

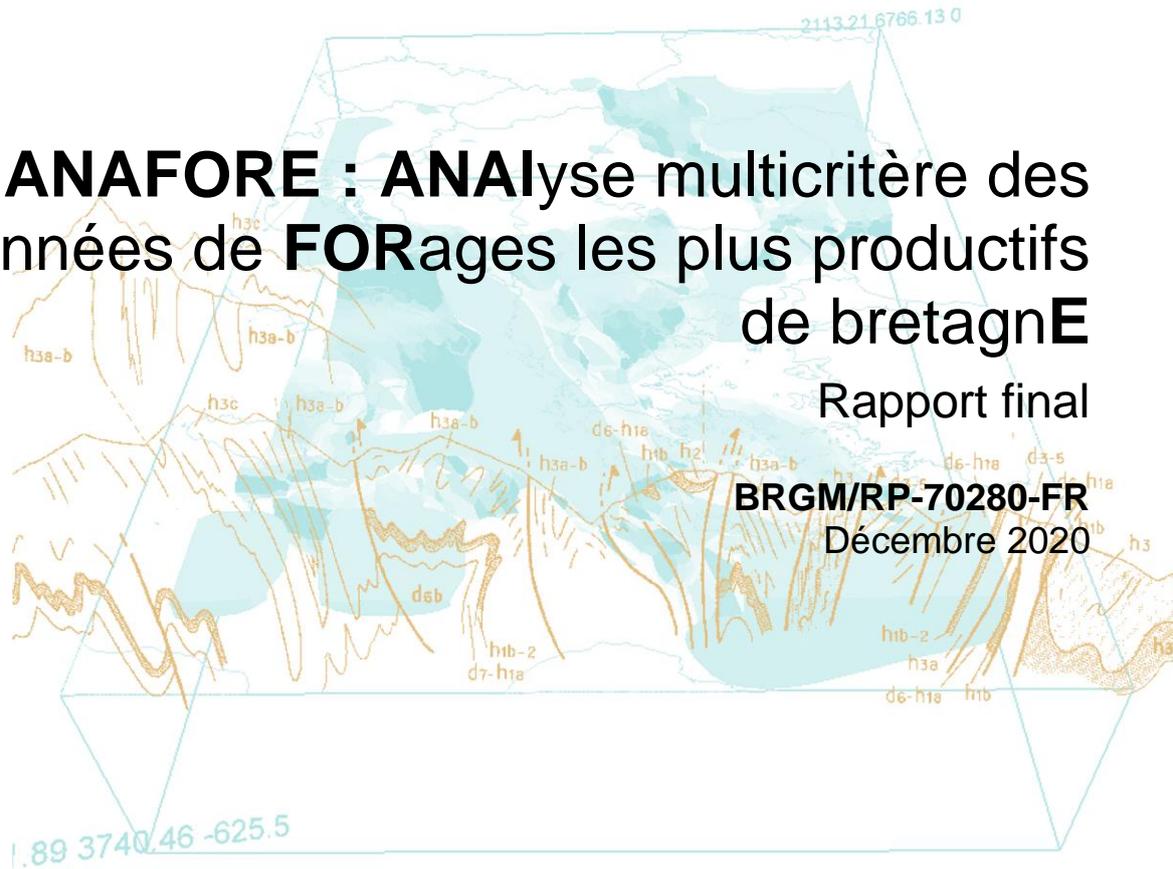


ANAFORE : ANALYse multicritère des données de FORages les plus productifs de bretagne

Rapport final

BRGM/RP-70280-FR

Décembre 2020



ANAFORE : ANAlyse multicritère des données de FORages les plus productifs de bretagne

Rapport final

BRGM/RP-70280-FR
Décembre 2020

Étude réalisée dans le cadre des opérations
de Service public du BRGM – Projet AP16BRE054

J.-M. SCHROËTTER, A. BOISSON, F. LUCASSOU, A-G BADER, L. BECCALETTO, Y. OUERGUI et B. TOURLIÈRE

Vérificateur :

Nom : B. DEWANDEL

Date : 03/12/2020

Signature :

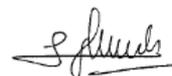


Approbateur :

Nom : M. BARDEAU

Date : 11/12/2020

Signature :



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

Mots-clés : forage, débit, productif, pompage d'essai, réinterprétation, hydrogéologie, Bretagne

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

J.-M. SCHROËTTER, A. BOISSON, F. LUCASSOU, A-G BADER, L. BECCALETTO, Y. OUERGUI et B. TOURLIERE (2020) - ANAFORE : ANALyse multicritère des données de FORages les plus productifs de bretagnE, Rapport final, BRGM/RP-70280-FR, 156 p., 105 ill., 2 annexes.

© BRGM, 2020, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Le projet **ANAFORE** est l'analyse de 100 forages bretons les plus productifs en eaux souterraines. Les deux objectifs principaux de ce projet étaient :

- **Objectif n°1** : analyser l'ensemble des données acquises (**anaphores géologiques**) lors de la réalisation de ces 100 forages depuis l'acquisition de données géophysiques pour leur implantation jusqu'aux données des pompages d'essai pour la caractérisation de l'aquifère (**anaphores hydrogéologiques**), en vue de réaliser une classification typologique des 100 forages ;
- et **Objectif n°2** : cartographier à partir de la compréhension des 100 forages des **Zones Potentiellement Productives en eaux souterraines** avec pour objectif de devenir des Zones de Sauvegarde pour le Futur (ZSF ou NAEP).

Les **anaphores géologiques** ont montré que les 100 forages appartenaient à une classification de **10 typologies distinctes**, qui s'accordent avec la carte géologique et surtout à l'histoire géologique du Massif Armoricaïn. Ces typologies varient par leur contexte géologique mais s'accordent sur un même modèle de déformation tectonique post Hercynien.

La **typologie 1** correspond à l'«*Auréole de métamorphisme recoupée par des failles ou fractures NS, N150° et/ou N045°* » : elle regroupe à **29%** des forages. La **typologie 2**, « Une lithologie magmatique (granites, granodiorites) recoupée par des failles ou fractures NS, N150° et/ou N045° », regroupe **17% des données**. La **typologie 3**, « Synclinal paléozoïque recoupée par des failles ou fractures NS, N150° et/ou N045° » regroupe **12% des forages**. **Les typologies 4** : « Profil d'altération sous le paléozoïque recoupé par des failles ou fractures NS, N150° et/ou N045° », regroupe **6% des forages** et **5** : « Filons magmatiques dans une lithologie des failles ou fractures NS, N150° et/ou N045° », regroupe aussi **6% des forages**. La **typologie 6**, « Lithologie perméable dans une lithologie peu perméable recoupée par des failles ou fractures NS, N150° et/ou N045° », regroupe **5% des forages**. La **typologie 7**, « Failles et fractures transtensives NS, N150° et/ou N045° recoupant le Cisaillement Sud Armoricaïn », regroupe **10%** des forages. La **typologie 8**, « Failles et fractures transtensives NS, N150° et/ou N045° au Sud du Cisaillement Sud Armoricaïn ou structures satellites ou réutilisant une structure ancienne », regroupe **9%** des données. La typologie **9**, « Lithologies effusives (volcanites) recoupées par des failles ou fractures transtensives N150° et N045° et/ou NS », ne regroupe que **2%** des forages. Et enfin, la **typologie 10**, « Aquifère avec multi profils d'altération le long de la faille de Quessoy/Nort-sur-Erdre », regroupe **4%** des forages.

A l'échelle des sites :

1. Les lithologies (la nature des roches) ne constituent pas la seule explication de présence d'aquifères : le raisonnement doit s'orienter vers les contextes géologiques. Les lithologies les plus compétentes mécaniquement pourraient bien être les lithologies les plus propices à la présence d'eau souterraine, et les roches ont pu acquérir cette compétence mécanique au cours des temps géologiques comme les coréniennes par exemple.
2. Les failles sont omniprésentes sur les 100 sites avec des orientations dominantes et récurrentes : N150° +/- 10, NS +/- 10 et N045° +/- 10, correspondant à un système transtensif. Ces directions de failles/fractures sont les orientations préférentielles favorables à la présence d'eau souterraine et qui expliquent la présence de forages productifs dans des lithologies qui statistiquement montrent des débits instantanés moyens peu favorables. Dans certains secteurs, des failles anciennes de N070° à N090°

auront la bonne orientation pour être réactivées et participer à la création d'une structure perméable.

3. L'altération est elle aussi omniprésente (avec au moins un profil d'altération par site) : soit ce profil d'altération est décalé par les failles, soit il existe plusieurs profils emboîtés. Sur 4 sites d'ANAFORE, il existe jusqu'à environ 4 à 5 profils d'altération superposés emboîtés et décalés par des failles N150° +/- 10.
4. La dualité/interaction entre les failles et l'altération semble être le paramètre important au caractère productif de chaque site, indépendamment des lithologies. Les failles décalent les profils d'altération, favorisent : (1) le développement d'un gradient hydraulique et le développement du ou des profils d'altération, et (2) leur enracinement le long de structures perméables.
5. Ainsi l'altération crée une porosité d'altération qui vient se surimposer à une porosité de fractures liée à l'action des failles. Cette histoire pourrait avoir débuté dès la fin du Paléozoïque entre 300/250 millions d'années jusqu'après l'Eocène moyen (41 million d'années) pour l'essentiel et l'Oligocène (Le Rupélien).

Les **anaphores hydrogéologiques** et notamment la réinterprétation des essais de pompages pour chaque forage lorsque ceux-ci étaient réutilisables ou disponibles ont permis :

1. de montrer que le **fonctionnement hydraulique/hydrogéologique** de chaque site, permettait aussi un classement typologique, au nombre de 5, depuis un comportement hydraulique dans une faille ou corridor de déformation de roches (1), à une faille puis à de la drainance associée (2), à un comportement hydraulique radial homogène (3) puis à de la drainance associée (4) et enfin à de la compartimentation (5).
2. de montrer une bonne **relation entre les comportements hydrauliques et la géologie** des sites,
3. de montrer **l'importance de la fracturation** avec la dominance de la typologie hydraulique montrant un comportement hydraulique dans une faille ou un corridor de déformation de roches, et la mise en avant du rôle de la fracturation plutôt orientée N150°,
4. de montrer **un fort lien avec la partie supérieure des aquifères** qui peut être de deux natures distinctes : soit alluviale (relation à la rivière) soit latéritique (relation avec l'altération),
5. de montrer la **limitation liée aux données des essais de pompages car hétérogènes ou incomplètes** (temps de pompage trop courts ou pompage interrompu),
6. et enfin de montrer que les **débits d'exploitation ou critiques les plus élevés étaient localisés** et associés avec les structures tectoniques régionales de même orientation préférentielle que celles identifiées par l'analyse géologique sur trois zones à fort potentiel : la faille Quessoy-Nort-sur-Erdre (QN/E), le prolongement à terre des bassins éocènes majeurs marins du sud Bretagne et le secteur de Fougères.

ANAFORE a permis :

1. de mieux diagnostiquer les circulations souterraines de ces réservoirs souterrains de Bretagne et de permettre une meilleure protection pour le futur.
2. de préciser comment mieux les rechercher, par la caractérisation des relations lithologies (histoire géologique), failles et l'altération des roches ;

3. et enfin de définir quels secteurs peuvent être propices en eaux souterraines par la cartographie de 38 Zones Potentiellement Productives (ZPP).

Ces résultats et nouvelles compréhensions sont majeurs, notamment dans une perspective de changement climatique et d'augmentation de la demande. Ils permettront d'apporter des réponses opérationnelles à l'adaptation et à la bonne gestion de la ressource en eau en Bretagne.

Sommaire

Liste des illustrations.....	12
1. Présentation du projet	19
1.1. PREAMBULE DE L'ARS, DE L'AELB ET DU BRGM.....	19
1.1.1. Contexte	19
La ressource en eau souterraine pour l'adduction publique.....	19
Les usages.....	20
Constats.....	20
1.1.2. Objectifs	20
1.2. PROGRAMME TECHNIQUE.....	22
1.2.1. Présentation	22
1.2.2. Choix des ouvrages à analyser.....	23
1.2.3. Détails des travaux	23
Acquisition des données et des connaissances.....	24
1.2.4. Analyse multicritère et identification des zones favorables.....	24
2. Géologie et hydrogéologie de la Bretagne	25
2.1. HISTOIRE GEOLOGIQUE DE LA BRETAGNE.....	25
2.1.1. Introduction.....	25
2.1.2. L'histoire cadomienne et hercynienne.....	27
Les domaines cadomiens nord-breton et normano-breton.....	27
Les Domaines varisques de centre Bretagne (domaine varisque médio-armoricain occidental ; domaine varisque médio-armoricain oriental et domaine varisque de Bretagne centrale)	28
Le Domaine varisque Ligéro-séan.....	28
Les domaines varisques nantais et sud armoricain breton	28
Le domaine varisque du Pays de Léon	29
2.1.3. L'histoire post-hercynienne.....	29
Le Carbonifère supérieur (320-300 Ma).....	29
Au Permien (300-250 Ma) : la Manche s'émancipe.	30
Le Trias (250-200 Ma) : érosion	30

Les prémisses de l'ouverture de l'Atlantique et la remontée de la plaque Afrique	
30	
La transgression jurassique.....	31
Le Cénozoïque (la maladie tertiaire) :.....	32
2.1.4. La sismicité actuelle.....	34
2.2. HISTOIRE DE CISAILLEMENTS, FAILLES ET FRACTURES.....	35
2.2.1. Qu'est-ce qu'une faille, fracture (diacalse) ou autre cisaillement ?.....	35
Définitions	35
Quelques caractéristiques d'une faille	36
Implications en hydrogéologie de socle	37
2.2.2. Les failles, fractures ou autres cisaillements en Bretagne.....	37
Différentes générations de failles, fractures et cisaillements.....	37
Reconstitution succincte des paléo-tenseurs de contrainte : Cadomien, Paléozoïque, Hercynien et post-Hercynien puis Néogène, et implications en hydrogéologie de socle	37
2.3. HYDROGEOLOGIE DE « SOCLE », HYDROGEOLOGIE EN BRETAGNE	38
2.3.1. Les structures aquifères	38
Propriétés hydrodynamiques des horizons d'altération des aquifères de socle ..	39
Fracturation structurale et tectonique	40
2.3.2. Continuité spatiale des aquifères de socle.....	41
Connectivité des fractures et niveau piézométrique	41
Influence des hétérogénéités géologiques	42
2.3.3. Connaissances hydrogéologiques régionales.....	43
Qualification régionale de l'horizon d'altération (Projet SILURES).....	43
Caractérisation de l'hétérogénéité (Projet MORPHEUS).....	45
Sites et comportements remarquables (Projets RAPSODI et CASPAR).....	46
2.4. LIMITES ACTUELLES.....	47
3. La base de données forage SILURES-ANAFORE & Présentation des données ANAFORE.....	49
3.1. LA BASE DE DONNEES FORAGES SILURES-ANAFORE	49
3.1.1. Constitution de la base de données forages SILURES-ANAFORE.....	49
3.1.2. Les débits instantanés de la base de données forages SILURES-ANAFORE	49

3.1.3. Débits instantanés en fonction de la profondeur et en fonction de l'altitude de la base de données forages SILURES-ANAFORE	50
3.2. LA COLLECTE DES DONNEES DE FORAGES ANAFORE	54
3.3. LOCALISATION ET CHOIX DES FORAGES A ANALYSER	55
3.4. QUALITE DES DONNEES RECUPEREES	57
4. Les Anaphores	59
4.1. LES ANAPHORES GEOLOGIQUES (DES SITES)	59
Exemple de carte géologique enrichie des différentes observations tirées de la fiche de Trébry, site de la « La Perchais » dans les Côtes d'Armor (22) (Illustration n°32).	59
4.1.1. Les lithologies (la nature des roches) au niveau des 100 forages	61
Cadrage lithologique	61
Essai de typologie – Dénombrement des sites	61
4.1.2. Hétérogénéités lithologiques des logs de forage & venues d'eau	62
Hétérogénéités lithologiques des logs de forage	62
Les venues d'eau	64
4.1.3. Cartographie de la limite altérites meubles/zone fracturée	66
L'épaisseur de altérites meubles autour des 100 forages	67
Le nombre de surfaces d'altération	67
La relation entre les surfaces d'altération	69
Implications & conséquences	70
4.1.4. Direction tectonique, failles et fractures des 100 forages (<i>mesures in situ</i>) ..	72
Premières mesures faites sur les 50 premiers sites de forages	72
Mesures faites sur les sites des 100 forages	73
Nombre de directions tectoniques	77
Tentative d'évaluation de l'impact de la faille (zone de dommage) sur les forages	77
Interprétation et relation avec l'histoire tectonique du massif armoricain	78
4.1.5. Typologies des forages	81
Les fiches par typologie	82
Répartition cartographique des 10 typologies	93
4.1.6. Conclusions géologiques	96

4.2. ANAPHORES HYDROGEOLOGIQUES (DES SITES)	97
4.2.1. La qualité des eaux souterraines des 100 forages ANAFORE	97
Rappel historique et des mécanismes	97
4.2.2. Méthodologie	101
Réinterprétation d'essais de pompage	101
Mise en relation avec la géologie	104
Définition de typologies	104
4.2.3. Résultats	104
Synthèse des essais de pompages analysés	104
Typologies hydrogéologiques rencontrées – Définition	105
Exemple d'analyse à l'échelle du site	107
Typologies hydrogéologiques rencontrées – Quantification.....	109
Limites observées	111
Identification des orientations préférentielles.....	113
Importance de la drainance	115
Rôle des structures géologiques régionales majeures sur les ouvrages à forte productivité.....	115
4.2.4. Discussion	118
Comparaison avec les études existantes	119
4.2.5. Conclusions	120
5. Cartographie des Zones Potentiellement Productives (ZPP)	123
5.1. RECHERCHE D'ARGUMENTS CARTOGRAPHIQUES ET STATISTIQUES	123
5.1.1. Caractérisation des failles et fractures	123
Les débits instantanés moyens par failles & fractures	124
Densité des sources par failles & fractures.....	124
Conclusion	125
Les failles majeures.....	126
5.1.2. Caractérisation des lithologies	126
Différentes méthodes d'évaluation des lithologies	126
La méthode retenue	128
5.1.3. Dernière entité utilisée : les bassins versants immédiats	130

5.1.4. Délimitation des Zones Potentiellement Productives.....	131
6. Conclusions de l'approche combinée : géologie - hydrogéologie	137
7. Bibliographie	141
8. Annexes 1 & 2 :.....	147

Liste des illustrations

Illustration 1 : caractéristiques principales des captages EDCH en Bretagne (source ARS Bretagne)	19
Illustration 2 : Découpage du massif armoricain breton d'après Chantraine et al., 2001, carte géologique du massif armoricain à 1 : 250 000 et les âges des failles : en rouge, failles cadomiennes ; en rose, failles hercyniennes ou varisques en bleu nuit, failles paléozoïques inférieures, en noir et violet, failles tardi-hercyniennes ou tardi-varisques à tertiaires.	25
Illustration 3 : Bloc diagramme 3D du Massif Armoricain (Andra-BRGM, réactualisés par Maïté Venville, 2018)	26
Illustration 4 : Carte géologique au millionième de la Bretagne (Editions BRGM).....	27
Illustration 5 : Bloc diagramme de la Bretagne au Carbonifère (330 -300 millions d'années)....	29
Illustration 6 : Evolution géologique post-hercynienne du Massif Armoricain (modifié d'après Ballèvre et al., 2013).....	31
Illustration 7 : La mer autour du Massif armoricain il y a 8 à 10 millions d'années.....	33
Illustration 8 : En haut, la côte bretonne au début du Quaternaire où le niveau de la mer atteint les + 100 m au dessus du littoral actuel, la partie de la Bretagne en teinte de gris reste immergée	34
Illustration 9 - Sismicité instrumentale de l'Ouest de la France métropolitaine entre 1962 et 2018, en fonction de leur intensité épicertrale (Mw).....	35
Illustration 10 : Schéma conceptuel des différents types de failles avec le régime tectonique associé : à gauche, faille normale, au milieu, faille inverse et à droite, décrochement (Source : https://www.pairform.fr/doc/17/138/467/web/co/FI-6.html).....	36
Illustration 11 : Quatre caractéristiques principales du plan de faille	36
Illustration 12 : Régimes tectoniques simplifiés et failles/cisaillements associés de Bretagne depuis le Cadomien (700 millions d'années) jusqu'à l'Oligo-pliocène sup. (2 millions d'années)	38
Illustration 13 : Schéma conceptuel des aquifères de socle (Source : Wyns et al., 2004)	39
Illustration 14 : Débits instantanés par mètre en fonction de la profondeur du forage en-dessous de la base des altérites (Mougin et al., 2008). Mesures sur différentes lithologies à l'échelle de la Bretagne sur un échantillon de 6 089 forages.....	40
Illustration 15 : Modèle conceptuel des flux souterrains sur le site de St-Brice en Cogles sous a) conditions ambiantes et b) conditions de pompage (Projet CASPAR et thèse de Roques et al., 2014).....	41
Illustration 16 : Modèle conceptuel des écoulements à l'échelle du bassin versant en fonction des niveaux d'eau : a) en conditions de hautes eaux ; b) en conditions de basses eaux (Guihéneuf et al., 2014)	42
Illustration 17 : Modèle conceptuel d'un aquifère de socle associé à une veine de quartz (Dewandel et al., 2011).....	43
Illustration 18 : Cartographie des altérites en place (m) avec l'incertitude en encart – Projet SILURES (Mougin et al.,2008)	44
Illustration 19 : Cartographie des secteurs où l'exploitation de l'eau souterraine peut être encouragé, en encart, formations géologiques sur lesquelles il y a eu extrapolation et écart-type sur la prédiction (en mètres) – Projet SILURES (Mougin et al.,2008).....	45

Illustration 20 : Carte piézométrique (à gauche) et carte de transmissivité obtenue par inversion sur le massif de Tiébaghi en Nouvelle Calédonie (à droite) (Dewandel et al., 2017).....	46
Illustration 21 : forage du projet RAPSODI et modélisation d'essais de traçage	47
Illustration 22 : Effectifs des forages en fonction des débits instantanés de la base de données forages SILURES-ANAFORE.....	50
Illustration 23 : Débits instantanés en fonction de la profondeur et de l'altitude de la base de données forages SILURES-ANAFORE.....	52
Illustration 24 : BD forages BRGM Bretagne SILURES (12 000 forages) et ANAFORE (8 000 forages), soit 19 684 forages avec débits instantanés auxquels ont été superposés en bleu, les forages avec des débits instantanés supérieurs à 60 m ³ /h, de la base de données forages SILURES-ANAFORE.	53
Illustration 25 : sources des dossiers des forages analysés dans ANAFORE	54
Illustration 26 : principales sources de contribution aux dossiers des forages analysés dans ANAFORE (la somme est supérieure à 100 à cause des contributions multiples).	55
Illustration 27 : nombre de forages ANAFORE par département breton	55
Illustration 28 : Répartition géographique des 100 forages ANAFORE (les étiquettes correspondent aux noms des communes ; il y a parfois plusieurs forages pour une même commune)	56
Illustration 29 : Qualité des dossiers des 100 forages ANAFORE (4 très bon, 0 donnée inexistante)	57
Illustration 30 : Dossiers contenant des données de géophysique des 100 forages ANAFORE	57
Illustration 31 : utilisation et nature des forages ANAFORE	58
Illustration 32 : exemple de carte géologique de détail réalisée à partir de la journée de terrain pour chaque site (site de la Perchais).	60
Illustration 33 : les fiches de chaque site en recto/verso.	60
Illustration 34 : Regroupement par lithologie puis contexte géologique, tectonique ou latéritique des 100 sites ANAFORE.	62
Illustration 35 : A gauche, exemple de log de forage levé pendant la foration par le bureau d'études et synthétisé dans ANAFORE par site ; à droite, les trois types d'hétérogénéité extraites des 100 logs de forages et qui favorisent les venues d'eau souterraine (FT : Faille, HT : Intrusion mineure et LT : Alternance lithologique).	63
Illustration 36 : A gauche, tableau des effectifs des types d'hétérogénéités favorisant les venues d'eau ; à droite, représentation graphique du tableau de gauche (les trois types d'hétérogénéités extraites des 100 logs de forages, FT : Faille, HT : Intrusion mineure et LT : Alternance lithologique, sont combinées : FT + LT etc.).....	64
Illustration 37 : A gauche, tableau des effectifs de forages en fonction du nombre de venues d'eau ; à droite, classe des profondeurs des venues d'eau dans les forages.....	64
Illustration 38 : Trois portraits-robots types de forages en Bretagne (Synthèse des 100 forages ANAFORE).	65
Illustration 39 : Carte de détail de la fiche PLOUJAY, Manebail où la base des altérites est décalée deux fois par des structures de mêmes orientations que les mesures microtectoniques faites sur le terrain (effondrement vers l'ouest de la base des altérites meubles – relation tectonique)	66

Illustration 40 : Effectifs en fonction des épaisseurs d'altérites meubles. Epaisseur moyenne des altérites : 12,9 m	67
Illustration 41 : Nombre de surfaces d'altération par sites ANAFORE.....	68
Illustration 42 : Effectifs des relations entre les bases des surfaces d'altération	69
Illustration 43 : Carte géologique de détail aux niveaux de forage de Paimpont (35), la relation entre les bases des altérites meubles se situent à 245-250 m NGF et 145-150 m NGF où passe ici la faille Quessoy-Nort-sur-Erdre.....	70
Illustration 44 : Classification altimétrique (axe vertical en mNGF) de l'ensemble des bases des altérites meubles du Massif armoricain cartographiées dans ANFORE sur les 100 sites (en noir, en m NGF) et dénivelé ou rejet vertical apparent entre chaque classe altimétrique (en rouge)	71
Illustration 45 : Schéma de principe interprétatif de l'aquifère de Dompierre-du-chemin (35), site de Pré-Poncel, avec deux profils d'altération raccordé par un talus de raccordement et drainé par des failles.....	72
Illustration 46 : Schéma des mesures faites sur les failles et fractures.	72
Illustration 47 : Rosaces des directions tectoniques mesurées sur les 50 premiers sites analysés en 2017. Ordre 1 (haut gauche), ordre 2 (haut droit), ordre 3 (bas gauche) et ordre 4 (bas droit).....	73
Illustration 48 : A gauche - directions tectoniques mesurées autours des 100 forages ANAFORE ; à droite – Stéréogramme de densités des pôles des failles et fractures (Hémisphère inférieur)	74
Illustration 49 : en haut, faille normale de direction N020°, inclinée de 70°ouest, avec un pitch de 60/70° vers le Nord dans le granite de Saint-Anne d'Auray (Theix, Morbihan) et en bas, petits grabens N150° à NS dans les grès armoricains (Carrière d'Iffendic, secteur Paimpont, Ille-et-Vilaine).....	75
Illustration 50 : en haut, dessin interprétatif de l'affleurement du bas, montrant une variation horizontale de l'altération dans le granite de Ploemeur sur le littoral de la commune du même nom, et en bas, halo d'altération souligné par les hydroxydes et oxydes de fer le long d'un filon pegmatitique de direction N020° (à gauche) et tectonique cassante N150° reprenant ces filons N020° (Ploemeur, Morbihan).....	75
Illustration 51 : en haut, halos d'altération autour de failles normales N090° dans le granite de Pont-l'Abbé, Fouesnant et en bas, bassin d'effondrement N080° et faille N020° normale qui recoupe ces bassins (respectivement, Saint-Gildas-de-Rhuys et Sarzeau, Morbihan).....	76
Illustration 52 : fracturation et décrochement dextre (N150° 90) accompagnés par les fentes de tension (en échelon) NS 90 sur le granite de Ploemeur.....	77
Illustration 53 : nombre de direction de failles/fractures par site.....	77
Illustration 54 : plus petit pavé du réservoir : entité entre deux à trois familles de plans de fracture ou faille	78
Illustration 55 : A - schéma classique de type Ridet d'un système décrochant ; B - rosace des orientations de fracturation (extensif, compressif et décrochant) pour un même tenseur de contrainte (d'après Ruhand, 1973).....	79
Illustration 56 : en haut, modèle tectonique déduit de l'ensemble des observations de terrain réalisées sur les 100 forages ANAFORE (764 affleurements ; voir le texte pour une description, les point rouges correspondent aux positions des forages analysés) ; en bas à gauche, modèle interprétatif de la création des structures tectoniques post hercyniennes : flambage du massif armoricain avec localement des hauts topographiques et plusieurs paléosurfaces d'altération et des bassins sédimentaires. Les failles principales sont diffuses car interfèrent avec des failles anciennes qui	

peuvent localement rejouer tectoniquement si elles sont orientées favorablement au champ de contrainte principal NS. En bas à droite, déformation d'un cylindre de roches en compression avec du flambage en son centre et des zones basses.	80
Illustration 57 : typologie des 100 forages ANAFORE avec les effectifs de forages correspondants.	81
Illustration 58 : schémas en carte et en coupe des deux typologies ANAFORE 1 & 2.....	84
Illustration 59 : schémas en carte et en coupe des deux typologies ANAFORE 3 & 4.....	86
Illustration 60 : schémas en carte et en coupe des deux typologies ANAFORE 5 & 6.....	88
Illustration 61 : schéma en carte et en coupe de la typologie ANAFORE 7.	89
Illustration 62 : schéma en carte et en coupe de la typologie ANAFORE 8.	90
Illustration 63 : schéma en carte et en coupe de la typologie ANAFORE 9.	91
Illustration 64 : schéma en carte et en coupe de la typologie ANAFORE 10	92
Illustration 65 : répartition géographique des typologies des 100 forages ANAFORE, avec leur effectif respectif dans les pastilles rondes.	94
Illustration 66 : typologie par site (trait rouge) et typologie secondaire apparentée (cercle associé) (par exemple QN/E = Faille de Quessoy-Norte-sur-Erdre s'ils sont proches ou sur la faille).....	95
Illustration 67 : concentrations en nitrate sur les sites ANAFORE (voir date de l'analyse sur les fiches descriptives des sites) – Seuls les sites avec des teneurs supérieures à 25 mg/L sont légendés : COMMUNE_Site_(département))	99
Illustration 68 : en haut à gauche, concentrations en fer sur les sites ANAFORE (voir date de l'analyse sur les fiches descriptives des sites) ; en haut à droite, concentrations en manganèse sur les sites ANAFORE (voir date de l'analyse sur les fiches descriptives des sites) ; en bas à gauche, concentrations en chlorure sur les sites ANAFORE (voir date de l'analyse sur les fiches descriptives des sites) ; en bas à droite, concentrations en sulfate sur les sites Anafore (voir date de l'analyse sur les fiches descriptives des sites)	100
Illustration 69 : Méthodologie mise en œuvre pour l'interprétation de pompages d'essai. Utilisation des dérivées des rabattements pour diagnostiquer les essais (Gutierrez et Dewandel, 2013).	102
Illustration 70 : exemple de succession des régimes d'écoulement lors d'un pompage dans un aquifère rectangulaire clos. t_D : temps adimensionnel, s_D (courbe pleine) et s_D' (courbe tiretée) : rabattement et dérivée du rabattement (adimensionnel).	103
Illustration 71 : synthèse des régimes d'écoulements et leur dimension d'écoulement associée (Ferroud et al., 2019 modifié de Ehlig-Economides et al., 1994).....	103
Illustration 72 : durées et débits moyens des essais analysés	105
Illustration 73 : typologies hydrogéologiques correspondant à un écoulement radial – à gauche schémas représentant la géométrie de l'aquifère ; à droite diagnostic hydrogéologique représentatif de la typologie	106
Illustration 74 : Typologies hydrogéologiques correspondant à un écoulement linéaire – à gauche schéma représentant la géométrie de l'aquifère ; à droite diagnostic hydrogéologique représentatif de la typologie)	107
Illustration 75 : Typologies hydrogéologiques correspondant à un écoulement par drainance – à gauche, schéma représentant la géométrie de l'aquifère ; à droite, diagnostic hydrogéologique représentatif de la typologie)	107
Illustration 76 : a) Diagnostic hydrogéologique réalisé sur le site de Pipriac-Le Meneu dans le cadre du projet Anafore ; b) géométrie schématique du système.....	108

Illustration 77 : Analyse géologique réalisée sur le site de Pipriac-Le Meneu dans le cadre du projet ANAFORE	109
Illustration 78: Nombre de sites par typologie (N.A = données indisponibles) – Les pourcentages sont calculés sur les 70 sites réinterprétés.....	110
Illustration 79 : Nombre de sites par type d'écoulement.....	110
Illustration 80 : Moyenne et médiane des débits critiques par typologies.....	110
Illustration 81 : Typologies des 15 sites les plus productifs et des 15 sites les moins productifs	111
Illustration 82 : Limites identifiées lors des essais de pompage (0L = Pas de limite identifié ; 2L = 2 Limites étanches ; 4L = 4 Limites étanches ; AL = Limite d'alimentation : N.A = non disponible).....	111
Illustration 83 : limites observées en fonction de la durée de pompage. A gauche en effectif ; au centre en pourcentage des sites ; à droite répartition des durées par type de limites.....	112
Illustration 84 : cartographie des temps de pompage et limites observées sur les essais de pompage.....	112
Illustration 85 : Orientations probables de la faille sollicitée lors des essais de pompage sur les différents sites. Les couleurs indiquent les familles de failles auxquelles elle ont été associées.	114
Illustration 86 : effectifs par familles de failles.....	114
Illustration 87 : carte géologique interprétée du site de Bain de Bretagne - Les Riáis (gauche) et de site de Paimpont - Les Creux du Canné (avec en rouge le forage étudié ; droite).....	115
Illustration 88 : Répartition spatiale des typologies hydrogéologiques des sites analysés dans le cadre du projet ANAFORE.....	116
<i>Illustration 89 : Débit critique ou moyen des essais de pompage réinterprétés dans le cadre du projet ANAFORE</i>	<i>117</i>
Illustration 90 : Sites ANAFORE dont le débit critique ou le débit moyen de l'essai longue durée est supérieur à 15 m ³ /h	118
Illustration 91 : Superposition de la cartographie du débit du milieu fracturé utile issue du projet SILURES Bretagne (Mougin, 2008) et de la localisation des sites ANAFORE dont le débit critique ou le débit moyen de l'essai longue durée est supérieur à 15 m ³ /h.....	120
Illustration 92 : Résultats statistiques des débits moyens instantanés pour les failles des cartes géologiques au 1/50 000 avec les forages > à 10 m ³ /h	124
Illustration 93 : Résultats statistiques des débits moyens instantanés pour les failles des cartes géologiques au 1/50 000 avec les forages > à 10 m ³ /h (En ordonnées : le Kernel Density et en absises : les classe de failles de 20° en 20°)	125
Illustration 94 : Densité des sources en fonction de l'orientation des failles (de bleu nuit: favorable à orange peu favorable.....	125
Illustration 95 : failles régionales avec les rejets apparents tectoniques les plus importants ...	126
Illustration 96 : WoE des lithologies au 1/50 000 de Bretagne pour des débits supérieurs à 40 m ³ /h.....	127
Illustration 97 : CBA par CHA – classification par cellule ayant les débits instantanés les moins aux plus importants en Bretagne.	128
Illustration 98 : grandes familles de roches magmatiques et leur minéralogie, et leur relation avec l'altération ; les cercles correspondent à des regroupements possibles.	129

Illustration 99 : en haut , débits instantanés moyens (en m ³ /h) après harmonisation des lithologies bretonnes au 1/50 000, et en bas, répartition cartographique.	130
Illustration 100 : nombre des forages avec un débit instantané supérieur à 40 m ³ /h par bassin versant de cours d'eau d'ordre 1 à 2.	130
Illustration 101 : exemple de la limite composite pour la délimitation des ZPP, ici celle du secteur de Paimpont (35).	133
Illustration 102 : carte des 38 ZPP sur la Bretagne issues de l'étude ANAFORE	134
Illustration 103 : tableau des 38 ZPP sur la Bretagne issues de l'étude ANAFORE	135
Illustration 104 : Coupe géologique du Massif armoricain jusqu'à sa bordure avec le bassin de Paris, et position des typologies ANAFORE (les typologies 6 et 9 n'ont pas pu être représentées).....	137
Illustration 105 : Classement des forages ANAFORE par typologie hydraulique/hydrogéologique	139

1. Présentation du projet

1.1. PREAMBULE DE L'ARS, DE L'AELB ET DU BRGM

1.1.1. Contexte

La ressource en eau souterraine pour l'adduction publique

En Bretagne, les eaux destinées à la consommation humaine (EDCH) proviennent très majoritairement des ressources en eau superficielle (80 %) à l'inverse du schéma national. Les 20 % restants sont issus des nombreux captages d'eau souterraine puisant à des profondeurs généralement réduites et à des débits relativement modestes. Les formations géologiques dans lesquelles se situent ces aquifères sont majoritairement des altérites (au sens large) de roches granitiques ou schisteuses. Les caractéristiques principales des installations de pompage d'eaux souterraines pour les EDCH en Bretagne sont présentées dans l'illustration n°1.

Caractéristiques	Indicateurs
Profondeur	70 % des captages < 15 m
Débit	50 % des captages < 150 m ³ /j et 85 % < 400 m ³ /j
Aquifère majoritaire	80 % des captages dans des altérites granitiques ou schisteuses
Aquifère spécifique	4 % des captages dans des faluns ou sables calcaires

Illustration 1 : caractéristiques principales des captages EDCH en Bretagne (source ARS Bretagne)

Il convient en outre de mentionner deux catégories d'ouvrages atypiques qui, s'ils sont d'importance mineure à l'échelle régionale, peuvent localement représenter un intérêt non négligeable. Il s'agit d'une part de captages d'eau souterraine de subsurface sous forme de drains situés dans le nord du département d'Ille et Vilaine et d'autre part de captages dans des formations tertiaires puisant plus profondément (60 m) des débits nettement plus importants (1000 à 2000 m³/j) et situés également en Ille-et-Vilaine.

De cette configuration résulte une dualité de la qualité structurale des eaux souterraines pour les EDCH en Bretagne. Les aquifères de socle altéré produisent une eau douce, légèrement acide et faiblement minéralisée tandis que les eaux des formations tertiaires fournissent une eau un peu dure, minéralisée et à pH élevé (8). Très localement, quelques eaux de socle pourront contenir naturellement un peu de fer (fréquent), des éléments radioactifs ou de l'arsenic à faibles concentrations.

Concernant les polluants d'origine anthropique, les eaux souterraines sont à l'instar des eaux de surface touchées principalement par les pollutions d'origine agricole. Pour ce qui est du paramètre nitrate, la situation apparaît contrastée car certaines eaux souterraines sont très proches des pollutions de surface et en sont très affectées tandis que d'autres ressources plus profondes sont exemptes de nitrates par l'action dénitrificatrice des pyrites que contiennent les roches. Pour ce qui est des résidus phytosanitaires, elles sont touchées comme les eaux de surface mais dans une moindre mesure. Il faut cependant mentionner la forte rémanence de ces produits dans les eaux souterraines qui leur offre un milieu à l'abri des dégradations physico-chimiques et biologiques. Par ailleurs, les eaux souterraines circulant bien plus lentement que les eaux de surface, les quantités de polluants emmagasinées restent stockées plusieurs décennies dans le compartiment souterrain. Enfin, les contaminations microbiologiques ou autres se révèlent ponctuelles et anecdotiques.

Les eaux souterraines profondes présentent plusieurs intérêts non négligeables :

- Une disponibilité importante dans certains secteurs géographiques,
- Une accessibilité et une gestion souvent plus facile,
- Une bonne qualité physico-chimique et bactériologique, par l'intervention de phénomènes naturels de dénitrification par exemple,
- Et une exploitation et un traitement moins onéreux que les eaux superficielles.

Malgré ces avantages, il faut rester réaliste quant au débit d'exploitation que les ouvrages souterrains (forages, puits, sources, drains) peuvent fournir.

Les usages

La moindre vulnérabilité des eaux souterraines leur confère souvent une qualité acceptable, et leur omniprésence dans la région à de faibles profondeurs rend ces ressources aptes à répondre à de nombreux usages qui ne nécessitent pas des débits conséquents. A côté de l'alimentation en eau potable qui recense plus de 700 ouvrages, d'autres usages sont très répandus notamment en agriculture, élevage et agro-alimentaire. Il faut également noter le nombre croissant d'opérations de forages, avec ou sans prélèvements, dédiés à la géothermie. C'est ainsi que 1 200 à 1 400 forages sont réalisés annuellement en Bretagne tous usages confondus donnant lieu à ce jour à plus de 52 000 ouvrages déclarés dans la banque de données du sous-sol (BSS). Il faut enfin noter qu'une proportion très importante des ouvrages recensés est non conforme à la réglementation tant sur des aspects techniques qu'administratifs.

Si par le passé, il était convenu que le socle ne constituait pas un aquifère significatif, il a été récemment mis en évidence que des zones particulières pouvaient s'avérer être très productives au droit d'horizons profonds ou semi-profonds des formations de socle. Ces nouvelles eaux souterraines commencent d'ailleurs à être exploitées.

Constats

A la situation décrite ci-dessus peut être ajouté le constat d'un besoin de sécurisation de l'alimentation en eaux destinée à la consommation humaine en Bretagne. En effet, certaines parties du territoire régional pourraient tirer bénéfice de l'utilisation de nouveaux aquifères productifs de bonne qualité compensant de ce fait la faible proportion des eaux souterraines pour l'alimentation en eau et la qualité parfois médiocre des ressources superficielles actuelles. Les nombreux épisodes de pénuries locales d'eau observés par le passé, notamment celui de l'automne 2011 au cours duquel le nord de l'Ille et Vilaine a dû être approvisionné par d'importantes ressources en provenance des Côtes d'Armor, nous rappellent la fragilité des interconnexions de proximité. Cette même conjoncture défavorable s'est reproduite en 2017, poussant les syndicats producteurs d'eau à s'interroger sur la pérennité des ressources exploitées, notamment avec l'influence du changement climatique.

A noter enfin l'accentuation probable de ces phénomènes en raison de l'impact prévisible à moyen ou long terme du changement climatique (Cf. Projet EXPLORE 2070 du BRGM qui modélise les impacts du changement climatique au niveau des aquifères français).

1.1.2. Objectifs

Suite aux échanges entre le Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM), l'Agence Régionale de Santé (ARS) et l'Agence de l'Eau Loire-Bretagne (AELB), le BRGM a

élaboré le projet **ANAFORE** : **AN**alyse multicritères des données des **FOR**ages les plus productifs de Bretagne. Il repose sur l'analyse de la réussite de 100 réalisations d'ouvrages, selon plusieurs critères scientifiques, avec pour objectif d'identifier les contextes géologiques les plus favorables à la recherche d'eau souterraine profonde.

Les réflexions menées entre le BRGM, l'ARS, l'AELB, la Région Bretagne, les conseils départementaux et les services de l'état en Bretagne (DREAL, MIRE), ont permis de définir et d'affiner le programme technique et financier qui suit.

La première étape du programme a consisté à identifier les zones profondes ou semi profondes disposant d'aquifères potentiellement productifs en s'appuyant sur les travaux récemment réalisés (cf. notamment les projets de service public SILURES¹ (2002-2008) et RAPSODI² (2006-2008) et sur une analyse de la réussite de captages selon plusieurs critères scientifiques (projets de recherche CINERGY³ (2009-2012), CASPAR⁴ (2010-2013) OSUR-Géosciences Rennes).

Ces résultats permettront d'identifier des ressources potentielles en eaux souterraines, profondes et semi-profondes, qui pourraient être prospectées dans le futur pour une exploitation ultérieure et/ou des mesures de protection associées éventuelles.

Ces données constitueront par ailleurs pour les acteurs du domaine de l'eau des éléments de réflexion pour l'élaboration et/ou la révision de leurs documents stratégiques de gestion de l'eau et d'aménagement du territoire (SDAEP réalisés par les Conseils Départementaux, stratégie d'organisation pour les syndicats d'eau, les SAGE etc.). La meilleure connaissance des ressources stratégiques permettra de fournir une aide à la décision aux acteurs locaux pour l'identification des systèmes aquifères potentiellement exploitables et à préserver pour l'avenir. La connaissance de secteurs favorables permettra d'orienter les décisions sur le plan de la gestion de l'eau, de la satisfaction des différents usages et de la protection de la ressource en favorisant l'anticipation des décisions liées à l'aménagement du territoire.

Les résultats de ces travaux permettront également à l'Agence Régionale de Santé de Bretagne et à l'Agence de l'eau Loire-Bretagne de disposer de ressources potentielles protégées et réservées prioritairement à l'alimentation en eau potable. En effet, l'ARS et l'AELB comptent s'appuyer sur les résultats de ce projet pour réserver les eaux souterraines de certaines zones géographiques en vue de les sécuriser pour l'alimentation en eau potable face aux pressions sociétales, tout en tenant compte des contraintes économiques de surface.

Ce projet correspond à l'action 5B du programme régional santé-environnement (PRSE2 : 2010-2015) : « Identification des ressources en eau à privilégier pour l'alimentation humaine » pour laquelle le BRGM a été identifié comme porteur de projet.

Cette étude s'intègre dans la définition de Zones de Sauvegarde pour le Futur (ZSF). Elle est également en adéquation avec l'orientation 6E du SDAGE Loire-Bretagne 2010-2015 dont un des objectifs est de préserver certaines ressources en eau de bonne qualité pour les utilisations futures, en délimitant des Nappes réservées en priorité à l'Alimentation en Eau Potable (NAEP).

¹ Système d'Information pour la Localisation et l'Utilisation des Ressources en Eau Souterraine, cf. <http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-56457-FR.pdf>

² Recherche d'Aquifères Profonds Dans le SOcle du Département De l'Ille-et-Vilaine, cf. <http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-56749-FR.pdf>

³ Connaissance de la géologie profonde du bassin tertiaire de Rennes, à visée Géothermique et Hydrogéologique, cf. <http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-60977-FR.pdf>

⁴ Caractérisation des Aquifères Semi-Profonds Armoricaux, cf. <http://sigesbre.brgm.fr/CASPAR.html>

Les NAEP déjà délimitées bénéficient d'une protection géologique naturelle et sont pour la plupart captives. Elles délivrent à quelques exceptions près, une eau d'excellente qualité et indemne de pollution ce qui justifierait leur intégration dans le registre des zones protégées, au titre des nappes d'eau à réserver dans le futur à l'alimentation en eau potable.

