre 6 et 7 ans	Pas de données non disponibles	Cycle annuel fort - Cycle pluriannuel dominant supérieur à 10 ans de puissance forte	Cycle annuel fort - Cycle pluriannuel dominant supérieur à 10 ans de puissance forte	Cycle annuel fort - Cycle pluriannuel dominant inférieur à 6 ans de puissance faible	Cycle annuel fort - Cycle pluriannuel dominant inférieur à 6 ans de puissance modérée
Commentaires	Chronique trop courte pour réaliser un périodogramme (<15ans)	Pas d'autres cycles visibles avant 12 ans de cyclicité - Chronique plutôt longue mettant bien en évidence les cycles pluriannuels, rendant le test de tendance plutôt correcte	Pas d'autres cycles visibles avant 12 ans de cyclicité	Coefficient d'autocorrélation important d'où une inertie de la nappe forte - Autre cycle de plus de 12 ans possible mais chronique trop courte	Pas d'autres cycles visibles avant 12 ans de cyclicité	Autre cycle de plus de 10 ans possible mais chronique trop courte	Chronique trop courte pour visualiser des cycles pluriannuels de plus de 8 ans	Chronique trop courte pour réaliser un périodogramme (<15ans)	Pas d'autres cycles visibles avant 12 ans de cyclicité	Chronique trop courte pour visualiser des cycles pluriannuels de plus de 10 ans	Dernier cycle observable en bordure de graphique	Chronique trop courte pour réaliser un périodogramme (<15ans)	Chronique trop courte pour réaliser un périodogramme (<15ans)	Chronique trop courte pour réaliser un périodogramme (<15ans)	Chronique trop courte pour réaliser un périodogramme (<15ans)	Autre cycle de plus de 10 ans possible mais chronique trop courte	Le périodogramme mensuel ne peut être réalisé car il y a un trop grand nombre de données manquantes - Chronique trop courte pour visualiser des cycles pluriannuels de plus de 10 ans	Pas de données non disponibles	Chronique trop courte pour visualiser des cycles pluriannuels de plus de 12 ans (dernier cycle visible en bordure du graphique)	Chronique trop courte pour visualiser des cycles pluriannuels de plus de 12 ans	Coefficient d'autocorrélation important d'où une inertie de la nappe forte - Chronique trop courte pour visualiser des cycles pluriannuels de plus de 8 ans	Autre cycle de plus de 8 ans possible mais chronique trop courte
Karst																	Karst possible	Karst possible ?			Karst possible ?	
Autres Remarques																						
Influence cours d'eau, si < 100 m	Probable		Possible		Possible							Possible	Possible				Oui	Possible				Possible
UH	Dives	Orne amont	Orne amont	Orne amont	Orne amont	Orne amont	Orne amont	Orne amont	Orne amont	Orne amont	Sarthe amont	Sarthe amont	Sarthe amont	Sarthe amont	Sarthe amont	Touques	Touques	Huisne médian 1	Huisne médian 1	Husine médian 1	Husine médian 1	Huisne médian 1
BVME	La Dives	L'Ure	L'Houay	L'Orne	L'Ure	La Thouane	L'Orne	L'Orne	L'Orne	La Baize	La Sarthe	La Sarthe	La Sarthe	La Sarthe	La Sarthe	La Touques	La Touques	La Même	La Même	La Même	L'Erre	La Même
Cours d'eau	La Dives	La Dieuge	L'Houay	L'Orne	L'Ure	La Thouane	Le Don	L'Orne	L'Orne	La Baize	La Sarthe	La Sarthe	La Sarthe	La Sarthe	La Sarthe	La Touques	La Touques	La Coudre	seau de Petite-Font	Source de la Coudre	La Chèvre	La Même
Distance (m)	70	1 170	135	425	125	400	225	240	250	705	350	160	180	2 540	1 600	270	30	120	470	460	430	185
Plateau, versant/vallée sèche, vallée humide	Vallée humide	Versant vallée humide	Vallée humide	Versant	Versant vallée humide	Vallée humide	Vallée humide	Vallée humide	Vallée humide	Plaine	Versant	Vallée humide	Versant vallée humide	Vallée humide	Vallée humide	Vallée humide	Vallée humide	Vallée Humide	versant vallée sèche	versant vallée sèche	versant-vallée humide	versant vallée humide
Situation relative	Amont	Amont	Amont	Amont	Amont	Amont	Amont	Amont	Amont	Amont	Amont	Amont	Amont	Aval	Amont	Aval	Aval	Aval	Amont	Amont	Amont	Amont
Pression prélèvement, influence pompage si < 200 m									Probable				Probable									Probable