L'étude tiendra notamment compte de la note méthodologique éditée en septembre 2013 par la Direction de l'Eau et de la Biodiversité du Ministère de l'Ecologie au sujet de « l'identification et de la protection des ressources en eau stratégiques et des zones de sauvegarde pour le futur pour l'alimentation en eau potable en France ».

Le projet ANAFORE s'intègre dans le déroulement suivant :

- (1) Partage des objectifs avec les partenaires du projet et affinage des besoins,
- (2) Réalisation de l'étude technique,
- (3) Protection administrative des ressources,
- (4) Amélioration de la sécurisation de l'alimentation en eau.

ANAFORE

1.2. PROGRAMME TECHNIQUE

1.2.1. Présentation

ANAFORE pour **ANALY**se multicritères des données des **FOR**ages les plus productifs de Bretagne correspond à l'analyse de critères géologiques et hydrogéologiques sur 100 forages d'exploitation de l'eau souterraine les plus productifs réalisés sur la région Bretagne, afin d'expliquer cette productivité.

Neuf critères scientifiques ont été retenus. Ces critères sont des critères qui sont usuellement analysés lors de recherches d'eau souterraine et notamment pour l'Alimentation en Eau Potable (AEP). Quatre d'entre eux (en gras ci-dessous) sont des critères sur lesquels le BRGM a développé une expertise. Ces critères sont :

1. L'analyse de l'**histoire géologique** du secteur du forage en rapport avec l'histoire cadomienne, paléozoïque, hercynienne et post-hercynienne (mésocénozoïque) ;
2. L'analyse des lithologies (nature de roches hôtes) ;
3. L'analyse de la **fracturation** des roches (porosité, etc.)
4. La relation entre les différentes lithologies (différents types de roches) ;
5. La ré-analyse des données géophysiques ;
6. L'analyse de l'**altération** dans le secteur du forage : profil d'altération, épaisseurs des altérites et zone fracturée ;
7. L'analyse du bassin versant (superficie, pente, etc.) ;
8. L'analyse des **données du pompage d'essai** ;
9. Et enfin, l'analyse de la chimie et de la qualité de l'eau.

Les objectifs principaux sont :

1. **Une classification de ces ouvrages** à travers la création de typologies de Zones Potentiellement Productives (ZPP) de Bretagne,
2. **et la cartographie de ces zones (ZPP)**, ainsi que leur traduction cartographique au 1/100 000.

1.2.2. Choix des ouvrages à analyser

Suite aux échanges qui ont eu lieu au cours de l'année 2015 avec les différents partenaires du projet, il a été décidé que le choix des ouvrages à analyser devait prendre en compte quatre critères :

- (1) **Nombre** : le BRGM s'assurera d'avoir un nombre de forages suffisant par département (au moins 25). Pour compléter ceux contenus dans la Banque de données du Sous-Sol (BSS), le BRGM a puisé dans les données des ouvrages en la possession des partenaires, comme les études de recherche en eau des syndicats départementaux d'eau potable, ou celles des ouvrages de suivi des installations classées et les études réalisées sur des ouvrages AEP par les Agences départementales de Santé ;
- (2) **Localisation** : la répartition des ouvrages doit être fonction des besoins et/ou des enjeux départementaux. Cette analyse préalable a été orientée par la connaissance des acteurs départementaux d'enjeux locaux (déficit temporaire, détérioration de la qualité etc.) ;
- (3) **Quantité** : un débit minimal d'exploitation ou instantané a été défini (si possible 35 m³/h pour un débit d'exploitation et 60 m³/h pour un débit instantané par exemple) ;
- (4) **Qualité** : les ouvrages possédant des analyses chimiques détaillées et ceux ayant bénéficié d'une étude (avant et pendant leurs réalisations pour la recherche d'eau potable par exemple ou pour des installations classées) réalisée par un bureau d'études ou par le BRGM, et pour lesquels il existe de nombreuses données acquises, ont été privilégiés. En effet, ces forages bénéficient souvent d'un ensemble d'investigations telles que de la photo-interprétation, de la prospection géophysique et/ou des pompages d'essais, qui correspondent aux données nécessaires aux analyses du projet **ANAFORE**. Les ouvrages ayant des problèmes de qualité liés au milieu souterrain naturel (fond géochimique), ont été intégrés, sans pour autant être prioritaires.

La liste des ouvrages identifiés d'après ces 4 critères a été soumise pour validation auprès des syndicats d'eau potable concernés. Des adaptations ont été faites en fonction des remarques et souhaits des partenaires.

Cet échantillon de 100 ouvrages a une valeur de statistique. L'analyse d'ANAFORE a été faite sur la base : (i) des documents recueillis, (ii) des études anciennes déjà réalisées et (iii) des reconnaissances de terrain.

1.2.3. Détails des travaux

Les travaux ont été répartis en deux lots de 50 forages par année (2017 et 2018). La troisième année 2019 a été consacrée à l'analyse des anaphores et à la réalisation des cartes finales des ZPP.

Acquisition des données et des connaissances

Le travail d'acquisition des connaissances a porté à la fois sur les volets géologiques et hydrogéologiques. Une étude bibliographique et une extraction des bases de données ont permis de collecter les données existantes (données brutes, rapports, compte-rendu de travaux, résultats d'analyses, avis d'hydrogéologues agréés etc.). Une visite de terrain a été faite pour chacun des 100 site/forages étudiés.

1.2.4. Analyse multicritère et identification des zones favorables

Classification des ouvrages : l'un des objectifs du projet est la création d'une typologie des forages en fonction de l'analyse multicritère (§ 2.2.1.) et la création d'un portfolio sous la forme de fiche par forage au format A3.

Etendue & cartographie : l'analyse multicritère réalisée au préalable, ainsi que le travail de classement typologique des 100 sites/forages sont les arguments pour aboutir à la définition des Zones Potentiellement Productives (ZPP) en eaux souterraines à l'échelle du 1/100 000.

La cartographie des ZPP mises en évidence a été confrontée à certaines contraintes comme la détérioration de la qualité ou des besoins quantitatifs, en vue de la création de Zones de Sauvegarde pour le Futur (ZFS) et de leur intégration au SDAGE.

Ces données cartographiques ont servi de base de travail à l'AELB et à l'ARS pour l'identification de Zones de Sauvegarde pour le Futur et pour la caractérisation des Nappes réservées en priorité à l'Alimentation en Eau Potable, en vue du prochain SDAGE Loire-Bretagne (2022-2027).

2. Géologie et hydrogéologie de la Bretagne

2.1. HISTOIRE GEOLOGIQUE DE LA BRETAGNE

2.1.1. Introduction

Le massif armoricain, comme toutes chaînes de montagnes, n'échappe pas à la règle de voir l'ensemble de ses formations géologiques qui le composent être organisées suivant une certaine nomenclature tectono-stratigraphique ou litho-tectono-stratigraphique.

Ainsi, des Alpes à l'Himalaya, des Pyrénées aux Appalaches, des nomenclatures sont venues regrouper les formations géologiques en grands domaines en fonction de leurs âges, de leurs déformations et de l'environnement dans lequel elles se sont formées (marin, continental etc.).

Le massif armoricain pour la région Bretagne peut être découpé en neuf grands domaines géologiques sur la base de la structuration de la carte géologique au 1 : 250 000 du massif armoricain par Chantraine, Rabu et Béchenec, en 2001, où chaque **domaine** contient au moins une à plusieurs **unités** qui elles-mêmes contiennent différentes **formations géologiques** (Illustration n°2).

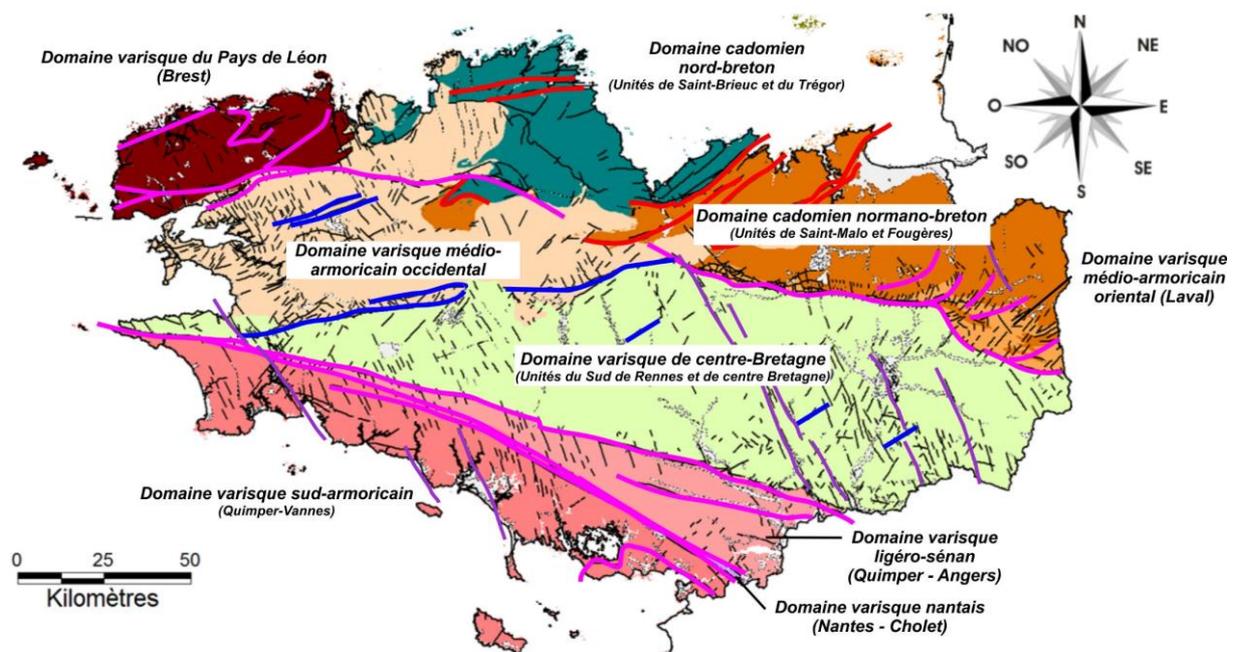


Illustration 2 : Découpage du massif armoricain breton d'après Chantraine et al., 2001, carte géologique du massif armoricain à 1 : 250 000 et les âges des failles : en rouge, failles cadomiennes ; en rose, failles hercyniennes ou varisques en bleu nuit, failles paléozoïques inférieures, en noir et violet, failles tardi-hercyniennes ou tardi-varisques à tertiaires.

D'Ouest en Est et du Nord au Sud, on trouve :

- Le domaine varisque du Pays de Léon ;
- Le domaine cadomien nord-breton ;
- Le domaine cadomien normano-breton ;
- Le domaine varisque médio-armoricain occidental ;
- Le domaine varisque médio-armoricain oriental ;
- Le domaine varisque de Bretagne centrale ;

- Le domaine varisque ligéro-séna ;
- Le domaine varisque nantais
- Et enfin, le domaine sud-armoricain breton.

On retrouve à travers les noms donnés à ces domaines géologiques, l'histoire géologique du massif armoricain qui est la superposition de deux évènements orogéniques (c'est-à-dire de deux chaînes de montagnes). Ainsi au nord des Côtes d'Armor et de l'Ille-et-Vilaine, les roches appartiennent à l'ancienne chaîne de montagnes dite « cadomienne » avec ces deux domaines, en vert, à l'Ouest : le domaine cadomien nord-breton et à l'Est, en orangé : le domaine cadomien normano-breton ou encore appelé « *mancellien* ». La chaîne cadomienne a été active entre 750 et 520 millions d'années environ.

Les autres domaines sont eux principalement des domaines sur lesquels la fameuse ancienne chaîne de montagnes « hercynienne ou varisque », est venue imprimer sa marque. Elle a été active entre 360 et 300 millions d'années environ.

La formation d'une chaîne de montagnes se fait sous un régime tectonique compressif, qui correspond au rapprochement de deux masses continentales. Le rapprochement de ces deux continents, séparés par un océan, entraîne la disparition de celui-ci. Mais entre ces deux compressions cadomiennes et hercyniennes, que s'est-il passé ? Et bien, il y a eu après la période cadomienne, un épisode qui s'oppose à la compression et qui a été « extensif ».

D'environ 500 à 360 millions d'années, il y a eu la création de bassins sédimentaires, résultat de l'extension (c'est-à-dire de l'étirement de la croûte continentale) et le dépôt dans ces bassins, de conglomérats, grès et d'argiles jusqu'à des calcaires (Illustration n°3).

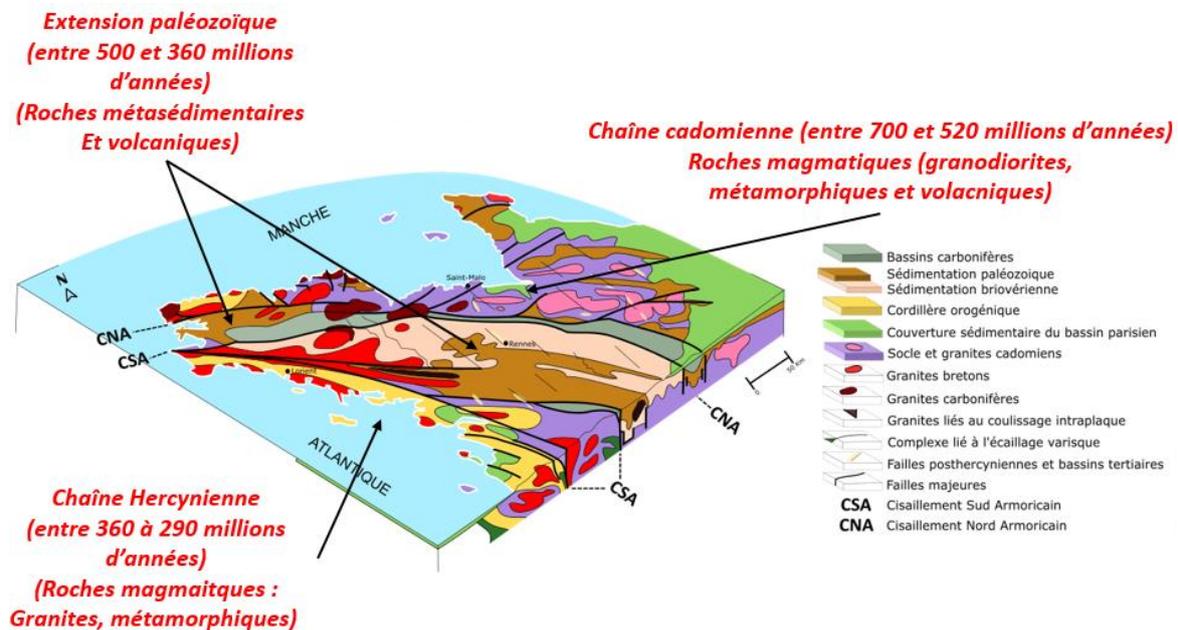


Illustration 3 : Bloc diagramme 3D du Massif Armoricain (Andra-BRGM, réactualisés par Maïté Venville, 2018)

2.1.2. L'histoire cadomienne et hercynienne

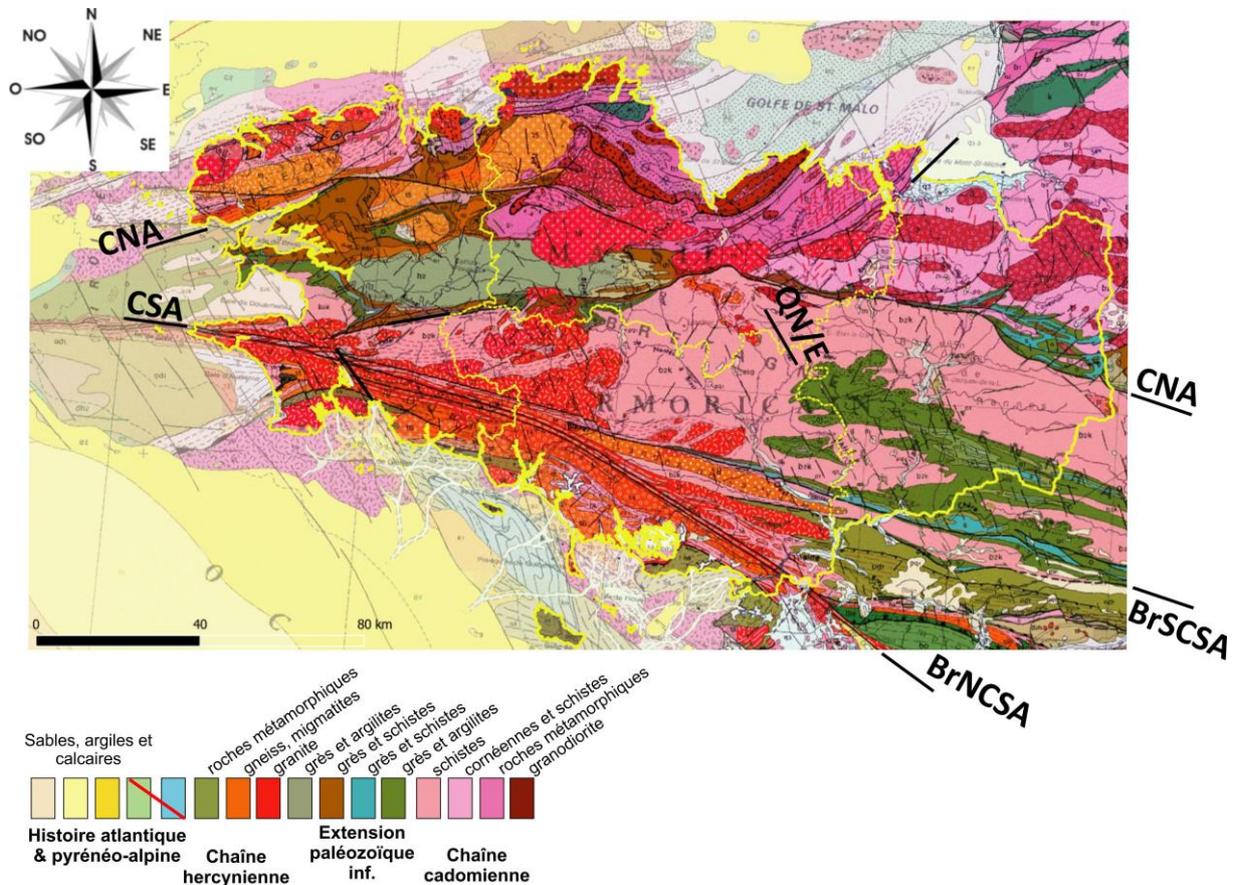


Illustration 4 : Carte géologique au millionième de la Bretagne (Editions BRGM)

Les domaines cadomiens nord-breton et normano-breton

Au nord du Cisaillement Nord Armoricain (CNA), la déformation date pour l'essentiel de l'histoire orogénique cadomienne (de 750 millions d'années à 540 millions d'années).

A une collision continentale succède une période de subduction océanique vers le sud-est. Les structures tectoniques (c'est-à-dire les failles) de direction N040/050° vont enregistrer un raccourcissement oblique, orienté environ NNE-SSW (Brun et al., 2001).

L'arc volcanique et le bassin arrière arc, construits lors de cette phase de subduction, vont chevaucher une marge continentale vers le Sud-Est, entraînant un métamorphisme (transformation des roches) à haute température et basse pression.

La fin de l'histoire cadomienne est marquée dans la partie Est de ces domaines, par le dépôt d'une épaisse série sédimentaire conséquence de l'érosion rapide de la chaîne cadomienne (les schistes du Briovérien). Pour clôturer le tout, se mettent en place des granites qui scellent à 540 millions d'années la fin de la déformation du Domaine Cadomien (Graviou et al., 1988).

Repris dans la collision hercynienne, ce socle cadomien se comportera comme un bloc résistant, encaissant des déformations cassantes, concentrées le long des failles héritées.

Les Domaines varisques de centre Bretagne (domaine varisque médio-armoricain occidental ; domaine varisque médio-armoricain oriental et domaine varisque de Bretagne centrale)

Ces domaines sont essentiellement constitués de roches métasédimentaires déformées en schistes peu à pas métamorphiques. Les dépôts les plus anciens datent du Protérozoïque supérieur (570 millions d'années, les fameux schistes du Briovérien) et proviennent de l'érosion de la chaîne cadomienne située au Nord (Chantraine et al., 1988 ; Le Corre et al., 1991). Dès le Cambrien et au cours de l'Ordovicien (de 500 à 395 millions d'années), une phase d'extension affecte l'ensemble du massif armoricain, qui se traduit par le dépôt de sédiments continentaux localisés dans des structures en blocs basculés (Brun et al., 1991). La série sédimentaire (depuis les schistes rouges en passant par les grès armoricains et les schistes noirs d'Anger, etc.) se poursuit jusqu'au Dévonien (395 millions d'années, Guillocheau et Rolet, 1982 ; Robardet et al., 1994). A partir du Dévonien supérieur, les sédiments préservés sont plus rares et souvent alignés le long des grands cisaillements que sont les Cisaillements Nord et Sud Armoricains (CSA et CNA).

A partir du Carbonifère (345 millions d'années), les grands cisaillements nord et sud armoricains montrent des déformations décrochantes dextres (vers la droite) et la sédimentation est confinée dans de petits bassins le long de ces structures (Pelhate et al., 1994), accompagnées par la mise en place de granites clairs (leucogranites) (Berthé et al., 1979a et b).

Le Domaine varisque Ligéro-séan

Ce domaine est situé entre les Branches Nord et Sud du Cisaillement Sud Armoricain (BrNCSA et BrSCSA). Les roches sédimentaires de ce domaine s'individualisent par rapport aux domaines varisques de centre Bretagne à partir de l'Ordovicien (Robardet et al., 1994). La Branche Nord du CSA et l'orthogneiss de Lanvaux ont été reconnus comme constituant une limite paléogéographique du Paléozoïque (Robardet et al., 1994). Cette limite sépare également deux domaines présentant une évolution géologique différente de la déformation carbonifère. Alors que la déformation des domaines varisques de centre Bretagne est continue et générale, celle du domaine varisque ligéro-séan est localisée le long sur des failles orientées WNW-ESE.

Les domaines varisques nantais et sud armoricain breton

Situés au Sud de la Branche Sud du Cisaillement Sud Armoricain (BrSCSA), ces domaines constituent la « zone interne » de la Chaîne hercynienne (c'est-à-dire la partie la plus déformée). Ils sont essentiellement composés de roches métamorphiques présentant une déformation ductile intense. Récemment, des études « pétrologiques et géochronologiques », sont venues préciser leur histoire tectonique, qui peut être divisée en deux phases principales.

- (1) un épaissement « crustal » vers 360/370 millions d'années (Le Hébel et al., 2002), concomitant à une exhumation de roches venant de haute pression et faible température, très particulières, dont les plus beaux exemples pour la Bretagne, sont les schistes bleus de l'île de Groix (enregistrant une pression de 18 kbars (60 km de profondeur) et une température de 500-550°C), vers 350 millions d'années (Bosse et al., 2000) ;
- (2) et un amincissement au Carbonifère supérieur, avec la remontée et le refroidissement des roches migmatitiques entre 320 et 300 millions d'années (Gapais et al., 1993 ;

Brown et Dallmeyer, 1996) et la mise en place de granites clairs à 310-300 millions d'années (Bernard-Griffiths et al., 1985 ; Le Hébel et al., 2002).

Le domaine varisque du Pays de Léon

Son histoire se rapproche de celle des domaines sud-armoricains, où dans cette hypothèse, le Léon correspondrait à un bloc exotique d'affinité sud-armoricaine qui à la limite Dévonien-Carbonifère (345 millions d'années environ) se serait juxtaposé à l'Armorique, le long d'une zone de failles ductile, décrochante et dextre. Cependant, cette hypothèse est encore débattue.

Il correspond à la mise en place de roches métamorphiques sous la forme de nappes chevauchantes, incorporant des reliques d'éclotites (métabasites de Lesneven), datées à 440 million d'années. L'intensité de la déformation atteint un métamorphisme (transformation des roches originelles) allant jusqu'à localement l'anatexie (c'est-à-dire la fusion partielle des roches comme à Tréglonou, Plounévez-Lochrist, Plouguerneau) et datée autour de 380 millions d'années. Enfin, cet ensemble subit la mise en place des granites d'âge carbonifère (300 millions d'années environ) et le fonctionnement de zones de cisaillement ductiles décrochantes (dans Cagnard F., 2008).

2.1.3. L'histoire post-hercynienne

Les lignes qui suivent s'inspirent très largement de l'article de M. Ballèvre et collaborateurs, paru en 2012/2013, intitulé : « Histoire géologique du Massif armoricain : actualité de la recherche, dans le Bulletin de la Société Géologique et Minéralogique de Bretagne (SGMB), et compléter d'illustrations et autres articles de synthèse.

Le Carbonifère supérieur (320-300 Ma)

Alors que les plaques s'entrechoquent et que l'épaississement de la croûte terrestre est maximal, des bassins sédimentaires s'installent au Viséen au Westphalien (entre 340 et 310 Ma). Ces bassins annoncent la fin de la collision à la fin du Westphalien (310 millions d'années), la création d'une multitude de petits bassins stéphaniens (310-300 Ma ; Illustration n°5).

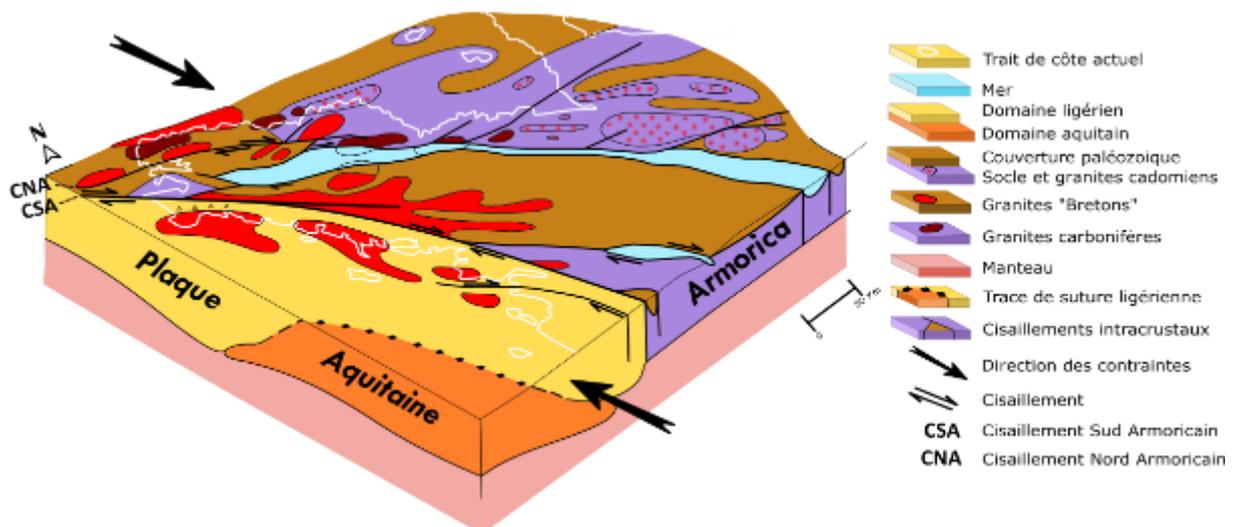


Illustration 5 : Bloc diagramme de la Bretagne au Carbonifère (330 -300 millions d'années)

Cet épisode d'effondrement gravitaire est généralisé à l'ensemble du domaine sud-armoricain. Au sud du Cisaillement Sud-Armoricain (CSA), une zone de cisaillement ductile, en faille normale, datée aux alentours de 300 Ma par quelques intrusions de leucogranites syncinématiques (Quiberon : Brown et Dallmeyer, 1996 ; Sarzeau : Turrillot et al., 2010), sépare :

- Un ensemble supérieur de granites porphyroïdes de Belle-Île à la Vendée et les schistes bleus de Groix et du Bois-de-Céné,
- D'un ensemble sous-jacent de gneiss et schistes du Golfe du Morbihan, Sables d'Olonne (Gapais *et al.*, 1993 ; Cagnard *et al.*, 2004).

Dans la partie supérieure, l'extension ductile de direction E-W dans les granites ? porphyroïdes comme dans les schistes bleus de l'île de Groix, développent des blocs basculés d'échelle décimétrique pouvant marquer l'épisode extensif carbonifère. Dans la partie inférieure, c'est un dense réseau de filons granitiques de direction N20 qui s'est mis en place, dont celui de l'île d'Arz fait partie.

Cette extension est synchrone avec le CSA mais n'est pas reconnue au nord de celui-ci, et la cinématique du CSA peut être en partie, compatible avec ce mouvement extensif. Cet effondrement est associé à la naissance de nombreuses intrusions granitiques.

Cette extension est accompagnée des successions sédimentaires qui enregistrent l'érosion de la chaîne dont certains niveaux sont charbonneux comme au **Stéphanien**, comme le long du CSA à Quimper ou dans la Baie des Trépassés.

Au Permien (300-250 Ma) : la Manche s'émancipe.

Faisant suite à l'extension carbonifère supérieur, le rifting de la Manche n'a pas d'effet direct sur le Morbihan.

Le Trias (250-200 Ma) : érosion

Le Trias est une longue période d'érosion c'est-à-dire où les reliefs vont être arrondis, ameublés. Si sur le Massif Armoricain breton, il n'existe pas de dépôts triasiques (pour le moment reconnus) ; cependant dans les dépôts triasiques de bassin de Paris, des éléments provenant de la Bretagne sont présents, comme ceux issus des unités de Saint-Georges-sur-Loire ou des Mauges, attestant que le Massif Armoricain correspondait à un relief. Ce n'est qu'à la fin du Trias que la sédimentation reprend sur les marges du Massif armoricain. Cependant entre la base du Permien (env. 290-270 Ma) et la fin du Trias (env. 210-200 Ma), persiste une lacune de 60 Ma environ, ce qui souligne une histoire continentale du Massif armoricain (Illustration n°6 à gauche).

Les prémisses de l'ouverture de l'Atlantique et la remontée de la plaque Afrique

Avec la fermeture des domaines océaniques lors de la formation des chaînes de montagnes cadomienne et hercynienne, le résultat a été la création d'un continent important la Pangée.

L'ouverture de l'Atlantique peut être liée par une accumulation importante de chaleur sous la Pangée. Le supercontinent va se disloquer permettant d'observer d'une rive à l'autre de l'Atlantique des parties de cette chaîne varisque. Dans un premier temps constituant la microplaque ibérique (Espagne, Portugal), qui se séparera de l'Europe au moment de l'ouverture du golfe de Gascogne, au Crétacé. Enfin l'ouverture de l'Atlantique Sud entrainera une remontée de la plaque Afrique vers le Nord et la création de la chaîne pyrénéenne.

Les témoins de cette histoire géologique ne sont pas clairs dans le Massif Armoricain, en termes de parts respectives à attribuer à un évènement ou à un autre.

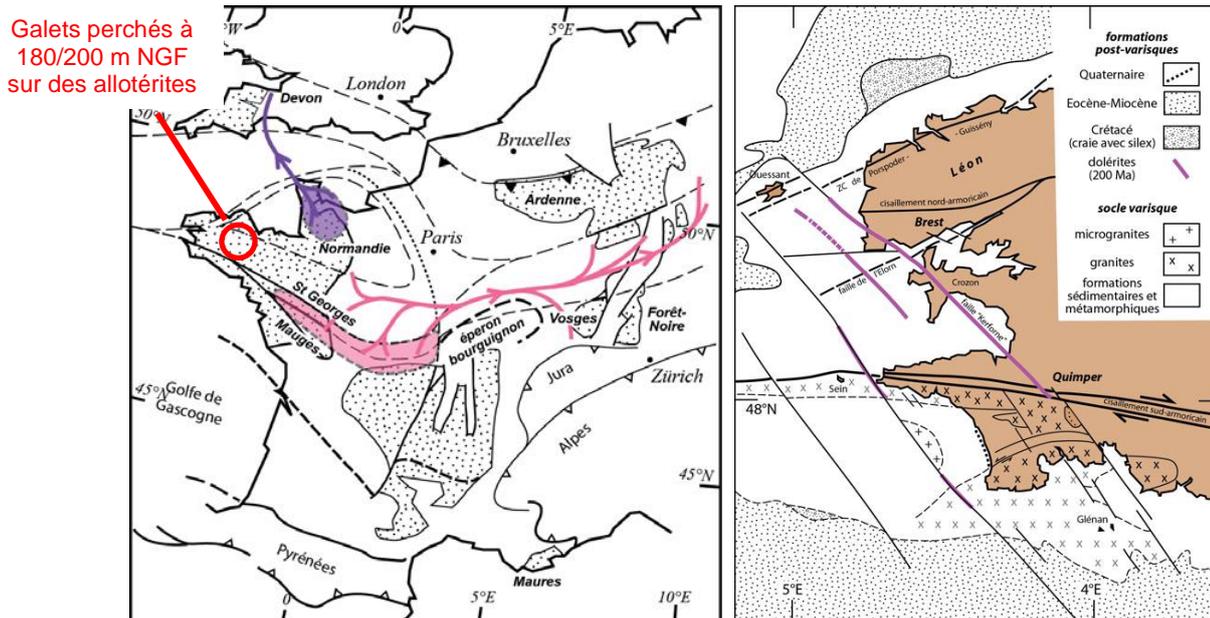


Illustration 6 : Evolution géologique post-hercynienne du Massif Armoricain (modifié d'après Ballèvre et al., 2013)

Les seules roches (ou formations géologiques) avec des âges qui coïncident avec cette période sont la présence des filons de dolérites. Dans l'ouest du Massif Armoricain, ces filons de dolérites de 10 à 30 m d'épaisseur atteignent des longueurs considérables (plusieurs dizaines, voire une centaine de kilomètres). Le plus connu est celui qui recoupe suivant une direction SE-NW toutes les structures hercyniennes depuis la baie de Concarneau jusque dans le Léon (Caroff et al., 1995 ; Caroff et Cotten, 2004). Ces dolérites sont des roches basaltiques de type tholéiitique, issues de magmas de la fusion partielle du manteau supérieur avec une contamination de la croûte inférieure, et ils sont datés à la limite Trias/Jurassique à environ 200 Ma (Jourdan et al., 2003) (Illustration n°6 à droite).

Ces filons parallèles aux failles tardives varisques (comme la « faille Kerforne ») se retrouvent aussi sur les marges continentales américaines et africaines. Dans l'Atlantique septentrional, de tels filons sont également connus à Terre-Neuve et en Espagne. Les filons doléritiques de la partie orientale du Massif armoricain sont donc généralement considérés comme associés aux premiers stades du rifting atlantique et permettent de déterminer la dérive apparente des pôles au Jurassique (Sichler et Perrin, 1993).

La transgression jurassique

L'histoire géologique entre 240 et 65 millions d'années demeure assez mal connue. Les séries sédimentaires du Trias et du Jurassique (230 à 200 millions d'années) qui se déposent en Manche, en Aquitaine et dans le bassin parisien n'ont aucun témoin connu sur la péninsule bretonne. Seules des intrusions magmatiques (sous la forme de filons de dolérites de direction NW-SE à NS) et datées à 205 Ma, témoignent d'une période d'extension, prélude de l'ouverture de l'océan Atlantique nord.

Aucun témoin de la transgression jurassique ne subsiste au cœur du Massif armoricain, bien que la possibilité de l'existence de ce Jurassique dans le sous-sol de Chartres-de-Bretagne ait été envisagée, mais réfutée à la suite du forage Chartres1 (Bauer et al., 2010). A une échelle globale, celle de la France, voire de l'Europe occidentale, la mer jurassique recouvrait une paléotopographie plane: la chaîne varisque fut, peut-on dire, pénéplanée dès le début du

Jurassique. Cette « pénéplaination » n'est probablement pas le seul résultat d'une longue période d'érosion, mais la combinaison entre cette érosion et une ou plusieurs tectoniques extensives.

La chaîne varisque, développée durant le Dévonien et le Carbonifère, a été pénéplanée au Permien et au Trias, comme le montre la « fossilisation » de sa paléotopographie par la transgression jurassique.

L'image selon laquelle le Massif armoricain constitue depuis le Permo-Trias une île au sein des mers méso-cénozoïques ne résiste cependant pas à l'analyse : le relief actuel du Massif armoricain – c'est-à-dire le fait même de l'affleurement du socle varisque – montre au contraire que ce socle fut déformé au Méso-cénozoïque (Guillocheau *et al.*, 2003 ; Dugué *et al.*, 2005).

Le Cénozoïque (la maladie tertiaire) :

Au Cénozoïque (65 millions d'années), la Bretagne est considérée comme essentiellement continentale (Illustration n°7; Durand, 1960 ; Estéoule-Choux, 1967) et les roches du massif armoricain (schistes, gneiss et granites) vont subir une altération, les transformant in situ en arènes, limons et argiles d'altération (riche en kaolinite) : La maladie tertiaire de Yves Milon (1932). A ces altérites résiduelles, on retrouve des occurrences de fer (cuirasses), exploitées depuis la préhistoire. L'Éocène inférieur (55 millions d'années) est caractérisé par une période d'altération importante des roches du substratum, décrites ci-dessus, sous des climats chauds et humides, déterminant des profils latéritiques de 70 à 100 m d'épaisseur. La fin de cette période d'altération est marquée par des horizons de silicification (conglomérats, grès ladères et de sabal) interprétés par Wyns et Guillocheau (1999), comme une période, pour l'Europe du nord, caractéristique d'une subsidence lithosphérique. Ces silicifications d'âge supposé Eocène moyen sont observables sur l'ensemble de la Bretagne.

Les failles NW-SE cassantes vont s'individualiser sur les filons de dolérites carbonifères à triasiques, et jouer pendant le Tertiaire (comme la Faille ou Accident de Quessoy/Nort-sur-Erdre QN/E ou encore de Chartres-de-Bretagne/Pont-Péan) pour créer des bassins d'effondrement (grabens) qui vont se remplir de sédiments argilo-sableux accompagnés de minces niveaux de lignite. Les mouvements tectoniques syn- à post- Éocène affectent les niveaux latéritiques, leur conférant une géométrie « en touches de piano ». Le remplissage de ces bassins va se poursuivre de l'Oligocène au Miocène par l'intermédiaire d'argile, de calcaires, et de sables calcaires (Mer des faluns) (Illustration n°7). Au Miocène tardif - Pliocène, les sables rouges et les dépôts marins associés vont venir combler une paléotopographie de type « ria » (Guillocheau *et al.*, 1998).

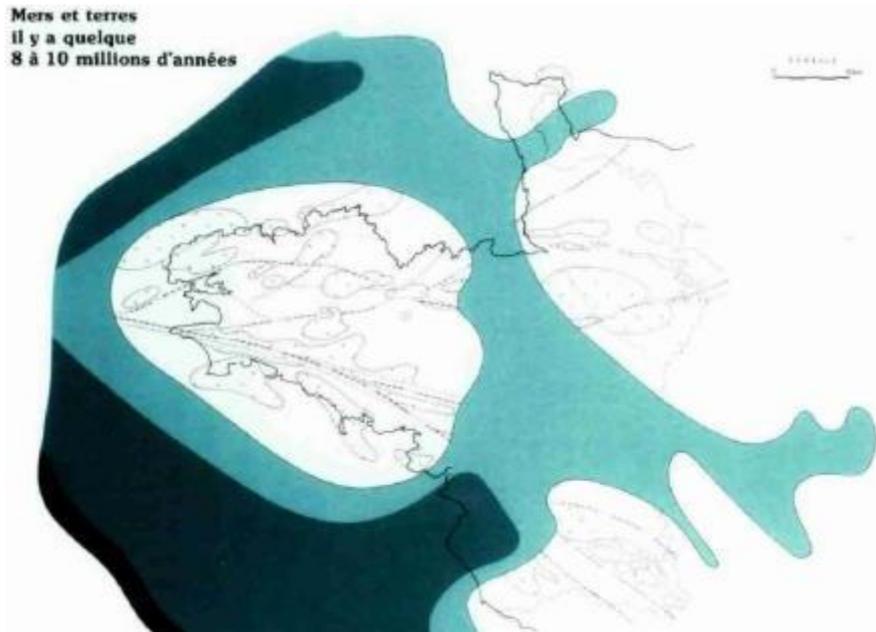


Illustration 7 : La mer autour du Massif armoricain il y a 8 à 10 millions d'années

Le Quaternaire correspond au début des cycles glaciaires et donc à un changement climatique général vers 2,4 millions d'années. Une alternance de périodes froides et de réchauffements (périodes tempérées ou interglaciaires) va se succéder où pendant les périodes froides, la ligne de rivage va être plus basse que l'actuel et/ou sur les parties continentales, un gel va provoquer la fracturation des roches affleurantes et leur transit sur les versants, par cryoturbation, fauchage et gélifluxion (*heads*). Pendant les périodes tempérées interglaciaires, les niveaux des mers vont être proches de l'actuel (Illustration n°8).

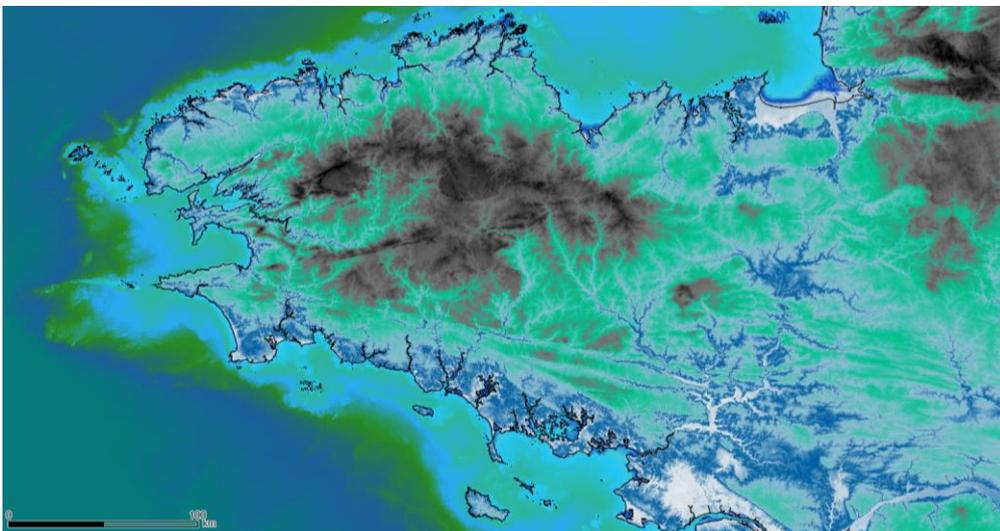




Illustration 8 : En haut, la côte bretonne au début du Quaternaire où le niveau de la mer atteint les + 100 m au dessus du littoral actuel, la partie de la Bretagne en teinte de gris reste immergée

En bas, la côte bretonne pendant les dernières glaciations où le niveau de la mer est d'environ -100 m en dessous du littoral actuel, entraînant une côte à 50 voir 100 km au large du rivage actuel, la partie de la Bretagne en teinte de gris reste immergée (Traitement à terre sur la BD Alti IGN à 50 m et en mer du MNT Gascogne du SHOM à 100 m).

L'Holocène (interglaciaire actuel) marque le retour d'un climat tempéré depuis 10 000 ans environ. Même si la fin de la dernière glaciation est mal connue, on dispose de nombreuses informations sur la flore et les variations du niveau marin depuis 8 000 ans (Morzadec-Kerfourn, 1974). La ligne du rivage est ainsi remontée de 80 m jusqu'au 0 actuel (Illustration n°8).

De ce fait, les principales vallées des rivières côtières actuelles se prolongent en mer, ce réseau de paléo-vallées ennoyées a été creusé lors de périodes froides, en relation avec les abaissements importants du niveau marin, notamment au Pléistocène supérieur (entre 8 000 et 120 000 ans).

2.1.4. La sismicité actuelle

La base de données nationale de la sismicité historique [SisFrance-> <http://www.sisfrance.net/>] du BRGM, de l'EDF et de l'IRSN (2008) dénombre pour les séismes d'intensité épicentrale supérieure ou égale à 5, pour la région Bretagne, 38 séismes, s'étalant de 1843 à 2002 (Illustration n°9). L'un des séismes les plus importants pour la région Bretagne est la secousse sismique du 30 septembre 2002, avec une intensité épicentrale de 5,5 dans la région d'Hennebont. Ce séisme n'a pas fait de victimes, mais a causé des dégâts matériels réduits comme des chutes de cheminées, fissurations de murs, bris de vitres. Le séisme du 30 septembre 2002 à Hennebont a fait l'objet d'un article scientifique (J. Perrot et al., 2005) et il serait la conséquence d'une faille d'orientation N120-N150 ayant joué suivant une contrainte locale orientée NW-SE avec une composante décrochante et une faille normale (affaissement). La profondeur de l'épicentre de ce séisme se situerait à environ 12 km.

Cependant, d'autres séismes peuvent être signalés, comme celui du 9 janvier 1959 en Cornouaille à Melgven (29), avec une intensité épicentrale de 7, ou encore celui du 16 janvier 1930 d'intensité épicentrale de 7 à Meucon dans les Landes de Lanvaux.

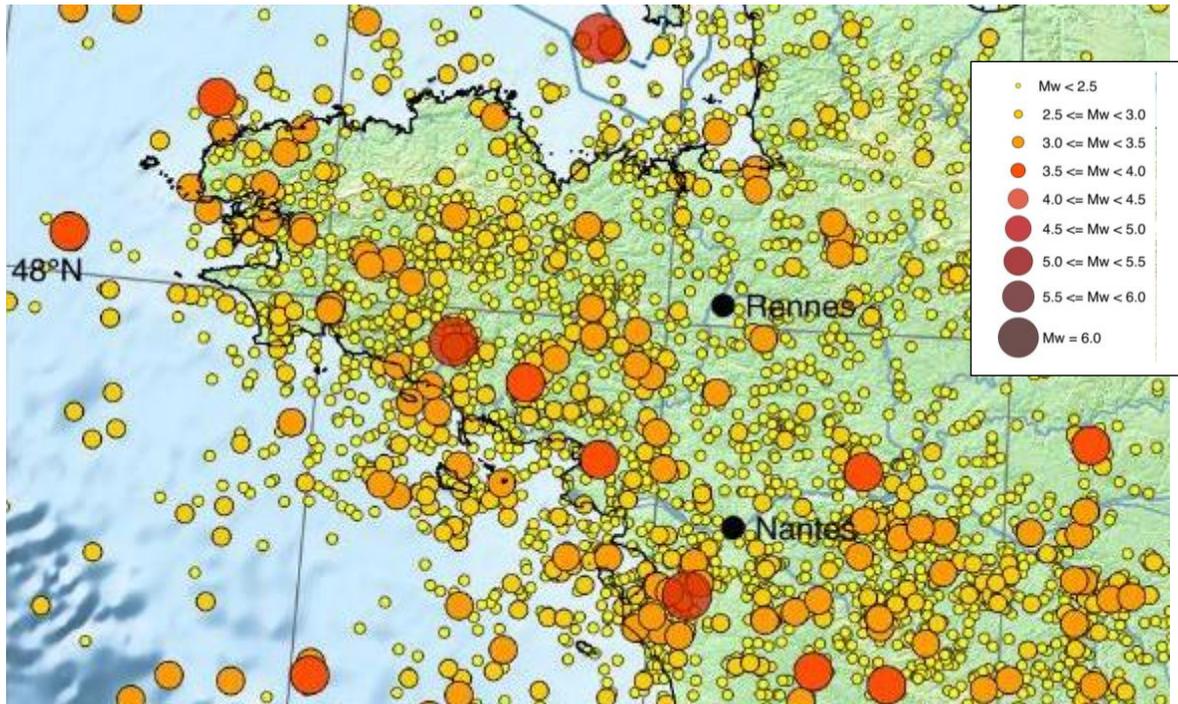


Illustration 9 - Sismicité instrumentale de l'Ouest de la France métropolitaine entre 1962 et 2018, en fonction de leur intensité épicentrale (M_w).