Captage AEP (ESO)	Le Meillon	La Frestinière	Zone Nord	Port d'Aunou F3	rme du Bout de Bas	Saint-Hippolythe	Saint-Hippolythe	Le Pré Clos F2	La Genterie F1	Vingt Acres	Courteille	Courteille	La Cour	La Cour	La Cour	Le Blanc Buisson	Le Blanc Buisson	Les Feugerêts	La Renardière	Les Feugerêts	Le Gravier	a Fontaine aux Ladre
Secteur	PASM	PASM	VODT	VODT	VODT	PASM	PASM	VODT	VODT	VODT	PASM	PASM	PASM	PASM	PASM	PASM	PASM	Perche	Perche	Perche	Perche	Perche
Collectivité	Le Meillon	Région du Merlerault	Région d'Argentan	Région d'Argentan	Région d'Argentan	CC Sources de l'Orne	CC Sources de l'Orne	Vallée de l'Orne	Région d'Argentan	Région d'Argentan	CU Alençon	CU Alençon	CU Alençon	CU Alençon	CU Alençon	Région de Gacé	Région de Gacé	Perche Sud	Perche Sud	Perche Sud	Nocé	Perche Sud
Distance (m)	11 800	975	4 450	2 600	2 220	6 070	780	465	185	1 580	300	400	200	3 170	2 060	500	1 430	2 800	850	1 460	530	120

Domaine Sédimentaire Bassin Parisien													Socle Armoricain											
Craie du Cénomanien							Sables du Perche du Cénomanien						Grès du Cambrien		Schistes du Briovérien						Cornéennes			
BSS000REWL	BSS000RFGE	BSS000TTKJ	BSS000TTNK	BSS000TTXC	BSS000TTXH	BSS000VYHZ	BSS000TTJF	BSS000TTPJ	BSS000TTQN	BSS000RFVG	BSS002PTKW	BSS000TSFY	BSS003VFXY	BSS000RDSC	BSS003UJUO	BSS003UKJE	BSS003UKJY	BSS003VEUS	BSS003VEVM	BSS000MPTZ	BSS003UJSA	BSS003UKQC	BSS000RCVC	BSS000TRUX
02144X0005/S1	02148X0036/FE1	02523X0029/P	02527X0009/S1	02535X0012/S1	02535X0018/FE1-93	02895X0004/FE1-92	02523X0002/S2	02531X0001/F	02531X0029/PZ	02155X1040/F	BSS002PTKW/SR1	02503X0011/FO	BSS003VFXY/X	02125X0049/F	BSS003UJUO/X	BSS003UKJE/X	BSS003UKJY/X	BSS003VEUS/X	BSS003VEVM/X	01756X0008/S1	BSS003UJSA/X	BSS003UKQC/X	02108X0020/SR2-4	02492X0007/F
Saint-Sulpice-sur-Risle	Randonnai	Bubertré	Mauves-sur-Huisne	Rémalard	Rémalard	Saint-Hilaire-sur-Erre	Villiers-sous-Mortagne	Longny-au-Perche	Moulicent	Saint-Maurice-lès-Charencey	La Lande-sur-Eure	Ciral	Saint-Ellier-les-Bois	Le Grais	Le Grais	Briouze	Briouze	Briouze	Briouze	Saint-Pierre-du-Regard	Flers	La-Selle-la-Forge	Beauchêne	Ceaucé
Saint-Sulpice-sur-Risle	Tourouvre au Perche	Tourouvre au Perche	Mauves-sur-Huisne	Rémalard en Perche	Rémalard en Perche	Saint-Hilaire-sur-Erre	Villiers-sous-Mortagne	Longny Les Villages	Longny Les Villages	Charencey	Longny Les Villages	Ciral	Saint-Ellier-les-Bois	Le Grais	Le Grais	Briouze	Briouze	Briouze	Briouze	Saint-Pierre-du-Regard	Flers	La-Selle-la-Forge	Tinchebray Bocage	Ceaucé
CC Pays de l'Aigle	CC Hauts du Perche	CC Hauts du Perche	CC Pays de Mortagne au Perche	CC Cœur du Perche	CC Cœur du Perche	CC Collines du Perche Normand	CC Pays de Moragne au Perche	CC Hauts du Perche	CC Hauts du Perche	CC Hauts du Perche	CC Hauts du Perche	CU Alençon	CU Alençon	Flers Agglo	Flers Agglo	Flers Agglo	Flers Agglo	Flers Agglo	Flers Agglo	Flers Agglo	Flers Agglo	Flers Agglo	Flers Agglo	CC Andaines - Passais
Le Souchey	Belle Perche	Marolles	La Gaulardière	Vaujours	Le Grand Rhay	Le Pont d'Erre	Le Moulin Rouel	La Marchandière	Fossard	La Bourgeoiserie	La Moinerie	La Boullière	La Guitardière	Les Noës	La Briancière	Marais du Grand Hazé	Marais du Grand Hazé	Le Grand Hazé	La Longrais	Les Bruyères	Les Clos	La Forge	La Noë Verte	La Largerie
Puits du Château du Souchey (l'Aigle)	Belle Perche	La Couvendière - Marolles	S1 La Gaulardière	Le Verger	Le Grand Rhay	FE1-92 Le Pont d'Erre	Le Verger	La Marchandière	Le Gué Hersant	La bourgoiserie	SR1 La Moinerie	La Boullière	PZ Champs l' Oiseau	La Martinière	FE3-1 La Briancière	PZ2 Le Marais du Grand Hazé - 2006	PZ3 Marais du Grand Hazé - 2006	Ru Source Philippe	PZ La Longrais	Les Bruyères	PZ1 La Forge	PZ2 La Forge - 2006	La Noë verte	La Largerie
AFB Normandie	SDE61	SDE61	SDE61	SDE61	SDE61	SDE61	AFB Normandie	AFB Normandie	SDE61	SDE61	SDE61	SDE61	SDE61	SDE61	SDE61	SDE61	SDE61	SDE61	SDE61	SDE61	SDE61	SDE61	SDE61	SDE61
Seine Normandie		Loire Bretagne	Loire Bretagne			Loire Bretagne			Loire Bretagne	Loire Bretagne														
AFB		SDE61	SDE61		SDE61	SDE61	AFB	AFB	SDE61	SDE61		SDE61								SDE61				
BRGM	Complémentaire	Patrimonial	Patrimonial	Patrimonial	Complémentaire	Patrimonial	BRGM	BRGM	Patrimonial	Complémentaire	Complémentaire	Patrimonial	Complémentaire	Complémentaire	Complémentaire	Complémentaire	Complémentaire	Complémentaire	Complémentaire	Patrimonial	Complémentaire	Complémentaire	Complémentaire	Complémentaire
FRHG212		FRGG081					FRGG081			FRHG211		FRGG018	FRGG019	FRHG502						FRHG502			FRGG018	
121 AS, 121 AW, 123 BA, 123 BS, 123AW	121 et 123 BS	121 et 123 BA					123AC					179AA	177AA	163AC						163AE			179AC	179AA
BV Risle et Iton	BV Avre	BV Huisne					BV Huisne			BV Avre	BV Eure	BV Mayenne	BV Sarthe	BV Rouvre						BV Noireau			BV Varenne	BV Mayenne
7A-L'Aigle	5D - Trappe	5A- Mortagne	4D- Belleme	4A- Longny		3A- Nocé	4B - Belleme	4A- Longny		5D - Trappe		16B- Ferté massé		11A- Flers						9A- Athis Ouest	11A- Flers		21A -St Bomer	26- Mayenne
Libre	Semi-captive	Libre	Semi-captive	Libre	Semi-captive	Semi-captive	Libre	Libre	Libre	Libre	Libre	Semi-captif	Semi-captif	Semi-captif	Semi-captif	Semi-captif	Semi-captif	Semi-captif	Semi-captif	Semi-captif	Semi-captif	Semi-captif	Semi-captif	Semi-captif
Puits	Forage	Puits	Forage	Forage	Forage	Forage	Forage	Puits	Forage	Forage	Forage	Forage	Forage	Forage	Forage	Forage	Forage	Forage	Forage	Forage	Forage	Forage	Forage	Forage
	273	1400	113	410	178	178	157	800	150	165	115	178	166	168	355	168	168	311	168	113	168	168	113	115
230,00	255,00	240,00	148,00	171,00	123,00	97,50	202,00	227,00	216,00	230,00	266,00	340,00	229,38	229,00	221,65	204,70	204,67	205,47	205,91	205,00	221,91	230,50	200,00	176,00
29,8	85	13,1	35	90	40	31,5	35	70	40	67	42	68	100	103	121	40	16	80	100	80	85	100	120	127
31/01/1974	05/03/2013	15/04/1995	03/11/1998	04/05/1999	14/05/1998	31/03/1998	27/02/1987	26/01/1987	06/04/1999	25/03/1999	28/04/2016	20/08/1996	25/08/2000	02/09/2010	09/12/2010	13/12/2006	13/12/2006	04/02/2005	10/05/2006	21/06/1995	25/05/2007	25/05/2007	15/10/2011	09/08/2012
46	6	25	22	21	22	22	33	33	21	21	3	24	19	9	9	13	13	14	13	25	12	12	8	8
207,49	241,30	230,64	143,09	140,13	122,60	99,18	194,46	167,24	210,00	227,25	243,41	325,96	218,61	223,00	216,47	203,70	203,72	205,11	206,03	196,25	220,56	227,23	172,84	172,01
202,41	241,10	229,50	141,78	139,07	122,12	98,56	193,14	166,60	207,14	226,00	243,16	324,06	214,77	221,06	214,56	201,92	201,94	203,77	204,61	194,39	217,44	225,16	169,80	168,56
22/11/2017	19/12/2017	09/11/2010	07/12/1998	14/09/2004	24/07/2006	16/07/2009	03/12/2011	06/11/2012	10/09/1999	28/05/2011	12/12/2017	11/10/2001	17/01/2013	23/09/2010	28/10/2017	29/09/2010	30/09/2010	29/09/2010	23/09/2010	01/11/1996	29/10/2011	01/10/2010	26/03/2012	26/11/2017
226,62	241,57	232,51	145,05	141,65	123,99	100,19	196,77	172,92	210,73	228,91	243,65	328,36	221,18	224,16	218,27	204,93	204,49	206,79	206,92	199,59	222,73	228,87	173,64	174,57
11/04/2001	30/01/2015	29/03/2001	23/03/2001	04/04/2001	23/03/2001	20/03/2002	14/02/2001	29/02/1988	02/06/2016	26/03/2001	02/03/2018	11/02/2013	08/11/2000	15/02/2014	11/02/2013	01/04/2016	02/02/2014	03/02/2014	23/12/2012	13/11/2000	16/02/2014	21/12/2012	05/01/2018	23/12/2012
Avril	Mars	Mars	Mars	Avril	Mars	Février	Mars	Décembre	Mars	Février / Mars	Avril	Février	Janvier	Février	Février	Janvier / Février / Mars / Décembre	Février	Février	Janvier	Février	Février	Février	Décembre	Février
Décembre	Octobre / Novembre	Novembre	Novembre / Décembre	Novembre	Septembre	Octobre	Novembre	Janvier	Septembre	Aout / Septembre	Décembre	Octobre / Novembre	Octobre	Septembre / Octobre	Octobre / Novembre	Octobre	Octobre	Octobre	Septembre	Octobre	Octobre	Octobre	Juillet / Septembre	Novembre
24,21	0,47	3,01	3,27	2,58	1,87	1,63	3,63	6,32	3,59	2,91	0,49	4,30	6,41	3,1	3,71	3,01	2,55	3,02	2,31	5,20	5,29	3,71	3,84	6,01