2.2. HISTOIRE DE CISAILLEMENTS, FAILLES ET FRACTURES

2.2.1. Qu'est-ce qu'une faille, fracture (diacalse) ou autre cisaillement ?

Définitions

Une **faille** est une structure tectonique, correspondant : (1) à un **plan** (ou une zone planaire dans laquelle les roches sont déformées : le **cisaillement**), séparant **deux parties distinctes** et (2) sur lequel il y a eu du **déplacement** (les deux blocs rocheux se sont déplacés l'un par rapport à l'autre).

Les blocs sont communément appelés « **compartiments** ». Associés aux failles, des **plans parallèles** à celles-ci sont présents mais sans déplacements se sont les **fractures** ou **diaclasses**.

En fonction du déplacement sur le plan de faille, déplacement qui correspond à un **régime de contraintes tectoniques (compressif ou extensif)**, les failles sont soit appelées « **normales** » en régime tectonique extensif, soit appelées « **inverses** » en régime tectonique compressif.

L'orientation du plan de faille par rapport à la contrainte tectonique principale va avoir une influence sur les mouvements de blocs le long de celle-ci, une faille verticale par exemple en régime compressif aura un jeu **décrochant** soit vers la droite dit « **dextre** », soit vers la gauche dit « **senestre** » (Illustration n°10).

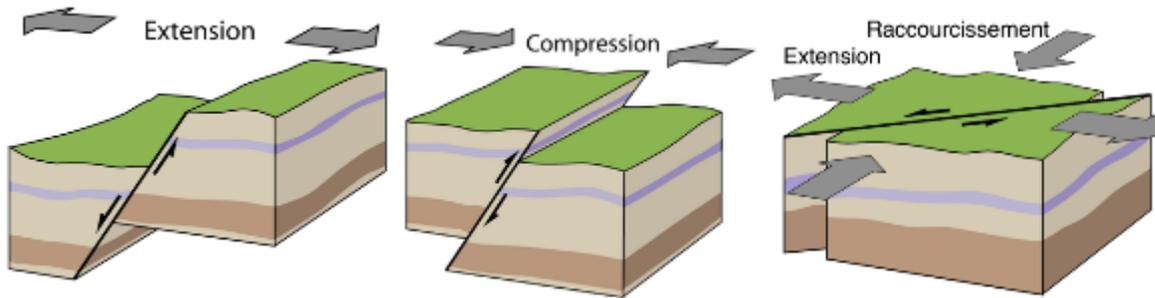


Illustration 10 : Schéma conceptuel des différents types de failles avec le régime tectonique associé : à gauche, faille normale, au milieu, faille inverse et à droite, décrochement (Source : <https://www.pairform.fr/doc/17/138/467/web/co/FI-6.html>)

Quelques caractéristiques d'une faille

Le plan de la faille est défini par **cinq caractéristiques principales (Illustration n°11)** :

- une **direction** donnée par rapport au Nord (par exemple N090°, pour une faille Est-Ouest),
- une inclinaison ou **pendage** (de 0 à 90°),
- d'un **sens** de déplacement,
- d'une direction de déplacement ou **pitch** (stries qui marquent le plan de faille),
- et d'un **rejet** (distance de déplacement liée à la faille repérée grâce à un marqueur quelconque).

Un **sixième** paramètre est celui de **l'épaisseur** qu'une faille peut avoir, c'est-à-dire, la zone d'influence de la déformation associée à celle-ci. Cette épaisseur est définie comme la « Damage Zone » des anglo-saxons mais est une caractéristique difficilement évaluable dans des conditions de terrain de la Bretagne.

Plus la **déformation** sur le plan de faille est **profonde** plus les températures et les pressions sont importantes et plus la déformation sera **ductile, plastique**. A l'inverse, plus la déformation est proche de la **surface** et plus la déformation sera **cassante**.

Les failles sont observables avec les mêmes caractéristiques depuis l'échelle microscopique (millimétrique), à l'échelle de l'affleurement rocheux jusqu'à celle des plaques tectoniques (plusieurs centaines de kilomètres). Les grandes failles se trouvent aux limites de plaques et aussi au sein des zones déformées intraplaques.

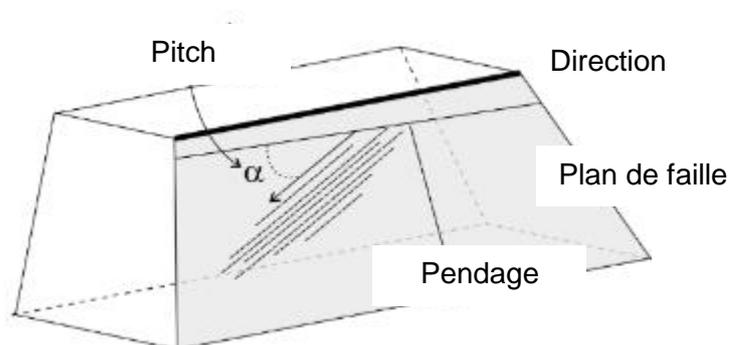


Illustration 11 : Quatre caractéristiques principales du plan de faille

Implications en hydrogéologie de socle

Les implications en hydrogéologie sont importantes. Un régime de contraintes **compressives** aura plutôt tendance à **refermer** la porosité des fractures des roches alors qu'un régime **extensif** aura tendance à créer une nouvelle porosité de fractures qui viendra se superposer à la première intrinsèque des matériaux ou des roches. Dans le cas des décrochements correspondant souvent à des failles verticales, ils pourront montrer des structures à la fois compressives et extensives.

Le fait que les failles soient **observables à toutes les échelles** depuis l'affleurement jusqu'à la mise en carte régionale, implique que les observations peuvent avoir des répercussions sur la **cinématique** (normale, inverse ou décrochante) régionale, sur la **géométrie du réservoir souterrain et sur leur répartition géographique**.

2.2.2. Les failles, fractures ou autres cisaillements en Bretagne

Différentes générations de failles, fractures et cisaillements

Avec une histoire géologique aussi longue, le massif armoricain et la Bretagne ont une histoire tectonique complexe et polyphasée.

Les failles et grands cisaillements bretons ont obéi chacun à des régimes de contraintes différents en nature, en orientation et en intensité, et où certaines de leurs failles ont certainement joué plusieurs fois.

En fonction de ces différents régimes de contraintes tectoniques et des orientations des failles par rapport à ces régimes tectoniques, les failles ont ou n'ont pas eu des rejeux tectoniques identiques et donc créer ou pas d'éventuelles nouvelles 'porosités' de fractures tectoniques.

Reconstitution succincte des paléo-tenseurs de contrainte : Cadomien, Paléozoïque, Hercynien et post-Hercynien puis Néogène, et implications en hydrogéologie de socle

L'illustration n°12 est une tentative de reconstruction des régimes de contraintes en fonction de la littérature et des orientations de grandes failles connues du massif armoricain en Bretagne pour la période cadomienne à pliocène supérieure.

En termes de jeux tectoniques, les failles les plus anciennes sont en rouge et correspondent à la période cadomienne entre 700 à 540 millions d'années. Les flèches rouges correspondent à la direction moyenne de contrainte principale compressive pour cette période. Les failles parallèles à ces flèches vont avoir potentiellement des jeux extensifs alors que celles perpendiculaires vont avoir des jeux chevauchants (ou en faille inverse) à décrochants (Illustration n°12).

Le système est compressif, et malgré ce régime, les failles de direction N020/030° peuvent s'ouvrir et générer une porosité sur les roches impliquées.

Les failles en bleu appartiennent à la période extensive paléozoïque inférieure. Les failles N070° en moyenne sont des failles normales pouvant avoir elles aussi, généré des fractures dans les roches paléozoïques inférieures comme la Formation de Pont-Péan ou du Grès armoricain mais aussi aux roches sous-jacents briovériennes.

A ces deux périodes tectoniques, la compression hercynienne au sens large (flèches roses) vient se surimposer/superposer aux deux autres. Cette surimposition hercynienne va refermer certainement des structures ouvertes antérieurement et en ouvrir de nouvelles.

Alors que les failles perpendiculaires aux flèches roses (N080° à N120°) vont être des failles compressives (chevauchantes ou failles inverses ou encore décrochantes) avec une porosité associée plutôt refermée, celles orientées N150°, ont une orientation favorable à l'ouverture.

A fin de la période hercynienne, l'effondrement général de la chaîne va générer des failles extensives importantes comme en Sud Bretagne (dans le sud du Finistère et du Morbihan).

Enfin, l'ouverture de l'Atlantique Nord puis la remontée de la plaque Afrique (par l'intermédiaire de la péninsule hispanique), vont venir comprimer la Bretagne et le Massif armoricain (flèches violettes). La conséquence va être une ouverture Est-Ouest donc la création de failles ou structures extensives Nord-Sud, injectées par les filons de dolérites mais aussi le rejeu de failles bien orientées ou la création de nouvelles et notamment celles N150° (Illustration n°12).

Cette épisode va se poursuivre à l'Eocène et les structures ouvertes et accentuées vont encore rejouer à l'Oligocène. Ce système transtensif et potentiellement extensif va certainement accentuer une « certaine fracturation générale » du Massif armoricain.

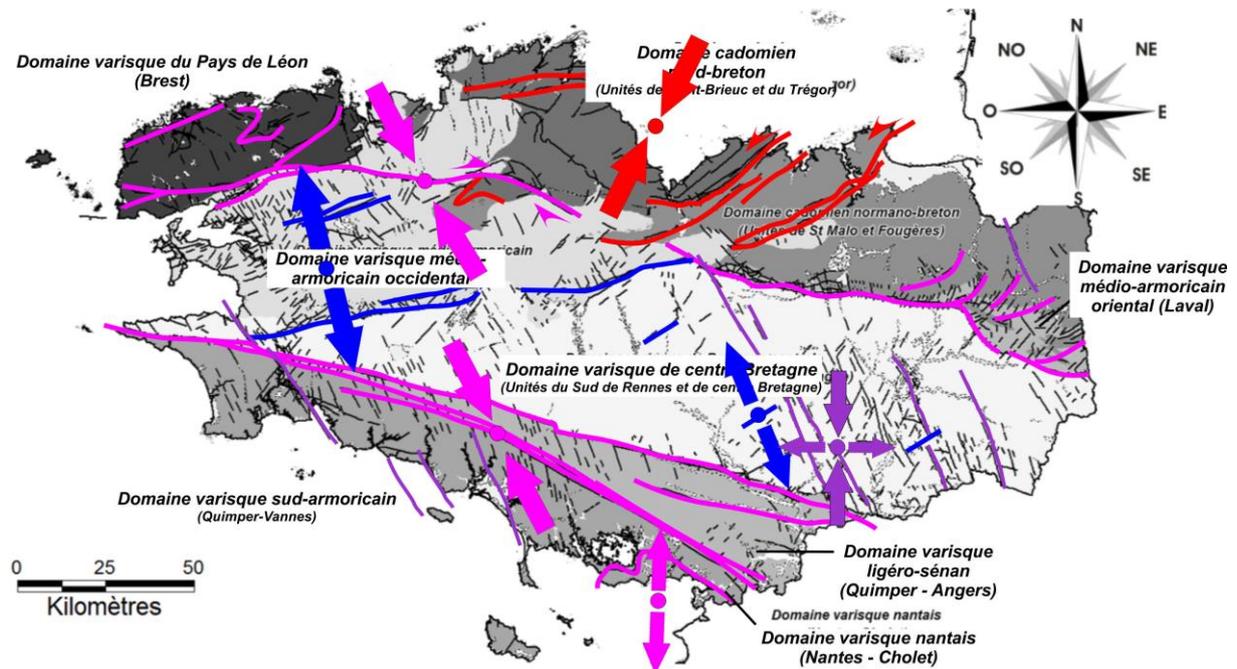


Illustration 12 : Régimes tectoniques simplifiés et failles/cisaillements associés de Bretagne depuis le Cadomien (700 millions d'années) jusqu'à l'Oligo-pliocène sup. (2 millions d'années)

2.3. HYDROGEOLOGIE DE « SOCLE », HYDROGEOLOGIE EN BRETAGNE

2.3.1. Les structures aquifères

Régionalement le massif armoricain ne possède pas de grands aquifères et l'hydrogéologie est composée d'une multitude de petits aquifères locaux. Les capacités aquifères locales sont dépendantes de la lithologie, de l'altération et de la fracturation. 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).

Propriétés hydrodynamiques des horizons d'altération des aquifères de socle

En domaine de socle (granites, schistes, etc.), une structure d'aquifère stratiforme découlant de l'altération peut être décrite depuis la surface vers la profondeur par trois zones en fonction de l'altération et de la fracturation rencontrée (Illustration 13).

- **Les altérites** constituent un horizon meuble riche en argiles provenant de la décomposition *in situ* de la roche mère. En raison de sa composition argilo-sableuse, les altérites ont une porosité effective importante souvent comprise entre 3 et 10%. Elles sont donc souvent considérées comme ayant **un rôle capacitif**. En revanche leur perméabilité est généralement faible en l'absence de chemins d'écoulements préférentiels et est généralement comprise entre 10^{-6} et 10^{-8} m/s.
- En dessous, **l'horizon fissuré** se caractérise par une fracturation très dense dans les premiers mètres qui décroît 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 fracturation est dominée par les fractures sub-horizontales. Cet horizon fissuré peut avoir localement une forte perméabilité et assure le **rôle transmissif de l'aquifère**.
- En dessous de l'horizon fissuré, la roche saine n'est perméable que très localement à la faveur de fractures d'origine tectonique.

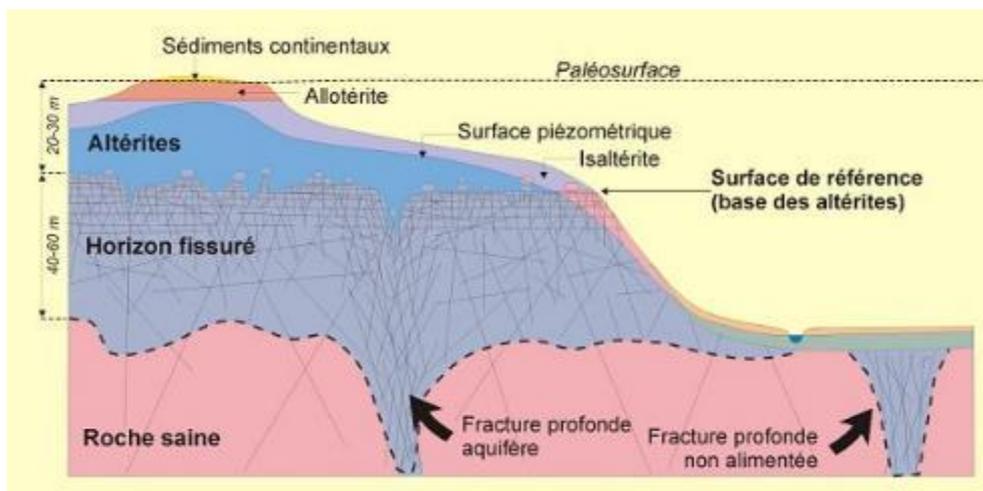


Illustration 13 : Schéma conceptuel des aquifères de socle (Source : Wyns et al., 2004)

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 14) illustre bien ce comportement (Mougin et al., 2008).

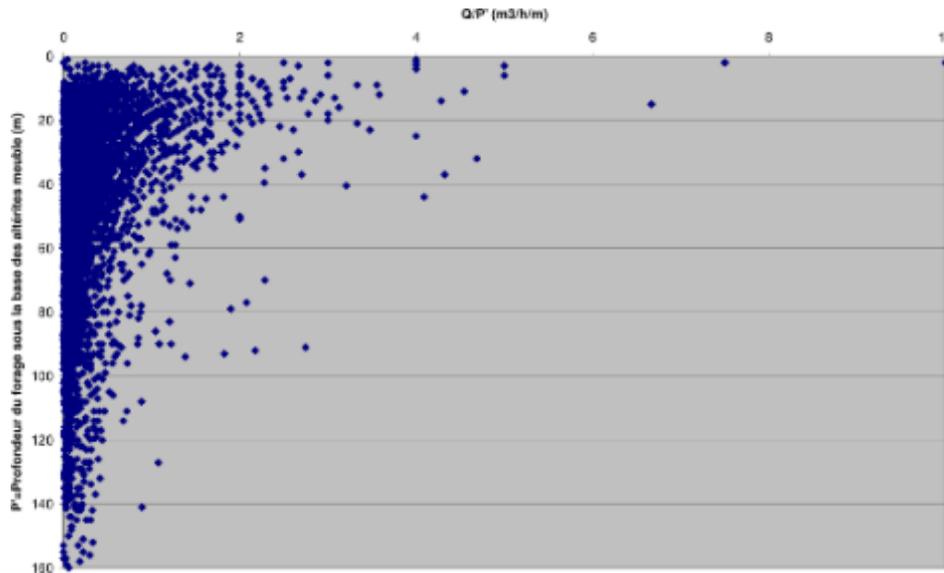


Illustration 14 : Débits instantanés par mètre en fonction de la profondeur du forage en-dessous de la base des altérites (Mougin et al., 2008). Mesures sur différentes lithologies à l'échelle de la Bretagne sur un échantillon de 6 089 forages.

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 lors de la mise en place de plutons granitiques.

L'impact de la présence de failles sur le potentiel d'exploitation et sur la continuité des aquifères de socle est difficile à identifier *a priori* (Bense et al., 2013). Les failles peuvent avoir un rôle de barrière hydraulique ou au contraire de conduit qui rend localement la perméabilité plus importante.

Dans certains cas, les failles sont faiblement perméables (Gleeson and Novakowski, 2009) et agissent comme des barrières hydrauliques. Dans d'autres situations, les failles peuvent favoriser la présence d'importants flux souterrains (Le Borgne et al., 2006; Roques et al., 2014).

La présence de failles donne souvent lieu à des comportements hydrogéologiques complexes, provoqués par des combinaisons entre chemins d'écoulements locaux et régionaux, sans parler des interactions possibles avec des compartiments profonds (Jiménez-Martinez et al., 2013; Roques et al., 2014) et de très fortes anisotropies.

La présence de failles d'échelle régionale peut donner lieu à des débits importants (ex : 110 m³/h sur le site de Ploemeur (Jiménez-Martinez et al., 2013)) mais elle entraîne souvent des comportements complexes avec des échanges entre écoulements souterrains et superficiels (ex : Site de saint Brice-en-Cogles, Roques et al., 2014 ; Illustration 15). Régionalement des relations ont été observées par Roques et al, (2016).

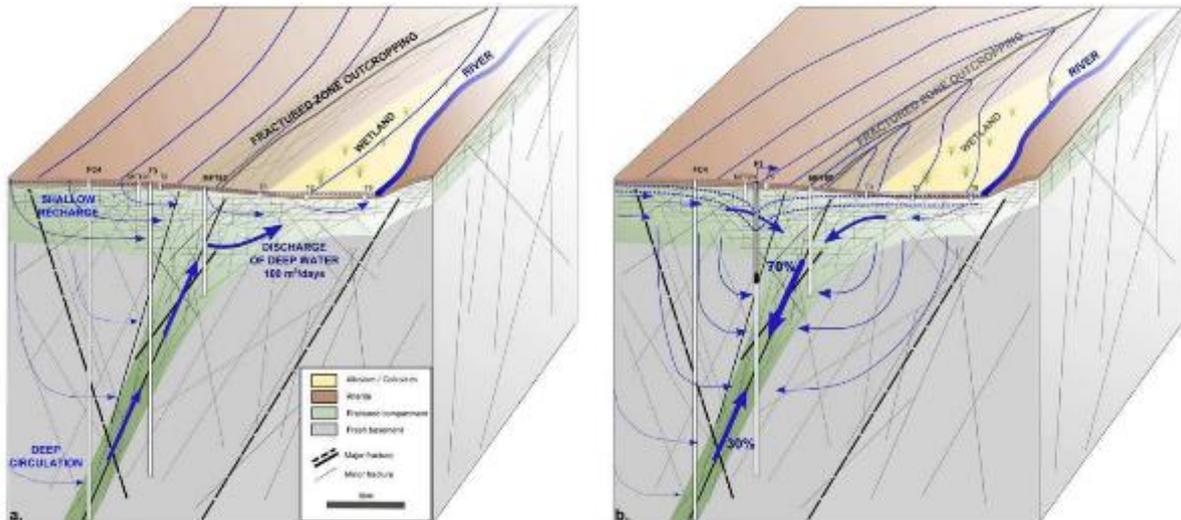


Illustration 15 : Modèle conceptuel des flux souterrains sur le site de St-Brice en Cogles sous a) conditions ambiantes et b) conditions de pompage (Projet CASPAR et thèse de Roques et al., 2014)

2.3.2. Continuité spatiale des aquifères de socle

L'extension des aquifères de socle est contrôlée par la topographie, la présence de failles, les hétérogénéités géologiques (ex : veines de quartz), l'intensité des profils d'altération et la connectivité des fractures formant l'horizon fracturé. Malgré la continuité latérale induite par l'horizon d'altération, l'extension spatiale des aquifères de socle reste très variable et généralement réduite en comparaison des aquifères sédimentaires.

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 eau en raison de la densité de données (et de puits) nécessaires pour une telle définition. Dans un contexte géologique similaire au massif armoricain, en Inde, où la densité de puits et la forte exploitation de la ressource induisent un rabattement des nappes à la base de l'horizon fissuré, Perrin et al., (2011) et Guihéneuf et al., (2014) ont montré sur une zone fissurée peu développée, l'impact de la diminution de la densité de fractures avec la profondeur sur la connectivité des aquifères (Illustration 16). Ces études ont montré que lorsque les niveaux d'eau sont hauts (partie supérieure de l'horizon fracturé), on observe une continuité des écoulements à l'échelle du bassin versant. Cependant quand les niveaux d'eau diminuent très fortement et lorsque le niveau piézométrique atteint la base de l'horizon fracturé, une compartimentation de l'aquifère est observée. Bien que le contexte d'exploitation soit différent dans le Massif armoricain, cette structuration a aussi un impact sur l'exploitation de la ressource à une échelle locale et le transport de contaminants.

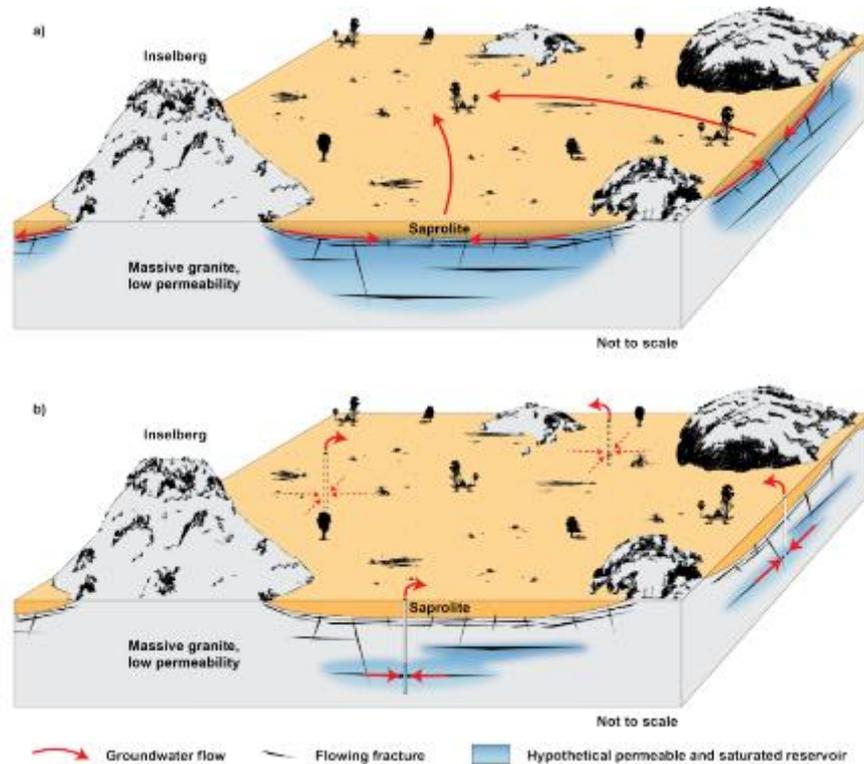


Illustration 16 : Modèle conceptuel des écoulements à l'échelle du bassin versant en fonction des niveaux d'eau : a) en conditions de hautes eaux ; b) en conditions de basses eaux (Guihéneuf et al., 2014)

Influence des hétérogénéités géologiques

Les hétérogénéités géologiques de type « veine 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 fracturée). A proximité du contact avec l'hétérogénéité, le profil dans le granite est toujours caractérisé par des niveaux d'altérites et de zone fracturée subparallèles. Cependant, ils ne sont plus subparallèles à la surface contemporaine de l'altération mais subparallèles aux épontes de la discontinuité (Illustration 17).

Cette forme en U montre un enracinement local du profil d'altération qui 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 de la formation granitique encaissante le filon se fracture et devient perméable, ce qui favorise un approfondissement local du profil. Cet épaissement 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 comportement double porosité, où l'écoulement est chenalisé. D'autres hétérogénéités géologiques, failles, contacts lithologiques, aboutissent au même type de structure.

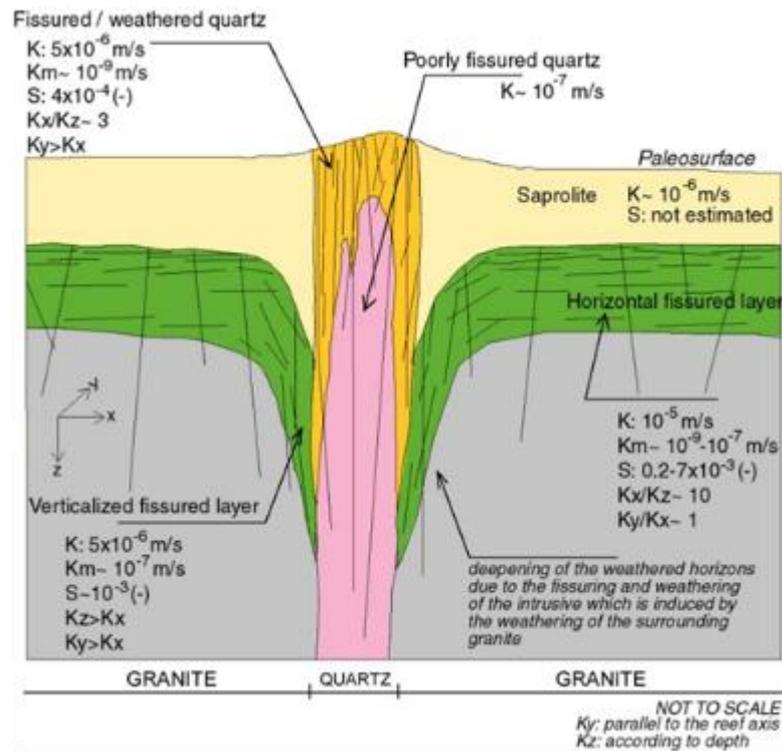


Illustration 17 : Modèle conceptuel d'un aquifère de socle associé à une veine de quartz (Dewandel et al., 2011).

2.3.3. Connaissances hydrogéologiques régionales

Pour faire face aux contraintes et spécificités des aquifères de socle, des méthodes adaptées doivent être développées et utilisées. Dans le contexte du Massif armoricain, le BRGM développe différents projets permettant d'obtenir une meilleure connaissance de ces aquifères pour une exploitation durable de la ressource.

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

Les concepts d'horizon d'altération ont été appliqués à l'échelle régionale au travers du projet BRGM SILURES Bretagne. Le projet SILURES, 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 régionale en se basant essentiellement sur des données existantes. Le projet est basé notamment sur la BSS (Banque du sous-sol) qui recensait 25 000 forages en 2008.

Sur la base des forages présentant des informations sur la profondeur des différents horizons (altérites, horizon fissuré) ce projet a permis d'aboutir, en plus d'une base de données, à différentes cartes régionales (échelle 1/250 000) incluant notamment une cartographie des altérites et de l'horizon fracturé, des secteurs où l'exploitation de l'eau souterraine peut être encouragée et de l'inertie du milieu physique souterrain.

Les cartes des altérites et de l'épaisseur de l'horizon fracturé ont été réalisées à partir de données de plus de 12 000 forages en se basant sur les observations de profondeur des différents horizons. Une modélisation de l'épaisseur des altérites en place et de l'épaisseur de l'horizon fracturé a été réalisée par krigeage avec les incertitudes associées (Illustration 18).

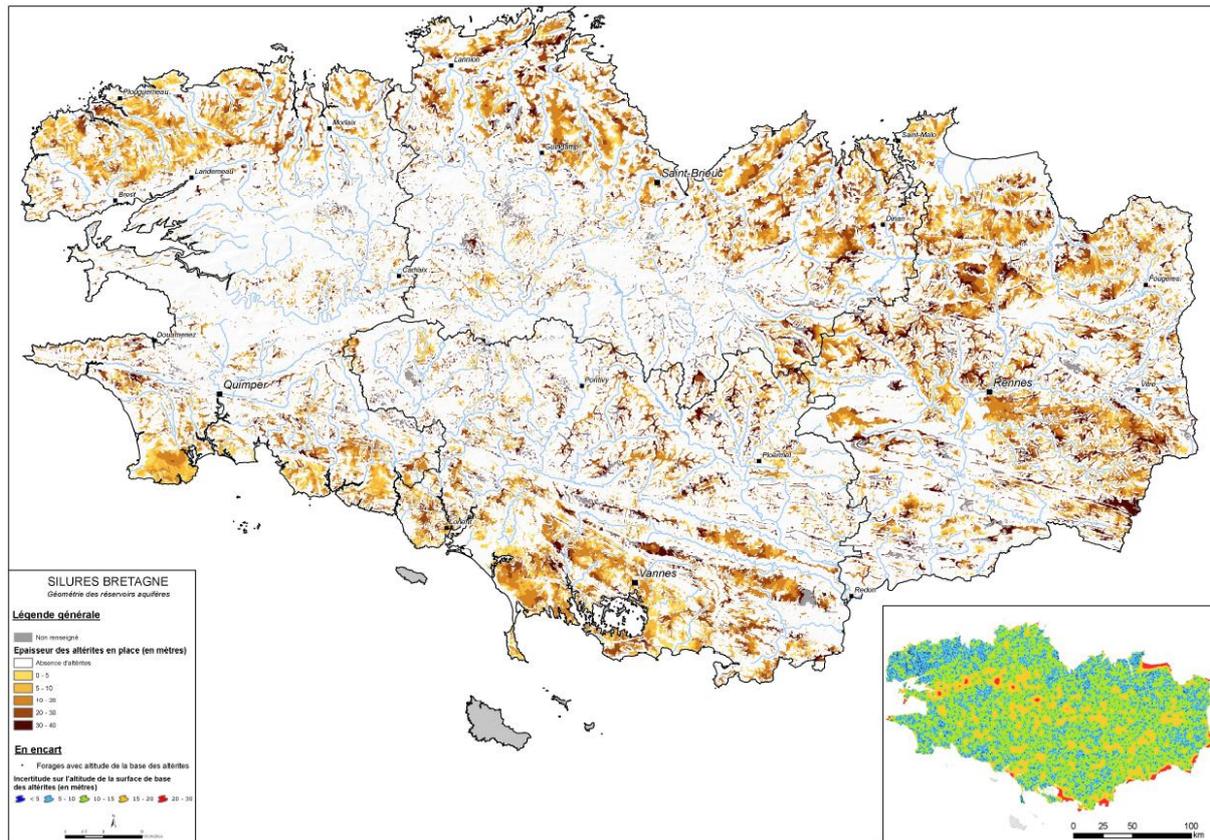


Illustration 18 : Cartographie des altérites en place (m) avec l'incertitude en encart – Projet SILURES (Mougin et al., 2008)

Ces cartes ont ensuite été mises en relation avec les études statistiques sur les débits des forages, les profondeurs et la géologie pour proposer une cartographie des zones où l'exploitation de l'eau souterraine peut être encouragée (zones de potentiel plus important - Illustration 19). Cette méthode s'appuie notamment sur des estimations de débits du milieu fracturé utile ou horizon fissuré utile (Illustration 19) et une identification des formations géologiques fournissant les meilleurs débits.

Cette cartographie correspond à l'épaisseur du sous-sol riche en fissures (provenant de l'altération des roches) qui apporte la meilleure productivité en termes de débits instantanés. Suites à deux régressions linéaires (débit moyen du quartile supérieur / débit du milieu fissuré utile ; krigeage du débit instantané obtenu en foration rapporté à la profondeur du forage sous la base des altérites meubles / calcul du débit linéaire du milieu fissuré utile), l'épaisseur du fissuré utile a été déduite à partir du rapport des deux paramètres : débit du milieu fissuré utile (en m^3/h), et débit linéaire du milieu fissuré utile (en $\text{m}^3/\text{h/m}$).

Cette carte d'intérêt hydrogéologique a été réalisée sur 126 formations de socle cristallin. En Bretagne, le débit de l'horizon fracturé utile varie de 3,8 à 42,6 m^3/h avec une moyenne de 13,5 m^3/h pour l'ensemble de la région.

La carte des débits du milieu fracturé utile indique, pour 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 milieu fracturé utile.

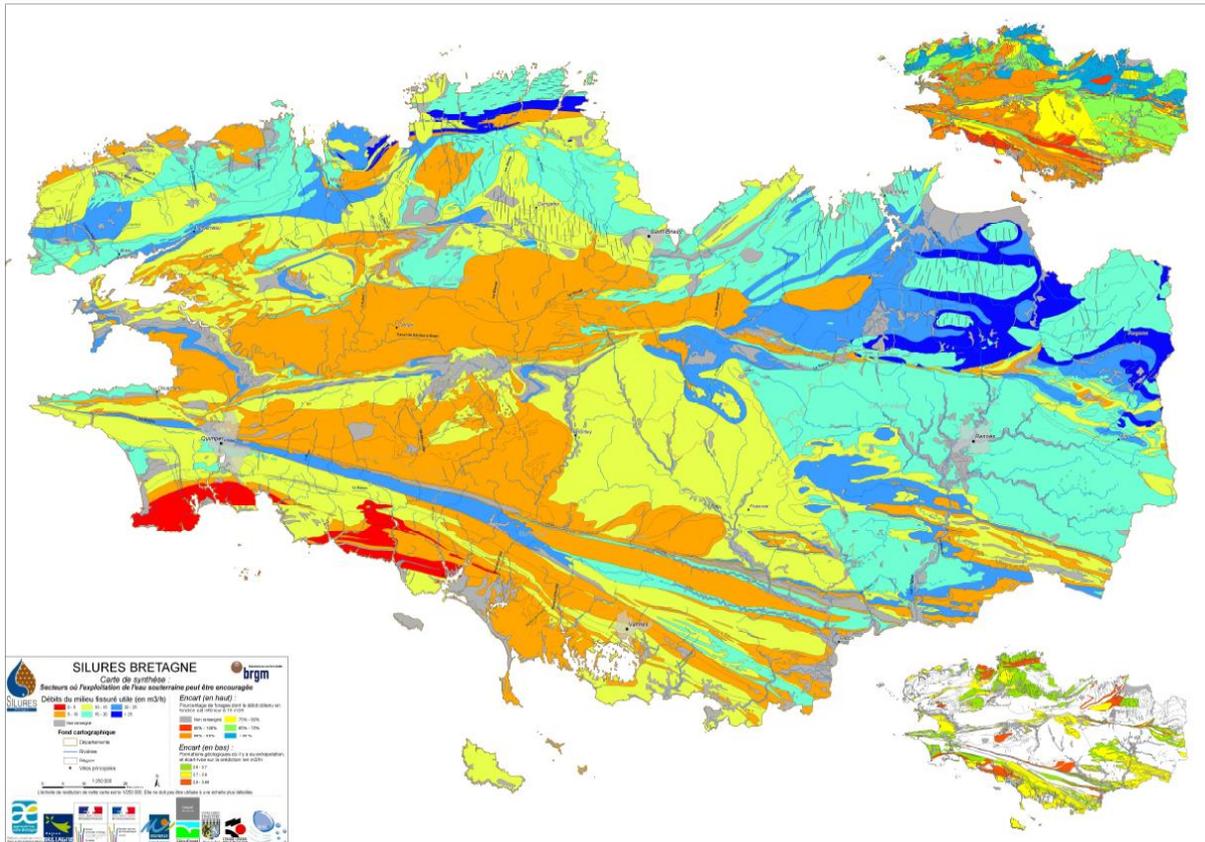


Illustration 19 : Cartographie des secteurs où l'exploitation de l'eau souterraine peut être encouragée, en encart, formations géologiques sur lesquelles il y a eu extrapolation et écart-type sur la prédiction (en mètres) – Projet SILURES (Mougin et al., 2008)

Les données et connaissances acquises dans ce projet sont aujourd'hui couramment utilisées dans de nombreuses études à l'échelle locale.

Caractérisation de l'hétérogénéité (Projet MORPHEUS)

La régionalisation des paramètres hydrodynamiques du projet SILURES fournit des informations pour la recherche en eau, la gestion régionale des ressources et sert de base pour de nombreuses autres applications. Cependant, elle ne permet pas de prendre en compte l'hétérogénéité des propriétés d'écoulement à l'échelle du bassin versant. Le projet MORPHEUS (MéthOdologie de Régionalisation des Propriétés HydrogEologiques des aquifères de Socle – BRGM, Dewandel et al., 2020) s'applique à quantifier les variations de perméabilité et de porosité à cette échelle.

L'objectif principal du projet est de tester des méthodes de régionalisation des paramètres hydrodynamiques (perméabilité et porosité) en s'appuyant au maximum sur les données disponibles ou sur des 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. Le projet s'appuie sur des travaux antérieurs menés sur le socle Indien (Dewandel et al., 2012, 2017a) et les péridotites de Nouvelle Calédonie et d'Oman (Dewandel et al., 2004, 2017b).

Des mesures (piézométrie, jaugeages de cours d'eau, résonance magnétique protonique) ont été effectuées sur les bassins versants du Nançon et de la Maudouve. L'inversion de ces données permet d'obtenir des cartes détaillées à l'échelle du bassin versant. Des exemples de cartes produites sont fournies (Illustration 20).

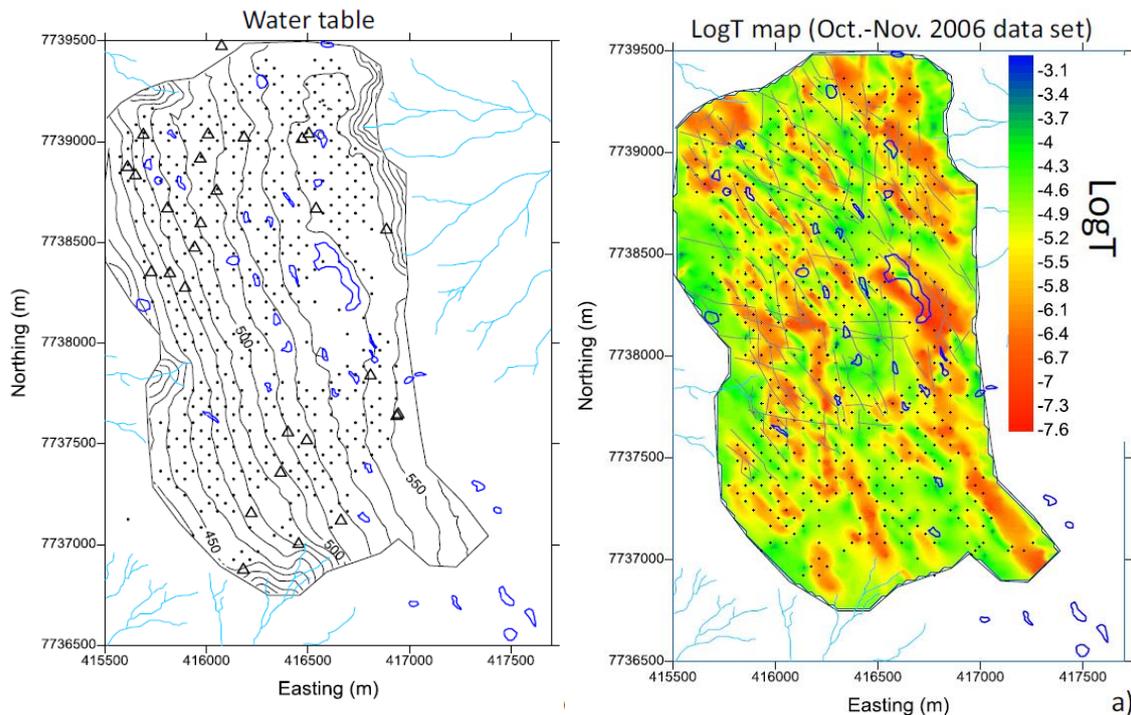


Illustration 20 : Carte piézométrique (à gauche) et carte de transmissivité obtenue par inversion sur le massif de Tiébaghi en Nouvelle Calédonie (à droite) (Dewandel et al., 2017)

Les cartes 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.

Sites et comportements remarquables (Projets RAPSODI et CASPAR)

Des études détaillées sont aussi conduites dans des cas spécifiques comme dans le cas de forages « semi-profonds », jusqu'à 300 m, réalisés en Bretagne.

Ainsi, le forage 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), implanté dans des cornéennes briovériennes, a donné des débits exceptionnels (débit instantané de 160 m³/h). Le projet CASPAR (Caractérisation des Aquifères Semi-Profonds Armoricaains) a par la suite permis de préciser la nature de ces zones aquifères ainsi que leurs relations avec les eaux souterraines moins profondes.

Ce 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 et l'origine de leur minéralisation.

Dans le cadre de ce projet de nombreux relevés hydrogéologiques (essais de pompage, essais par packers), diagraphiques (fluides, débitmétrie, etc.), géochimiques et isotopiques, datation

des eaux, suivis géophysiques, furent réalisés. Ces analyses ont permis de définir un modèle local d'écoulements (Illustration 15) mais aussi de significativement améliorer les connaissances sur les ressources semi-profondes et leurs interactions avec la surface.

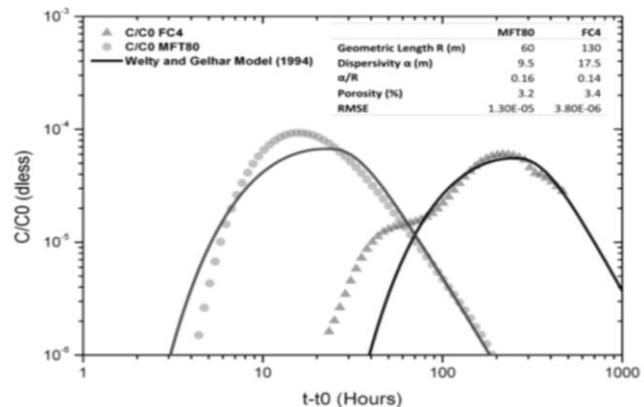


Illustration 21 : forage du projet RAPSODI et modélisation d'essais de traçage

2.4. LIMITES ACTUELLES

Les caractérisations des aquifères de socle bretons se sont principalement basées sur les concepts d'horizon d'altération qui permettent principalement de caractériser la ressource en eau moyenne à l'échelle de la région. Les apports des différentes études permettent d'effectuer des bilans de ressources et une mise en relation notamment avec les pressions liées à leur exploitation. Cependant, dans certains cas, des forages exceptionnels ont été observés tels que sur les sites de Ploemeur (56), Guidel (56) ou Saint Brice-en-Cogles (35). Les fortes capacités de ces sites ne sont que peu en relation avec les résultats des études basées uniquement sur les profils d'altération. Les études sur ces sites montrent au contraire que les débits exceptionnels observés sont en grande partie liés à des contacts lithologiques, des auréoles de métamorphisme et/ou des failles majeures. La découverte de tels sites est actuellement limitée car il n'existe pas actuellement de cadre théorique spécifique sur les typologies géologiques, les directions de fracturation préférentielles ou même une évaluation systématique du rôle des failles sur les captages d'eau de grande importance à l'échelle régionale.

Le projet ANAFORE vise à combler ce manque en analysant un échantillon de 100 forages très productifs et en évaluant le rôle de la fracturation tectonique, la structure des écoulements à proximité de ces forages ainsi que les directions préférentielles.

3. La base de données forage SILURES-ANAFORE & Présentation des données ANAFORE

3.1. LA BASE DE DONNEES FORAGES SILURES-ANAFORE

3.1.1. Constitution de la base de données forages SILURES-ANAFORE

Avant que le projet ANAFORE ne soit lancé, un travail sur les forages d'eau contenu dans la Banque de données du Sous-Sol (BSS) avait été réalisé par le BRGM Bretagne, surtout ceux qui possédaient des informations sur les débits instantanés et des coupes géologiques précises (logs de forage). L'objectif était d'en extraire des informations hydrogéologiques.

Ce travail réalisé dans le cadre du projet SILURES Bretagne (Mougin et al., 2008) avait analysé environ 12 000 forages où pour chaque forage, les paramètres permettant de préciser la géométrie de l'aquifère latéritique avaient été extraits et/ou interprétés.

Ces paramètres principaux étaient : la profondeur de la base des altérites meubles (limite isaltérite-zone fracturée), le débit instantané, les profondeurs de venues d'eau, etc.