Analyse réalisable	Chronique trop courte pour toute analyse (<10ans)	Analyse réalisable	Analyse réalisable mais test d'autocorrélation non satisfaisant	Analyse réalisable	Analyse réalisable	Analyse réalisable mais test d'autocorrélation non satisfaisant	Analyse réalisable	Analyse réalisable mais test d'autocorrélation non satisfaisant	Analyse réalisable mais test d'autocorrélation non satisfaisant	Analyse réalisable	Chronique trop courte pour toute analyse (<10ans)	Analyse réalisable	Analyse réalisable	Chronique trop courte pour toute analyse (<10ans)	Chronique trop courte pour toute analyse (<10ans)	Chronique trop courte pour réaliser un périodogramme (<15ans)	Chronique trop courte pour réaliser un périodogramme (<15ans)	Chronique trop courte pour réaliser un périodogramme (<15ans)	Chronique trop courte pour réaliser un périodogramme (<15ans)	Analyse réalisable	Chronique trop courte pour réaliser un périodogramme (<15ans)	Chronique trop courte pour réaliser un périodogramme (<15ans)	Chronique trop courte pour toute analyse (<10ans)	Chronique trop courte pour toute analyse (<10ans)
Pas de tendance significative détectée							Pas de tendance significative détectée		Tendance à la hausse détectée pour les valeurs minimales mensuelles (+6,6 cm/an)	Pas de tendance significative détectée		Pas de tendance significative détectée		Pas de tendance significative détectée				Tendance à la hausse détectée pour les valeurs moyennes et maximales mensuelles (respectivement	Pas de tendance significative détectée	Pas de tendance significative détectée					
Cycle annuel fort - Cycle pluriannuel dominant compris entre 6 et 7 ans de puissance forte	Chronique trop courte pour être caractériser	Cycle annuel fort - Cycle pluriannuel dominant compris entre 6 et 7 ans de puissance modérée	Cycle annuel fort - Cycle pluriannuel dominant compris entre 6 et 7 ans de puissance très forte	Cycle annuel fort - Cycle pluriannuel dominant compris entre 6 et 7 ans de puissance modérée	Cycle annuel fort - Cycle pluriannuel dominant compris entre 6 et 7 ans de puissance modérée	Cycle annuel fort - Cycle pluriannuel dominant compris entre 6 et 7 ans de puissance modérée	Cycle annuel fort - Cycle pluriannuel dominant compris entre 6 et 7 ans de puissance forte	Cycle annuel faible - Cycle pluriannuel dominant supérieur à 10 ans de puissance forte	Cycle annuel faible - Cycle pluriannuel dominant inférieur à 6 ans de puissance forte	Cycle annuel fort - Cycle pluriannuel dominant compris entre 6 et 7 ans de puissance faible	Chronique trop courte pour être caractériser	Cycle annuel fort - Cycle pluriannuel dominant compris entre 6 et 7 ans de puissance faible	Cycle annuel fort - Cycle pluriannuel dominant compris entre 6 et 7 ans de puissance faible	Chronique trop courte pour être caractériser	Chronique trop courte pour être caractériser	Chronique trop courte pour être caractériser	Chronique trop courte pour être caractériser	Chronique trop courte pour être caractériser	Chronique trop courte pour être caractériser	Cycle annuel fort - Cycle pluriannuel dominant supérieur à 7 ans de puissance faible	Chronique trop courte pour être caractériser	Chronique trop courte pour être caractériser	Chronique trop courte pour être caractériser	Chronique trop courte pour être caractériser
Chronique prise à partir de 1994 (trou de données manquantes avant) - Chronique trop courte pour visualiser des cycles pluriannuels de plus de 13 ans	Chronique trop courte pour réaliser un périodogramme (<15ans)	Autre cycle de plus de 12 ans possible mais chronique trop courte	Coefficient d'autocorrélation important d'où une inertie de la nappe forte - Autre cycle de plus de 10 ans possible mais chronique trop courte	Autre cycle de plus de 10 ans possible mais chronique trop courte	Autre cycle de plus de 10 ans possible mais chronique trop courte	Autre cycle de plus de 10 ans possible mais chronique trop courte	Chronique trop courte pour visualiser des cycles pluriannuels de plus de 15 ans	Chronique trop courte pour visualiser des cycles pluriannuels de plus de 16 ans	Coefficient d'autocorrélation important d'où une inertie de la nappe forte - Autre cycle de plus de 10 ans possible mais chronique trop courte - Mise en évidence des cycles pluriannuels peu importante, rendant le test de tendance peu fiable	Chronique trop courte pour visualiser des cycles pluriannuels de plus de 10 ans	Chronique trop courte pour réaliser un périodogramme (<15ans)	Chronique trop courte