Afin de faire perdurer et d'enrichir une telle base de données, le travail s'est poursuivi sur les nouveaux forages entrés en BSS où il y avait au moins des informations sur les débits instantanés. Ainsi environ 8 000 forages supplémentaires ont pu être ajoutés à la base de données SILURES Bretagne (Illustration n°24).

Cette base de données de 19 684 forages d'eau permet de dresser un portrait du forage d'eau en Bretagne.

Ainsi pour ces 19 684 forages, les profondeurs s'échelonnent entre *quelques mètres* de profondeurs à **363 m** de profondeur, avec une *moyenne de 62 m*.

Les *débits instantanés* s'échelonnent quant à eux proche de zéro à **417 m³/h**, avec un débit instantané moyen autour de **8,4 m³/h**.

3.1.2. Les débits instantanés de la base de données forages SILURES-ANAFORE

Discrétiser une variable quantitative comme par exemple le débit instantané, implique le choix d'un nombre de classes et d'en définir leurs bornes. Une discrétisation pertinente se justifie à la fois sur le nombre de classes et les bornes, qui fait référence à des critères explicitement définis. Classiquement le découpage se fait avec des classes homogènes et séparées, ce qui correspond respectivement aux notions statistiques de faible variance intra classe et de forte variance interclasse. Mais d'autres critères sont possibles, comme la répartition équitable de données, le respect d'un nombre minimal de données par classe etc.

Les classes sur les débits instantanés des forages, réalisées ici, sont basées sur la connaissance de l'hydrogéologie régionale, c'est-à-dire sur l'expertise.

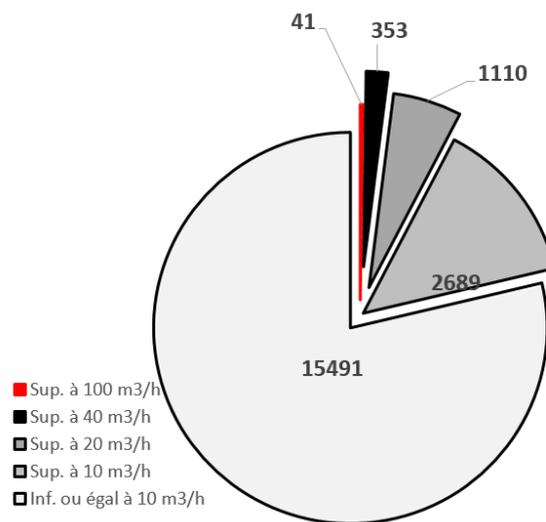
Ainsi, il était connu que les **10 m³/h** de débits instantanés pour les forages bretons correspondent à une limite physique inférieure, dont la grande majorité des forages fait partie ; tout comme celle des **100 m³/h** qui correspondent à une limite physique supérieure, dont il est connu qu'un forage avec un tel débit instantané est une belle réussite.

Les classes ont donc été réalisées en prenant ces deux limites d'encadrement ; les autres bornes de classes ont été réalisées après plusieurs tâtonnements. Il ressort de cette analyse succincte le tableau de l'illustration ci-dessous.

Les forages avec des **débits instantanés** inférieurs ou égaux à **10 m³/h** ont un effectif de 15 491 sur les 19 684 soit **78,7 %**.

Ceux supérieurs à **10 m³/h et 20 m³/h**, chutent déjà à 2 689 en effectifs soit **13,66%**, puis entre **20 et 40 m³/h**, la chute se poursuit avec un effectif de 1 110 soit **5,64 %**.

Alors qu'il était prévu de sélectionner des forages à partir de 60 m³/h de débit instantané, cette petite analyse montre clairement qu'à partir de **40 m³/h**, les forages avec de tels débits instantanés commencent à être exceptionnels et leur effectif tombe à 353 soit **1,79 %** et enfin l'effectif des forages **supérieurs à 100 m³/h** de débit instantané, ne sont plus que 41, soit **0,21 %**, ce qui confirme cette limite supérieure (Illustration n°22).



Classes (sup. X à inf. ou égal à X)	Effectifs	Pourcentage
Sup. à 100 m ³ /h	41	0,21
Sup. à 40 m ³ /h	353	1,79
Sup. à 20 m ³ /h	1110	5,64
Sup. à 10 m ³ /h	2689	13,66
Inf. ou égal à 10 m ³ /h	15491	78,70
Total	19684	100,00

Illustration 22 : Effectifs des forages en fonction des débits instantanés de la base de données forages SILURES-ANAFORE

3.1.3. Débits instantanés en fonction de la profondeur et en fonction de l'altitude de la base de données forages SILURES-ANAFORE

La relation entre le débit instantané et la profondeur du forage est une relation qui a souvent été commentée et présentée dans le passé dans l'ensemble des rapports qui portaient sur l'hydrogéologie de socle.

L'image donnée par les débits instantanés en fonction des profondeurs, peut être interprétée comme l'image de la zone aquifère dans le socle rocheux. Cependant l'interprétation du

pompage d'essai permet de mieux caractériser les écoulements souterrains et de préciser l'aquifère sollicité.

La zone productrice de l'aquifère de socle est comprise entre les **25 m de profondeur** et jusqu'à **150 m de profondeur**, et peut correspondre au profil d'altération au sens large sans qu'il ne soit possible de dire s'il s'agit des allotérites, des isaltérites ou la zone fissurée, simplement à partir des informations sur les débits instantanés et de la profondeur du forage.

Dans ces bases de données forages, l'information qui serait essentielle, est celle des profondeurs des débits instantanés, mais celles-ci est rarement extraite.

De très bons forages productifs ont des profondeurs qui cadrent avec cette zone comme ceux du Trégor par exemple (Illustration n°23 à gauche), d'autres tous aussi exceptionnels, comme celui de Saint-Avé ou de Guidel en Morbihan, se situent en dessous de cette zone.

Si le même exercice est réalisé avec l'altitude, il n'y a pas de relation directe entre de très bons forages et l'altitude. Les forages exceptionnels de Guidel se situent proche du niveau de la mer (à faible altitude ; Illustration n°23 à droite).

Ces illustrations montrent que les débits instantanés ne répondent pas à un modèle simple hydrogéologique mais certainement à un modèle plus complexe ou à l'emboîtement telles des poupées russes de modèles conceptuels hydrogéologiques (Ranjran et al., 2015), tels que la superposition de l'altération, de failles et de lithologies favorables.

Le modèle conceptuel de l'aquifère de socle altéritique au sens large propose un seul niveau d'altération alors que (1) des nouveaux travaux montrent l'existence d'altération polyphasée (Dewandel et al., 2011), ce qui est le cas de la Bretagne qui est le résultat de plusieurs paléo surfaces continentales (Bessin, 2013), mais aussi (3) qu'une faille a en surface plutôt des déformations cassantes (donc une porosité tectonique) et qu'à l'inverse les failles sont souvent moins ouvertes en profondeur en raison de déformations de plus hautes températures (ductile) (Passchier & Trouw, 2005).

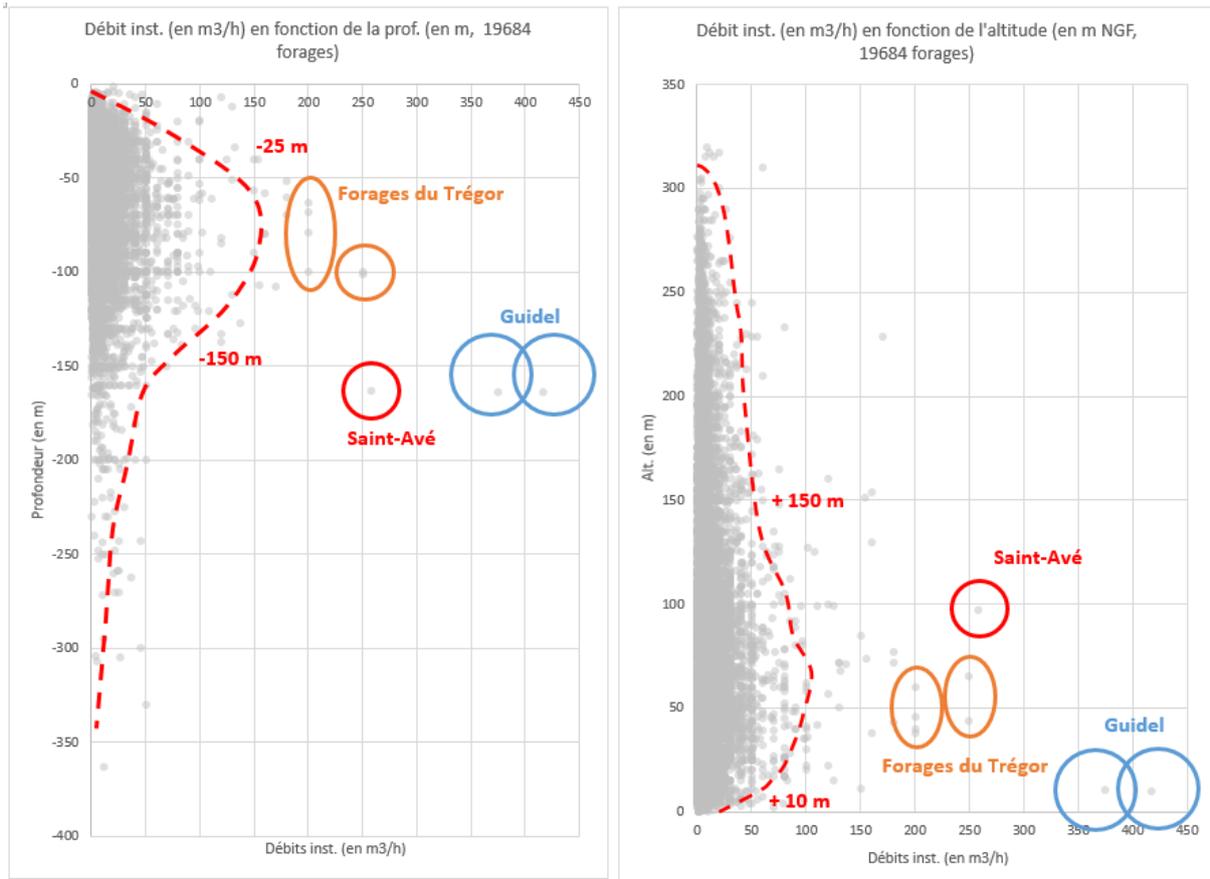


Illustration 23 : Débits instantanés en fonction de la profondeur et de l'altitude de la base de données forages SILURES-ANAFORE

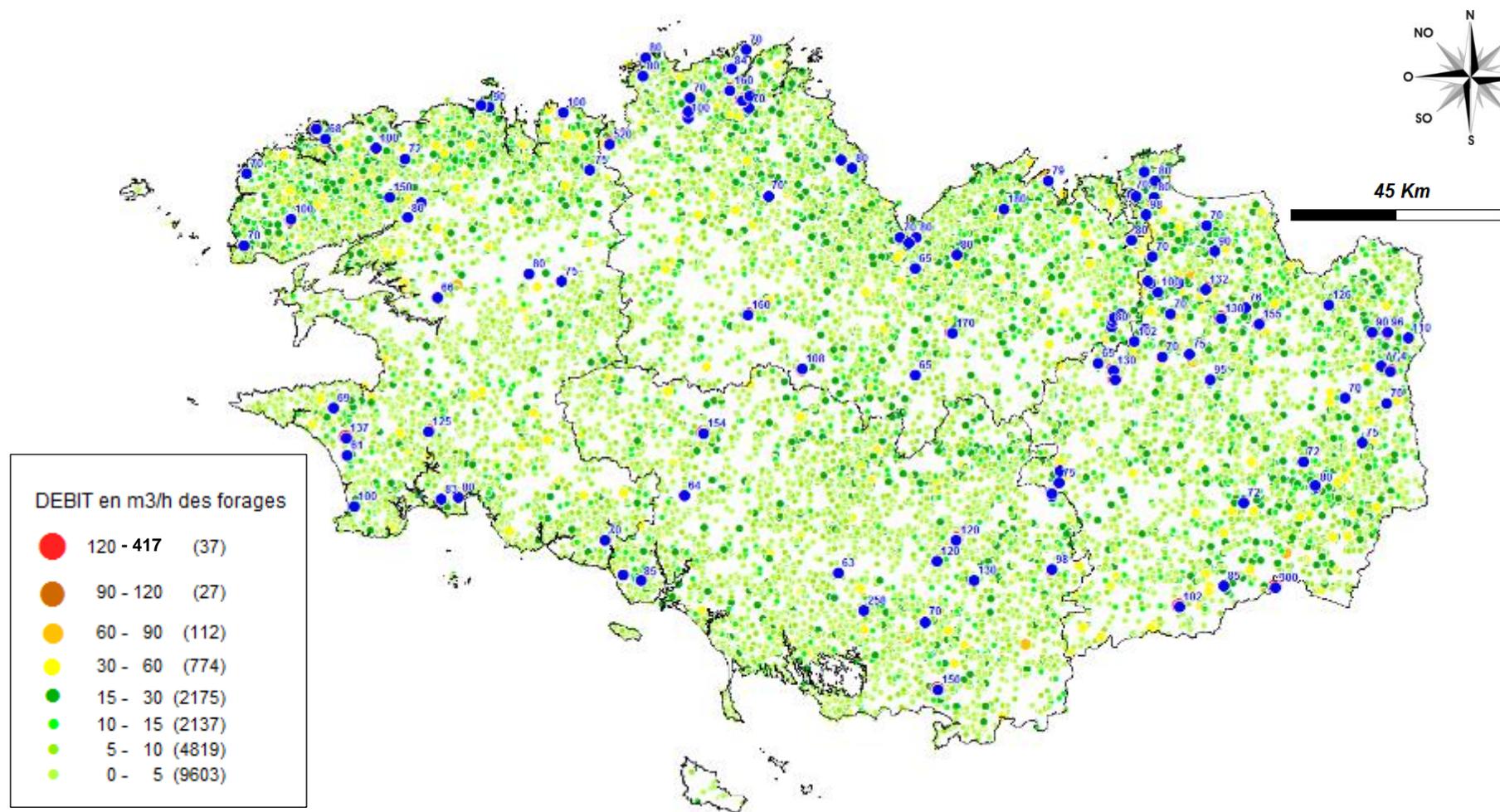


Illustration 24 : BD forages BRGM Bretagne SILURES (12 000 forages) et ANAFORE (8 000 forages), soit 19 684 forages avec débits instantanés auxquels ont été superposés en bleu, les forages avec des débits instantanés supérieurs à 60 m³/h, de la base de données forages SILURES-ANAFORE.

3.2. LA COLLECTE DES DONNEES DE FORAGES ANAFORE

Cette première tâche de récupération des données s'est avérée chronophage et s'est étendue sur 6 mois environ avec 132 dossiers (de décembre 2016 à septembre 2017). Elle s'est poursuivie au fil de l'étude, jusqu'à fin 2018, où 21 dossiers supplémentaires ont été rajoutés.

Cette action constitue un premier résultat en soi car malgré des dossiers parfois incomplets, 153 sites de captages des eaux souterraines bretons ont été récoltés, rassemblés en un seul et même lieu et sauvegardés. Cette action a mis en évidence, la fragilité de la pérennité de ces acquisitions faites au niveau des captages d'eau souterraines par la disparition de services instructeurs ou de bureaux d'études historiques.

Les sources d'approvisionnement sollicitées ont été des plus diverses, depuis les hydrogéologues agréés, en passant par les bureaux d'études, les principaux syndicats départementaux et les services dédiés des conseils départementaux.

La recherche d'information s'est faite aussi dans les archives du Bureau de Recherches Géologiques et Minières de Bretagne et dans les différentes actions ou projets menés récemment comme le SIGES Bretagne (2013-2020, Système d'Information et de Gestion des Eaux Souterraines) ou les projets RAPSODI/CASPAR (Thèse de C. Roques, 2013).

Les tableaux ci-dessous (Illustrations n°25 et 26) résument les différentes sources souvent composites, car pour un site/forage les informations ont été trouvées en plusieurs endroits.

Sources diverses	Nombre
Bureau de Recherches Géologiques et Minières (Rapports, BSS etc.)	33
Communauté de Communes du Pays Fouenantais, SIGES (F. Lucassou)	1
Communauté de Communes du Pays Fouenantais, SIGES (F. Lucassou), BRGM	1
Conseil départemental des Côtes d'Armor, SIGES (F. Lucassou)	7
Conseil départemental des Côtes d'Armor	5
Conseil départemental des Côtes d'Armor - Thèse de Clément Roques	5
Eau du Morbihan	15
Eau du Morbihan, SIGES (F. Lucassou)	7
Eau du Morbihan, SIGES (F. Lucassou), Thèse de C. Roques	1
Eau du Morbihan, Thèse de C. Roques	6
Groupe Jean Rozé, SIGES (F. Lucassou)	1
Rapsodi/Caspar - BRGM - Thèse de Clément Roques	1
SIGES (F. Lucassou)	7
SIGES (F. Lucassou), BRGM	4
SIGES (F. Lucassou), POLDIFF	2
Syndicat Mixte de Gestion de l'eau d'Ille-et-Vilaine, Thèse de C. Roques	1
Thèse de C. Roques	3
Total	100

Illustration 25 : sources des dossiers des forages analysés dans ANAFORE

Malgré cette diversité de sources, certaines se sont montrées récurrentes (Illustration n°25), comme Eau du Morbihan avec 41 dossiers fournis dont 29 ont été utilisés ou le Conseil Départemental des Côtes d'Armor avec 17 dossiers utilisés. En interne au BRGM, 39 dossiers plus ou moins complets ont pu être retrouvés et 28 recherches en eau avaient déjà été utilisées dans le projet SIGES. Enfin, lors du projet CASPAR, C. Roques dans ces travaux de thèse avait amorcé une analyse de type ANAFORE et à ce titre avait bancarisés 17 dossiers plus ou moins complets.

Principales sources	Nombre
Bureau de Recherches Géologiques et Minières	39
Conseil départemental des Côtes d'Armor	17
Eau du Morbihan	29
SIGES	28
Thèse de C. Roques	17
Divers	6

Illustration 26 : principales sources de contribution aux dossiers des forages analysés dans ANAFORE (la somme est supérieure à 100 à cause des contributions multiples).

3.3. LOCALISATION ET CHOIX DES FORAGES A ANALYSER

Les forages ANAFORE sont tous des forages qui exploitent une eau souterraine dite de « socle ». Les forages d'eau situés dans les alluvions des rivières où dans les bassins tertiaires (Eocène à Miocène) ne font pas partie de cette étude. Seul, le forage de Tréfumel, au lieu-dit « Bézie » dans les Côtes d'Armor, est situé dans les faluns (sables coquilliers) du Miocène mais il capte en réalité un milieu fissuré dans les schistes du Briovérien (appartenant certainement à l'auréole de métamorphisme de la granodiorite la plus proche).

Malgré l'hétérogénéité des données récoltées en fonction des départements, un effort particulier a été fait pour que la répartition des forages à analyser ait la meilleure répartition géographique possible, gage aussi d'une meilleure diversité géologique (Illustrations n°27 et 28).

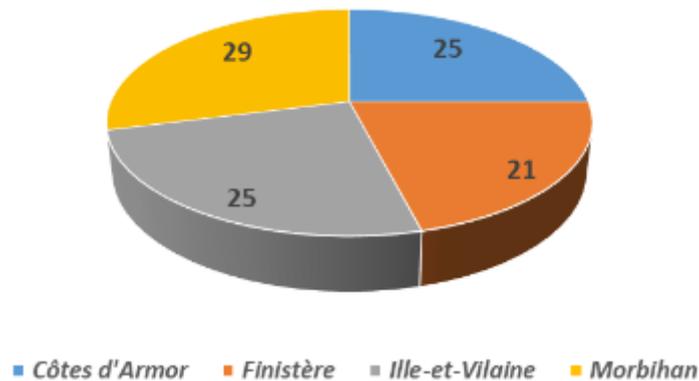


Illustration 27 : nombre de forages ANAFORE par département breton

A ceci, s'ajoute la prise en compte les débits instantanés (débit au soufflage) des forages mais aussi les autres données disponibles. Ainsi la connaissance d'un forage avec un débit instantané conséquent mais où il n'a pas été trouvé d'autres données disponibles, n'est pas passé prioritairement par rapport à un forage avec un débit moindre mais où l'ensemble des données acquises pour sa réalisation était présent. La priorité sur la qualité des données a donc été privilégiée. Ainsi, quelques sites à de débits faibles ont été analysés car ils constituent des informations importantes pour un secteur donné. Souvent ils correspondent à des sites captés (anciennes sources historiques par exemple) qui soulignent l'existence dans ce secteur d'un réservoir d'eau souterrain avéré.

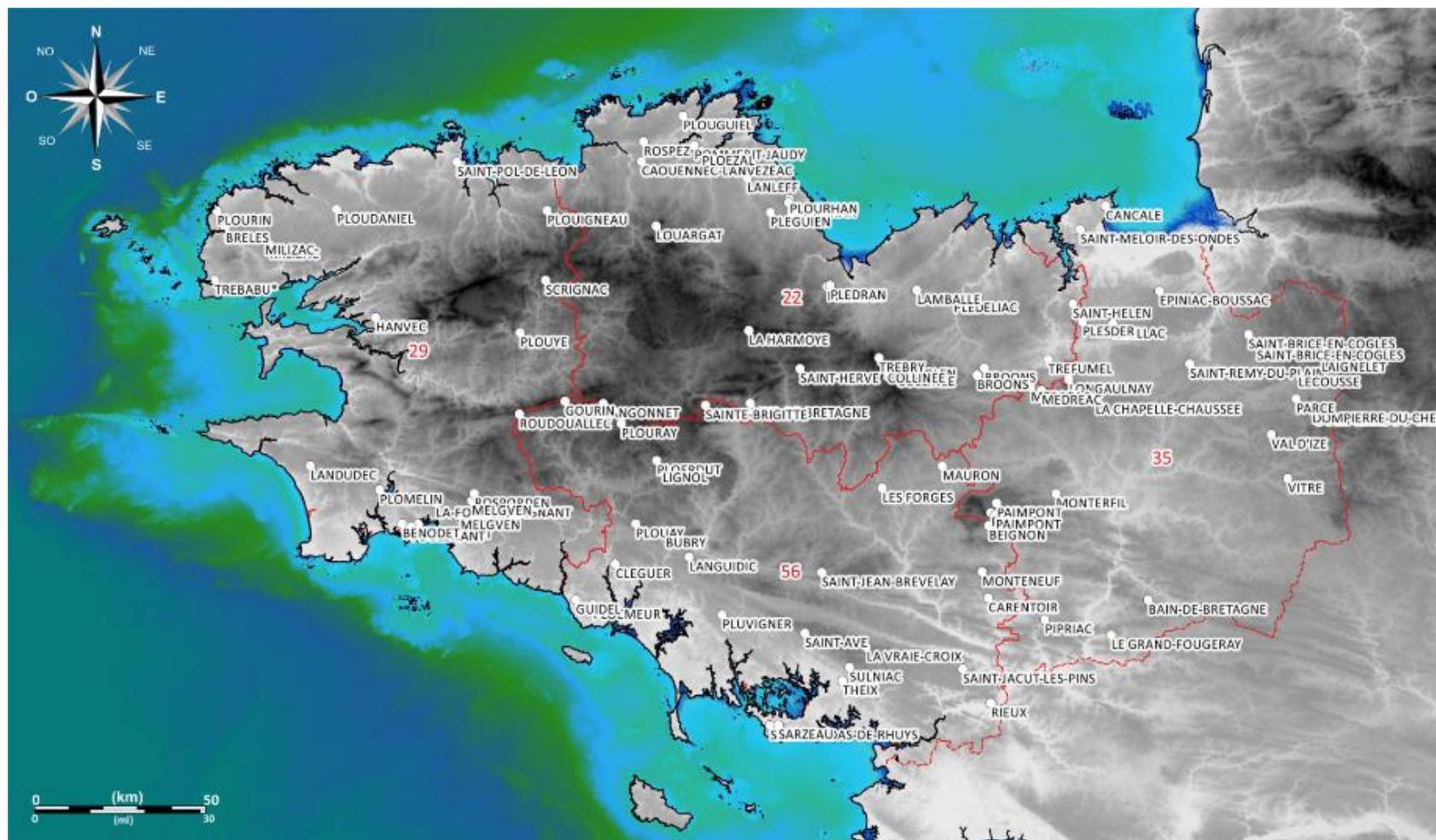


Illustration 28 : Répartition géographique des 100 forages ANAFORE (les étiquettes correspondent aux noms des communes ; il y a parfois plusieurs forages pour une même commune)

3.4. QUALITE DES DONNEES RECUPEREES

Comme nous l'avons mentionné plus haut : (1) la disparition de certains bureaux d'études historiques bretons, la restructuration de services dédiés à l'eau des conseils départementaux ayant réalisé des nombreuses recherches en eaux souterraines ou encore (2) le nombre important de recherches en eau anciennes qui n'avaient pas bénéficié, comme les recherches récentes, d'autant d'analyses (géophysique, pompage d'essai ou encore modélisation) font que la quantité de données des dossiers par forage peut être très hétérogène.

De ces faits, la qualité des données se voit altérée ou être incomplète. Ainsi pour chaque dossier de forage, un indice de qualité a été créé de 0 à 4 correspondant au contenu de chaque dossier (0 : pas de données, à 4 : données complètes).

Seuls 9 dossiers disposent d'un maximum de données, c'est-à-dire :

- Données géologiques : analyse des linéaments, Log de forages,
- Données de géophysique : profils électriques, cartes d'isorésistivité, diagraphies,
- Données hydrogéologiques : pompages d'essai, paramètres hydrodynamiques, chimie des eaux,
- Données hydrologiques : bilan hydrologique, occupation des sols, périmètre de protection.

Vingt et un sont des dossiers où il manque au moins une information précédente, mais l'essentiel est présent. Trente-neuf dossiers sont incomplets, 14 sont insuffisants et enfin 17 n'ont pas d'informations hormis celles contenues dans la Banque de données du Sous-Sol (BSS) (Illustration n°29).

Qualité	Nombre
4	9
3	21
2	39
1	14
0	17
Total	100

Illustration 29 : Qualité des dossiers des 100 forages ANAFORE (4 très bon, 0 donnée inexistante)

Ainsi les données de géophysique pour l'implantation des forages sont présentes sur 28 sites (28%) et les données sur les eaux souterraines présentes sur 77 sites (77%) (Illustration n°30).

Geophysique	Nombre	Pompage d'essai	Nombre
N	58	N	9
NC	14	NC	14
O	28	O	77
Total général	100	Total général	100

Illustration 30 : Dossiers conteant des données de géophysique des 100 forages ANAFORE

L'un des constats qui peut être fait, est que les forages réalisés avec pour objectif l'exploitation d'eau souterraine pour l'Alimentation en Eau Potable (AEP) sont des forages qui ont bénéficié

des plus grands nombres d'informations géologiques, géophysiques, hydrogéologiques et hydrologiques. C'est donc sans surprise que la majorité des forages ANAFORE sont surtout des forages pour l'AEP comme le montre l'illustration n°31.

L'utilisation des forages ANAFORE se répartie comme suit (Illustration n°31):

- 6 ont un usage industriel,
- 41 sont exploités pour l'AEP,
- 41 sont des AEP non exploités,
- 4 sont des AEP en projet,
- 4 ont des usages autres (agricoles ?), ou ont été abandonnés,
- Et 4 sans information.

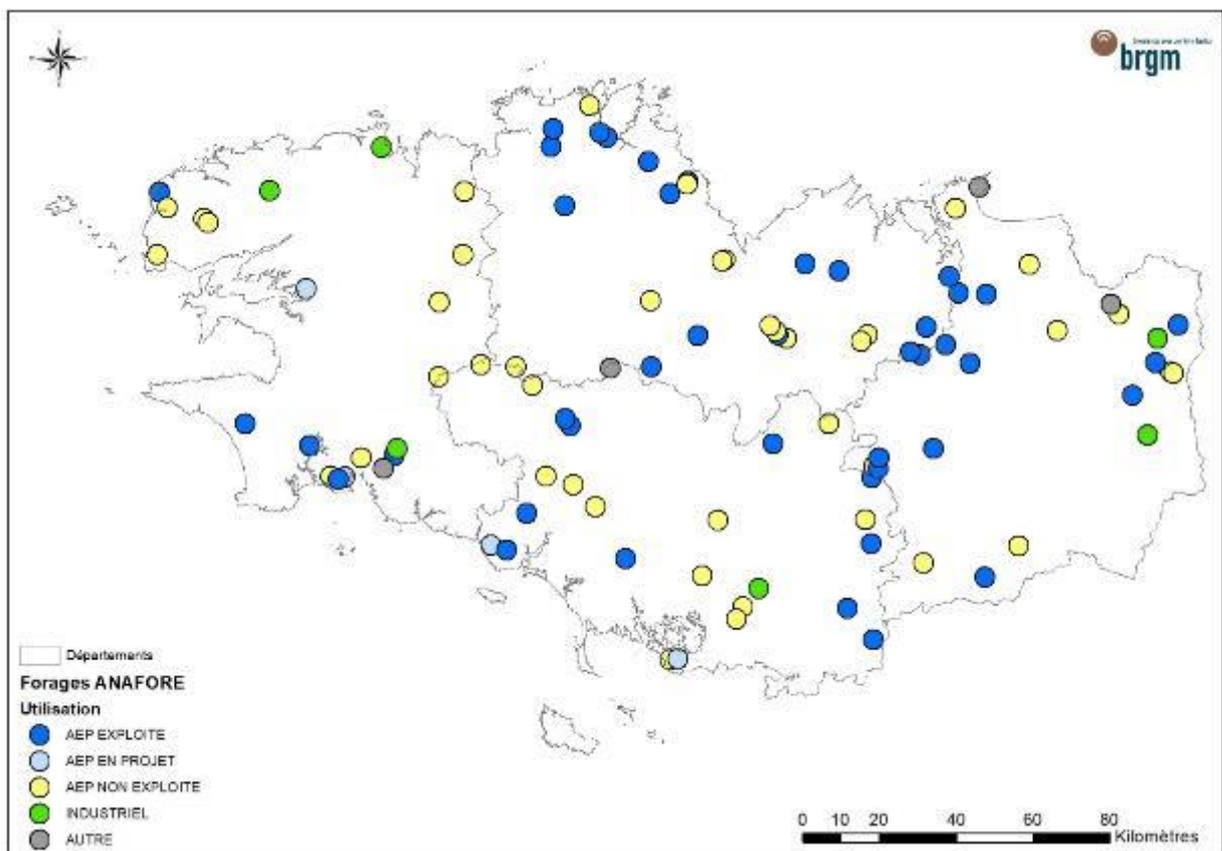


Illustration 31 : utilisation et nature des forages ANAFORE

ANAFORE a étudié sur les 100 forages des plus productifs de Bretagne : 92 avec des débits instantanés supérieurs ou autour de $40 \text{ m}^3/\text{h}$ et 8 forages avec des débits instantanés inférieurs à $40 \text{ m}^3/\text{h}$. Les $40 \text{ m}^3/\text{h}$ correspondent statistiquement à 1,79 % des forages bretons sur lesquels le débit instantané est connu. Les autres forages moins productifs ont été intégrés car il était nécessaire d'avoir une répartition homogène à l'échelle de la région et des informations à analyser (pas forcément disponibles pour des forages plus productifs).

4. Les Anaphores

A partir des 100 forages sélectionnés, les anaphores géologiques et hydrogéologiques sont décrites dans les lignes qui suivent.

4.1. LES ANAPHORES GEOLOGIQUES (DES SITES)

Les anaphores géologiques ont porté sur un travail à la fois de terrain mais aussi de synthèse bibliographique, avec pour objectif final de réaliser une classification des 100 forages à travers la définition de typologies de Zones Potentiellement Productives en eaux souterraines.

Pour la partie terrain :

Chaque site, une journée de terrain a été réalisée, et parfois plus (2 à 3 supplémentaires) pour les sites qui faisaient partie d'autres études menées par le BRGM Bretagne comme le site de Pont de la Lande sur la commune de Beignon dans le Morbihan, où le BRGM Bretagne réalise une étude sur l'impact du pompage des forages AEP en bordure de l'Aff (rivière), ou encore le site de la ville Hélio sur la commune de Plouha dans les Côtes d'Armor où le BRGM a réalisé une étude sur la qualité des eaux de l'AEP (Projet POLDIFF).

Lors de ces journées de terrain, les géologues étaient chargés de :

- 1 Caractériser les lithologies (nature de roches) des affleurements rocheux en essayant d'identifier si des indicateurs de circulation d'eau souterraine étaient visibles à travers la présence de filons, de zones d'altération localisées, de contrastes lithologiques pouvant jouer le rôle de facilitateur de circulation d'eau ou de barrière étanche ;
- 2 Caractériser la position de chaque affleurement rocheux par rapport au profil d'altération théorique. Cette position a été annotée comme ZF, si l'affleurement était dans la zone fracturée ; isalt., s'il était dans les isaltérites et allo., s'il était dans les allotérites ;
- 3 Et d'identifier les directions de fracturation ou des jeux de failles sur un maximum d'affleurement rocheux dans un périmètre de 3,5 km environ autour du forage.

Ces relevés avaient comme principal objectif de :

- Dresser un cadre lithologique et structurale pour caractériser la géométrie d'un réservoir potentiel, à travers l'amélioration de la carte géologique au 1/50 000 (Illustration n°32).
- Améliorer la compréhension de l'acquisition des données hydrogéologiques (courbes de pompage d'essai, cartes piézométriques etc.).

Trois géologues se sont répartis les 100 sites et c'est **794** affleurements rocheux qui ont pu être analysés, soit environ en moyenne **8 affleurements rocheux par site**. Parmi les affleurements visités, deux à trois affleurements-clés, ceux contenant des informations géologiques importantes pour le site considéré ont été décrits au volet recto : géologique de la fiche du site.

Exemple de carte géologique enrichie des différentes observations tirées de la fiche de Trébry, site de la « La Perchais » dans les Côtes d'Armor (22) (Illustration n°32).

Pour la partie bibliographique :

L'analyse a porté sur les données récoltées au niveau de chaque site comme :

1 - L'analyse des données du forage (du log réalisé lors de la foration) et des différentes venues d'eau en fonction de ce log,

2 - et des données de géophysique acquises pour la recherche en eau souterraine et disponibles etc.

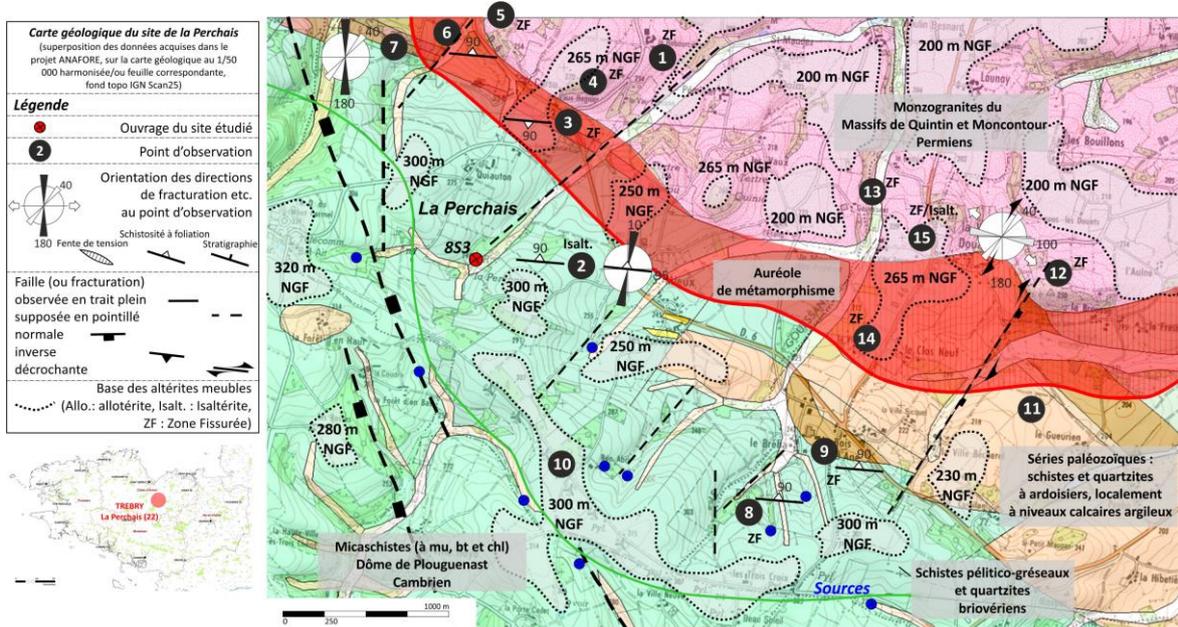


Illustration 32 : exemple de carte géologique de détail réalisée à partir de la journée de terrain pour chaque site (site de la Perchais).

Ainsi pour chaque site, une fiche a été dressée (Illustration n°33), au format A3, avec en recto, la présentation du forage et la synthèse géologique, et en verso, la synthèse hydrogéologique et les conclusions typologiques.

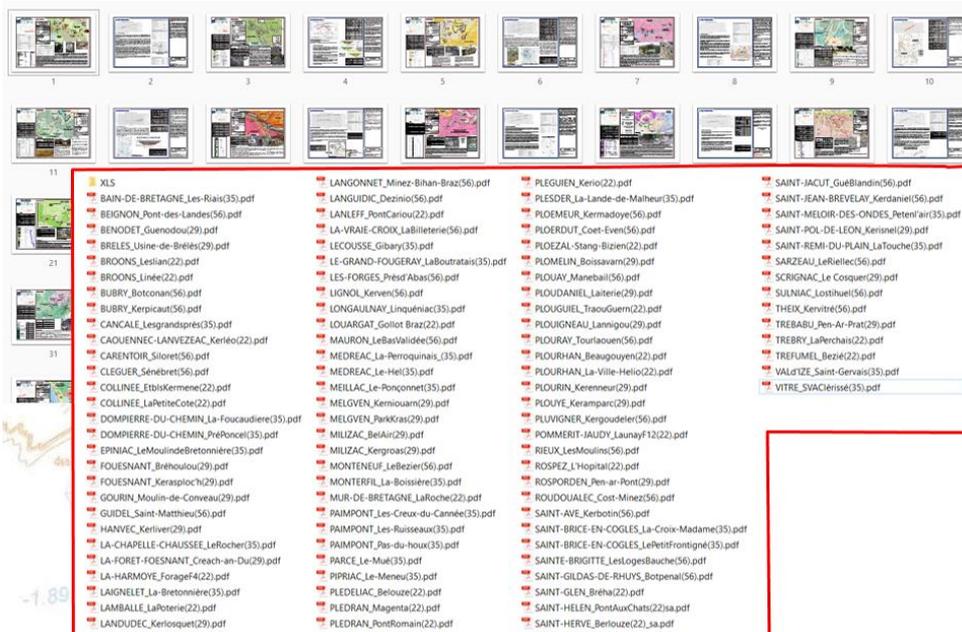


Illustration 33 : les fiches de chaque site en recto/verso.

4.1.1. Les lithologies (la nature des roches) au niveau des 100 forages

Cadrage lithologique

Sur chaque site, la nature de la roche dans laquelle est implanté le forage, a été analysée. Cette analyse est la synthèse entre (1) ce qui a été observé sur le terrain (la synthèse des différents affleurements de roches) et (2) ce qui a été décrit historiquement lors de la réalisation du forage. Un regard a également été porté sur la description de la formation géologique des cartes géologiques au 1/50 000.

Des variations peuvent et ont existé entre les descriptions faites lors de la réalisation des forages et les cartes géologiques. C'est la visite de terrain qui a permis d'accorder l'identification des lithologies par site. Ces divergences étaient valables notamment pour les roches de type « métasédimentaires » qui localement présentent ou peuvent présenter des alternances de grès, de siltites, de quartzites ou d'argilites (variations de faciès).

Pour les **100** sites, **49** lithologies ou associations lithologiques (**notées RI 1**) ont été observées (Illustration n°34 : colonnes 1, 2 et 3 à gauche).

Essai de typologie – Dénombrement des sites

Ces **49** associations lithologiques ne permettent pas cependant de définir une classification typologique particulière. Ce spectre trop large balaye un panel trop important de lithologies et fait écho aux analyses statistiques de moyennes des débits instantanés en fonction des lithologies, réalisées classiquement.

Le regard s'est donc porté sur le contexte géologique de chaque site (**notés Cg 2**), et il s'est avéré que plusieurs sites appartenaient à des contextes identiques comme ceux situés par exemple :

- Dans une auréole de métamorphisme ;
- Dans un synclinal paléozoïque ;
- Ou à l'interface entre la formation du Briovérien et les premiers niveaux du Paléozoïque (Formation de Pont-Réan).

Le passage depuis les lithologies ou association lithologique a permis un premier regroupement de **49** associations lithologiques à **16** groupes ou contextes géologiques.

Des groupes sont apparus, restreints en effectifs mais sont bien des groupes distincts, correspondant à des contextes géologiques bretons déjà connus comme les volcanites du Trégor par exemple et d'autres moins connus découverts dans ANAFORE comme une formation géologique principale avec des intrusions magmatiques mineures tels que des filons (de dolérites ou de kersantites) par exemple.

Le présence d'altérites a été un facteur réellement discriminant que pour **4** sites sur lesquels 4 à 5 niveaux différents d'altérites ont été dénombrées (voire la discussion à ce sujet au § 5.2.3.). Pour ces 4 sites, la discrimination n'aurait pas été mise en évidence avec les lithologies. Pour le reste des sites (96), les altérites omniprésentes ne constituent pas un facteur discriminant.

De la même façon, des structures tectoniques particulières ont permis de créer une typologie qui n'aurait pas été mise en évidence qu'avec les lithologies. Cependant, les structures tectoniques sont omniprésentes sur l'ensemble des sites. C'est notamment le cas des sites

situés en Sud Bretagne comme Sarzeau, Ploemeur, Guidel, Fouesnant ou Bénodet (voir le § 5.2.5.).

Ainsi le tableau ci-dessous synthétise ces regroupements à partir des lithologies vers les contextes géologiques. Le paramètre géologique (hydrogéologique) de chaque site/forage le plus important qui définira son appartenance typologique entre : (1) contexte géologique, (2) l'altération ou encore (3) contexte tectonique (Illustration n°34).

Lithologies associées	Nbre de lithologies	Effectifs	RI 1	Alt. (o/n)	Tect. (o/n)	RI 1 + Cg 2	RI 1 + Cg 2 + Ct 3	Synthèse RI 1 + Cg 2 + Ct 3			
Amphibolite	1	2	2	0	0	Auréole de métamorphisme	Contexte géologique 1	24			
Amphibolite	2	2	2	0	0						
Cornéenne et schistes tachetés	3	1	2	0	0						
Cornéenne et schistes tachetés	4	13	2	n	0						
Cornéenne et schistes tachetés	5	1	2	0	0						
Cornéenne et schistes tachetés	6	1	2	0	0						
Micaschistes tachetés	7	1	2	0	0						
Micaschistes	8	1	2	0	0						
Cornéenne et schistes tachetés	9	1	2	0	0						
Schistes (Cornéenne) et quartzites	10	1	2	0	0						
Calcschistes sous schistes argileux	11	1	1	0	0	Bassin paléozoïque 1	Contexte géologique 2	1			
Faïlle (car multi-lithologies)	12	1	1	0	0	Faïlle	Contexte géologique 10	1			
Gabbro (Roche magmatique basique + roche siliceuse : faille)	13	1	1	0	0	Intrusions magmatiques majeures	Contexte géologique 4	26			
Granite	14	14	1	0	0						
Granite & amphibolite	15	1	1	0	0						
Granite & micaschistes	16	1	1	0	0						
Granite mylonitique (granite déformé - roche de faille)	17	1	1	0	0						
Granite/gneiss + quartz (filon)	18	1	1	0	0						
Granites & granodiorites	19	1	1	0	0						
Granodiorite	20	2	1	0	0						
Granodiorite (+ faille : quartz)	21	2	1	0	0						
Granodiorite & dolérite	22	1	1	0	0						
Granodiorite sous un bassin tertiaire	23	1	1	0	0						
Gres (armoricain) & Quartzite	24	4	1	n	0				Bassin paléozoïque 2	Contexte géologique 5	7
Gres (armoricain) : grès et schistes	25	2	1	0	0						
Gres paleozoïque	26	1	1	0	0						
Micaschistes	27	2	2	0	0	Faïlle ?	Contexte géologique 1	2			
Micaschistes	28	4	2	0	0	Contexte géologique 2	Contexte géologique 3	16			
Micaschistes & granite	29	3	2	0	0						
Micaschistes & paragneiss	30	4	2	0	0						
Micaschistes & quartzites	31	2	2	0	0						
Micaschistes & schistes	32	2	2	0	0						
Micaschistes	33	1	2	0	0						
Migmatites & dolérites	34	2	2	0	0	intrusions magmatiques mineures	Contexte géologique 7	5			
Schistes silto-argileux + dolérites	35	3	2	0	0						
Quartzites + Schistes briovériens	36	1	2	0	0				Briovérien	Contexte géologique 8	16
Schistes silto-argileux + grès	37	1	2	0	0						
Schistes silto-argileux + poudingues	38	1	2	0	0						
Schistes argilo-greux + failles/fractures N150 et NS	39	1	2	0	0						
Schistes, grès et quartzites	40	3	2	0	0						
Schistes et quartzites	41	1	2	0	0						
Schistes greso-argileux altérés sous les grès de Courouet	42	2	2	n	0						
Schistes briovériens altérés fractures	43	2	2	0	0						
Schistes briovériens altérés	44	1	2	0	0						
Schistes briovériens pélicito-argileux localement gréseux + Faluns	45	1	2	n	0						
Schistes briovériens (cataclases ?)	46	1	2	0	0						
Schistes greux briovériens + failles/fractures N150 et NS	47	1	2	0	0	Volcanites	Contexte géologique 9	2			
Volcanites (laves & basaltes)	49	2	2	0	0						
Total	49	100	100	96	100	10	10	100			

49 lithologies 16 groupes

Illustration 34 : Regroupement par lithologie puis contexte géologique, tectonique ou latéritique des 100 sites ANAFORE.

Les résultats exprimés ici (Illustration n°34) montrent que les typologies sont plus complexes que des assemblages lithologiques ou des assemblages de contextes géologiques.

4.1.2. Hétérogénéités lithologiques des logs de forage & venues d'eau

Pour chaque site, dans la mesure du possible, c'est-à-dire dans la mesure où des informations étaient présentes, d'assez bonnes qualités et complètes sur les logs de forage, ont été extraits et dénombrés les raisons pour lesquelles il y avait des venues d'eau dans les forages.

Hétérogénéités lithologiques des logs de forage

Trois types de structures ou d'hétérogénéités ont été identifiées en face de chaque venue d'eau qui leur était associée (Illustration n°35 à gauche). Ces hétérogénéités ont été classées en trois typologies différentes (Illustration n°35 à droite) :

- 1 - les failles ou fractures ;
- 2 - les intrusions mineures diverses : magmatiques (pegmatites, aplites), filons etc.
- 3 - et enfin les alternances lithologiques par exemple de grès et d'argilites ou de schistes argileux.

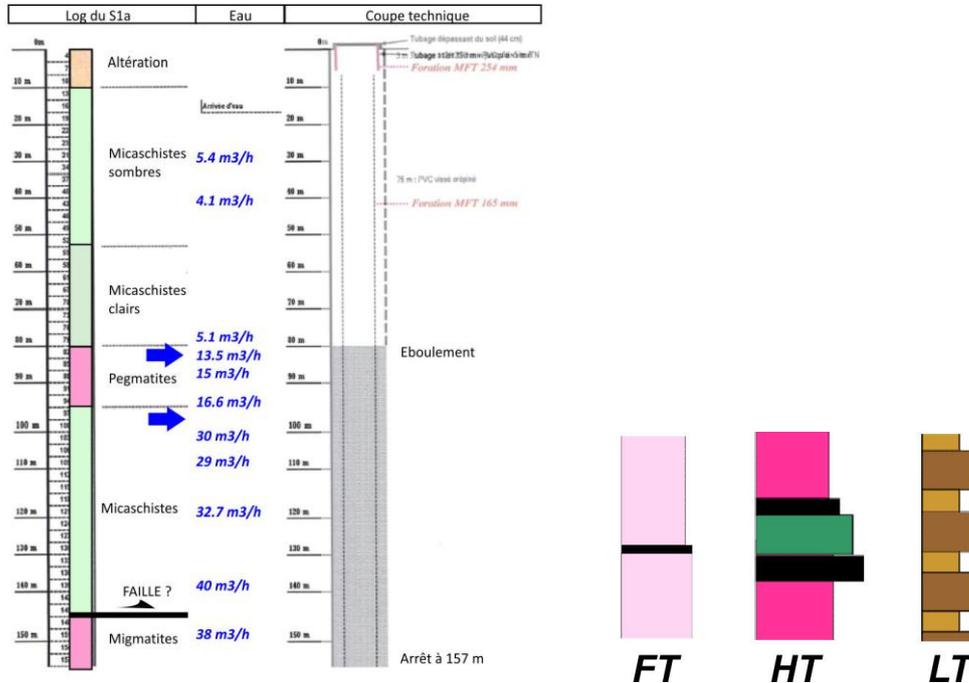


Illustration 35 : A gauche, exemple de log de forage levé pendant la foration par le bureau d'études et synthétisé dans ANAFORE par site ; à droite, les trois types d'hétérogénéité extraites des 100 logs de forages et qui favorisent les venues d'eau souterraine (FT : Faille, HT : Intrusion mineure et LT : Alternance lithologique).

Sur le log ci-dessus (Illustration n°35 à gauche), les venues d'eau dans le forage arrivent au niveau d'une intrusion mineure (le filon de pegmatite) puis en profondeur au niveau d'une faille importante qui met en contact les micaschistes et les migmatites en fin de forage.

Il existe sur le log de forage des venues d'eau secondaires qui peuvent correspondre à des failles satellites de la principale ou des filonnets de pegmatites. Cependant, les principales venues d'eau viennent des hétérogénéités les plus importantes.

Les venues d'eau pour une bonne partie des sites proviennent de structures tectoniques (48% des cas) mais aussi et surtout d'hétérogénéités combinées associant failles/fractures (FT), variations lithologiques (LT) et intrusions mineures (HT) (Illustration n°36).

Les venues d'eau semblent se positionner au niveau des contrastes lithologiques et sont le plus souvent associées à des failles/fractures qui affectent ces contrastes rhéologiques.

En résumé, la moindre hétérogénéité lithologique facilite la fracturation de la roche que les contraintes soient d'origine tectonique ou latéritique, car elle constitue une hétérogénéité rhéologique.

La fracturation se crée au niveau de ces hétérogénéités qui constituent des points de fragilité. Une fois fracturées, ces zones faciliteront les circulations d'eau souterraines.

Structures productrices d'eau dans les forages	Effectifs
(FT)	48
(LT)	8
(HT)	2
FT + HT	6
FT + LT	2
HT + FT	7
HT + LT	1
LT + FT	9
LT + HT	1
LT + HT + FT	1
Indéterminé	15
Total	100

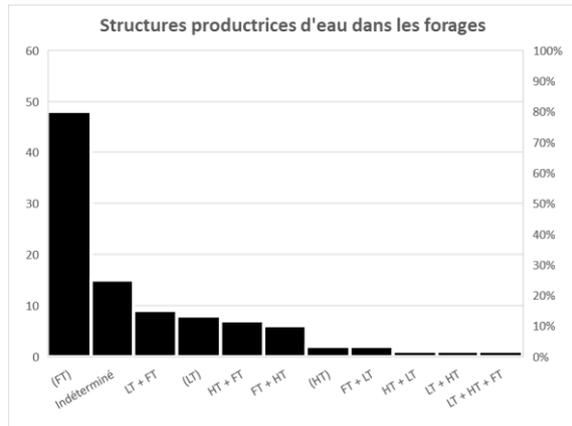


Illustration 36 : A gauche, tableau des effectifs des types d'hétérogénéités favorisant les venues d'eau ; à droite, représentation graphique du tableau de gauche (les trois types d'hétérogénéités extraites des 100 logs de forages, FT : Faille, HT : Intrusion mineure et LT : Alternance lithologique, sont combinées : FT + LT etc.).

Pour 15 sites, il n'a pas été possible d'extraire d'où pouvaient venir les venues d'eau car soit les logs étaient inexistants, soit de mauvaises qualités.

Les venues d'eau

Le nombre de venues d'eau sur les 100 forages s'organisent autour de 1 à 5 venues d'eau qui correspondent à 48 % des forages. Pour 9 forages, les venues ont été relevées en continu (correspondant à « Multiple » dans l'illustration n°37 à gauche). Pour le reste des forages les venues d'eau sont supérieures à 6 et arrivent jusqu'à 13 (15% des forages).

Les profondeurs des venues d'eau s'étalent sur des profondeurs comprises entre 7 et 217 m, avec une profondeur moyenne de 72 m. Mais la plus grande partie des forages ont des venues d'eau entre 7 et 112 m de profondeur (Illustration n°37 à droite).

Venues d'eau (nombre)	Effectifs
1	9
2	13
3	8
4	7
5	11
6	6
7	3
8	1
9	1
10	2
11	1
13	1
Multiples	9

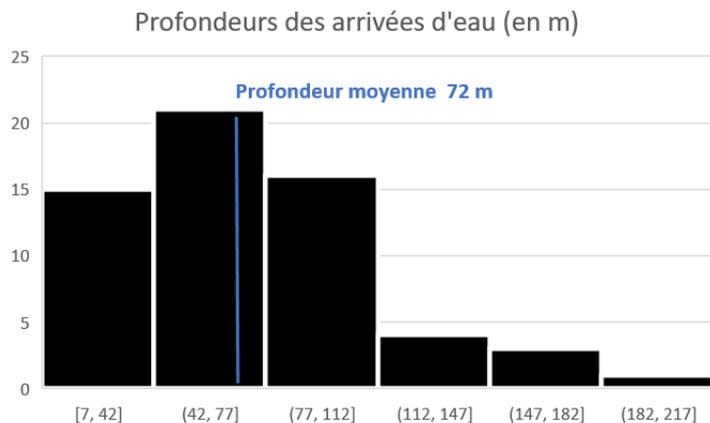


Illustration 37 : A gauche, tableau des effectifs de forages en fonction du nombre de venues d'eau ; à droite, classe des profondeurs des venues d'eau dans les forages.

S'il était délicat d'affirmer que la relation entre les débits instantanés et la profondeur des forages, était une image potentielle de l'aquifère de socle, il est plus raisonnable en revanche, d'affirmer avec cette intervalle des venues des 100 forages, que celui-ci (l'aquifère de socle) se situe entre 7 et 112 m de profondeur (Illustration n°37 à droite).

Pour la Bretagne, la zone aquifère profonde pourrait se situer en moyenne entre 7 et 112 m de profondeur et être composée majoritairement par 1 à 6 venues d'eau principales.

Les analyses des données de forage ne permettent pas d'établir un portrait-robot type du forage productif en eau souterraine en Bretagne mais plutôt un portrait-robot en plusieurs forages, au moins trois (Illustration n°38) :

- Le premier A, est un log de forage synthétique sur lequel il n'y a qu'une seule lithologie (nature de roche) avec une à plusieurs failles ou fractures d'où peuvent arriver des venues d'eau importantes ;
- Le second B, est un log de forage synthétique sur lequel il y a une à deux lithologies et des hétérogénéités de type « filon » de tout type de roches, et où les failles ou les fractures vont apporter de nombreuses d'eau ;
- Et enfin, le troisième C, est un log de forage synthétique sur lequel il y a une alternance de lithologies (des variations lithologiques de roches métasédimentaires) et où les failles ou fractures, aux niveaux des hétérogénéités vont produire un nombre important de venues d'eau.

Enfin les deux logs de forages D et E, correspondent à des logs de forages synthétiques particuliers. Ces logs n'ont été observés que rarement. L'un D correspond à des roches de socle armoricain sous les roches de bassins tertiaires alors que le second correspond à des roches magmatiques ou métamorphiques (schistes & granite) sous des roches métasédimentaires (schistes) E.

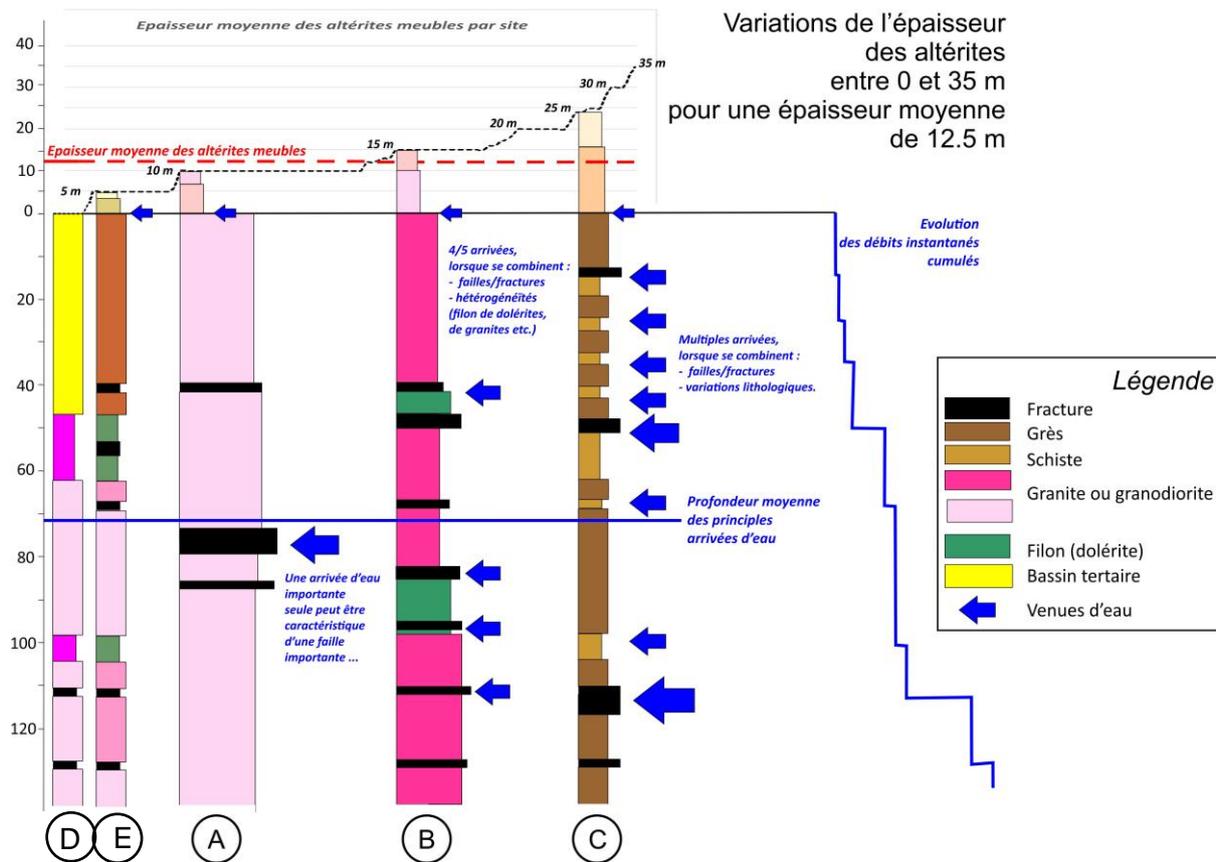


Illustration 38 : Trois portraits-robots types de forages en Bretagne (Synthèse des 100 forages ANAFORE).

4.1.3. Cartographie de la limite altérites meubles/zone fracturée

La cartographie systématique de la limite entre les **altérites meubles** (isaltérites et allotérites) et la zone fracturée dans l'environnement immédiat du forage, a permis :

- 1 - d'évaluer l'épaisseur de ces altérites meubles en faisant la différence d'altitude entre leur et le ou les points les plus hauts topographiquement du secteur, ce qui permet d'avoir ainsi l'épaisseur du réservoir latéritique sus-jacent au forage ;
- 2 - d'identifier l'existence d'une ou de plusieurs surfaces d'altération et de mettre ainsi en évidence une altération certainement polyphasée sur la Bretagne ;
- 3 – de caractériser la relation entre ces différentes surfaces depuis une relation tectonique (décalage de la base des altérites par une faille), à une relation naturelle par un talus de raccordement (soulignant une chute du niveau de base) ou encore une relation mixte (à la fois tectonique et par talus de raccordement).

La carte géologique ci-dessous est une illustration de cette cartographie au niveau d'un site sur la commune de PLOUAY, au lieu-dit « Manébail » (Illustration n°39).

La relation est ici une relation plutôt tectonique. Hélas, les conditions d'affleurement ne sont pas d'assez bonne qualité pour pouvoir observer systématiquement la faille recoupant la base des altérites. Mais celle-ci a été observée en d'autres endroits. Pour la carte ci-dessous, la relation est déduite des mesures microtectoniques faites sur le terrain autour du forage, de la cartographie de la base des altérites et de la géomorphologie. Entre la surface la plus haute (ps1) à 150 m NGF, le décalage avec celle la plus basse (ps 3) à 141 m, est de 10 m environ.

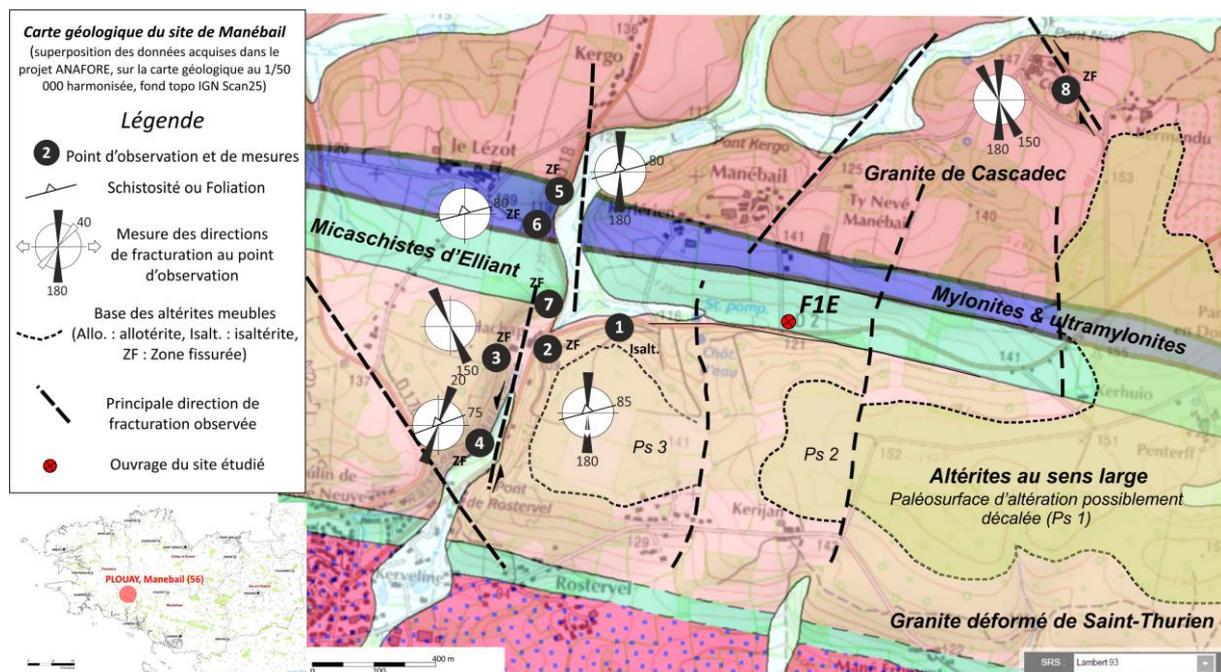


Illustration 39 : Carte de détail de la fiche PLOUAY, Manébail où la base des altérites est décalée deux fois par des structures de mêmes orientations que les mesures microtectoniques faites sur le terrain (effondrement vers l'ouest de la base des altérites meubles – relation tectonique)

L'illustration n°31 (plus haut) montre une relation par talus de raccordement entre la surface qui se situe à 200 m NGF et celle à 265 m. Cette relation est caractérisée par une imbrication étroite entre deux surfaces, à la différence de la relation entre la surface à 300 m et celle à

320 m d'altitude où il semblerait que la limite entre les deux soit une limite linéaire, donc plutôt tectonique.

L'épaisseur de altérites meubles autour des 100 forages

L'épaisseur des altérites meubles considérée ici est la différence d'altitude entre la base des altérites meubles et le point topographique de la surface continentale immédiate, sus-jacente à la surface de base.

Les hétérogénéités topographiques liées soit, (1) à la présence d'un filon de quartz ou de dolérite, soit (2) à un niveau de quartzite ou encore (3) à une surépaisseur locale de loess ou limons de plateau, n'ont pas été prises en compte dans ce calcul et ont donc été écartées.

De la même façon, dans les logs des forages, l'épaisseur d'altération qui y est décrite, n'a pas été prise en considération car : (1) cette altération peut être une altération très récente due à la position du forage dans une zone basse, (2) les descriptions sont trop hétérogènes (faites par différents bureaux d'études) et enfin (3) car la méthode d'évaluation de cette épaisseur n'aurait pas été égale d'un forage/site à l'autre.

Ainsi sur seulement six sites, l'épaisseur des altérites meubles n'a pas pu être déterminée. Ces six sites se situent soit directement dans la zone fracturée, soit sur leurs abords, les altérites meubles n'étaient pas présentes ou n'ont pas pu être observées.

Pour le reste des sites de forages soit les 94 autres, les altérites meubles sont présentes, avec un épaisseur moyenne de **12,94 m** et une épaisseur minimale entre **0 et 5 m** et une épaisseur maximale de **35 m** (Illustration n°40).

Pour les sites **entre 25 et 35 m** d'épaisseur d'altérites meubles aucun contexte géologique particulier n'est identifié, ces **9** forages se situent aux quatre coins de la Bretagne d'ouest en est : Saint-Pol-de-Léon, Melgven, Fouesnant en Finistère, Pommerit-Jaudy, Saint-Hélen en Côtes d'Armor, Bubry, Carentoir, Plouray en Morbihan et enfin Dompierre-du-chemin en Ille-et-Vilaine.

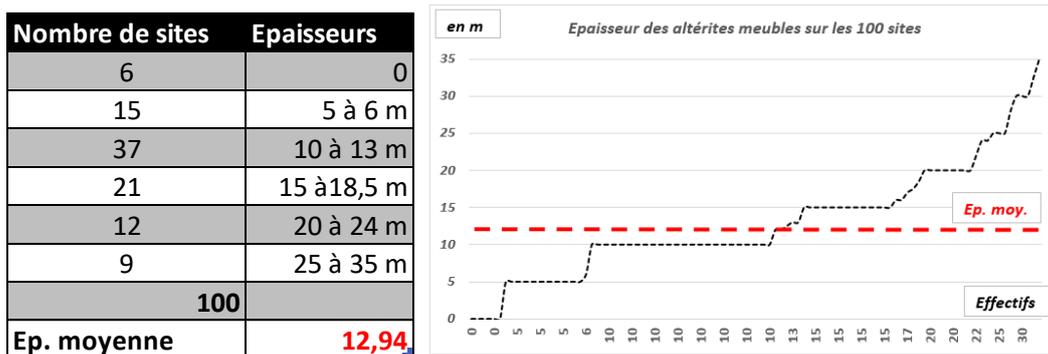


Illustration 40 : Effectifs en fonction des épaisseurs d'altérites meubles. Epaisseur moyenne des altérites : 12,9 m

L'illustration ci-dessus montre les effectifs de forages en fonction de l'épaisseur des altérites meubles. Dans 94 % des cas, les altérites sont présentes sur les 100 forages productifs bretons avec **une épaisseur moyenne assez importante, entre 10 à 15 m, ce qui constitue un réservoir capacitif non négligeable** (Illustration n°40).

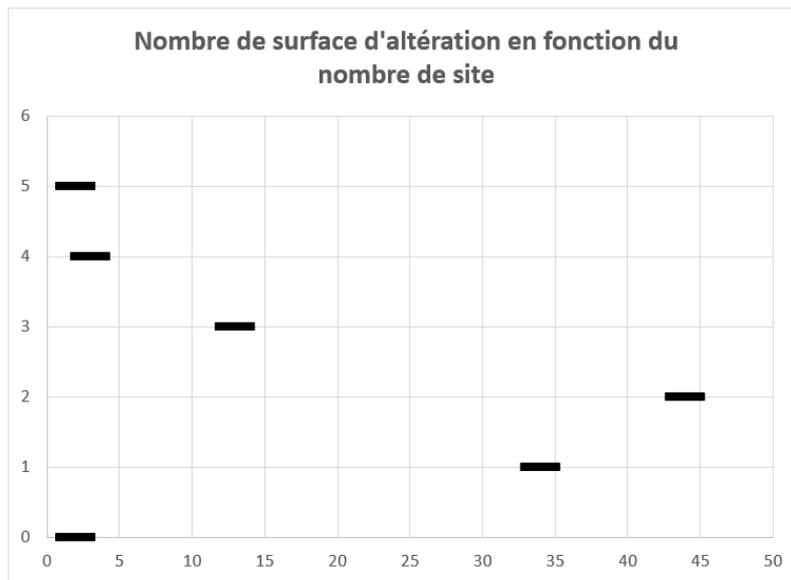
Le nombre de surfaces d'altération

La cartographie des altérites et notamment de la base des altérites a permis d'identifier l'existence d'une ou de plusieurs surfaces d'altération. Elle a mis en évidence une altération

certainement polyphasée sur la Bretagne et permis de caractériser la relation entre ces différentes surfaces depuis une relation tectonique (décalage de la base des altérites par une faille), à une relation naturelle par un talus de raccordement (soulignant une chute du niveau de base) ou encore une relation mixte (à la fois tectonique et par talus de raccordement).

Pour deux sites seulement aucune base des altérites meubles n'a été observée. Ces sites ont été interprétés comme étant directement situés dans la zone fracturée du profil d'altération.

En revanche pour les **96** autres (soit **96 %** des cas), il existe au moins une base des altérites meubles. Il existe une seule base des altérites sur **34** sites, deux bases sur **44** sites, et les faits nouveaux et remarquables est l'existence de **3, 4 et 5** surfaces d'altération sur respectivement **13, 3 et 2 sites** (Illustration n°41).



Nombre de sites	Nombre de surfaces
2	5
3	4
13	3
44	2
34	1
2	0
2	A*
100	

* ne s'applique pas !

Illustration 41 : Nombre de surfaces d'altération par sites ANAFORE.

Ce résultat est attendu quant à la présence d'un profil d'altération, mais inattendu quant au nombre parfois important de surfaces sur un même site. Ceci soulève des questionnements et permet d'ébaucher des hypothèses hydrogéologiques.

Quelle est la relation entre ces différentes surfaces d'altération ?

Est-il possible de savoir s'il existe un polyphasage de l'altération du socle breton ou s'agit-il de décalages par des structures tectoniques ?

Est-il possible de les dénombrer ?

Quelle implication hydrogéologique peut avoir l'existence de plusieurs surfaces d'altération sur le socle ?

La relation entre les surfaces d'altération

Principalement deux relations existent entre les surfaces d'altération :

- 1 - Soit une chute de niveau de base (niveau de la mer par exemple) ou une surrection du substratum, qui va générer la création d'un nouveau niveau d'altération. Dans ce cas de figure, la relation sera par talus de raccordement ;
- 2 - Soit une même surface va être décalée par une structure tectonique.

La première relation, celle du talus de raccordement, montre que les deux surfaces, l'une haute et l'autre basse, voient la limite inférieure de la première suivre topographiquement plus haut la limite supérieure de la plus basse alors que pour la seconde, les limites entre les deux bases sont décalées topographiquement et l'allure de ces limites est linéaire, souvent soulignée par une faille ou une fracture des cartes géologiques au 1/50 000 du BRGM ou révélée par les investigations de terrain du projet.

La **relation tectonique** est dominante avec **37 sites** d'autant que sur **13 autres sites**, les relations « **tectonique et de talus de raccordement** » sont concomitantes. La **relation n'est pas établie** pour **3** d'entre eux et **37** sont les sites avec **une seule surface** (Illustration n°42).

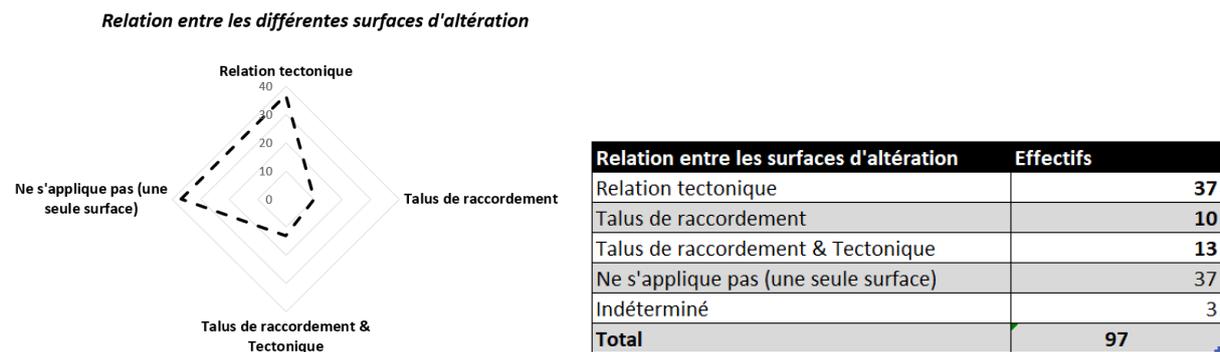


Illustration 42 : Effectifs des relations entre les bases des surfaces d'altération

Les décalages apparents verticaux en règle générale entre les différentes surfaces sont de l'ordre de **10 à 20 m voir 40 m**, sauf dans au moins deux cas particuliers :

- sur les sites où il a été possible d'observer 4 à 5 surfaces d'altération où le décalage total apparent vertical cumulé atteint les **120 m (de 320 m à 200 m d'altitude NGF)**, combinant des relations tectoniques et de talus de raccordement (Illustration n°32) certainement, c'est le cas des sites des Monts Bel-air et Carmel en Côtes d'Armor (22),
- et sur les sites qui se situent dans le secteur de Paimpont en Ille-et-Vilaine où en seulement deux surfaces (deux bases altérites meubles identifiées), le décalage apparent vertical serait de **100 m (de 245-250 m à 145-150 m d'altitude NGF)** (Illustration n°43 ci-dessous).

Sur ces deux secteurs, passe la faille de Quessoy/Nort-sur-Erdre qui coupe la Bretagne en deux parties distinctes : à l'ouest une Bretagne avec une altitude supérieure d'une Bretagne orientale à l'Est.

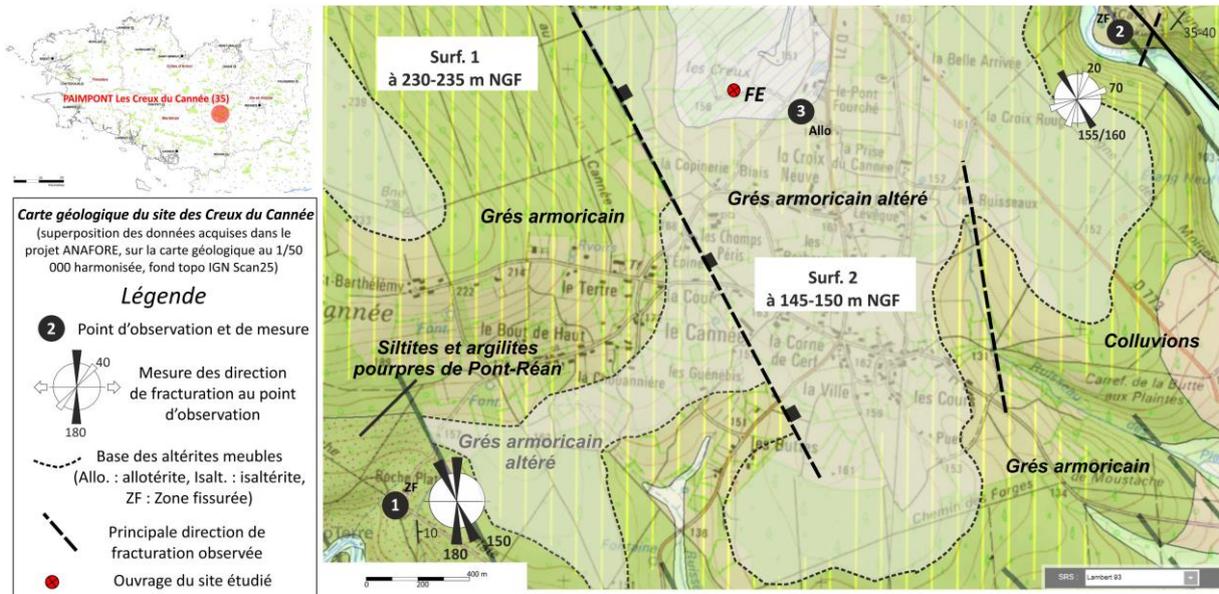


Illustration 43 : Carte géologique de détail aux niveaux de forage de Paimpont (35), la relation entre les bases des altérites meubles se situent à 245-250 m NGF et 145-150 m NGF où passe ici la faille Quessoy-Nort-sur-Erdre.

Implications & conséquences

La cartographie des altérites, de leurs bases et la reconnaissance de leur relation ont des implications à la fois sur l'histoire géologique et sur l'hydrogéologie.

Sur l'histoire géologique, récemment, Paul Bessin (2013) dans son travail de doctorat a mis en évidence l'existence d'au moins six paléosurfaces continentales sur le Massif armoricain à partir de l'analyse de la géomorphologie du massif et de sa relation avec les sédiments qui reposent sur ces surfaces en bordure du bassin parisien.

Certaines de ces paléosurfaces ont des âges relatifs déterminés par les sédiments datés qui les coiffent mais d'autres surfaces ont été notées comme des surfaces dégradées correspondant certainement aux mêmes surfaces mais affectées par un phénomène géologique postérieur (tectonique ou eustatique).

Avec au moins deux événements tectoniques avérés post altération, l'un anté ou syn Eocène moyen et le second au Rupélien à l'Oligocène inférieur, il est certainement possible de dédoubler le nombre de surfaces d'altération ou continentales du Massif armoricain.

La classification en altitude de l'ensemble des bases des altérites cartographiées sur des 100 sites, montrent qu'elles balayent le spectre altimétrique depuis les 26,4 m jusqu'à 320 m NGF.

Elles se répartissent suivant **12 classes d'altitudes** dont le dénivelé moyen entre chaque classe, est homogène de 256 à 320 m NGF avec 20 m de dénivelé moyen, et hétérogène de 16,3 à 225,8 m NGF dont le dénivelé maximum est de 40,1 m et le minimum de 11,7 m (Illustration n°44).

Ces 12 classes d'altitude de la base des altérites meubles sur la partie bretonne du Massif armoricain pourrait être une illustration de l'évolution altimétrique de celui-ci combinant des relations tectoniques et eustatiques.

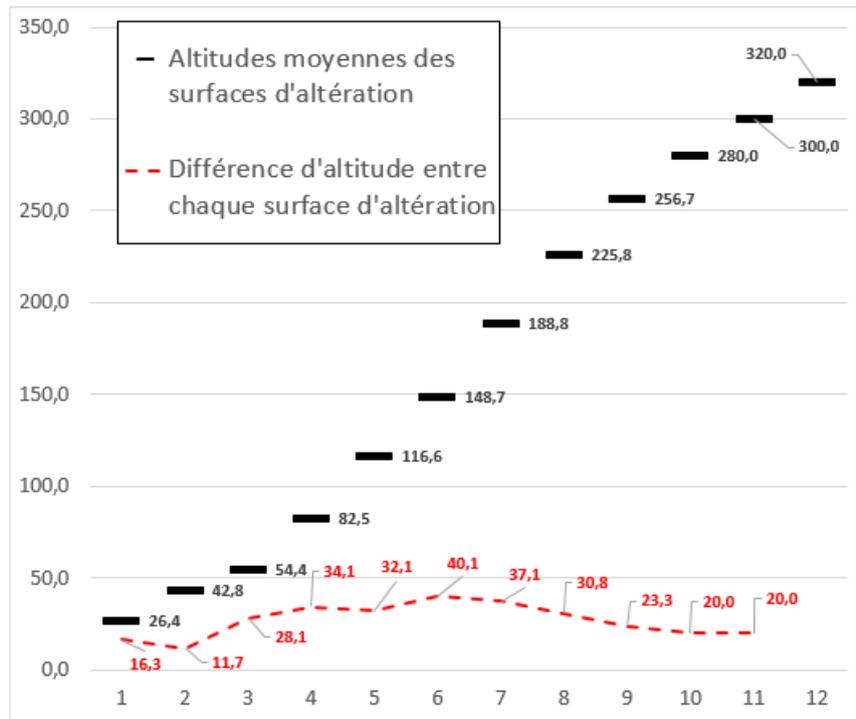


Illustration 44 : Classification altimétrique (axe vertical en mNGF) de l'ensemble des bases des altérites meubles du Massif armoricain cartographiées dans ANFORE sur les 100 sites (en noir, en m NGF) et dénivelé ou rejet vertical apparent entre chaque classe altimétrique (en rouge).

Sur l'hydrogéologie du Massif armoricain, l'identification des surfaces d'altération montre que celle-ci est omniprésente et qu'elle est polyphasée ce qui n'est pas sans conséquence sur le comportement hydrogéologique des roches.

Si les parts respectives entre les contributions lithologiques, tectoniques ou celles liées à l'altération des roches sont difficilement quantifiables à présent, le caractère polyphasé de l'altération peut être une explication probable sur des sites où les lithologies ne sont pas des plus favorables statistiquement à la présence d'eaux souterraines (calcul du débit moyen instantané par lithologie par exemple).

C'est certainement le cas des sites productifs qui jalonnent les Monts Bel-Air et Carmel dans les Côtes d'Armor avec 4 à 5 surfaces d'altération dans des schistes briovériens silto-argileux classiquement peu productifs mais traversés par la faille Quessoy/Nort-sur-Erdre (QN/E). Sur ce secteur, les multi profils d'altération sont drainés par la faille de QN/E, cumulant réservoir capacitif et structure transmissive (Illustration n°34).

Mais aussi, les sites qui entourent une butte de 180 m NGF d'altitude, qui expose une zone fissurée d'une granodiorite cadomienne (ici son apex), et où tout autour, topographiquement plus bas, cette zone fissurée est ceinturée par les altérites meubles de cornéennes et schistes tachetés, les deux reliées par un talus de raccordement. L'ensemble étant recoupé par des failles qui viennent drainer ce dispositif de deux profils d'altération (Illustration n°45).

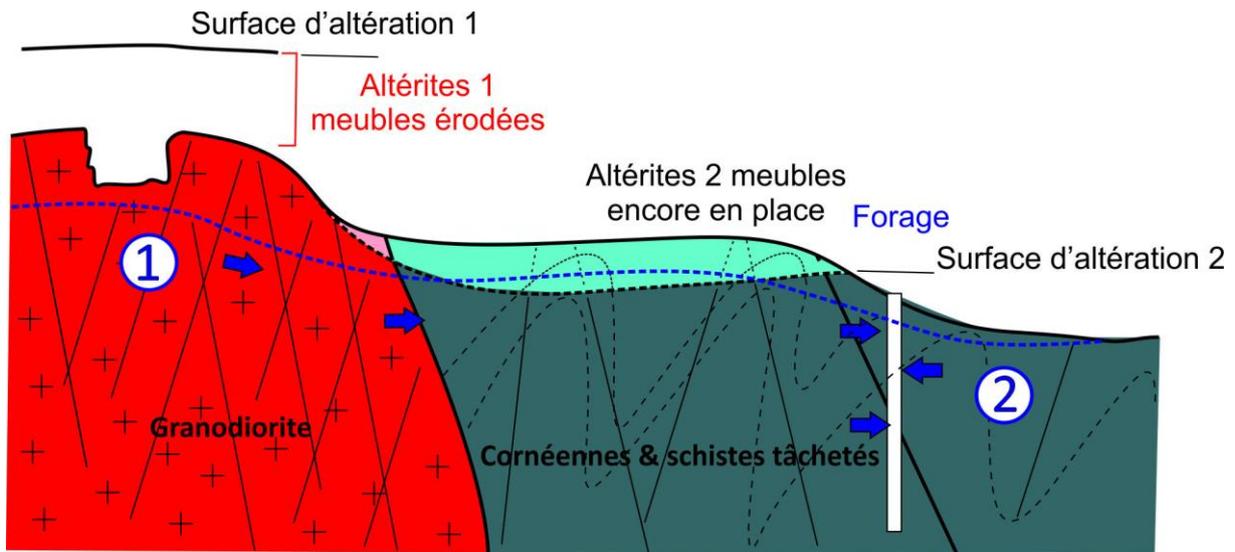


Illustration 45 : Schéma de principe interprétatif de l'aquifère de Dompierre-du-chemin (35), site de Pré-Poncel, avec deux profils d'altération raccordé par un talus de raccordement et drainé par des failles.

4.1.4. Direction tectonique, failles et fractures des 100 forages (*mesures in situ*)

Un maximum d'affleurements rocheux a été ausculté autour des forages sur un périmètre approximatif de 3,5 km. Les mesures structurales : faille, fracture, schistosité/foliation, intrusion mineure magmatique (filon) pour chaque site ont été réalisées et classées en : direction principale, direction de second ordre, de troisième ordre et enfin de quatrième ordre.

La direction principale est considérée comme la direction dominante du site, direction la plus récurrente sur les affleurements rocheux du site mais aussi celle qui dicte la géomorphologie du site c'est-à-dire son orientation préférentielle, le cas échéant.

Les mesures ont été : une direction (trait noir en gras) par rapport au Nord, une pendage (ou inclinaison du plan ; trait noir fin avec la flèche) et pour les failles quand c'était observable sur le terrain, le pitch ou les stries montrant le sens et le déplacement sur la faille (traits noirs fins en tiretés serrés) (Illustration n°46).

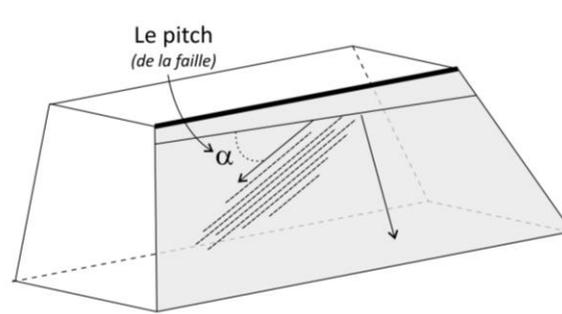


Illustration 46 : Schéma des mesures faites sur les failles et fractures.

Premières mesures faites sur les 50 premiers sites de forages

Les 50 premiers sites analysés (Illustration n°47) avaient montré que la direction principale sur un maximum de site était la direction N150°, accompagnée des directions NS et N045°.

Les directions secondaires étaient plus éparpillées avec toujours la direction N150° mais à effectif égal avec les autres directions.

Enfin au niveau des directions d'ordre 3, la répartition des directions étaient la même que pour les directions principales mais apparaissaient en effectif plus important de nouvelles directions autour de l'E-W.

Ces directions E-W (de N080° à N120°) sont alors dominantes à part égale avec celles N150 pour les directions d'ordre 4.

Ces résultats montraient l'existence de directions tectoniques préférentielles et récurrentes associées à ces forages les plus productifs. Ces directions principales étaient les directions N150° (entre 130°N et 160°N) et NS (entre 0°N et 30°N), accompagnées de directions tournant autour du N040°. Localement, les directions EW (entre 80°N et 120°N), statistiquement plutôt secondaires, pouvaient avoir participé à la structuration des sites par le jeu tectonique en extension de ces structures héritées, orientées favorablement par rapport au champ de contrainte tectonique du moment.

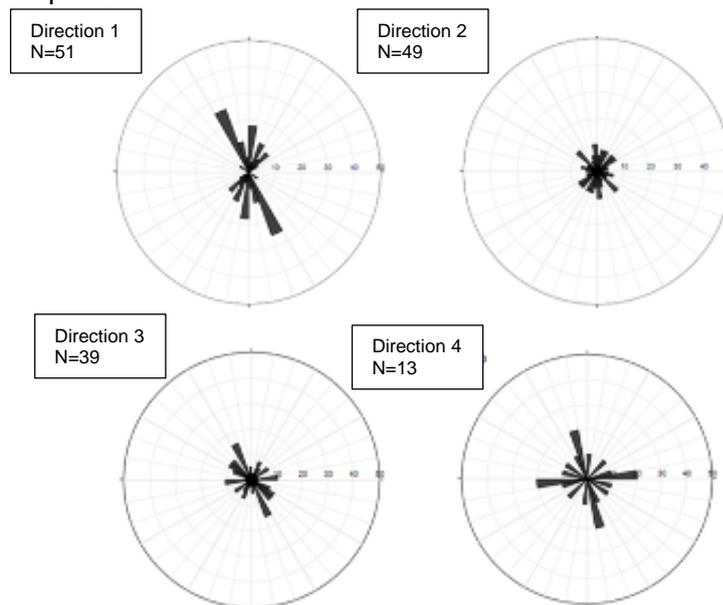


Illustration 47 : Rosaces des directions tectoniques mesurées sur les 50 premiers sites analysés en 2017. Ordre 1 (haut gauche), ordre 2 (haut droit), ordre 3 (bas gauche) et ordre 4 (bas droit).

Mesures faites sur les sites des 100 forages

Les mesures prises sur les 50 sites de forages supplémentaires de la deuxième année ont fourni les mêmes résultats que l'analyse structurale faite sur les 50 premiers. Mais à ces faits sont venus s'ajouter la découverte d'affleurements rocheux clés, confirmant les résultats de la cartographie des altérites et la mise en évidence par les décalages observés au niveau des bases des altérites meubles.

Les orientations (par rapport au Nord) des failles/fractures principales mesurées sur les sites sont principalement N150° (Nord-Ouest/Sud-Est) et NS (Nord/Sud) avec des directions localement N045° (Nord-Est/Sud-Ouest). La direction secondaire principale est autour de l'Est-Ouest (depuis N080° jusqu'à N120° ; Illustration n°48 à gauche).

Les pendages pour l'ensemble des structures failles/fractures principales sont en général assez abruptes avec des pendages qui oscillent entre 65° et 85° soit vers l'Est soit l'Ouest, pour un plan moyen N144°. Les pendages pour les plans secondaires sont tout aussi abruptes avec des angles de 55° à 85°, ici aussi soit vers l'est soit l'ouest et pour un plan moyen N024°.

Enfin, les pendages des failles/fractures de troisième ordre ont des pendages qui vont de 20° à 85° soit vers l'est soit l'ouest, pour un plan moyen N095° (Illustration n°48 à droite).

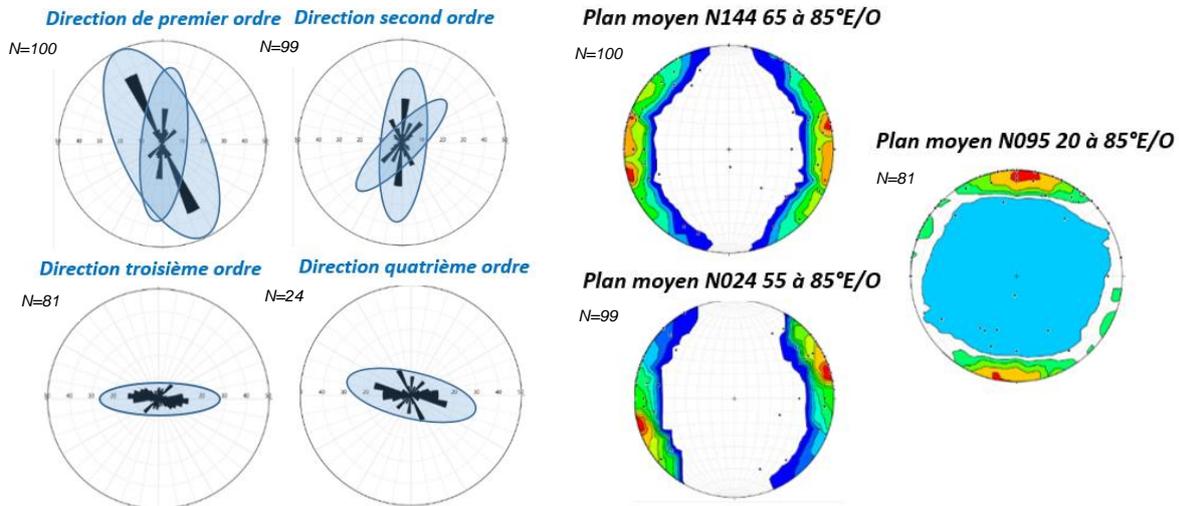
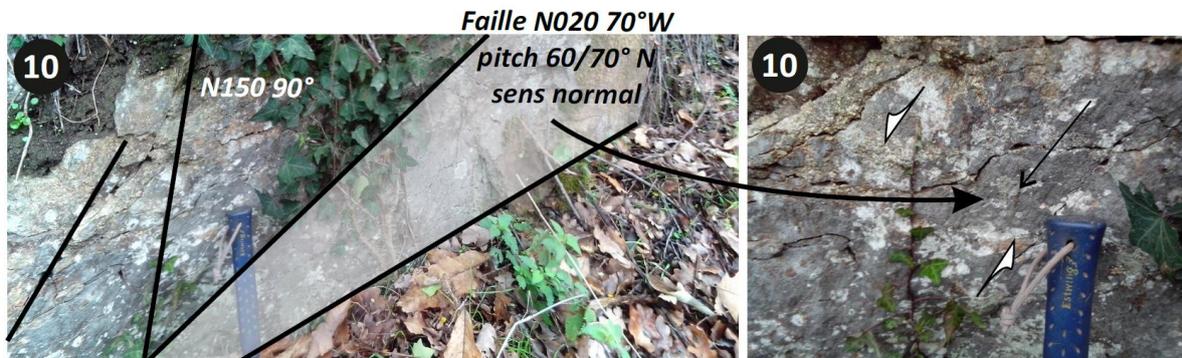


Illustration 48 : A gauche - directions tectoniques mesurées autour des 100 forages ANAFORE ; à droite – Stéréogramme de densités des pôles des failles et fractures (Hémisphère inférieure)

Ces observations principales sur quelques affleurements clés choisis parmi les 794 visités sont :

Des failles transtensives senestres (décrochantes et normales) N150° avec des pendages de 60 à 70° soit vers l'ouest, soit l'est sur lesquels les pitchs et des sens univoques de déplacement ont pu être observés clairement (Illustration n°49).