pour visualiser des cycles pluriannuels de plus de 12 ans	Chronique trop courte pour visualiser des cycles pluriannuels de plus de 10 ans	Chronique trop courte pour réaliser un périodogramme (<15ans)	Chronique trop courte pour réaliser un périodogramme (<15ans)	Chronique trop courte pour réaliser un périodogramme (<15ans)	Chronique trop courte pour réaliser un périodogramme (<15ans)	Chronique trop courte pour réaliser un périodogramme (<15ans) - Pas de mise en évidence des cycles pluriannuels rendant le test de tendance peu fiable	Chronique trop courte pour réaliser un périodogramme (<15ans)	Chronique trop courte pour visualiser des cycles pluriannuels de plus de 12 ans	Chronique trop courte pour réaliser un périodogramme (<15ans)	Chronique trop courte pour réaliser un périodogramme (<15ans)	Chronique trop courte pour réaliser un périodogramme (<15ans)	Chronique trop courte pour réaliser un périodogramme (<15ans)
karst probable	karst probable								Faille	karst probable														
									zone faillée/cours d'eau								réseau de drainage ? limie débordement							
			Possible		Possible	Oui	Possible		Possible				Possible		Possible	Possible	Possible	Probable			Probable	Probable	Oui	
Risle	Avre	Huisne ornais	Huisne ornais	Huisne ornais	Huisne ornais	Huisne médian 1	Huisne ornais	Huisne ornais	Huisne ornais	Avre	Eure amont	Mayenne amont	Sarthe amont	Orne moyenne	Orne moyenne	Orne moyenne	Orne moyenne	Orne moyenne	Orne moyenne	Orne moyenne	Orne moyenne	Orne moyenne	Varenne	Mayenne amont
La Risle	L'Avre	La Jambée	La Chippe	L'Huisne	L'Huisne	L'Erre	La Chippe	La Jambée	La Jambée	Saint-Maurice	La Lande	Le Tilleul	Le Sarthon	La Rouvre	La Rouvre	La Rouvre	La Rouvre	La Rouvre	La Rouvre	Le Noireau	La Vère	La Vère	L'Egrenne	Ruisseau d'Ortel
La Risle	L'Avre	La Commeauche	La Chippe	La Boiscorde	L'Huisne	L'Erre	La Gironde	La Jambée	Le Marchainville	La Poterie	La Thibaudière	Les Fortinières	Le Sarthon	Le Moulinet	Le Moulinet	Le Val du Breuil	Le Val du Breuil	La Source Philippe	Marais du Grand Hazé	La Vère	La Blanche Lande	La Blanche Lande	Fontaine des Forget	La Gânerie
1 140	310	300	120	650	200	12	150	385	120	290	600	315	105	280	175	190	200	60	10	430	95	70	20	300
Plateau	Versant Vallée Humide	Versant vallée humide	Vallée humide	Versant	Vallée humide	Vallée humide	Vallée humide	Versant vallée humide	Versant vallée humide	Versant vallée humide	Plateau	Versant	Vallée humide	plaine, versant	plaine, versant	Vallée humide	Vallée humide	Vallée humide	Plaine	Vallée humide	Vallée humide	Vallée humide	Vallée humide	Vallée humide
Aval	Amont	Amont	Amont	Aval	Amont	Amont	Amont	Aval	Aval	Amont	Amont	Amont	Aval	Aval	Aval	Aval	Aval	Amont	Amont	Amont	Amont	Amont	Amont	Amont
										Oui											Probable		Probable	
Les Vautioux	La Maroyère	La Couvendière	La Guérollière	La Lunandière	Dorceau	Les Costiers	La Guerollière	Le Pré Beauvais	La Butte aux Frileux	La Bourgeoiserie	La Repesserie	Le Grand Germancé	Le Pré Chauvron	Bois du Grais	Bois du Grais	Ru du Val de Breuil	Ru du Val de Breuil	Ru du Val de Breuil	Ru du Val de Breuil	L'Être	La Forge	La Forge	La Noë Verte	La Chiennerie
Est Ornais	Perche	Perche	Perche	Perche	Perche	Perche	Perche	Perche	Perche	Perche	Perche	PASM	PASM	Bocage	Bocage	Bocage	Bocage	Bocage	Bocage	Bocage	Bocage	Bocage	Bocage	Bocage
Percher	Haut Perche	Haut Perche	Haut Perche	Nocé	Nocé	Bassin de l'Huisne	Haut Perche	on de Longny-au-Pe	Marchainville	Marchainville	s-St-l'Homer - Les M	Val d'Ecouves	Val d'Ecouves	Fiers Agglo	Fiers Agglo	Fiers Agglo	Fiers Agglo	Fiers Agglo	Fiers Agglo	Fiers Agglo	Fiers Agglo	Fiers Agglo	Fiers Agglo	Andaine
4 150	1 290	400	1 450	1 110	4 200	2 520	7 220	2 870	2 240	15	8 850	1 660	630	2 240	2 960	400	420	1 750	1 660	420	100	335	135	9 340

OUVRAGES ANALYSES								ANALYSE STATISTIQUE					ANALYSE DES CYCLES						