Point n°10 : Faille N02 70° W avec sens normal et pitch (direction de transport) de 15° Nord

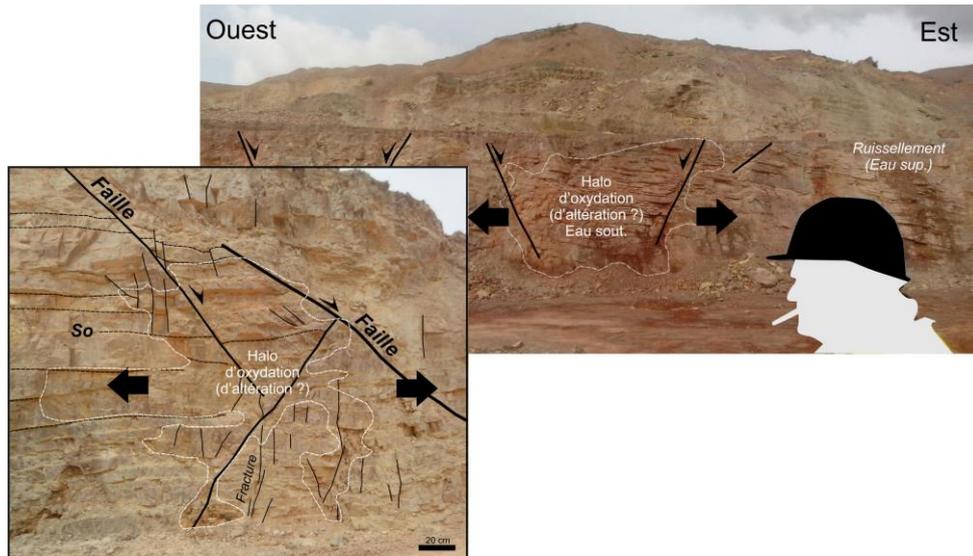


Illustration 49 : en haut, faille normale de direction N020°, inclinée de 70°ouest, avec un pitch de 60/70° vers le Nord dans le granite de Saint-Anne d'Auray (Theix, Morbihan) et en bas, petits grabens N150° à NS dans les grès armoricains (Carrière d'Iffendic, secteur Paimpont, Ile-et-Vilaine).

Des halos d'altération accompagnant des fentes de tension N020° qui aboutissent à d'individualisation de zones d'altération n'ayant plus de variations verticales de faciès d'altération (R. Wyns, 1998) mais avec des variations horizontales passant latéralement de la zone fracturée caractéristique des granites aux isaltérites et aux allotérites.

Ces observations ont pu être faites grâce aux affleurements de qualité offert par le littoral de Bretagne au niveau de Ploemeur dans le Morbihan (Illustration n°50),

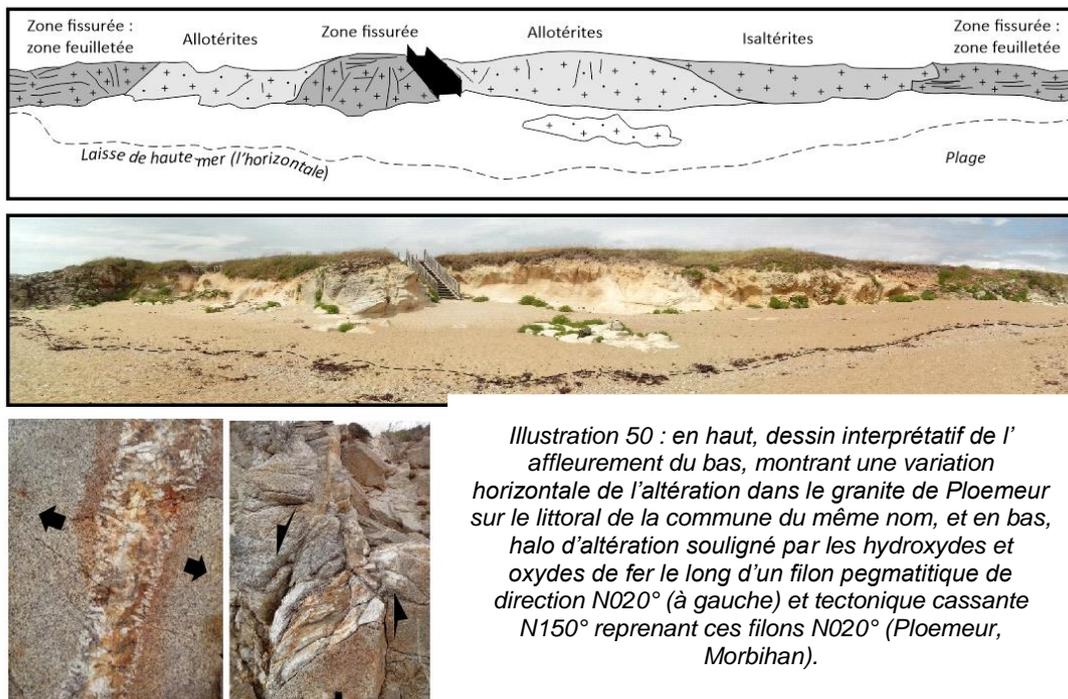
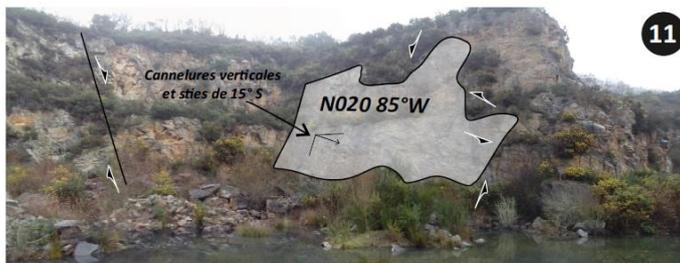
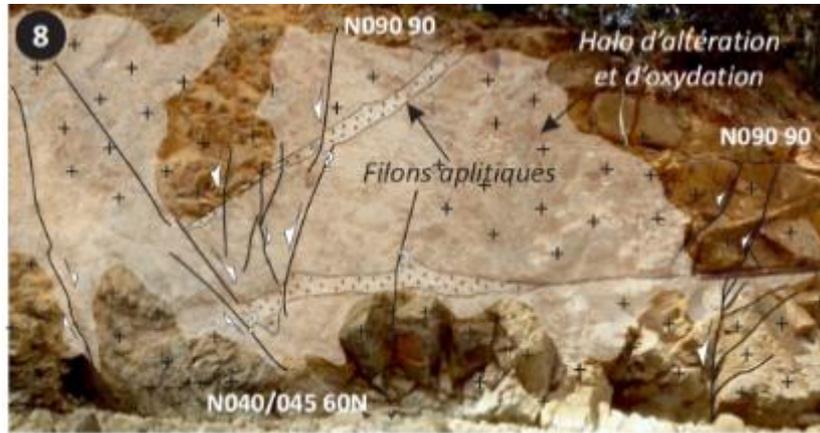


Illustration 50 : en haut, dessin interprétatif de l'affleurement du bas, montrant une variation horizontale de l'altération dans le granite de Ploemeur sur le littoral de la commune du même nom, et en bas, halo d'altération souligné par les hydroxydes et oxydes de fer le long d'un filon pegmatitique de direction N020° (à gauche) et tectonique cassante N150° reprenant ces filons N020° (Ploemeur, Morbihan).

Enfin des structures minoritaires d'ordre 3 surtout et observées en Sud Bretagne, qui ont des orientations proches de celles hercyniennes c'est-à-dire sub-Est-Ouest. Ces structures, connues pour être compressives, ont été observées avec des jeux tectoniques extensifs (Illustration n°51).

C'est le cas du granite de Pont-l'Abbé à Fouesnant, où des failles N090° et fortement inclinées, décalent des filons aplitiques et sont accompagnées d'auréoles d'altération (Illustration n°51 en haut). Ou encore sur la Presqu'île de Rhuys, sur la commune de Sarzeau, où il est possible d'observer sur le littoral des grabens Est-Ouest avec des cinématiques univoques sur les failles bordières et des failles N020° à NS ainsi que N150° transtensives (décochantes et normales senestres) qui reprennent les précédentes (Illustration n°51 en bas).



Point n° 11 : Faille N020 85°W, avec un pitch de 15° vers le Sud (direction de mouvement). Cette orientation et ces indicateurs cinématiques suggèrent un jeu transtensif senestre ...



Point n°6 : Bassin d'effondrement orienté N080° et recoupé par des failles/fractures N150°. Détail de la cinématique univoque sur la photo en haut à droite.

Illustration 51 : en haut, halos d'altération autour de failles normales N090° dans le granite de Pont-l'Abbé, Fouesnant et en bas, bassin d'effondrement N080° et faille N020° normale qui recoupe ces bassins (respectivement, Saint-Gildas-de-Rhuys et Sarzeau, Morbihan).

Enfin, toujours sur le littoral morbihannais, entre Guidel et Ploemeur, il est possible d'observer le système transtensif N150° et NS à N020°. Une dalle de granite à Ploemeur, qui se découvre à marée basse, montre clairement la mise sous contraintes des roches avec la création de fentes de tension NS à N020° qui évoluent en fentes en échelon pour aboutir à l'individualisation de failles de direction N150°, faisant ainsi un angle de 45° approximativement avec la direction de la contrainte principale sub NS (Illustration n°52).



Illustration 52 : fracturation et décrochement dextre (N150° 90) accompagnés par les fentes de tension (en échelon) NS 90 sur le granite de Ploemeur.

Nombre de directions tectoniques

En moyenne, les sites/forages ont en majorité trois directions tectoniques (57 % des sites), suivis à parts égales 22% et 18% par les sites/forages avec respectivement 4 et 2 directions tectoniques. Enfin seulement 1 site/forage n'a qu'une direction et 2 sites ont cinq directions tectoniques (Illustration n°53).

Nombre de directions tectoniques	Effectifs par Nombre de directions tectoniques
1	1
2	18
3	57
4	22
5	2
Total général	100

Illustration 53 : nombre de direction de failles/fractures par site

Tentative d'évaluation de l'impact de la faille (zone de dommage) sur les forages

Une tentative de mise en relation entre les débits instantanés et la taille de la plus petite entité volumique autour des forages (calculer grâce à l'intersection des fréquences de fracturation) a été réalisée sur les 50 premiers forages. Hélas, cette manipulation s'est avérée complexe avec des résultats mitigés qui sont brièvement décrits dans les lignes ci-dessous.

L'espacement systématique (intervalle) entre les fractures du même ordre de grandeur qui possède un certain parallélisme, peut avoir des conséquences statistiquement significatives. La distance perpendiculaire moyenne (ou modale) entre deux discontinuités adjacentes d'un même ensemble peut avoir une influence sur la perméabilité de la masse rocheuse et donc sur l'écoulement des eaux souterraines. Cet espacement des fractures est l'inverse de la fréquence de fracture ou de la densité de fracture linéaire et il contrôle également l'intensité

des fractures et la taille des blocs de la matrice (que nous avons appelé « **plus petit pavé du réservoir** »).

Price et Cosgrove (1990) ont défini cet espacement entre les fractures (f_s) comme lié à la lithologie (c'est-à-dire à la nature de la roche) et à l'épaisseur du lit (b : c.-à-d. du banc stratigraphique de la formation géologique), suivant la relation $f_s = Yb$ où Y est une constante liée à la lithologie : Price et Cosgrove ont montré que cette relation était linéaire fonction de la nature de la roche.

Sur le projet ANAFORE, les 50 premiers forages ont été analysés, sur chaque affleurement rocheux où il était possible de le faire, les espacements entre les plans de fractures ont été mesurés afin de déterminer un pavé constituant **la plus petite entité** physique caractérisant le réservoir (Illustration n°54).

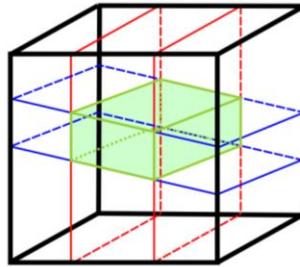


Illustration 54 : plus petit pavé du réservoir : entité entre deux à trois familles de plans de fracture ou faille

L'objectif était de confronter ce pavé avec les valeurs de débits instantanés afin de vérifier l'idée selon laquelle les débits instantanés peuvent avoir une relation avec des observations directes de terrain. En confrontation directe, la relation entre le plus petit pavé du réservoir souterrain et les débits instantanés, n'a pas montré de lien évident.

Une tendance a semblé s'établir entre des classes de tailles des pavés en fonction de la moyenne par classe des débits instantanés. Les moyennes des débits instantanés pour chaque classe ont semblé montrer que la moyenne des débits par classe diminuait quand la taille du « **pavé** », elle augmentait.

Interprétation et relation avec l'histoire tectonique du massif armoricain

La récurrence des mêmes directions structurales sur les 100 sites/forages, leur relation observable d'un bout à l'autre de la Bretagne (même si ici les plus beaux exemples proviennent de Bretagne Sud) et le fait que l'ensemble définisse un système tectonique extensif à transtensif (système propice à la création d'espace dans les roches) permettent de construire un modèle tectonique très favorable à la présence d'eau souterraine.

Les mesures structurales confirment les conclusions faites à partir de la cartographie des altérites, et même s'il est difficile d'évaluer si la tectonique a accéléré l'altération en augmentant par le biais de jeux verticaux de la Bretagne, les gradients hydrauliques, le schéma général tectono-latéritique semble assez cohérent.

Ainsi, les directions N150° (à +/- 10 à 20°) et les directions NS (à +/- 10 à 20°) accompagnées des directions N045° (à +/- 10 à 20°) semblent correspondre à un système tectonique en transtension, qui découpe la Bretagne et auxquelles sont associées le dépôt des formations géologiques sédimentaires éocènes à pliocènes (Illustration n°48 en haut). Dans certains secteurs, se sont développés des bassins sédimentaires comme les bassins de Concarneau, Quimper ou encore de Chartres-de-Bretagne pour les plus importants, alors que dans d'autres

secteurs, il semblerait que les relais soient faits par des hauts topographiques (Monts Bel-Air et Carmel dans les Côtes d'Armor etc.).

Les directions NS seraient donc les directions de mise sous contrainte du Massif armoricain, où les fentes de tension évoluant vers des fentes en échelons auraient évolué encore vers les fractures N150° à 45° de la contrainte tectonique principale, respectant ainsi les principes de la mécanique des roches (Illustration n°56 en haut et en bas).

Les directions N045° seraient ainsi le développement de failles/fractures conjuguées aux premières.

Les directions observées au niveau des 100 forages décrivent un schéma de type Ridel, schéma dans lequel il est possible de trouver pour un même régime tectonique des structures extensives (plutôt productrices d'eaux souterraines) mais aussi compressives, les directions NS et les direction N150° et leur conjuguées N045° (Illustration n°55).

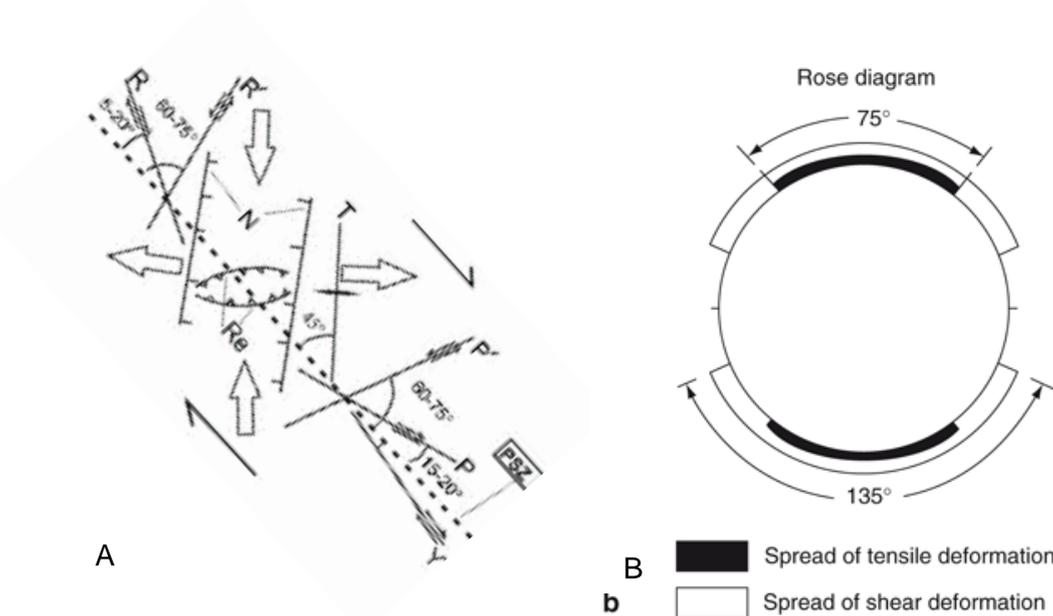


Illustration 55 : A - schéma classique de type Ridel d'un système décrochant ; B - rosace des orientations de fracturation (extensif, compressif et décrochant) pour un même tenseur de contrainte (d'après Ruhand, 1973)

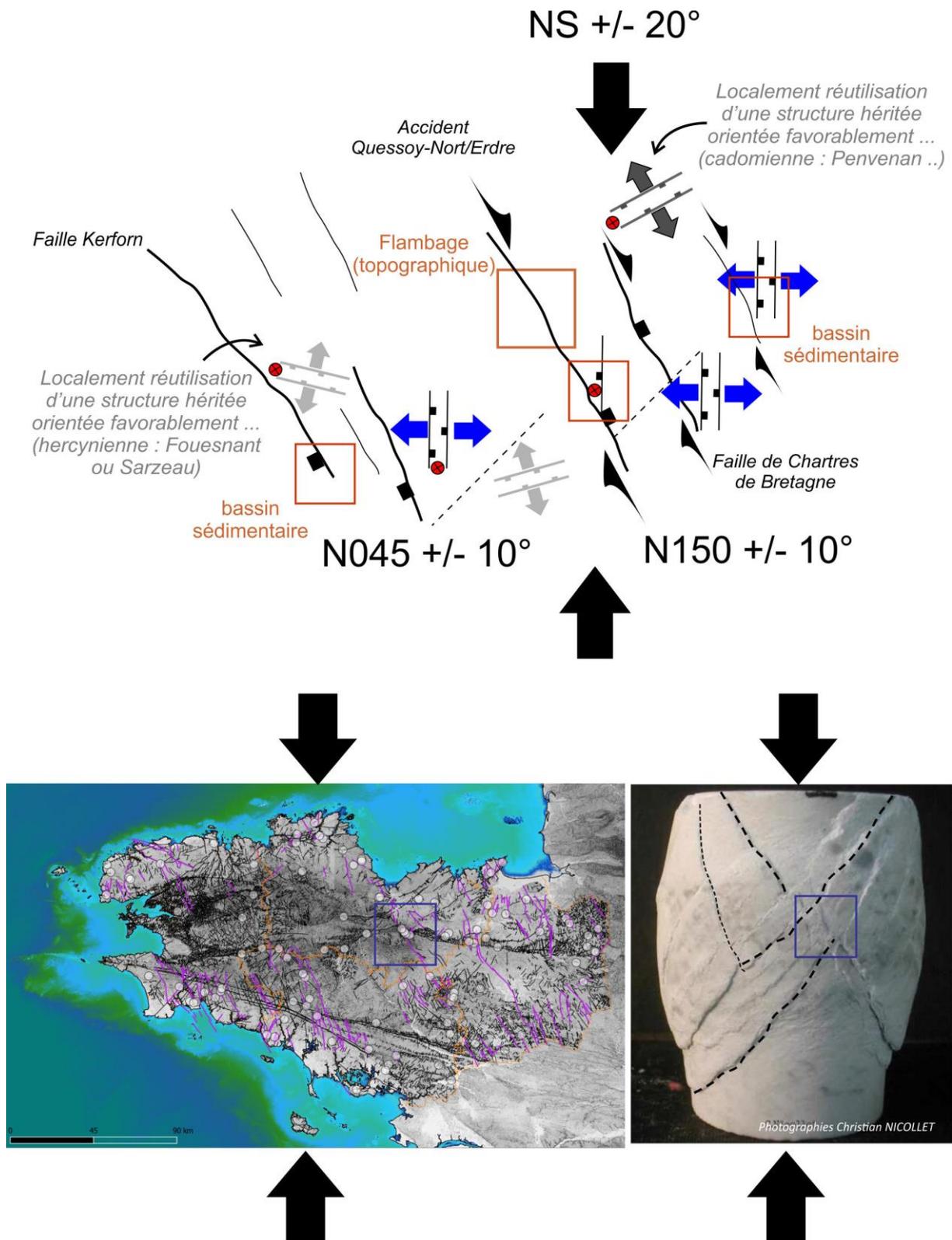


Illustration 56 : en haut, modèle tectonique déduit de l'ensemble des observations de terrain réalisées sur les 100 forages ANAFORE (764 affleurements ; voir le texte pour une description, les point rouges correspondent aux positions des forages analysés) ; en bas à gauche, modèle interprétatif de la création des structures tectoniques post hercyniennes : flambage du massif armoricain avec localement des hauts topographiques et plusieurs paléosurfaces d'altération et des bassins sédimentaires. Les failles principales sont diffuses car interfèrent avec des failles anciennes qui peuvent localement rejouer tectoniquement si elles sont orientées favorablement au champ de contrainte principal NS. En bas à droite, déformation d'un cylindre de roches en compression avec du flambage en son centre et des zones basses.

4.1.5. Typologies des forages

Les sites qui ont été analysés jusqu'ici montrent que :

- les lithologies à elles seules ne permettent pas de dresser des typologies de forages,
- que les contextes géologiques ou géodynamiques permettent de regrouper la distribution des forages de 51 à 16 puis 10, mais ces contextes géologiques ne sont qu'une part de l'histoire géologique du Massif armoricain et les sites ont montré que plusieurs phénomènes venaient se superposer les uns aux autres pour générer un forage productif en eaux souterraines.
- l'altération est omniprésente sur l'ensemble des sites,
- comme la tectonique était récurrente et correspond à un système transtensif orienté N150° à NS avec localement des failles N045°,
- Mais que cette tectonique pouvait potentiellement faire rejouer des failles héritées sub Est-Ouest.

Ainsi, certaines analyses au niveau de certains forages ont montré de réelles découvertes de contextes hydrogéologiques avec des aquifères particuliers encore insoupçonnés comme :

- le site de Beigon, Pont de la Lande (sur l'Aff), découvert par Eau du Morbihan et dont la compréhension du fonctionnement a fait l'objet de deux études BRGM et OSUR : l'une terminée (Dewandel et al., 2015) et l'autre en cours (Mougin et al., à paraître.),
- ou encore ceux des Monts Bel-Air et Carmel dans les Côtes d'Armor (de Collinée, Trébry et Saint-Glen) avec les profils d'altération polyphasés ou de Plouha, la ville Hélio contenu dans une auréole de métamorphisme du même âge que celle de la granodiorite de Fourgères,
- et pour finir par ceux de sud Bretagne, deux types différents : ceux de Guidel, Ploemeur, Sarzeau et Bénodet par exemple, et ceux le long du Cisaillement Sud Armoricain recoupé par le dispositif faillé transtensif N150°/NS.

Les 100 sites (forages) analysés dans le projet ANAFORE se répartissent suivant 10 typologies différentes qui s'articulent autour de (1) différents contextes géologiques, (2) la présence de différentes lithologies (nature des roches), mais où toutes les typologies ont en commun : (3) les structures tectoniques et (4) l'altération des roches.

Les failles sont omniprésentes sur l'ensemble des forages avec des directions quasi similaires. Pour certaines typologies des paramètres vont être dominantes comme l'altération, la tectonique, les lithologies ou le contexte géologique mais c'est majoritairement un effet combiné de deux à trois paramètres qui confèrent aux roches leurs propriétés hydrogéologiques ?.

Les 10 typologies sont données dans le tableau ci-dessous (Illustration n°57), avec les effectifs de forages correspondant.

TYPOLOGIE	EFFECTIF	DESCRIPTION
1	29	Auréole de métamorphisme recoupée par failles/fractures transtensives NS, N150 et/ou N045
2	17	Une lithologie magmatique (granites, granodiorite) recoupée par failles/fractures transtensives NS, N150 et/ou N045
3	12	Synclinal paléozoïque recoupé par failles/fractures transtensives NS, N150 et/ou N045
4	6	Profil d'altération sous le paléozoïque recoupé par failles/fractures transtensives NS, N150 et/ou N045
5	6	Filons magmatiques dans une lithologie recoupés par failles/fractures transtensives NS, N150 et/ou N045
6	5	Lithologie perméable dans une lithologie peu perméable recoupée par failles/fractures transtensives NS, N150 et/ou N045
7	10	Failles/fractures transtensives NS, N150 et/ou N045 recoupant le CSA ou structures satellites
8	9	Failles/fractures transtensives NS, N150 et/ou N045 au Sud du CSA ou structures satellites ou réutilisant une structure ancienne
9	2	Lithologies effusives (volcanites) recoupées par failles/fractures transtensives N150 et N045, et/ou NS
10	4	Aquifère avec multiprofiles d'altération le long du QN/E

Illustration 57 : typologie des 100 forages ANAFORE avec les effectifs de forages correspondants.

Parmi ces 10 typologies différentes, **cinq typologies sont dominantes.**

La **typologie 1** intitulée : « *Auréole de métamorphisme recoupée par des failles ou fractures NS, N150° et/ou N045°* », regroupe à **29%** des forages ANAFORE. Le **typologie 2** intitulée : « *Une lithologie magmatique (granites, granodiorite) recoupée par des failles ou fractures NS, N150° et/ou N045°* », regroupe **17%**. La **typologie 3** intitulée : « *Synclinal paléozoïque recoupée par des failles ou fractures NS, N150° et/ou N045°* » regroupe **12%** des forages suivie par la **typologie 7** intitulée : « *Failles et fractures transtensives NS, N150° et/ou N045° recoupant le Cisaillement Sud Armoricaïn* », regroupe **10%**. Et enfin, la **typologie 8**, intitulée : « *Failles et fractures transtensives NS, N150° et/ou N045° au Sud du Cisaillement Sud Armoricaïn ou structures satellites ou réutilisant une structure ancienne* », regroupe **9%**.

Quatre typologies sont approximativement égales en effectif. Les typologies : 4 intitulée : « *Profil d'altération sous le paléozoïque recoupé par des failles ou fractures NS, N150° et/ou N045°* », **et 5** intitulée : « *Filons magmatiques dans une lithologie des failles ou fractures NS, N150° et/ou N045°* », **regroupent 6% des forages alors que les typologies : 6 :** intitulée : « *Lithologie perméable dans une lithologie peu perméable recoupée par des failles ou fractures NS, N150° et/ou N045°* », **et 10** intitulée : « *Aquifère avec multi profils d'altération le long de la faille de Quessoy-Nort-sur-Erdre* », **regroupent respectivement 5% et 4% des forages.**

Enfin, une dernière typologie, la typologie **9**, intitulée : « *Lithologies effusives (volcanites) recoupées par des failles ou fractures transtensives N150° et N045° et/ou NS* », ne regroupe que **2%** des forages.

Les fiches par typologie

Une fiche synthétique a été réalisée par typologie. Elles se succèdent de 1 à 10 ci-dessous. Les forages appartiennent à une typologie principale mais certaines typologies se situent sur la faille d'échelle régionale de Quessoy/Nort-sur-Erdre (QN/E).

Ceci est annoté dans le tableau de l'illustration n°57, dans une colonne nommée *RESUS*, c'est-à-dire où potentiellement il y a aussi une forte influence de la faille de QN/E.

Typologie 1 : « Auréole de métamorphisme recoupée par des failles ou fractures NS, N150° et/ou N045° », 29% des forages ANAFORE (Illustration n°58).

Un tiers des 100 forages ANAFORE sont contenus dans une auréole de métamorphisme. Ces auréoles de métamorphisme sont d'âge carbonifère au sens large (hercyniennes ; autour des 300 millions d'années) et d'âge cambrien inférieur (Cadomien ; entre de 540 à 520 millions d'années).

Elles sont recoupées par la fracturation tardi-hercynienne mais qui pourrait être plus précoce et avoir été réutilisée entre le Carbonifère et l'Oligocène (Rupélien), avec certainement une activité ténue subactuelle. L'orientation des failles est NS à N150°, avec des directions secondaires N045°. Les pendages des failles (inclinaiisons) sont assez prononcés de 60 à 90°.

Cette typologie fait écho à des résultats déjà connus en Bretagne et qui réapparaissent dans le programme SILURES Bretagne (Mougin et al., 2008), sur la carte des débits de la zone fissurée utile des différentes lithologies bretonnes au 1/250 000.

Cette typologie a été étudiée au niveau de Saint-Brice-en-Coglès (Ille-et-Vilaine) dans le détail lors du projet CASPAR dans le cadre de la thèse de C. Roques en 2013, encadré par le BRGM (B. Dewandel) et Géosciences Rennes (L. Aquilina).

Et bien évidemment superposée à ces contextes, l'altération des roches qui peut être composée de plusieurs phases d'altération.

Typologie 2 : « Une lithologie magmatique (granites, granodiorites) recoupée par des failles ou fractures NS, N150° et/ou N045° », 17% des forages ANAFORE (Illustration n°58).

Cette typologie correspond à 17 % des forages ANAFORE et elle est certainement représentative d'une grande majorité des forages en Bretagne. Car elle correspond à la rencontre entre le modèle tectonique commun à presque l'ensemble des typologies et des intrusions magmatiques majeures que sont les granites hercyniens et les granodiorites cadomiennes, formations largement représentées en Bretagne.

A celles-ci, il est possible d'ajouter aussi d'autres intrusions importantes comme les gabbros ou les diorites, et est bien évidemment superposer à ce contexte, l'altération des roches qui peut être composée en plusieurs phases d'altération.

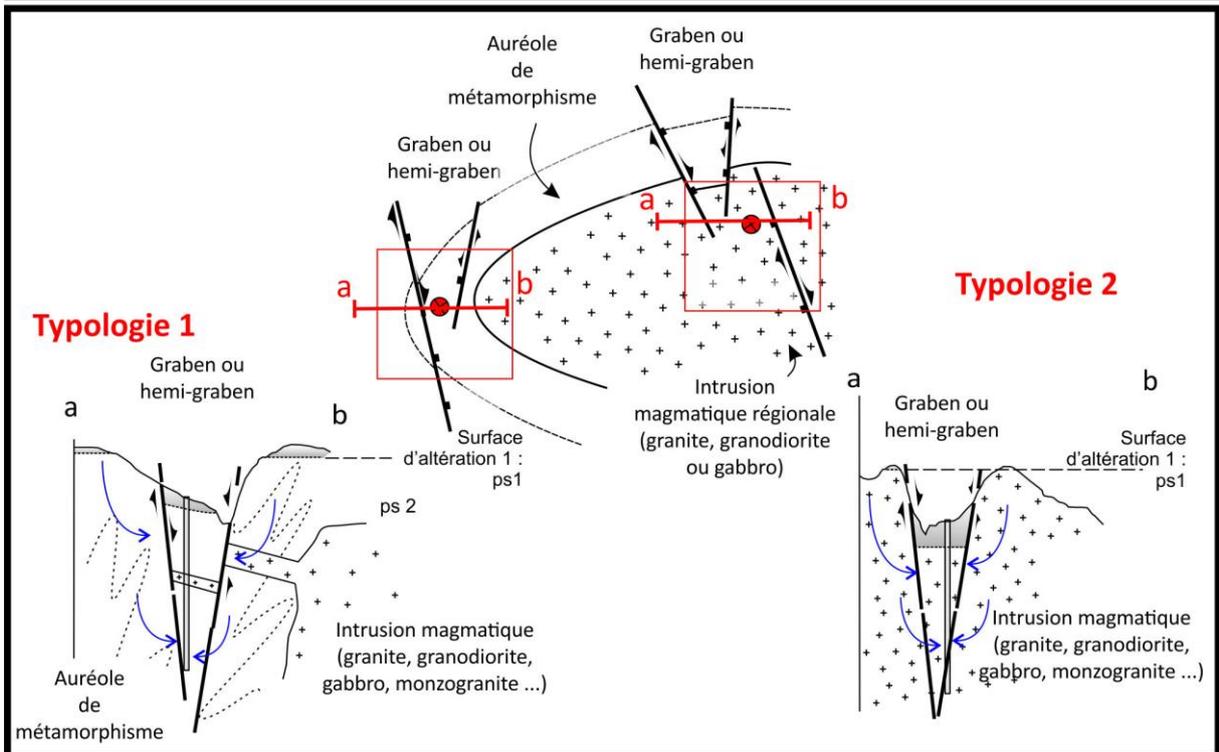
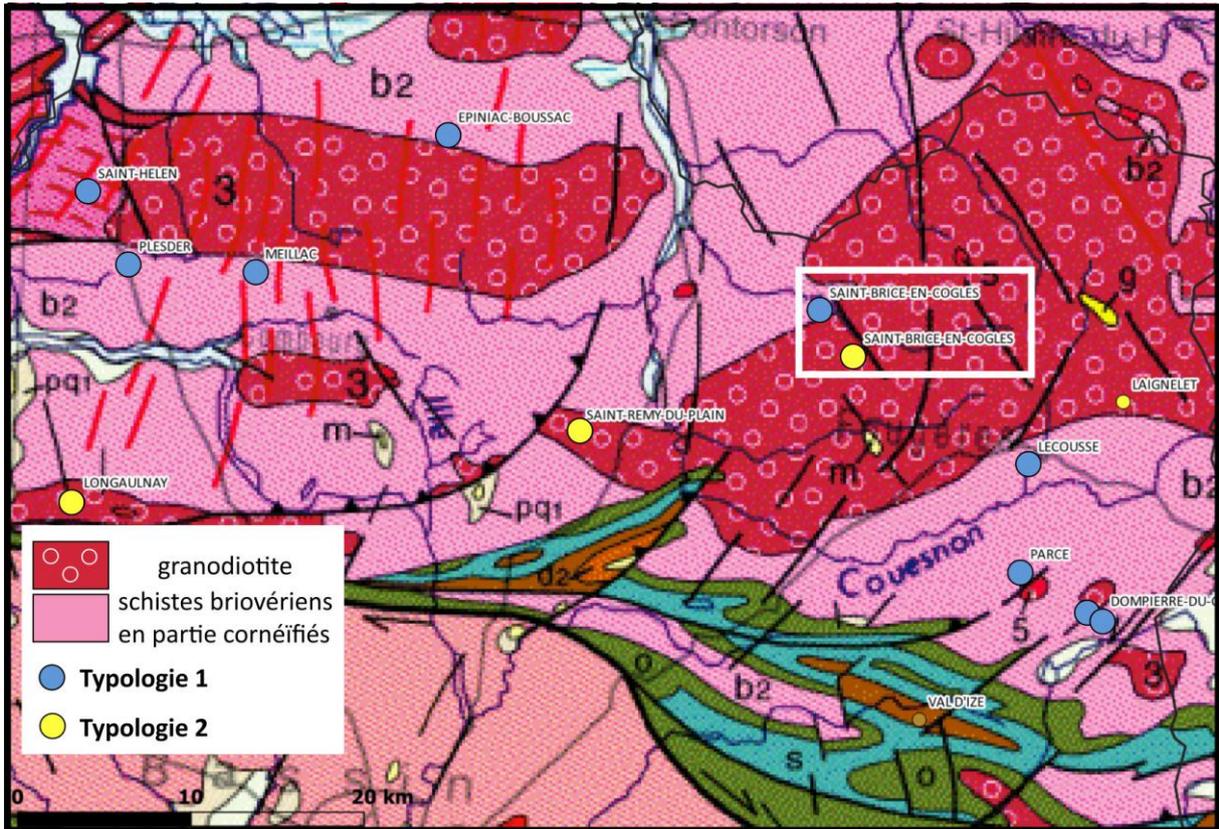


Illustration 58 : schémas en carte et en coupe des deux typologies ANAFORE 1 & 2

Typologie 3 intitulée : « Synclinal paléozoïque recoupée par des failles ou fractures NS, N150° et/ou N045° », 12% des forages ANAFORE (Illustration n°59),

Les niveaux successifs de grès et de quartzites en tant que métasédiments constituent naturellement une fois plissés un réservoir naturel. C'est notamment le cas du synclinal de grès et quartzites de la Formation du Grès armoricain au niveau de Paimpont. En effet, le développement d'un réseau de fractures parallèles à l'axe du synclinal, lié au plissement, vient recouper les niveaux stratigraphiques, créant des pavés assez réguliers au sien de cette formation géologique.

La porosité de métasédiements est accentuée par l'altération qui en apportant de l'eau dans les inter bancs/interlits argileux, les fait gonfler et crée de la fracturation ?. Lors d'un forage dans cette formation géologique des traces d'oxydation dans ces interlits ont été observées jusqu'à environ 300 m de profondeur.

Enfin, ce réservoir lié au plissement et à l'altération est recoupé par les fractures ou failles NS à N150° et N045°, créant une porosité de fracture supplémentaire.

Les forages dans ce contexte ont donc été associés à cette typologie étendue à des formations de grès autres que ceux des grès armoricains.

Pour le secteur de Paimpont, la grande superficie du synclinal de grès et quartzites, recoupé par la faille QN/E (faille majeure N150°), en font un véritable château d'eau naturel pour la Bretagne. C'est aussi au niveau de Paimpont que l'on observe le plus de décalage verticale de la base des altérites avec un rejet apparent de 100 m.

Typologie 4 intitulée : « Profil d'altération sous le paléozoïque recoupé par des failles ou fractures NS, N150° et/ou N045° », 6% des forages ANAFORE (Illustration n°59),

Cette typologie est l'une des typologies des plus originales avec les typologies 7, 8 et 10. Le point de départ est la découverte de l'aquifère par Eau du Morbihan dans le secteur de Beignon en bordure de la rivière l'Aff qui fait la limite entre les communes de Paimpont et de Beignon, respectivement en Ille-et-Vilaine et dans le Morbihan.

Une étude menée par le BRGM (B. Dewandel et al., 2015), sur la compréhension de l'aquifère et sa relation avec la rivière à partir de la réinterprétation des essais de pompage par la méthode des dérivées a montré l'existence d'un niveau aquifère situé sous la Formation de Pont-Péan et sur la partie supérieure des schistes briovériens, se comportant comme un horizon fracturé d'un aquifère d'altération. Une seconde étude a été diligentée sur le site pour approfondir ces premiers résultats, étude toujours en cours (Mougin et al., *en cours*). Le site de Beignon a été intégré à ANAFORE où des investigations de terrain ont mis en évidence le même modèle tectonique avec des failles NS à N150° transtensives localement associées des failles N045°. Ce site a donné lieu à une typologie particulière et exceptionnelle d'aquifères de socle dont la description détaillée sera dans le rapport de l'étude en cours (Mougin et al., *en cours*). Cependant, il est déjà possible de la décrire brièvement en un niveau d'altération situé à la base du Paléozoïque recoupé par le même modèle tectonique que les autres typologies au sens large. Autre fait exceptionnel, est son caractère captif à semi captif alors que les aquifères de socle sont en général plutôt des aquifères libres (Illustration n°59).

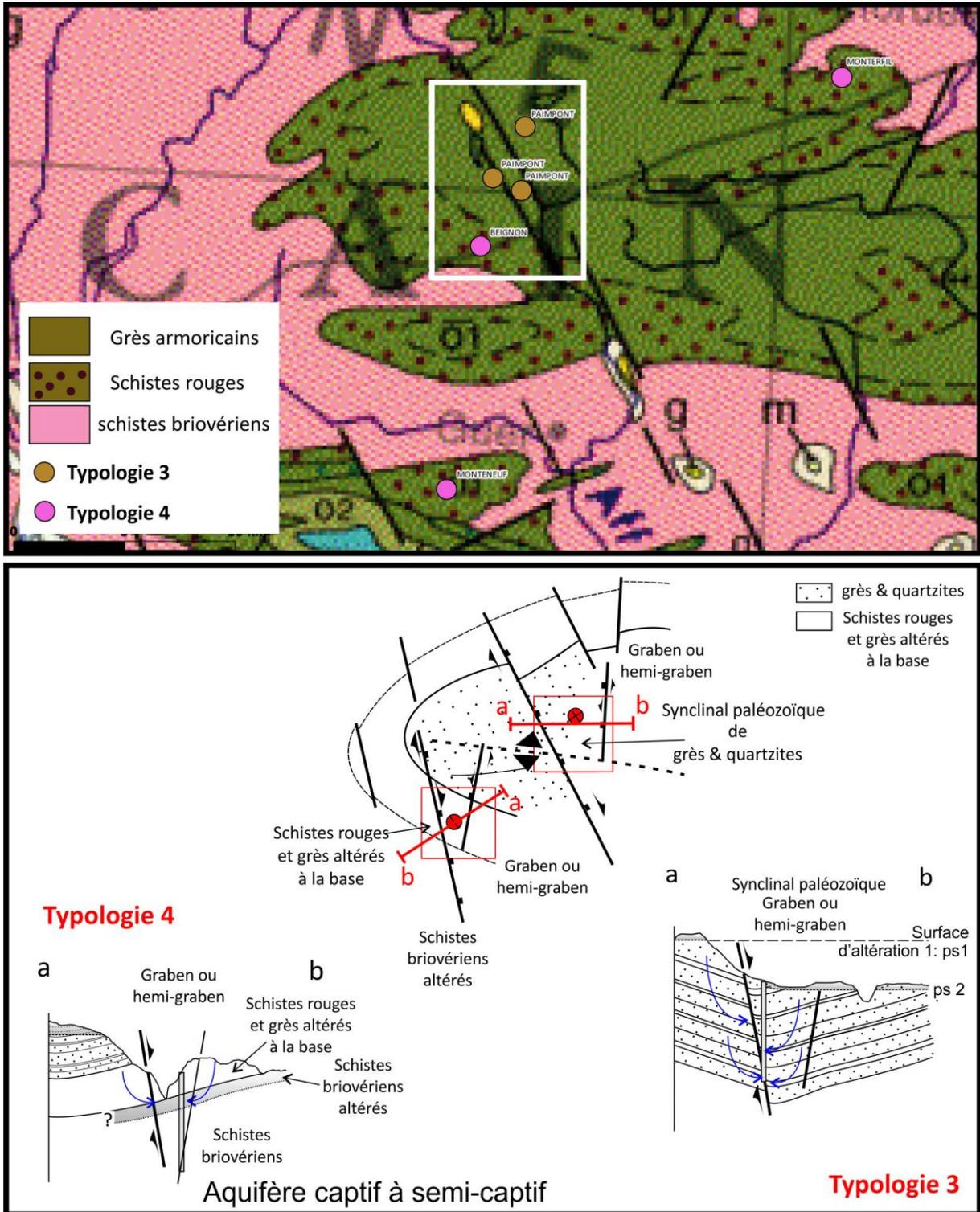


Illustration 59 : schémas en carte et en coupe des deux typologies ANAFORE 3 & 4.

Typologie 5 intitulée : « Filons magmatiques dans une lithologie, recoupés par des failles ou fractures NS, N150° et/ou N045° », 6% des forages ANAFORE (Illustration n°60) &

Typologies : 6 intitulée : « Lithologie perméable dans une lithologie peu perméable, recoupées par des failles ou fractures NS, N150° et/ou N045° », 5% des forages ANAFORE (Illustration n°60).

La typologie 5 dans son principe de fonctionnement est proche de la typologie 6. Toutes deux, correspondent à un contraste lithologique qui se traduit par un contraste rhéologique.

En effet, pour la typologie 5, la présence d'intrusions mineurs (de type « filon ») semblent être propices à la présence d'eau souterraine, alors que pour la typologie 6 c'est la présence de niveaux gréseux au sein de schistes plutôt argileux qui confère à cette typologie son caractère perméable. Cependant, pour la typologie 5, les filons comme ceux de dolérites peuvent avoir localement légèrement cuit la roche encaissante, créant un léger métamorphisme de contact ce qui n'est pas le cas de la typologie 6. En revanche, si les filons de dolérites peuvent en termes d'hydrogéologie avoir un rôle de barrière étanche (*B. Dewandel communication orale*), les niveaux de grés vont plutôt être drainants.

Comme pour les autres typologies, l'ensemble est affecté par le modèle tectonique transtensif NS à N150° et N045°, « senestre à dextre » respectivement, dont les déformations semblent se concentrer au niveau de ces contrastes rhéologiques.

La typologie 5 se retrouve de Broon dans les Côtes d'Armor à Cancale en Ille-et-Vilaine jusqu'à Hanvec dans le Finistère, avec des âges de filons pouvant être différents.

La typologie 6 se retrouve sur les formations géologiques métasédimentaires montrant des alternances de schistes (niveaux argilo-péliciques) et gréseux, depuis les forages d'Abats jusqu'à Mauron dans le Morbihan et dans le Sud de l'Ille-et-Vilaine. Cette typologie expliquerait le nombre assez important de forages avec des débits instantanés de 40 m³/h et plus des schistes du Briovérien dans le Sud de l'Ille-et-Vilaine, expliquant statistiquement et historiquement le caractère productif de cette formation géologique.

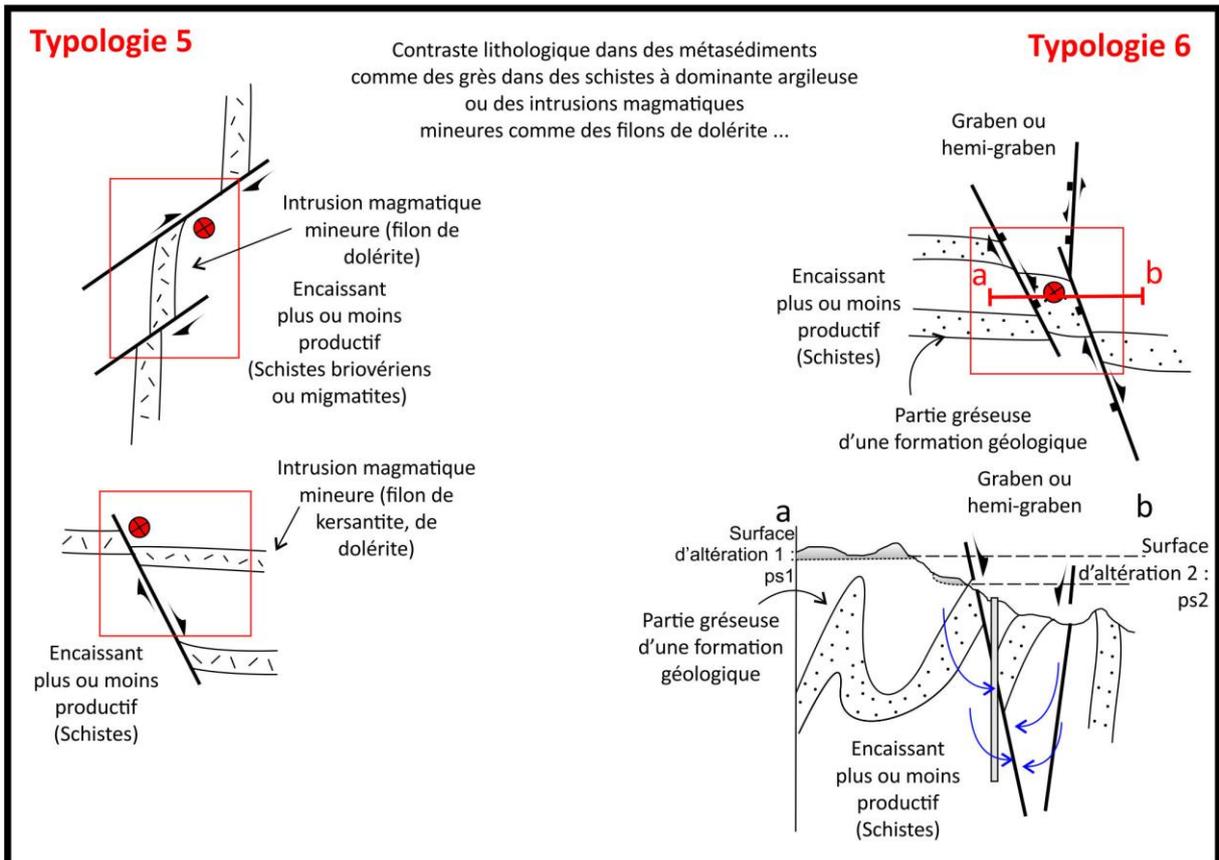
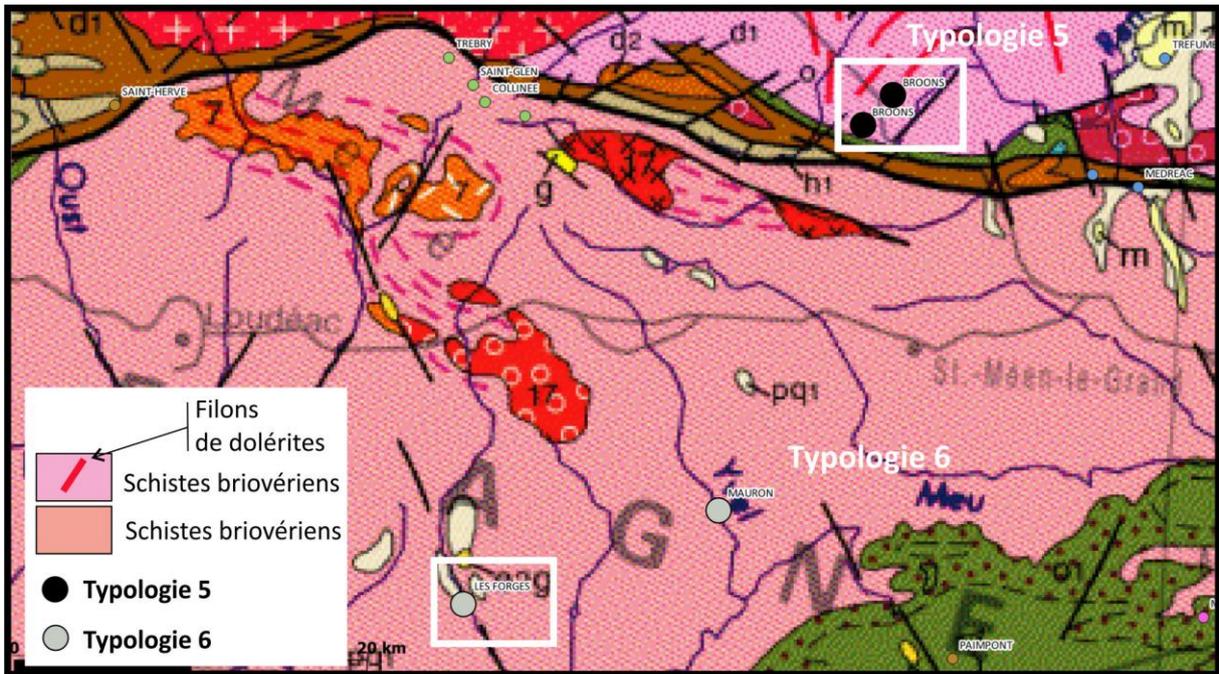


Illustration 60 : schémas en carte et en coupe des deux typologies ANAFORE 5 & 6.

Typologie 7 intitulée : « Failles et fractures transtensives NS, N150° et/ou N045° recoupant le Cisaillement Sud Armoricain », 10% des forages ANAFORE (Illustration n°61).

Le Cisaillement Sud Armoricain est sur certaines parties de sa longueur, recoupé par des failles N150° à NS mais aussi N045° pour l'essentiel. Les sites des forages ANAFORE analysés dans cette configuration montrent que les failles décalent le profil d'altération et créent des petits bassins d'effondrement en graben à héli graben.

Cette configuration particulière semble favorable à la production d'eau souterraine et a donné lieu à cette typologie particulière car plusieurs sites sont dans ce cas (typologie 7).

Sur certains sites de forages, cette typologie a été extrapolée à d'autres plus au Sud qui s'éloignent du CSA, car malgré tout, les structures dominantes sont parallèles au CSA et recoupées par le modèle tectonique mis en évidence.

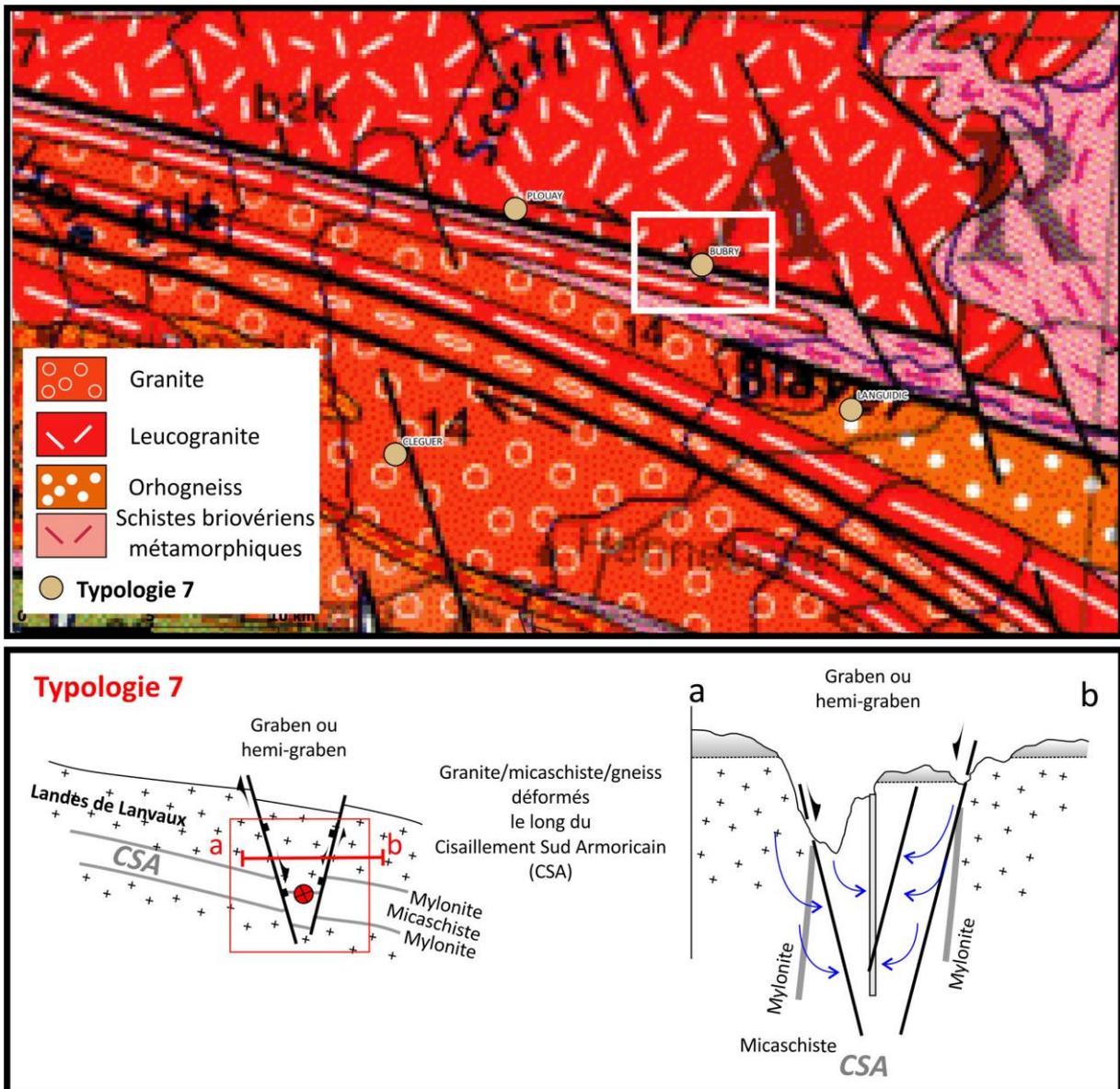


Illustration 61 : schéma en carte et en coupe de la typologie ANAFORE 7.

Typologie 8 intitulée : « Failles et fractures transtensives NS, N150° et/ou N045° au Sud du Cisaillement Sud Armoricain ou structures satellites ou réutilisant une structure ancienne », 9% des forages ANAFORE (Illustration n°62).

Cette typologie fait partie des typologies originales. Des sites de forages ont été regroupés dans cette typologie après la visite d’affleurements-clés comme deux affleurements au sud de Guidel, sur l’Estran proche du Fort Bloqué, un affleurement à Sarzeau ou encore un autre à Fouesnant.

Sur celui de Guidel, il est possible d’observer le fonctionnement des failles N150° décrochantes et dextres et celles NS qui constituent l’orientation de la contrainte principale.

Ainsi, des fentes de tension sont ouvertes suivant cette direction NS (avec une extension Est-Ouest) et sont parfois en échelon avant d’individualiser les failles N150°. Localement, des failles anciennes sont reprises pour créer des petits bassins en extension Est-Ouest comme à Sarzeau ou à Fouesnant.

Hydrogéologiquement, les débits d’exploitation les plus importants se situent sur les sites de cette typologie.

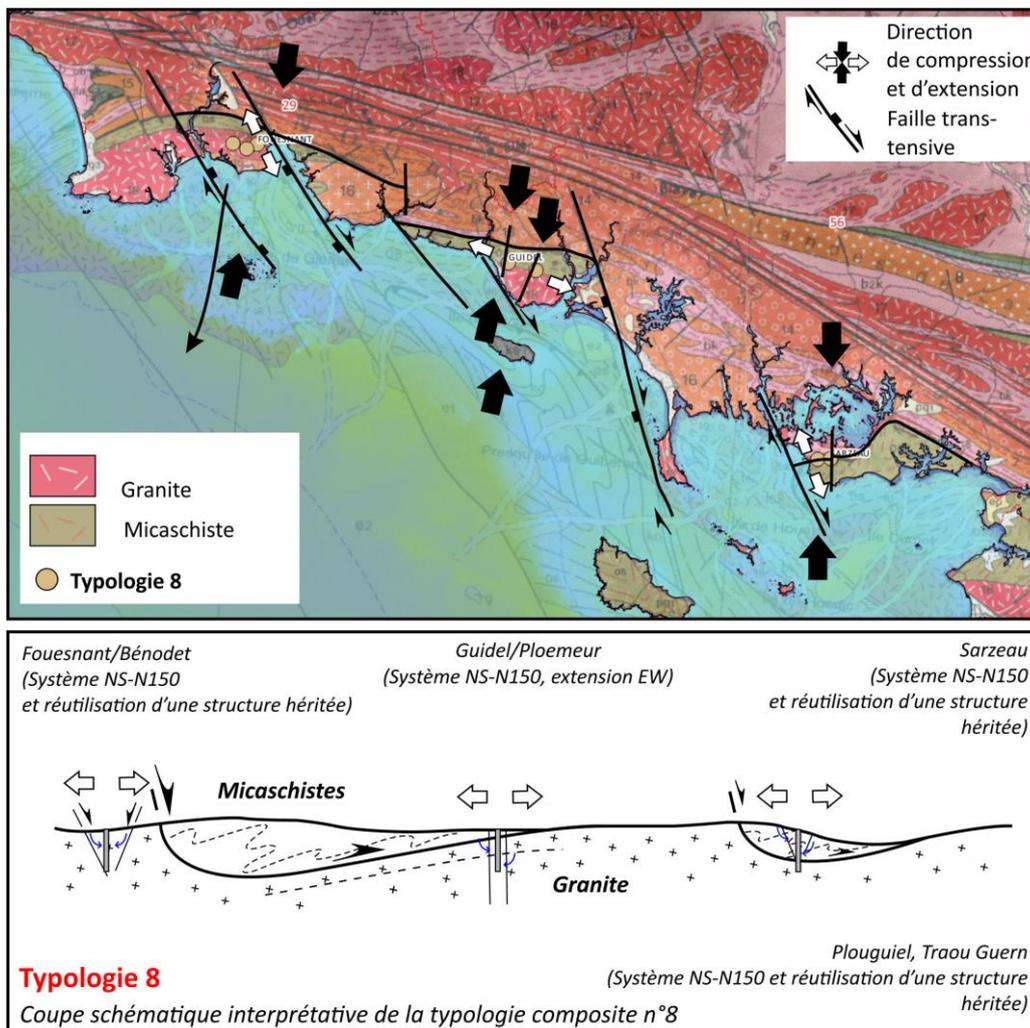


Illustration 62 : schéma en carte et en coupe de la typologie ANAFORE 8.

Typologie 9, intitulée : « Lithologies effusives (volcanites) recoupées par des failles ou fractures transtensives N150° et N045° et/ou NS », 2% des forages ANAFORE (Illustration n°63).

Cette typologie correspond à des sites déjà connus en Bretagne de forages très productifs situés dans les volcanites du Trégor.

Les visites de terrain ont montré comme pour les autres sites qu'il y avait des directions tectoniques préférentielles mais qu'elles semblaient légèrement différentes. En effet, les sites se situent à proximité de structures plutôt orientées N150° et N045°, formant un entonnoir caractéristique.

Les volcanites sont très déformées (schistes verts) ce qui laisse perplexes sur les éventuelles porosités possibles et intrinsèques des volcanites. En revanche, le site est situé dans l'auréole de métamorphisme d'un granite carbonifère très altéré et en position altimétrique supérieure aux volcanites. Cette typologie mériterait d'être réétudiée plus précisément.

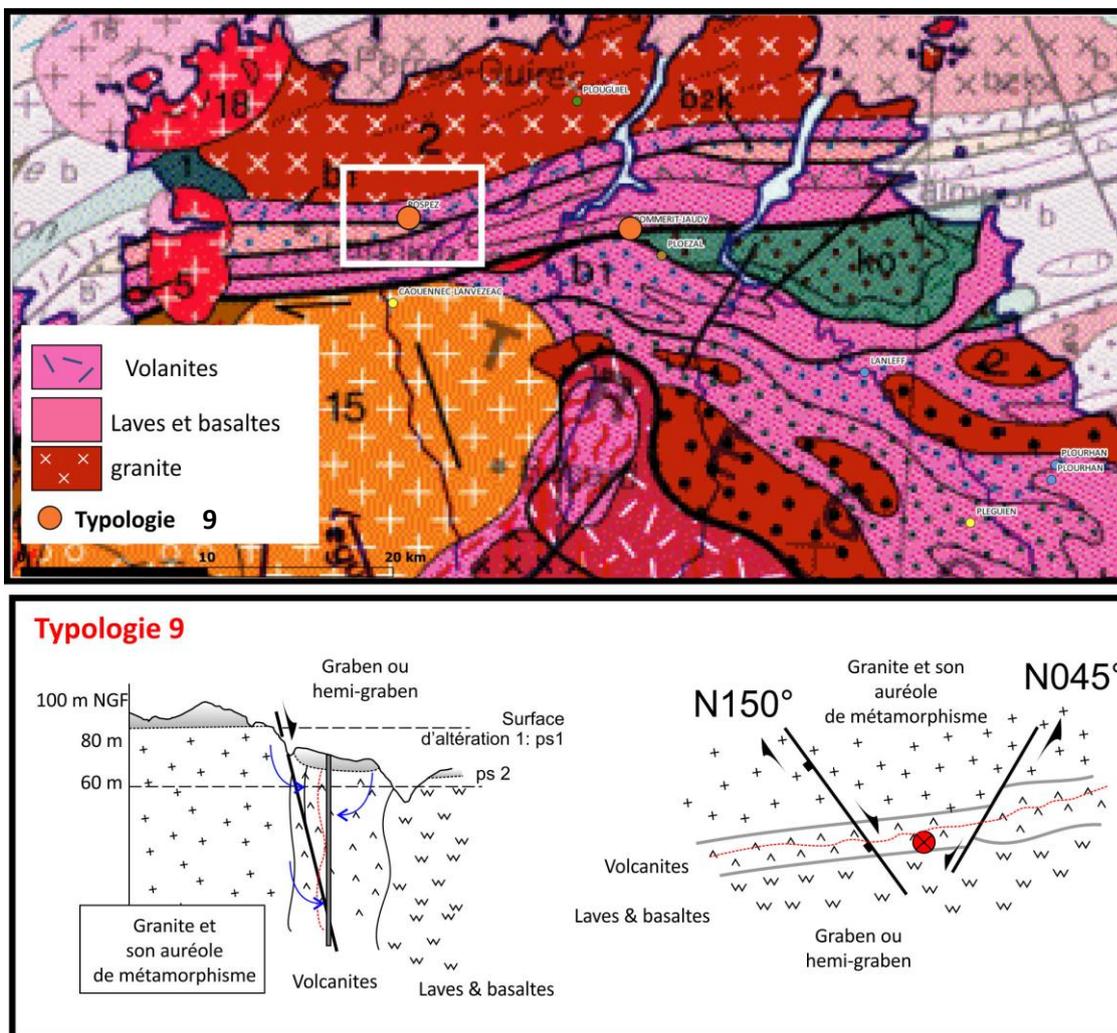


Illustration 63 : schéma en carte et en coupe de la typologie ANAFORE 9.

Typologie 10 intitulée : « Aquifère avec multi profils d'altération le long de la faille de Quessoy-Nort-sur-Erdre », 4% des forages ANAFORE (Illustration n°64).

Cette dernière typologie est aussi la typologie qui a été créée en dernier lieu. Elle est née du constat de l'existence sur 4 sites avec des forages productifs, qui s'alignaient sur la faille de Quessoy/Nort-sur-Erdre, de 4 à 5 surfaces d'altération mises en évidence par la cartographie de la base des altérites (voir le § 4.1.3.).

Ces 4 sites et cette typologie ont permis de confirmer le modèle tectonique de déformation post-hercynienne de la Bretagne, en mettant en évidence une des parties en surrection (soulignant le flambage de la Bretagne) qui s'oppose aux parties effondrées (soulignées à leur paroxysme par les bassins tertiaires). Hydrogéologiquement, cette typologie montrerait une faille majeure mais aussi l'emboîtement de plusieurs zones capacitatives (les altérites meubles) et transmissives (plusieurs horizons fracturés). Géographiquement, elle correspond à un relief important des Côtes d'Armor, les Monts Bel-Air et Carmel à 320 m NGF, d'où partent les sources de rivières importantes bretonnes : la Rance (104 km), le Guessant (49 km) et deux affluents importants du Lié.

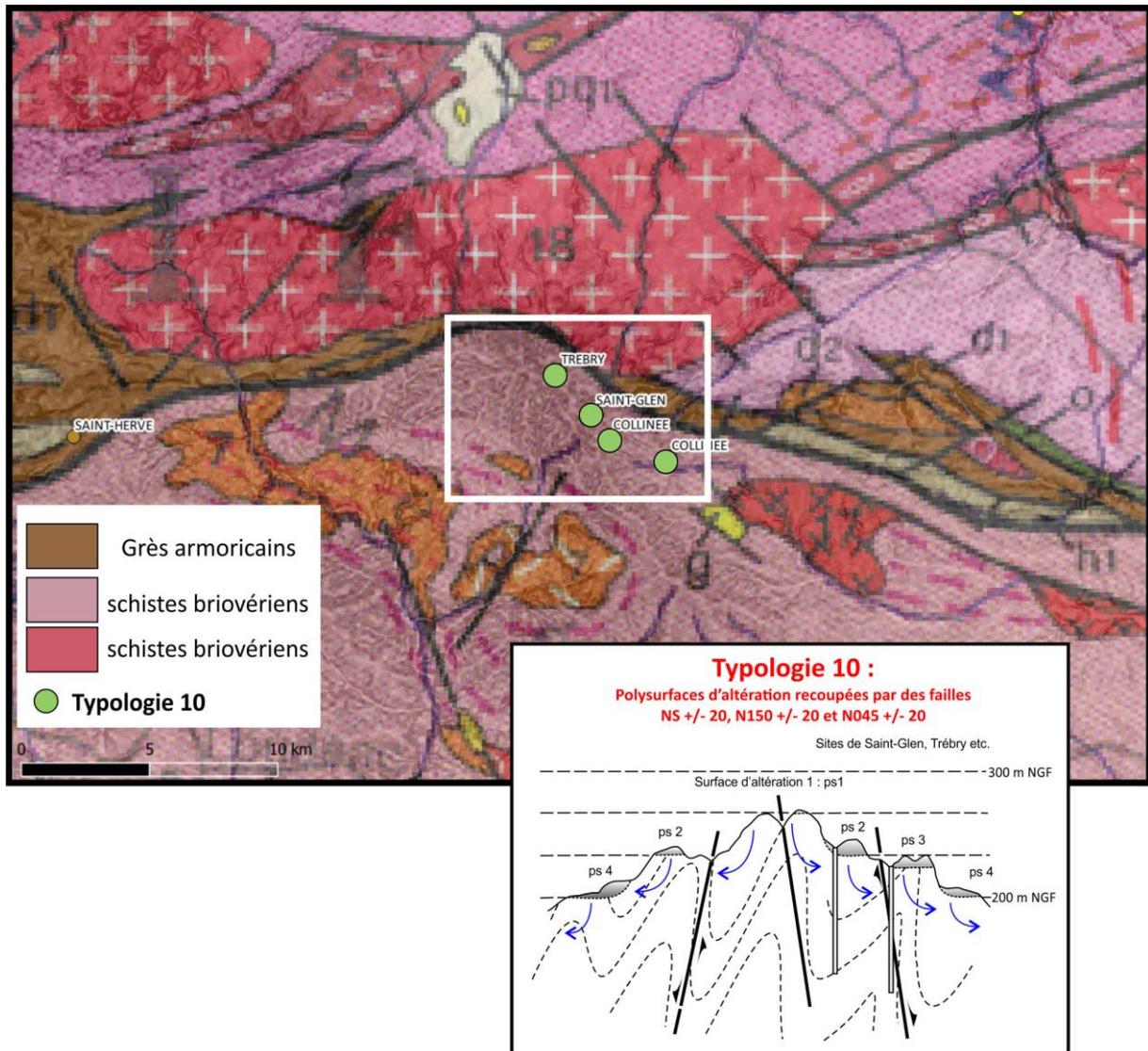


Illustration 64 : schéma en carte et en coupe de la typologie ANAFORE 10

Répartition cartographique des 10 typologies

A l'échelle de la Bretagne, les 10 typologies permettent de pouvoir comparer les sites entre eux sur l'ensemble du territoire.

On retrouve des sites en position « hydrogéologique » commune dans des contextes géologiques qui ont à la fois eu lieu lors des deux orogénies bretonnes, cadomienne et hercynienne, ou de la phase d'extension paléozoïque comme les typologies 1, 2, 3, 4, 5 et 6, et des sites qui appartiennent à un événement tectonique particulier sur un contexte géologique particulier comme c'est notamment le cas des typologies 7, 8, 9 et 10.

La carte ci-dessous montre, pour chaque site, la répartition des typologies sur le territoire de la Bretagne avec un résumé des effectifs (pastille ronde) pour chaque typologie (Illustration n°65). Un second chiffre est associé au numéro de la typologie, il correspond à la typologie secondaire à laquelle le site est apparenté en second lieu (Illustrations n°65 et 66). L'annotation « QN/E » correspond au fait que le site (avec sa typologie respective) se situe sur la faille de Quessoy/Nort-sur-Erdre. Enfin, l'illustration n°66 donne le nom de la commune, le nom du site (lieu-dit ou nom du forage) en fonction de sa typologie principale et de la typologie qui lui est apparentée en second lieu.

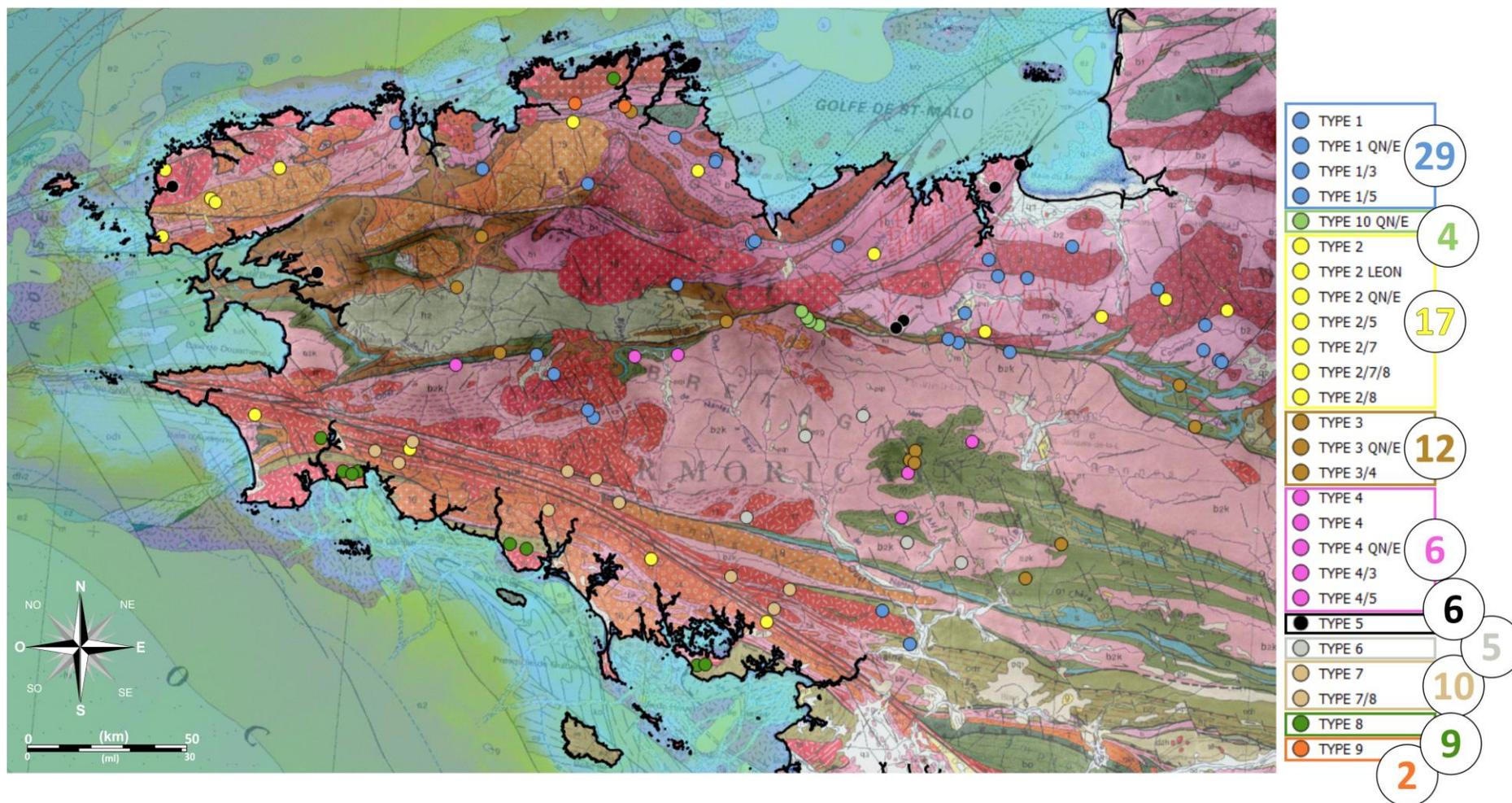


Illustration 65 : répartition géographique des typologies des 100 forages ANAFORE, avec leur effectif respectif dans les pastilles rondes.

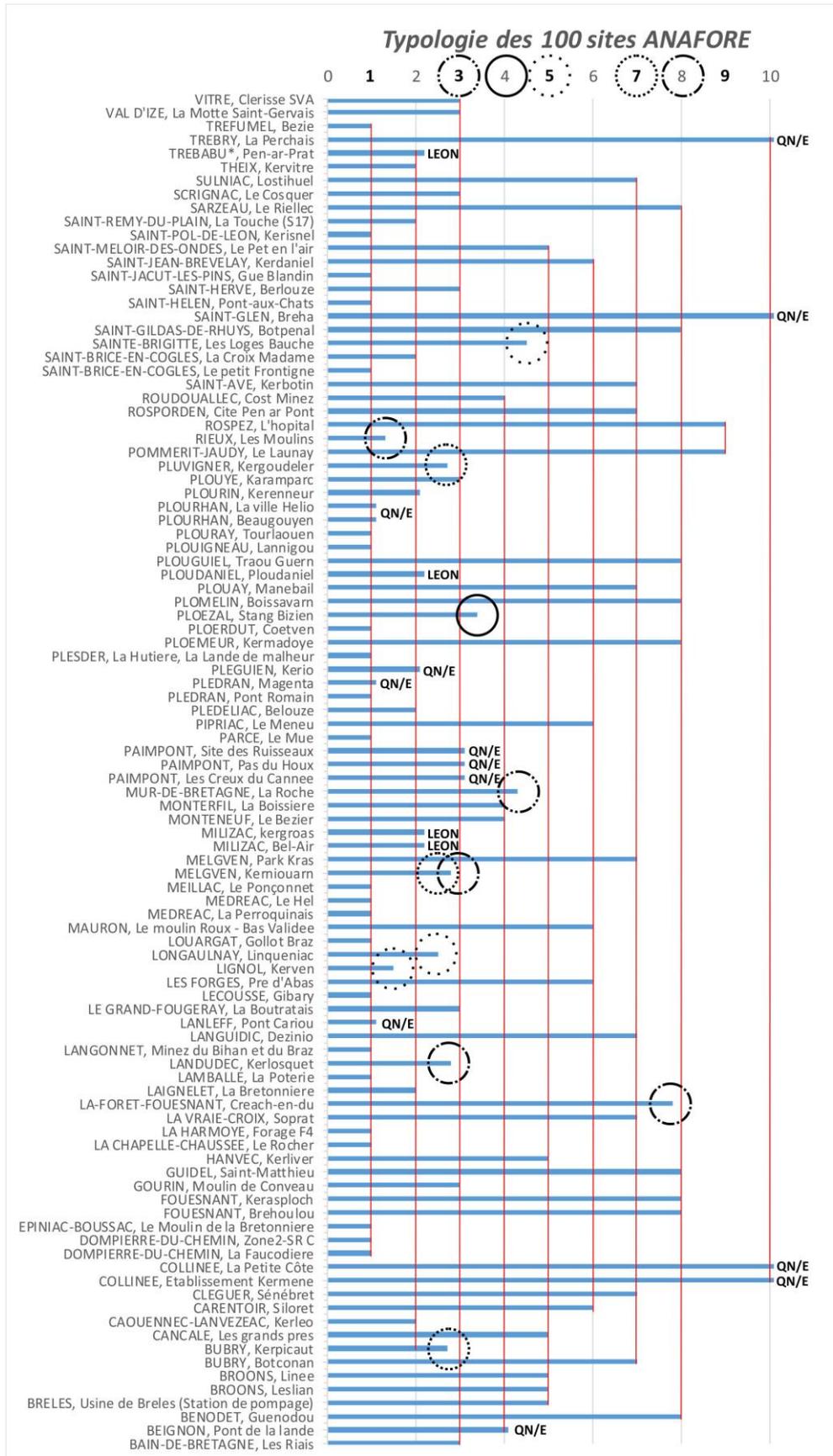


Illustration 66 : typologie par site (trait rouge) et typologie secondaire apparentée (cercle associé) (par exemple QN/E = Faille de Quessoy-Norte-sur-Erdre s'ils sont proches ou sur la faille)

4.1.6. Conclusions géologiques

Les anaphores géologiques, pour répondre à l'objectif n°1 du projet ANAFORE, c'est-à-dire la classification typologique des 100 forages, montre que :

1. les lithologies (la nature des roches) ne constituent pas à elles seules l'existence d'aquifères, et que le raisonnement doit s'orienter vers plutôt sur des contextes géologiques.
2. les failles sont omniprésentes sur les 100 sites avec des orientations dominantes et récurrentes : N150° +/- 10, NS +/- 10 et N045° +/- 10. Ces directions de failles/fractures sont les orientations préférentielles dans lesquelles il faudra rechercher l'eau souterraine et qui expliquent la présence de forages productifs dans des lithologies qui statistiquement montrent des débits instantanés moyens ou faibles. Dans certains secteurs, des failles anciennes de N070° à N090°, ont la bonne orientation pour être réactivées et participer à la création de structures perméables.
3. l'altération est elle aussi omniprésente, avec au moins un profil d'altération par site. Soit ce profil d'altération est décalé par les failles, soit il existe plusieurs profils superposés. Sur 4 sites d'ANAFORE, il existe jusqu'à environ 4 à 5 profils d'altération superposés et décalés par des failles N150° +/- 10.
4. la dualité/interaction entre les failles et l'altération semble être le paramètre important au caractère productif de chaque site, indépendamment des lithologies. Les failles décalent les profils d'altération, favorisent le développement d'un gradient hydraulique qui favorise le développement du ou des profils d'altération, et leur enracinement en profondeur, notamment le long des structures perméables.
5. ainsi l'altération crée une porosité d'altération qui vient se surimposer à une porosité de fracture liée à l'action des failles. Cette histoire pourrait avoir débuté dès la fin du Paléozoïque entre 300/250 millions d'années jusqu'après l'Eocène moyen (41 million d'années) pour l'essentiel et l'Oligocène (Le Rupélien).

Ces anaphores géologiques montrent que les 100 forages/sites analysés peuvent être classés en 10 typologies distinctes qui s'accordent avec la carte géologique et surtout à l'histoire géologique du Massif Armoricain.

L'analyse de terrain a permis de mettre en évidence ou de confirmer sept concepts d'aquifères de socle différents et nouveaux :

En confirmant un aquifère potentiellement sous le Paléozoïque de Bretagne (typologie 4) auquel sont venus s'ajouter cinq autres sites ;

Et mettant en évidence 6 autres nouveaux concepts : les typologies 3, 5, 6, 7, 8 et 10.

4.2. ANAPHORES HYDROGÉOLOGIQUES (DES SITES)

Les analyses hydrogéologiques qui ont pu être menées sur les 100 forages ANAFORE sont les suivants :

- 1 - l'analyse de la qualité des eaux au niveau des 100 forages ;
- 2 - l'identification des structures d'écoulement de l'eau souterraine (géométrie et dimensions d'écoulements) ;
- 3 - la relation entre les propriétés hydrodynamiques des ouvrages et les différentes structures géologiques (failles, fractures des cartes géologiques du BRGM au 1/500 000, 1/250 000 et 1/1 000 000, en s'appuyant sur les analyses géologiques) ;
- 4 - l'analyse à l'échelle régionale des relations entre hydrodynamisme, productivité et structures géologiques ;
- 5 - et enfin, la caractérisation de typologies hydrogéologiques représentatives.

4.2.1. La qualité des eaux souterraines des 100 forages ANAFORE

Rappel historique et des mécanismes

Les nitrates ont été depuis les années 1990 un des problèmes majeurs de la qualité des eaux en Bretagne. Fort heureusement, c'est aussi un élément simple à analyser et peu coûteux. Pour ces raisons, ils sont bien suivis à l'échelle régionale et depuis une longue période, ils sont de bons indicateurs de la qualité et de la vulnérabilité des eaux. En effet, étant majoritairement d'origine anthropique, ils peuvent servir de traceurs d'eaux récentes et renseigner sur les temps de transfert et de renouvellement des aquifères.

Peu présent avant les années 70, leur absence peut être un indicateur d'eaux anciennes ou de la présence de réactions de dénitrification. Leur présence est en revanche un indicateur d'intrants agricoles dans les eaux souterraines.

Dès la fin des années 70 des profils de concentration en nitrates sont régulièrement dressés lors des forations. Pendant la foration, les échantillons d'eau régulièrement prélevés (historiquement tous les 3 m (mètre linéaire) ce qui correspond à la longueur moyenne d'un tube du train de tige de forage) et analysés en laboratoire ou « à la trousse de terrain », permettent de dresser un profil d'évolution des concentrations des eaux en divers éléments et notamment en nitrates. Pour ce qui concernent ces derniers, l'abaissement de leurs teneurs est généralement symétrique à l'augmentation des concentrations en sulfates et en fer.

L'eau qui est prélevée en cours de foration, à une certaine profondeur, est un mélange de toutes les venues d'eau du forage. Les évolutions des concentrations constatées d'un prélèvement au suivant dépendent surtout du volume relatif de chaque venue d'eau. Par exemple, il est possible que le forage rencontre d'abord une venue d'eau de 10 m³/h à 200 mg/l de NO₃ puis une seconde de même débit mais sans nitrate. En fin de travaux, le bilan global sera une eau à 100 mg/l de NO₃.

Un phénomène naturel permet aussi une baisse de la concentration en nitrates : la dénitrification. Depuis sa mise en évidence en Bretagne sur la laiterie de Ploudaniel dans les années 80, le processus de dénitrification a été largement étudié sur l'ensemble du territoire (e.g. Pauwels et al., 1998, 2010, Ayraud et al., 2006; Tarits et al., 2006 ; Boisson, 2013 ; Roques et al., 2018).

Alors que les premiers travaux se basaient sur des indices de dénitrification tels que des concentrations élevées en fer ou sulfates, ou une baisse de concentrations en nitrates, aboutissant notamment à une première cartographie des indices de dénitrification (Talbo et

Duermael, 1995), les travaux menés par divers organismes de recherche ont permis d'améliorer les connaissances régionales sur cette réaction.

L'origine de la dénitrification est la conséquence de plusieurs éléments jouant le rôle de donneurs d'électrons ou susceptibles de l'être. Dans les aquifères de socle, les minéraux sulfurés et des minéraux contenant du fer sont principalement mentionnés. La réaction autotrophe avec la pyrite est souvent considérée comme étant la réaction principale de dénitrification dans ce milieu (Pauwels et al., 1998 ; Conan et al., 2003 ; Tarits et al., 2006). Cependant bien qu'une augmentation des concentrations en sulfates soit souvent observée, la stœchiométrie de la réaction est rarement respectée (Boisson et al., 2013 ; Pauwels et al., 1998 ; Tarits et al., 2006). De ce fait, différentes réactions complémentaires ont été proposées par l'implication du Fe^{2+} (Tarits et al., 2006), autres que la précipitation de minéraux sulfatés (Pauwels et al., 2000). Très récemment, des travaux ont mis en évidence le rôle d'autres minéraux tels que la biotite (silicate alumino-potassique ferro-magnésien), élargissant les possibilités d'occurrence de la réaction à l'échelle régionale (Boisson, 2011 ; Aquilina et al., 2018 ; Roques et al., 2018).

Si les minéraux pouvant permettre la réaction de dénitrification dans les eaux souterraines sont nombreux et très largement présents (e.g : la biotite est présente dans tous les granites et les micaschistes), ils ne réagissent pas partout pour permettre la réaction. Pour que la réaction ait lieu, les conditions suivantes sont nécessaires : absence ou faible taux d'oxygène, la présence d'accepteurs d'électrons (Nitrates), la présence de donneurs d'électrons (Pyrite, biotite ou autres), la présence de communautés bactériennes servant de catalyseur à la réaction.

Chimie des forages ANAFORE

Afin de renseigner sur la qualité des eaux à partir de données historiques faiblement documentées, nous avons dressé dans ce rapport des cartes de concentrations en nitrates, fer et manganèse à partir des différents ouvrages disponibles. Les concentrations à l'échelle régionales étant généralement actuellement à la baisse, des différences importantes peuvent exister entre les concentrations observées lors des analyses à la foration et les données actuelles.

Des analyses de **nitrates sont disponibles sur 81 des 100 sites** étudiés. Il s'agit d'analyses ponctuelles disponibles dans les rapports produits au moment de la foration ou en fin d'essai de pompage et de chroniques disponibles sur le site **ADES** pour **36 forages** étudiés (notamment pour les forages à usage **AEP**). Ces chroniques ont été extraites et sont disponibles en annexe.

La majorité des forages étudiés présente des teneurs en nitrates inférieures à 25 mg/L (Illustration 67) : 13 forages ont des teneurs en nitrates supérieures à 25 mg/L et seul le forage étudié sur le site de Saint-Jean-Brévelay – Kerdaniel présente des teneurs en nitrates **dépassant la norme de qualité de 50 mg/L** (une seule analyse disponible). Pour 6 de ces forages avec des teneurs en nitrates supérieures à 25 mg/L, il s'agit d'analyses ponctuelles réalisées en fin de foration ou d'essai de pompage et aucune analyse plus récente n'a été retrouvée (Bubry Kerpicaud, Lanleff, Louargat, Plourhan Beaugouyen, Pommerit-Jaudy et Saint-Jean-Brévelay). Pour les 7 autres forages, des chroniques sont disponibles dans ADES (cf. annexe) : les teneurs en nitrates sont stables ou en baisse.

De nombreux sites présentent des teneurs en fer (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.** en haut à gauche) et en manganèse (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.** en haut à droite) élevées, ce qui est fréquent pour les aquifères de socle (limites et références de qualité fixées par l'arrêté du 11 janvier 2007 à 0,05 mg/L pour le manganèse et à 0,2 mg/L pour le fer). Les

chroniques d'évolution des teneurs en fer disponibles dans ADES ont été extraites et sont présentées en annexe.

Tous les sites ANAFORE présentent des teneurs en chlorures (Illustration 68 en bas à gauche) et en sulfates (Illustration 68 en bas à droite) inférieures aux limites et références de qualité fixées par l'arrêté du 11 janvier 2007 (250 mg/L pour les chlorures et les sulfates).