Code BSS	Ancien Code BSS	Nom	X (L93)	Y (L93)	Aquifere	Réseau	Début de la chronique	Nombre d'années utilisables	Test de tendance (seuil de risque 5%)	Test d'homogénéité (seuil de risque 5%)	Test d'autocorrélation (seuil de risque 5%)	Commentaires	Cycle anuel observé (en mois)	Puissance spectrale du cycle annuel	Premier cycle pluriannuel observé (en années)	Puissance spectrale du 1er cycle pluriannuel	Deuxième cycle pluriannuel observé (en années)	Puissance spectrale du 2ème cycle pluriannuel	Commentaires
BSS003XOOC	BSS003XOOC	PZ2 La Fontaine aux Ladres	518440	6811134	Calcaires de l'Oxfordien	SDE61	05/12/2002	17	0,617	0,916	0,125	Analyse réalisable	12,0	32,1	5,3	4,0	2,0	1,1	Autre cycle de plus de 8 ans possible mais chronique trop courte
BSS000VYFB	02891X0007	La Touche	533701	6808779	Calcaires de l'Oxfordien	SDE61	15/08/2001	18	0,000	0,273	0,841	Non réalisable - Test de tendance et d'autocorrélation non satisfaisant	12,0	7,8	5,3	0,6	8,4	0,9	Chronique trop courte pour visualiser des cycles pluriannuels de plus de 8 ans
BSS003UJFE	BSS003UJFE	FE1 Les Cotières	500304	6865100	Calcaires de l'Oxfordien	SDE61	14/04/2000	19	0,443	0,752	0,185	Analyse réalisable	Périogramme non possible - Trop de données manquantes		6,4	4,0	3,0	1,2	Chronique trop courte pour visualiser des cycles pluriannuels de plus de 10 ans
BSS000MQYX	01778X0015	La Nasserie	499687	6863913	Calcaires de l'Oxfordien	SDE61	04/02/1999	21	0,147	0,193	0,608	Analyse possible - Mais test d'autocorrélation limite	12,1	47,3	6,2	3,2	0,0	0,0	Autre cycle de plus de 10 ans possible mais chronique trop courte
BSS000VXYQ	02883X0017	Grand Fontaine	522010	6809175	Calcaires de l'Oxfordien	SDE61	15/09/1997	23	0,874	0,880	0,542	Analyse réalisable	12,1	16,9	6,5	3,9	12,2	5,1	Chronique trop courte pour visualiser des cycles pluriannuels de plus de 12 ans (dernier cycle visible en bordure du graphique)
BSS000VXYR	02883X0018	La Joffardière	520677	6808006	Calcaires de l'Oxfordien	SDE61	14/03/1996	24	0,487	0,488	0,501	Analyse réalisable	12,1	24,0	6,8	4,3	11,8	5,1	Chronique trop courte pour visualiser des cycles pluriannuels de plus de 12 ans
BSS000VXKY	02872X0552	St Paterne	487837	6815958	Calcaires du Bajocien-Bathonien	SDE61	22/05/2010	9	/	/	/	Non réalisable - Chronique trop courte	/	/	/	/	/	/	Chronique trop courte pour réaliser une analyse des cycles annuels et pluriannuels
BSS000TTED	02516X0501	Le Chevain	486820	6818739	Calcaires du Bajocien-Bathonien	SDE61	11/01/2008	11	0,938	1,000	-0,076	Analyse réalisable	/	/	/	/	/	/	Chronique trop courte pour réaliser une analyse des cycles annuels et pluriannuels
BSS000TTEU	02516X0516	PZ1 La Cour - 2008	488394	6819258	Calcaires du Bajocien-Bathonien	SDE61	07/11/2008	11	0,072	0,120	-0,088	Analyse réalisable	/	/	/	/	/	/	Chronique trop courte pour réaliser une analyse des cycles annuels et pluriannuels
BSS003UJHQ	BSS003UJHQ	Fe1 Step	487692	6817165	Calcaires du Bajocien-Bathonien	SDE61	30/10/2008	11	0,482	0,714	0,062	Analyse réalisable	/	/	/	/	/	/	Chronique trop courte pour réaliser une analyse des cycles annuels et pluriannuels
BSS000MQWY	01776X0023	Ommeel	490343	6859775	Calcaires du Bajocien-Bathonien	AFB Normandie	01/03/2006	14	0,193	0,180	0,159	Analyse réalisable	/	/	/	/	/	/	Chronique trop courte pour réaliser une analyse des cycles annuels et pluriannuels
BSS003VETE	BSS003VETE	PZ2 Juvigny 2 - 1994	481131	6851098	Calcaires du Bajocien-Bathonien	SDE61	25/10/2005	14	0,582	0,720	0,058	Analyse réalisable	/	/	/	/	/	/	Chronique trop courte pour réaliser une analyse des cycles annuels et pluriannuels
BSS003UJOK	BSS003UJOK	PZ1 St Hippolyte	485512	6847518	Calcaires du Bajocien-Bathonien	SDE61	08/04/2004	15	0,092	0,072	0,301	Analyse réalisable	12,1	13,9	5,8	3,4	3,6	1,3	Chronique trop courte pour visualiser des cycles pluriannuels de plus de 8 ans
BSS003VFXE	BSS003VFXE	Le Marais	477589	6850069	Calcaires du Bajocien-Bathonien	SDE61	06/10/1999	20	0,806	0,683	0,332	Analyse réalisable	12,0	51,3	6,3	4,1	3,6	1,5	Chronique trop courte pour visualiser des cycles pluriannuels de plus de 10 ans
BSS000REGZ	02135X0016	Le Parc	485204	6842088	Calcaires du Bajocien-Bathonien	SDE61	04/11/1999	21	0,466	0,258	0,545	Analyse réalisable	12,1	27,7	6,2	3,4	0,0	0,0	Autre cycle de plus de 10 ans possible mais chronique trop courte
BSS000TTBM	02516X0071	Stade	487034	6819373	Calcaires du Bajocien-Bathonien	SDE61	15/09/1997	23	0,979	1,000	0,380	Analyse réalisable	12,1	35,9	6,5	6,0	12,2	2,9	Dernier cycle observable en bordure de graphique
BSS000RECJ	02131X0019	Le Grand Clos	482942	6853122	Calcaires du Bajocien-Bathonien	SDE61	06/04/1995	24	0,503	0,507	0,403	Analyse réalisable	12,0	27,7	6,8	3,2	4,2	1,9	Pas d'autres cycles visibles avant 12 ans de cyclicité
BSS003VETY	BSS003VETY	PZ La Genterie - 1994	479772	6852021	Calcaires du Bajocien-Bathonien	SDE61	22/02/1995	24	0,710	0,370	0,301	Analyse réalisable	12,0	55,5	6,8	5,8	4,6	1,3	Pas d'autres cycles visibles avant 12 ans de cyclicité
BSS000RECH	02131X0018	Tercey	483289	6848400	Calcaires du Bajocien-Bathonien	SDE61	13/04/1995	25	0,016	0,205	0,764	Non réalisable - Test de tendance et d'autocorrélation non satisfaisant	12,0	15,0	6,7	1,7	0,0	0,0	Autre cycle de plus de 12 ans possible mais chronique trop courte
BSS000REEQ	02133X0008	A28	497529	6848690	Calcaires du Bajocien-Bathonien	SDE61	13/04/1995	25	0,017	0,001	0,042	Non réalisable - Test de tendance et d'homogénéité non satisfaisant	12,0	51,3	6,7	6,0	4,8	2,1	Pas d'autres cycles visibles avant 12 ans de cyclicité
BSS000MQPT	01768X0022	Les Luzernes	473796	6857865	Calcaires du Bajocien-Bathonien	SDE61	15/12/1995	25	0,275	0,326	0,437	Analyse réalisable	12,0	23,9	6,7	3,8	9,2	3,6	Pas d'autres cycles visibles avant 12 ans de cyclicité
BSS000RCVC	02108X0020	La Noë verte	424965	6849698	Cornéennes du Brioverien	SDE61	15/10/2011	8	/	/	/	Non réalisable - Chronique trop courte	/	/	/	/	/	/	Chronique trop courte pour réaliser une analyse des cycles annuels et pluriannuels
BSS000TRUX	02492X0007	La Largerie sondage 075-2007-SR3-1A	433654	6829683	Cornéennes du Brioverien	SDE61	09/08/2012	8	/	/	/	Non réalisable - Chronique trop courte	/	/	/	/	/	/	Chronique trop courte pour réaliser une analyse des cycles annuels et pluriannuels
BSS003UJSA	BSS003UJSA	PZ1 La Forge	441353	6855183	Cornéennes du Brioverien	SDE61	25/05/2007	12	0,304	0,937	0,213	Analyse réalisable	/	/	/	/	/	/	Chronique trop courte pour réaliser une analyse des cycles annuels et pluriannuels
BSS003UKQC	BSS003UKQC	PZ2 La Forge - 2006	441849	6855193	Cornéennes du Brioverien	SDE61	25/05/2007	12	0,074	0,378	0,327	Analyse réalisable	/	/	/	/	/	/	Chronique trop courte pour réaliser une analyse des cycles annuels et pluriannuels
BSS000MPTZ	01756X0008	Les Bruyères	439863	6863615	Cornéennes du Brioverien	SDE61	21/06/1995	25	0,441	0,168	0,379	Analyse réalisable	12,1	68,3	7,1	5,1	10,9	3,3	Chronique trop courte pour visualiser des cycles pluriannuels de plus de 12 ans
BSS000RFGE	02148X0036	Belle Perche	527501	6840406	Craie du Cénomanien	SDE61	05/03/2013	6	/	/	/	Non réalisable - Chronique trop courte	/	/	/	/	/	/	Chronique trop courte pour réaliser une analyse des cycles annuels et pluriannuels
BSS000TTXC	02535X0012	Le Verger	534834	6819316	Craie du Cénomanien	SDE61	04/05/1999	21	0,717	0,944	0,554	Analyse réalisable	12,0	21,0	6,2	3,4	0,0	0,0	Autre cycle de plus de 10 ans possible mais chronique trop courte
BSS000TTXH	02535X0018	Le Grand Rhay	533411	6816778	Craie du Cénomanien	SDE61	14/05/1998	22	0,844	0,694	0,590	Analyse réalisable	12,0	28,0	6,2	3,2	0,0	0,0	Autre cycle de plus de 10 ans possible mais chronique trop courte
BSS000TTNK	02527X0009	S1 La Gaulardière	523901	6820956	Craie du Cénomanien	SDE61	03/11/1998	22	0,632	0,412	0,706	Non réalisable - Test d'autocorrélation non satisfaisant	12,0	2,0	6,6	3,4	0,0	0,0	Autre cycle de plus de 10 ans possible mais chronique trop courte
BSS000VYHZ	02895X0004	FE1-92 Le Pont d'Erre	533643	6802272	Craie du Cénomanien	SDE61	31/03/1998	22	0,844	0,974	0,607	Analyse possible - Mais test d'autocorrélation limite	12,1	30,6	6,2	3,5	0,0	0,0	Autre cycle de plus de 10 ans possible mais chronique trop courte
BSS000TTKJ	02523X0029	La Couvendière - Marolles	522338	6833424	Craie du Cénomanien	SDE61	15/04/1995	25	0,726	0,414	0,456	Analyse réalisable	12,1	38,8	6,3	4,2	2,6	1,2	Autre cycle de plus de 12 ans possible mais chronique trop courte
BSS000REWL	02144X0005	L'Aigle	527891	6854360	Craie du Cénomanien	AFB Normandie	31/01/1974	46	0,708	0,720	0,401	Analyse réalisable	12,1	21,0	6,6	5,5	11,1	2,3	Chronique prise à partir de 1994 (trop de données manquantes avant) - Chronique trop courte pour visualiser des cycles pluriannuels de plus de 13 ans
BSS003VFXY	BSS003VFXY	PZ Champs l' Oiseau	473174	6827173	Grès du Cambrien	SDE61	25/08/2000	19	0,944	0,842	-0,151	Analyse réalisable	12,1	55,5	6,4	3,6	2,0	2,8	Chronique trop courte pour visualiser des cycles pluriannuels de plus de 10 ans
BSS000TSFY	02503X0011	La Boullière	469400	6829357	Grès du Cambrien	SDE61	20/08/1996	24	0,197	0,126	0,236	Analyse réalisable	12,0	67,8	6,8	5,3	10,3	1,4	Chronique trop courte pour visualiser des cycles pluriannuels de plus de 12 ans
BSS002PTKW	BSS002PTKW	SR1 La Moinerie	541591	6832412	Sables du Perche du Cénomanien	SDE61	28/04/2016	3	/	/	/	Non réalisable - Chronique trop courte	/	/	/	/	/	/	Chronique trop courte pour réaliser une analyse des cycles annuels et pluriannuels
BSS000RFVG	02155X1040	La bourgoiserie	532671	6838428	Sables du Perche du Cénomanien	SDE61	25/03/1999	21	0,628	0,972	0,498	Analyse réalisable	12,0	53,0	6,0	3,1	0,0	0,0	Chronique trop courte pour visualiser des cycles pluriannuels de plus de 10 ans
BSS000TTQN	02531X0029	Le Gué Hersant	537781	6833214	Sables du Perche du Cénomanien	SDE61	06/04/1999	21	0,000	0,134	0,611	Non réalisable - Test de tendance et d'autocorrélation non satisfaisant	Pas de cycle annuel		5,6	1,5	7,2	1,4	Autre cycle de plus de 10 ans possible mais chronique trop courte
BSS000TTJF	02523X0002	Villiers-sous-Mortagne	522201	6827515	Sables du Perche du Cénomanien	AFB Normandie	27/02/1987	33	0,336	0,173	0,414	Analyse réalisable	12,0	27,8	6,7	7,4	14,5	4,1	Chronique trop courte pour visualiser des cycles pluriannuels de plus de 15 ans
BSS000TTPJ	02531X0001	Longny-au-Perche	534159	6826648	Sables du Perche du Cénomanien	AFB Normandie	26/01/1987	33	0,107	0,008	0,776	Non réalisable - Test d'homogénéité et d'autocorrélation non statisfaisant	Pas de cycle annuel		7,0	2,1	15,7	8,3	Chronique trop courte pour visualiser des cycles pluriannuels de plus de 16 ans
BSS000RDSC	02125X0049	La Martinière	456350	6843201	Schistes du Briovérien	SDE61	02/09/2010	9	/	/	/	Non réalisable - Chronique trop courte	/	/	/	/	/	/	Chronique trop courte pour réaliser une analyse des cycles annuels et pluriannuels
BSS003UJUO	BSS003UJUO	FE3-1 La Briancière	456892	6843744	Schistes du Briovérien	SDE61	09/12/2010	9	/	/	/	Non réalisable - Chronique trop courte	/	/	/	/	/	/	Chronique trop courte pour réaliser une analyse des cycles annuels et pluriannuels
BSS003UKJE	BSS003UKJE	PZ2 Le Marais du Grand Hazé - 2006	450613	6850052	Schistes du Briovérien	SDE61	13/12/2006	13	1,000	0,470	0,071	Analyse réalisable	/	/	/	/	/	/	Chronique trop courte pour réaliser une analyse des cycles annuels et pluriannuels
BSS003UKJY	BSS003UKJY	PZ3 Marais du Grand Hazé - 2006	450640	6850034	Schistes du Briovérien	SDE61	13/12/2006	13	0,304	0,937	0,199	Analyse réalisable	/	/	/	/	/	/	Chronique trop courte pour réaliser une analyse des cycles annuels et pluriannuels
BSS003VEVM	BSS003VEVM	PZ La Longrais	449555	6849175	Schistes du Briovérien	SDE61	10/05/2006	13	0,502	1,000	-0,094	Analyse réalisable	/	/	/	/	/	/	Chronique trop courte pour réaliser une analyse des cycles annuels et pluriannuels
BSS003VEUS	BSS003VEUS	Ru Source Philippe	450232	6848746	Schistes du Briovérien	SDE61	04/02/2005	14	0,049	0,165	0,515	Non réalisable- Test de tendance non satisfaisant	/	/	/	/	/	/	Chronique trop courte pour réaliser une analyse des cycles annuels et pluriannuels

Annexe 3

Cartes des Zones de Répartition des Eaux (ZRE) du département de l'Orne


Albien
Cénomanien
Eaux des nappes et bassins du Bajo-Bathonien
L'AIGLE
MORTAGNE-AU-PERCHE
VIMOUTIERS
ARGENTAN
SEES)
ALENCON
LA FERTE-MACE
FLERS
DOMFRONT
Enjeux AEP
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 Normandie
Parc de la Vatine
14 Route d'Houppeville
76130 – Mont Saint Aignan – France
Tél. : 02.35.60.12.00