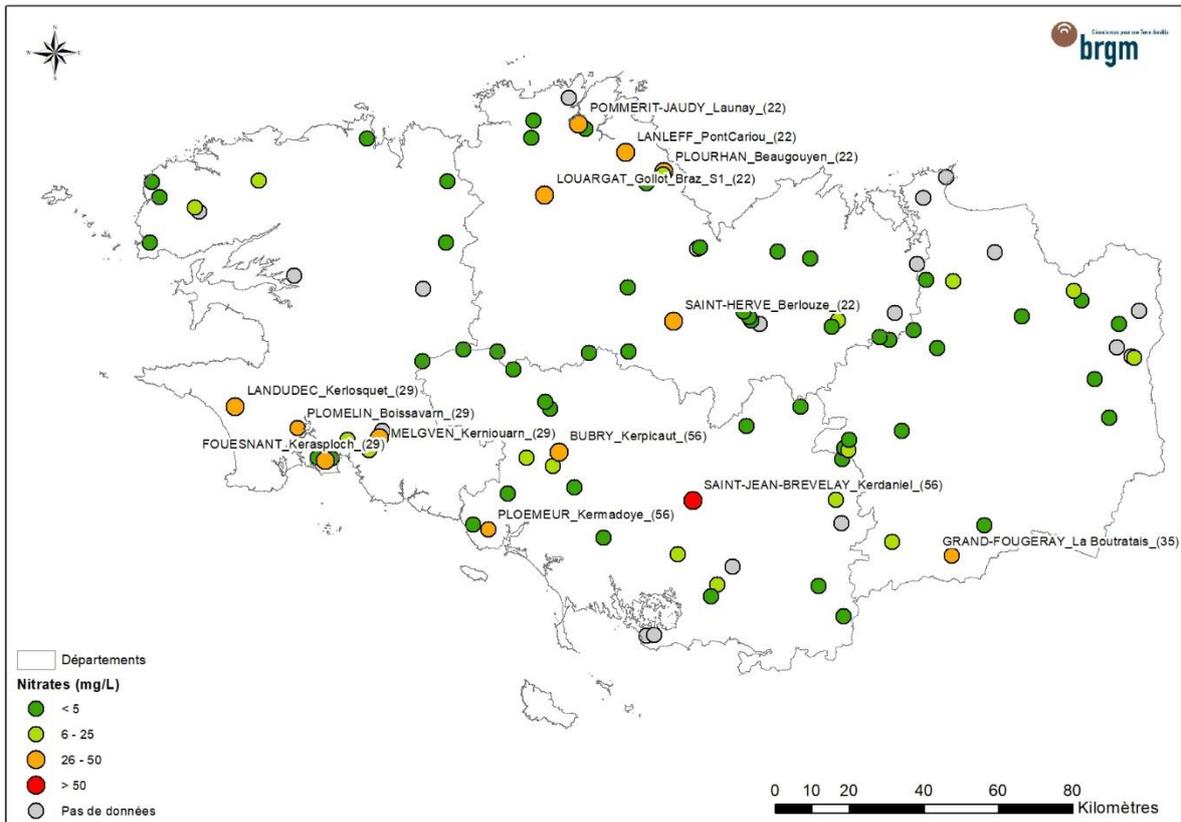


Illustration 67 : concentrations en nitrate sur les sites ANAFORE (voir date de l'analyse sur les fiches descriptives des sites) – Seuls les sites avec des teneurs supérieures à 25 mg/L sont légendés : COMMUNE_Site_(département)

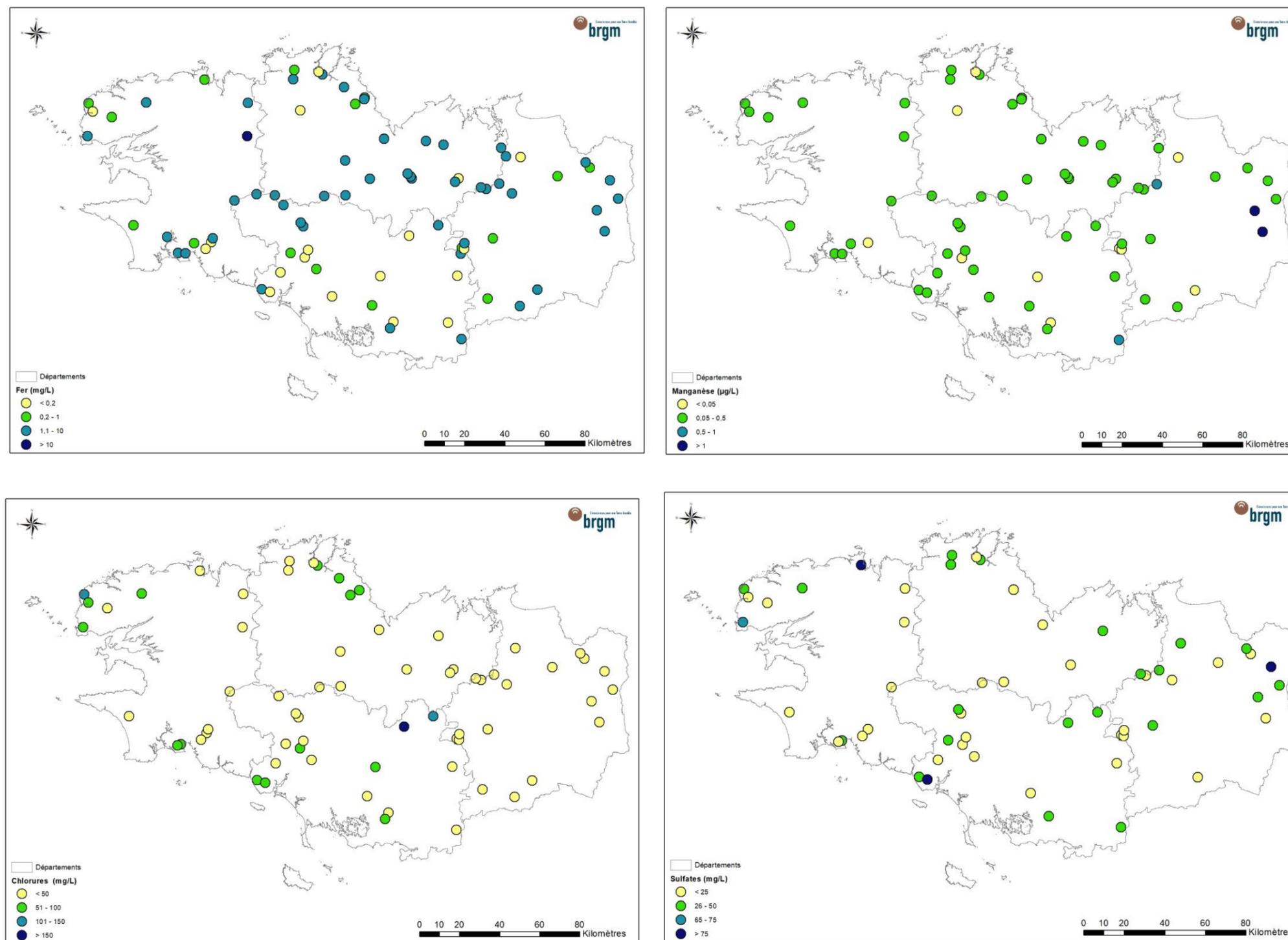


Illustration 68 : en haut à gauche, concentrations en fer sur les sites ANAFORE (voir date de l'analyse sur les fiches descriptives des sites) ; en haut à droite, concentrations en manganèse sur les sites ANAFORE (voir date de l'analyse sur les fiches descriptives des sites) ; en bas à gauche, concentrations en chlorure sur les sites ANAFORE (voir date de l'analyse sur les fiches descriptives des sites) ; en bas à droite, concentrations en sulfate sur les sites Anafore (voir date de l'analyse sur les fiches descriptives des sites)

4.2.2. Méthodologie

La méthodologie utilisée pour la réalisation de cette étude est décomposée en trois volets principaux :

- La réinterprétation d'essais de pompage ;
- La mise en relation avec la géologie locale et régionale ;
- Et la définition de typologies représentatives

Réinterprétation d'essais de pompage

Les essais de pompages réalisés sur les différents forages étudiés dans le cadre du projet ANAFORE ont tous été préalablement interprétés par les bureaux d'études ayant réalisé les essais. Ils ont, dans une majorité des cas, permis de déterminer les paramètres hydrodynamiques classiques que sont la transmissivité (capacité du milieu à conduire les écoulements - en m^2/s) et l'emmagasinement (capacité du milieu à stocker les fluides – sans unité) ainsi que dans certains cas d'identifier des limites étanches ou de réalimentation (ex : rivière). A quelques rares exceptions près, les interprétations de ces essais de pompage ont été réalisées par la méthode de Theis (Theis, 1935), ainsi que par sa simplification, la méthode de Cooper-Jacob (Cooper et Jacob, 1946), qui sont les méthodes les plus couramment appliquées, mais pas forcément adaptées à ce type de milieu.

Ces interprétations, bien que donnant des informations importantes sur le milieu et les possibilités d'exploitation, rencontrent certaines limitations notamment lors d'applications dans les milieux fracturés hétérogènes. En effet, ces méthodes d'interprétation sont basées sur les hypothèses d'un milieu homogène et d'un écoulement radial auxquels peuvent être ajoutées des limites étanches ou de réalimentation.

Les aquifères de socle étant connus pour leur hétérogénéité, ces hypothèses sont rarement rencontrées sur l'intégralité des essais de pompage. De plus, la structure de l'écoulement étant une des hypothèses du modèle (écoulement radial), ce type de modélisation ne peut pas fournir d'informations sur la structure réelle de l'écoulement et donc ne permet pas de définir un modèle conceptuel réaliste et donc généralisable. Une dernière contrainte d'ordre technique pour l'interprétation des essais de pompage est la stabilité du débit de pompage. Bien que tout soit fait pour maintenir un débit constant lors de ces essais, dans la pratique il s'avère difficile de maintenir ce débit constant en raison d'arrêts imprévus des pompes et de la baisse de productivité du milieu. Ces variations de débits affectant la continuité de l'essai peuvent le rendre complexe voir ininterprétable, sauf si les chroniques d'évolution du débit en cours d'essai sont également disponibles ce qui permet de reconstituer un essai à débit constant. Malheureusement cette information complémentaire n'est pas toujours disponible.

Dans le contexte du projet ANAFORE, l'objectif principal n'est pas d'obtenir les paramètres hydrodynamiques des aquifères mais plutôt de définir la structure de la formation aquifère des forages productifs pour permettre une généralisation et une définition typologique. Pour cet objectif, les essais de pompage disponibles ont été réinterprétés par des méthodes plus récentes de diagnostic de pompage et de modélisation.

Les diagnostics sont réalisés après déconvolution du signal (méthode inverse de reconstruction d'une réponse équivalente à débit constant et unitaire), en se basant sur les rabattements (variations de niveau d'eau pendant le pompage), les variations de débit ainsi que leurs dérivées logarithmiques (illustration n°69). Les évolutions récentes des interprétations de pompage sont présentées dans Gringarten (2008), Renard *et al.* (2009), Gutierrez et Dewandel (2013), Ferroud *et al.* (2019) (Illustration n°70). Les détails

sur les méthodes d'interprétation par diagnostic de pompages sont discutés dans Bourdet *et al.*, 1983 et Renard *et al.*, 2009.

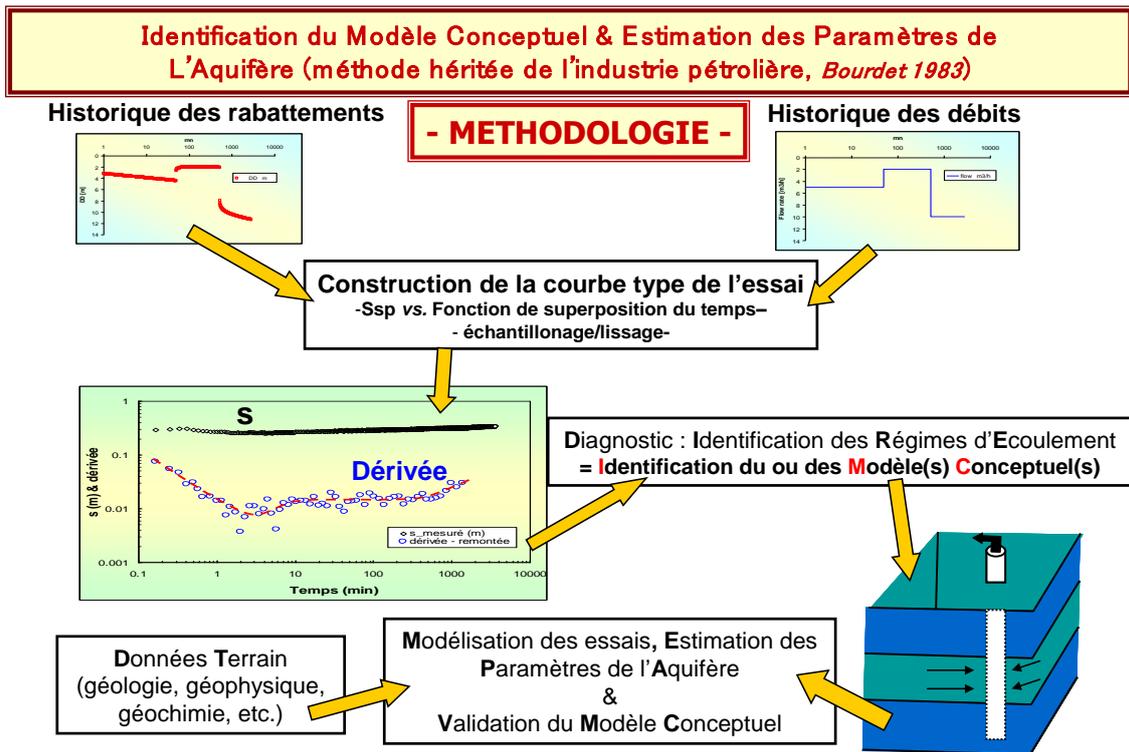


Illustration 69 : Méthodologie mise en œuvre pour l'interprétation de pompages d'essai. Utilisation des dérivées des rabattements pour diagnostiquer les essais (Gutierrez et Dewandel, 2013).

Le diagnostic repose sur l'interprétation des pentes de la courbe de dérivée logarithmique des rabattements s en fonction sur 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, 1989 ; Spane and Wurstner, 1993 ; etc.). 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 à une succession de certains régimes d'écoulement qu'il est en général possible d'identifier sur la courbe de dérivée (Deruyck *et al.*, 1992, Schlumberger, 2002 ; Renard *et al.*, 2009). Par exemple, un écoulement radial sera caractérisé par une dérivée formant un plateau (pente nulle) ; l'atteinte de deux limites étanches parallèles par une pente de $\frac{1}{2}$; 4 limites étanches orthogonales (ou un autre type de réservoir fermé) par une pente de 1 ; un captage partiel de l'aquifère par une pente de $-\frac{1}{2}$; un effet de drainance par une pente négative infinie, etc. **L'illustration n°70 présente à titre d'exemples les différents types d'écoulement que l'on observe lors d'un pompage dans un aquifère rectangulaire où, tour à tour, les limites étanches (orthogonales entre elles) sont perçues par l'essai. L'effet capacitif du puits est aussi pris en compte. Une synthèse des régimes d'écoulements et leur dimension d'écoulement associées sont présentés sur l'illustration 71.**

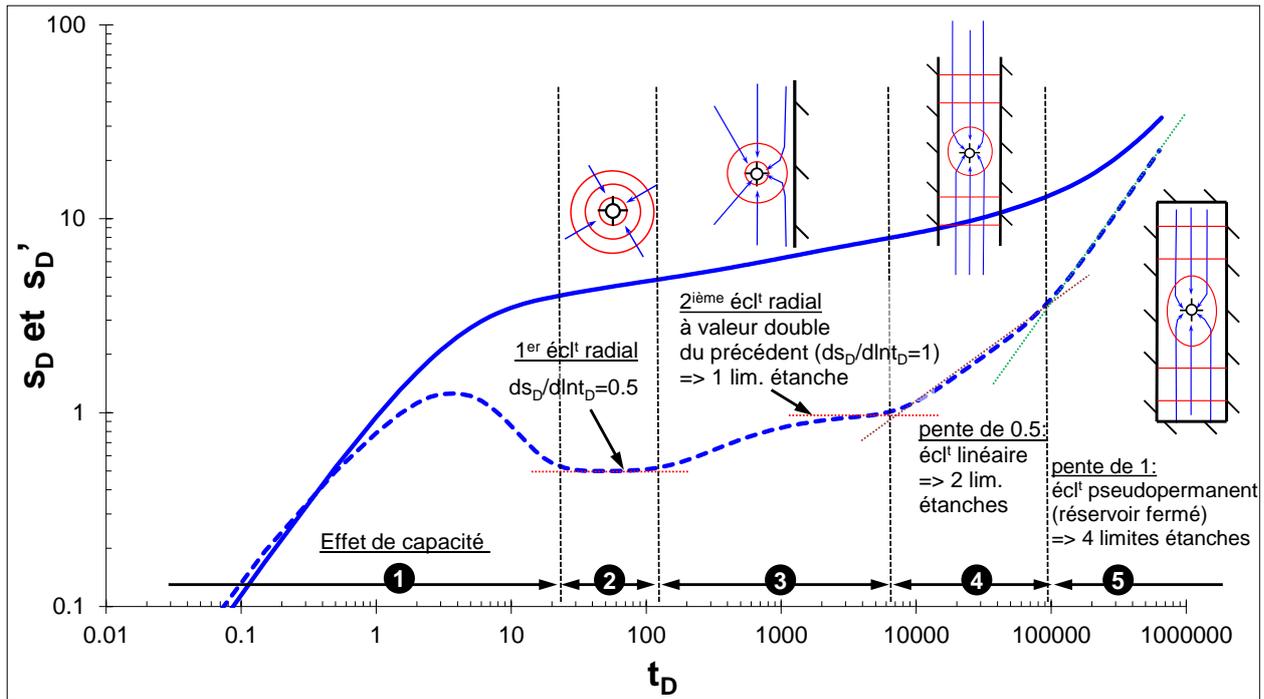


Illustration 70 : exemple de succession des régimes d'écoulement lors d'un pompage dans un aquifère rectangulaire clos. t_D : temps adimensionnel, S_D (courbe pleine) et S_D' (courbe tiretée) : rabattement et dérivée du rabattement (adimensionnel).

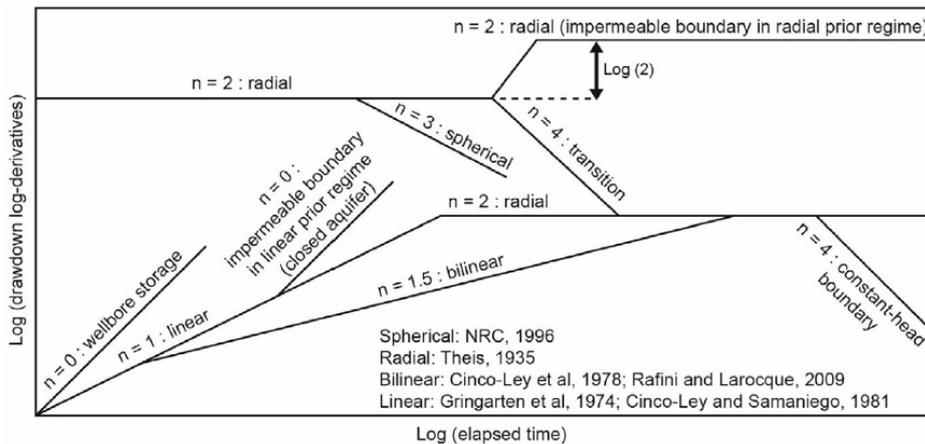


Illustration 71 : synthèse des régimes d'écoulements et leur dimension d'écoulement associée (Ferroud et al., 2019 modifié de Ehlig-Economides et al., 1994)

Le calcul de la dérivée du rabattement nécessite souvent un traitement par lissage afin d'augmenter le rapport signal sur bruit, le bruit étant engendré par des micro-variations du débit et/ou par la sensibilité de l'outil de mesure des niveaux d'eau (sonde manuelle, sonde automatique). Ce traitement n'altère en rien la qualité des données originelles. De plus, lorsque le débit varie de façon significative durant l'essai, il est nécessaire de prendre en compte ces variations dans le calcul. Le calcul de la dérivée sera donc réalisé à partir des rabattements spécifiques (normalisation par rapport aux variations de débit) et du temps de superposition (fonction aussi des variations de débit) ; on obtient ainsi une courbe type de l'essai –c'est-à-dire pour un débit unitaire– qui est dérivée et interprétée suivant la méthode précédemment décrite.

Une fois la courbe des dérivées construite, le diagnostic consiste à identifier les différents régimes d'écoulement et à en déduire les propriétés du forage (effet de capacité⁵, effet de skin⁶, ...), de l'aquifère (isotrope, anisotrope, fracture verticale, double porosité, etc.), de sa géométrie (effets de limites), des éventuelles relations entre l'aquifère capté et d'autres aquifères (effet de drainance par exemple). Enfin, une fois le diagnostic posé, l'estimation des paramètres de l'aquifère est réalisée à partir du modèle mathématique le plus approprié (solutions analytiques dont le choix est basé sur le diagnostic précédemment réalisé). Puis, le modèle conceptuel de l'aquifère est validé en jugeant de la pertinence de la modélisation et des informations géologiques disponibles sur la formation testée.

A partir de la courbe des dérivées, il est déjà possible d'estimer les paramètres hydrodynamiques, en particulier la transmissivité et la perméabilité de la formation captée, lorsqu'un écoulement radial cylindrique est identifié.

Mise en relation avec la géologie

Pour chacun des sites une mise en relation des diagnostics des essais de pompage avec les rapports des bureaux d'étude et les relevés géologiques de terrain menés dans le cadre du projet ANAFORE a été réalisée. Cette mise en relation a été effectuée sur les éléments suivants : présence de failles, orientation dominante, orientation de la faille la plus proche, position du profil d'altération, identification des limites (faille, rivières). L'ensemble des résultats a été synthétisé sur les fiches de sites et permet la réalisation d'un diagnostic hydrogéologique.

Définition de typologies

Suite à l'identification des différents régimes d'écoulement grâce à la réinterprétation des essais de pompage, des similitudes de comportement (successions de régimes d'écoulement identiques au cours du temps) sont apparues au niveau de certains forages. Elles ont permis de définir des typologies hydrogéologiques permettant de classer les forages selon leur comportement.

4.2.3. Résultats

Synthèse des essais de pompages analysés

Sur les 100 sites retenus pour le projet, 70 avaient des données d'essais de pompage de qualité suffisante pour la réalisation de diagnostics et d'interprétations.

Malgré les efforts pour obtenir des informations sur les sites les plus productifs, la sélection finale montre une grande hétérogénéité entre les ouvrages et essais de pompage (durées et débits). Les temps et débits de chaque essai sont synthétisés sur la figure suivante (Illustration 72).

⁵ Un effet de capacité (ou effet de puits) se manifeste lorsque le puits de pompage n'est pas de diamètre négligeable. Dans ces conditions, une partie de l'eau pompée provient du déstockage de l'eau emmagasinée dans le puits, sans transiter par le terrain. Dans un premier temps, le rabattement mesuré s'en trouve réduit par rapport à ce qui serait observé sans effet de capacité.

⁶ Un effet de skin (ou effet pariétal) correspond à des pertes de charges singulières en paroi de forage, en cas de colmatage par le « cake » résiduel laissé par la boue de foration, ou, au contraire, à une perméabilité accrue induite par la fissuration du milieu, naturelle ou résultant de la décompression des terrains par le forage ou de son développement.

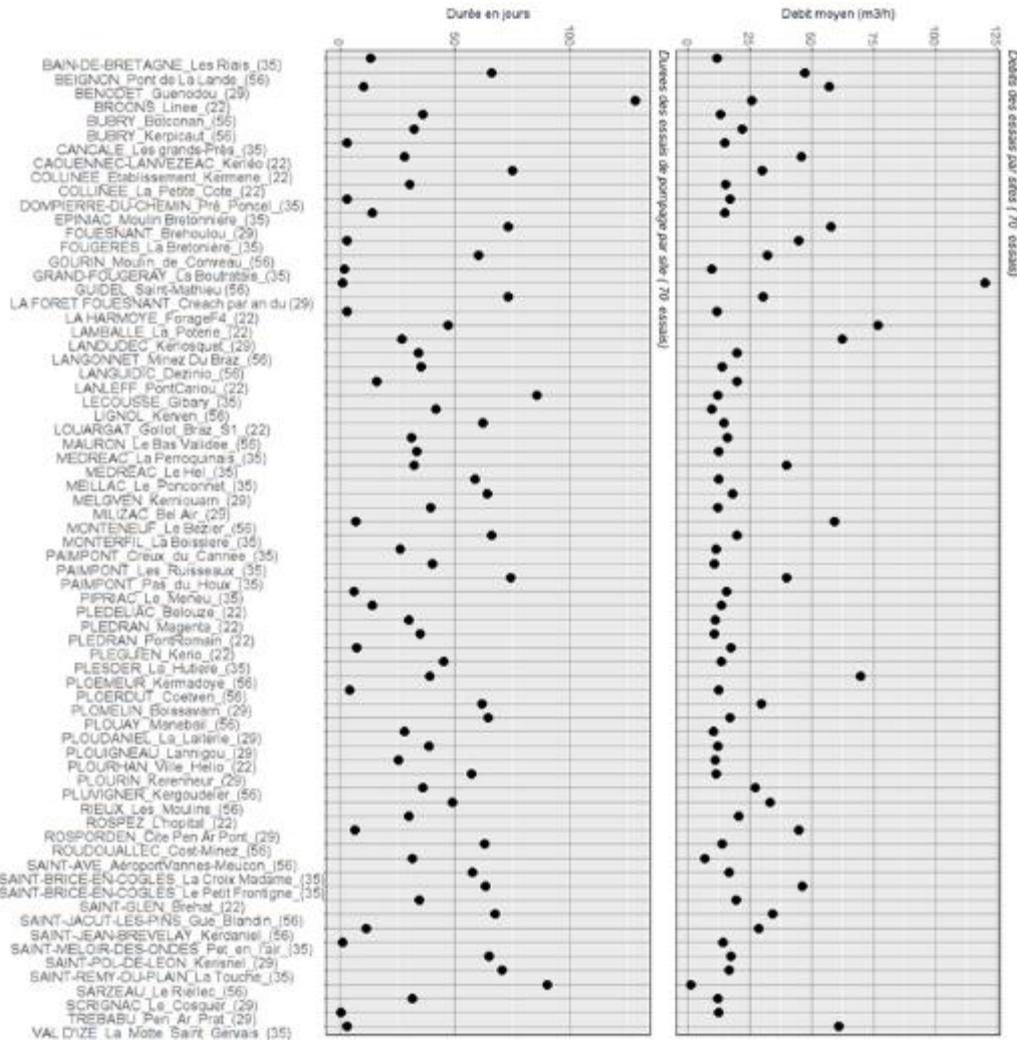


Illustration 72 : durées et débits moyens des essais analysés

Les durées des essais varient de quelques heures à plus de 4 mois. Sur la population analysée, 3 essais avaient des durées inférieures à 2 jours, 12 sont compris entre 2 jours et une semaine, 13 entre une semaine et un mois, 26 entre 1 et 2 mois et enfin 17 ont une durée supérieure à deux mois. L’essai de plus long a été suivi pendant 128 jours (Site de Broons à 26 m³/h).

Concernant les débits, 30 essais ont été réalisés à moins de 15 m³/h, 16 entre 15 m³/h et 25 m³/h, 16 entre 25 m³/h et 50 m³/h. Huit sites ont été testés à plus de 50 m³/h dont un à 120 m³/h (GUIDEL_Saint-Mathieu).

Typologies hydrogéologiques rencontrées – Définition

Les diagnostics réalisés sur les essais de pompage ont permis de définir six typologies hydrogéologiques majeures. Ces typologies sont schématisées sur les illustrations suivantes avec un exemple de diagnostic représentatif.

Les essais de pompages montrent pour une majorité d’entre eux une évolution des régimes d’écoulements au cours du temps. Afin de prendre en compte cette évolution, les typologies ont été définies en fonction de l’évolution au cours du temps des écoulements.

Aux temps courts (c'est à dire quelques minutes de pompage), les éventuels effets de puits n'ont pas été pris en compte, compte tenu de l'objectif de la réinterprétation des essais, axé sur l'identification des différents régimes d'écoulement au niveau de l'aquifère.

Passés les premières minutes de l'essai, 3 types d'écoulements sont d'abord observés :

- soit un écoulement radial (Illustration 73), noté R dans la suite du rapport ;
- soit un écoulement linéaire (fracture ou faille) (Illustration 74), noté F dans la suite du rapport,
- soit une drainance (Illustration 75), noté D dans la suite du rapport.

Un deuxième régime d'écoulement (du même type que ceux précédemment décrits) peut ensuite intervenir au cours de l'essai, d'où les typologies combinant plusieurs types d'écoulement successifs.

Enfin, différents types de limites (2 ou 4 limites étanches, limites d'alimentation) peuvent éventuellement être visibles en fin d'essai de pompage, dans la mesure où l'essai a été assez long pour que ces limites soient atteintes et que leur effet ait pu se surimposer aux écoulements décrits ci-dessous.

Dans cette étude, les écoulements shériques au temps longs (pente de -0.5) ont été assimilés à des phénomènes de drainance dans une majorité des cas. Cette simplification a été effectuée en comparant les écoulements aux informations géologiques locales et à des modélisations spécifiques présentées dans les fiches de sites.

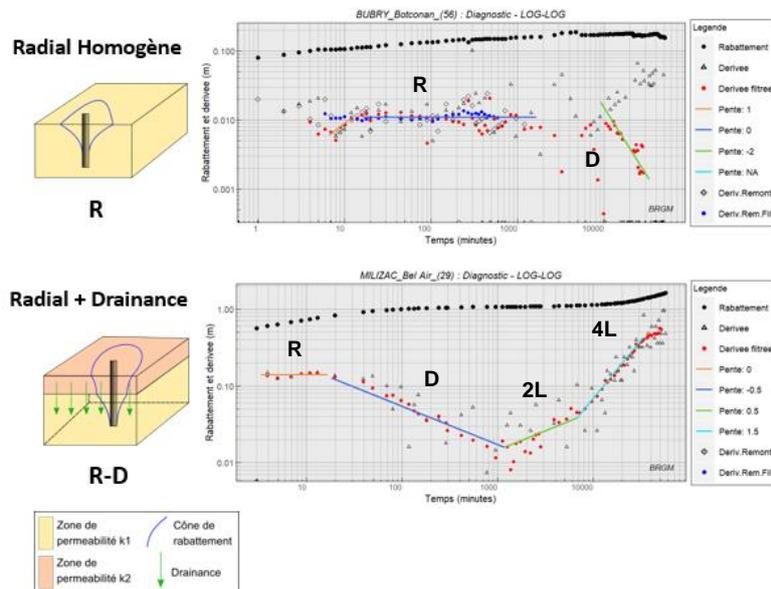


Illustration 73 : typologies hydrogéologiques correspondant à un écoulement radial – à gauche schémas représentant la géométrie de l'aquifère ; à droite diagnostic hydrogéologique représentatif de la typologie

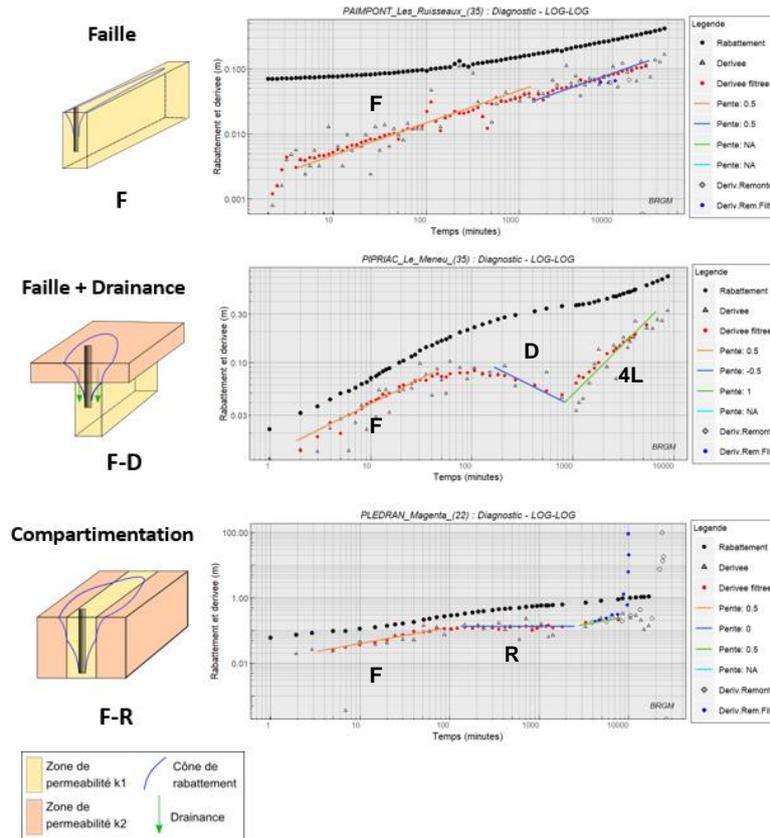


Illustration 74 : Typologies hydrogéologiques correspondant à un écoulement linéaire – à gauche schéma représentant la géométrie de l'aquifère ; à droite diagnostic hydrogéologique représentatif de la typologie)

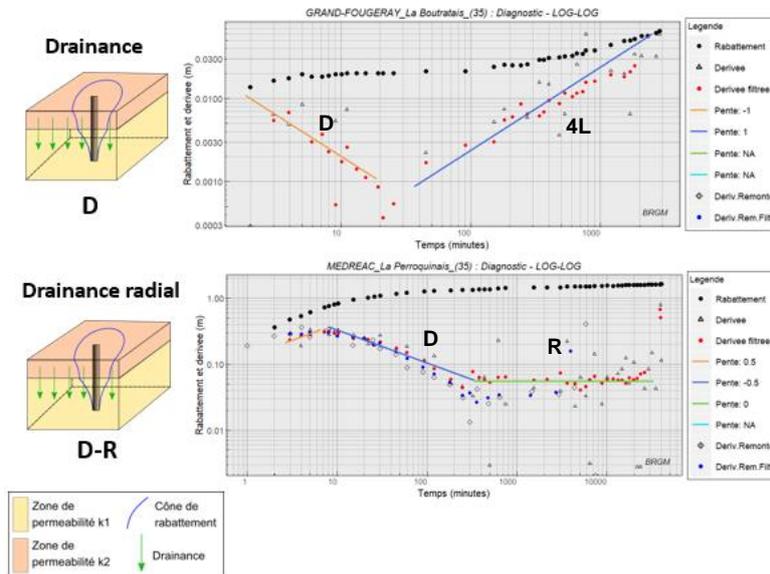


Illustration 75 : Typologies hydrogéologiques correspondant à un écoulement par drainance – à gauche, schéma représentant la géométrie de l'aquifère ; à droite, diagnostic hydrogéologique représentatif de la typologie)

Exemple d'analyse à l'échelle du site

Un exemple d'analyse d'essai de pompage est présenté en Illustration 76 avec l'interprétation géologique en Illustration 77 sur le forage SR3 de 50 m de profondeur et dont l'arrivée d'eau

principale est située à 35 m, sur le site de Pipriac - Le Meneu. L'essai de pompage a été conduit à 15,5 m³/h sur une période de 6 jours.

Le diagnostic réalisé sur le pompage du forage SR3 dans le cadre du projet ANAFORE montre dans un premier temps la sollicitation d'une faille avec une pente de 0.5 durant les 40 premières minutes de l'essai puis une stabilisation temporaire avec une dérivée de pente nulle ou plateau. Cet écoulement pseudo-radial ne semble être qu'une phase de transition, la dérivée suivant par la suite une pente de -0.5 (écoulement sphérique) synonyme d'un captage partiel de la fracture dans l'aquifères ou un phénomène de drainance entre 200 minutes et 800 minutes. La transmissivité estimée lors de ce plateau transitoire est de $2.76.10^{-4}$ m²/s ce qui correspond à l'estimation réalisée à l'époque de l'essai par le bureau d'étude. Cependant, si la fracture ne capte que partiellement l'aquifère, la transmissivité peut être plus importante. Après 800 minutes, la dérivée suit une pente de 1 ce qui indique la présence de 4 limites étanches.

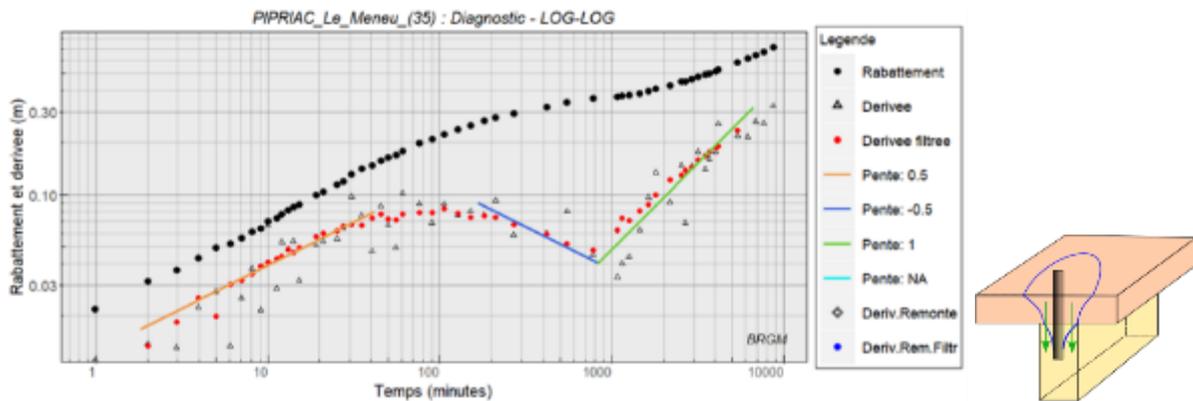


Illustration 76 : a) Diagnostic hydrogéologique réalisé sur le site de Pipriac-Le Meneu dans le cadre du projet Anafore ; b) géométrie schématique du système

La mise en relation avec les interprétations géologiques réalisées dans le cadre du projet (Illustration 77) permet de définir le fonctionnement du captage.

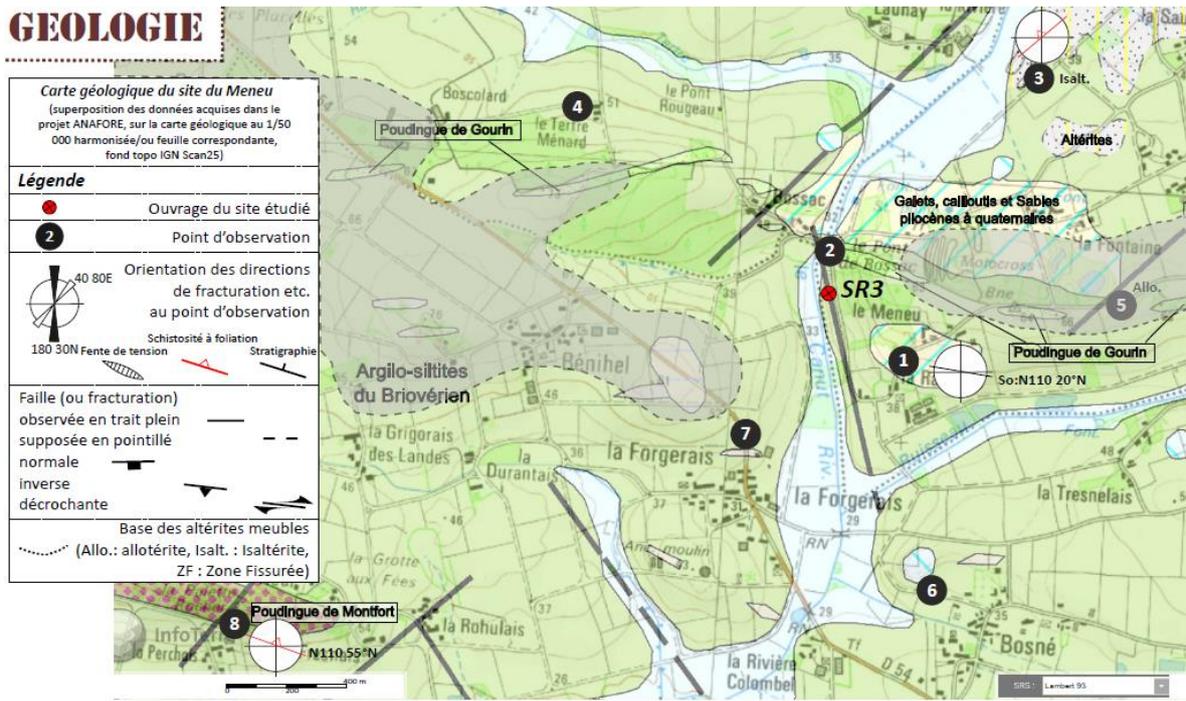


Illustration 77 : Analyse géologique réalisée sur le site de Pipriac-Le Meneu dans le cadre du projet ANAFORE

Les relevés effectués sur le site et la position de l'ouvrage indiquent que celui-ci est implanté au-dessus d'une faille d'orientation NS/N160 qui correspondrait à la première phase d'écoulement mise en évidence lors de l'essai. La présence des alluvions sus-jacents pourrait induire la drainance observée et les failles probables d'orientation N45 pourraient constituer les 2 limites étanches visibles en fin d'essai.

Ces éléments permettent de définir une structure de type faille drainant un aquifère sus-jacent illustrée par la géométrie présentée Illustration 76b.

Typologies hydrogéologiques rencontrées – Quantification

Le nombre de sites de chaque typologie hydrogéologique est comptabilisé dans l'illustration 78. Sur les 100 sites du projet, 30 ne possédaient pas de données d'essais de pompage et/ou celles-ci n'étaient pas interprétables en raison de leur qualité ou des informations disponibles. Sur les 70 sites analysés, la typologie la plus représentée est F-D (Faille puis drainance) avec 21 sites soit 30% des données analysées. Avec 12 sites la typologie F-R (faille puis comportement radial) est la seconde représentée. Les typologies F, R et R-D sont présentes sur 10 sites chacune. Les typologies D et D-R concernent un nombre de sites plus faible, respectivement 4 et 3 sites.

Sites	Nombre	% des sites analysés
F	10	14.3
F-D	21	30.0
F-R	12	17.1
R	10	14.3
R-D	10	14.3
D	4	5.7
D-R	3	4.3
N.A	30	
Total	100	

Illustration 78: Nombre de sites par typologie (N.A = données indisponibles) – Les pourcentages sont calculés sur les 70 sites réinterprétés.

Les types d'écoulements étant variables au cours du temps, une majorité des essais présente différents écoulements pouvant par exemple passer d'un écoulement linéaire (type faille) à de la drainance ou un écoulement radial. Le nombre de sites présentant chacun des types d'écoulement a aussi été comptabilisé. Ainsi tous les sites présentant des écoulements linéaires aux temps courts ou intermédiaires ont été notés Fxx, ceux présentant de la drainance Dxx et ceux présentant un écoulement radial Rxx. Cette quantification est présentée dans l'illustration 79. Plus de 60% des sites présentent un écoulement linéaire Fxx et 54 % de la drainance. 50% ont un écoulement radial.

Sites	Nombre	% des sites analysés
Fxx	43	61.4
Dxx	38	54.3
Rxx	35	50.0

Illustration 79 : Nombre de sites par type d'écoulement

De ces quantifications, il n'apparaît pas clairement de typologie nettement plus représentative que les autres. Cependant, tel qu'exposé précédemment, en raison des contraintes de sélection des sites, les débits des ouvrages interprétés peuvent être variables. Les débits moyens et médians par typologie (Illustration 80) indiquent que les débits des typologies comportant des failles (F, F-D, F-R) ou Fxx sont significativement plus importants que ceux des autres typologies avec des moyennes et médianes de 36 et 30 m³/h contre 25,5 et 16 m³/h pour les typologies présentant de la drainance et 27,1 et 19,9 m³/h pour les typologies radiales.

Débits critique des ouvrages (m3/h)		
Type	Moyenne	Mediane
F	43.1	28.5
F-R	36.7	29.4
F-D	32.2	35.0
R	19.4	16.3
R-D	22.7	13.9
D	23.9	13.0
D-R	10.0	10.0
Total	22.9	15.5
Fxx	36.1	30.0
Dxx	25.5	16.0
Rxx	27.1	19.9

Illustration 80 : Moyenne et médiane des débits critiques par typologies

Les populations des 15 sites les plus productifs et les moins productifs analysés dans le cadre de ce projet confirment cette observation avec 14 des 15 sites plus productifs comportant des failles contre seulement 6 des 15 sites les moins productifs (Illustration 81).

15 sites les plus productifs		15 sites les moins productifs	
Type	Nombre	Type	Nombre
F	4	F	2
F-R	4	F-R	1
F-D	6	F-D	3
R	0	R	1
R-D	1	R-D	4
D	0	D	2
D-R	0	D-R	2
Somme	15	Somme	15
Fxx	14	Fxx	6
Dxx	6	Dxx	11
Rxx	5	Rxx	8

Illustration 81 : Typologies des 15 sites les plus productifs et des 15 sites les moins productifs

Ces quantifications indiquent que bien sur les sites analysés une variabilité de configuration est observée, celles présentant des écoulements linéaires aux temps courts sont plus productifs.

Limites observées

Des limites étanches⁷ et d'alimentation⁸ ont été observées sur de nombreux essais. La présence de ces limites indique des aquifères fortement compartimentés. Les diagnostics réalisés sur les essais de pompage permettent d'identifier ces limites et notamment leur type (alimentées, étanches) et leur nombre. Cependant, ils ne permettent pas de déterminer directement leur distance au forage. En effet, cette distance est dépendante de la diffusivité du milieu, qui dépend elle-même de l'emménagement du milieu. Or ce coefficient d'emménagement était rarement disponible sur les essais, les distances n'ont donc pas pu être déterminées.

Les types de limites identifiées sur les essais de pompage sont quantifiées dans l'illustration 82.

Limites	Nombre de sites	% des points analysés
0L	16	22.5
2L	27	38.0
4L	23	32.4
AL	5	7.0
N.A	29	x
Total	100	100

Illustration 82 : Limites identifiées lors des essais de pompage (0L = Pas de limite identifié ; 2L = 2 Limites étanches ; 4L = 4 Limites étanches ; AL = Limite d'alimentation ; N.A = non disponible)

La capacité de détection d'une limite est liée à la durée du pompage. Un pompage trop court ne permet pas d'observer les limites éventuelles, car non atteintes par le cône de rabattement. Cependant, même sur des essais de courtes durées, 2 voire 4 limites ont souvent été

⁷ Limite d'un système aquifère faisant obstacle à tout transfert d'eau (flux nul) et sans potentiel imposé

⁸ Limite ouverte (ne faisant pas obstacle à un transfert d'eau significatif) d'un système aquifère à potentiel imposé ou non et à flux entrant dans les conditions naturelles ou modifiable au profit du système sous l'effet d'une exploitation. Exemple : nappe en contact avec un plan d'eau ou d'une rivière.

observées (Illustration 83). Les essais de plus de deux mois ont toujours permis d'observer *a minima* 2 limites. La localisation des sites avec durée de pompage et nombre de limites atteintes est fournie dans l'illustration 84.

Malgré la promiscuité observée entre cours d'eau et forages concernant les phénomènes de drainage, seul un nombre restreint (5) de limites alimentées ont été observées.

Cependant, cela ne signifie pas une déconnexion avec les rivières, les échanges pouvant être présents via l'aquifère de surface et les phénomènes de drainage

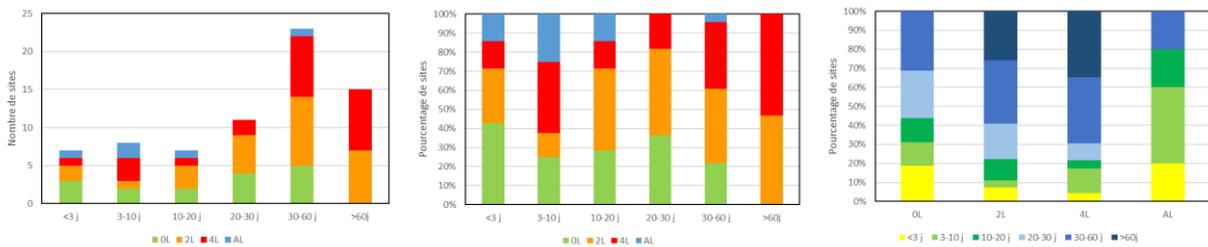


Illustration 83 : limites observées en fonction de la durée de pompage. A gauche en effectif ; au centre en pourcentage des sites ; à droite répartition des durées par type de limites.

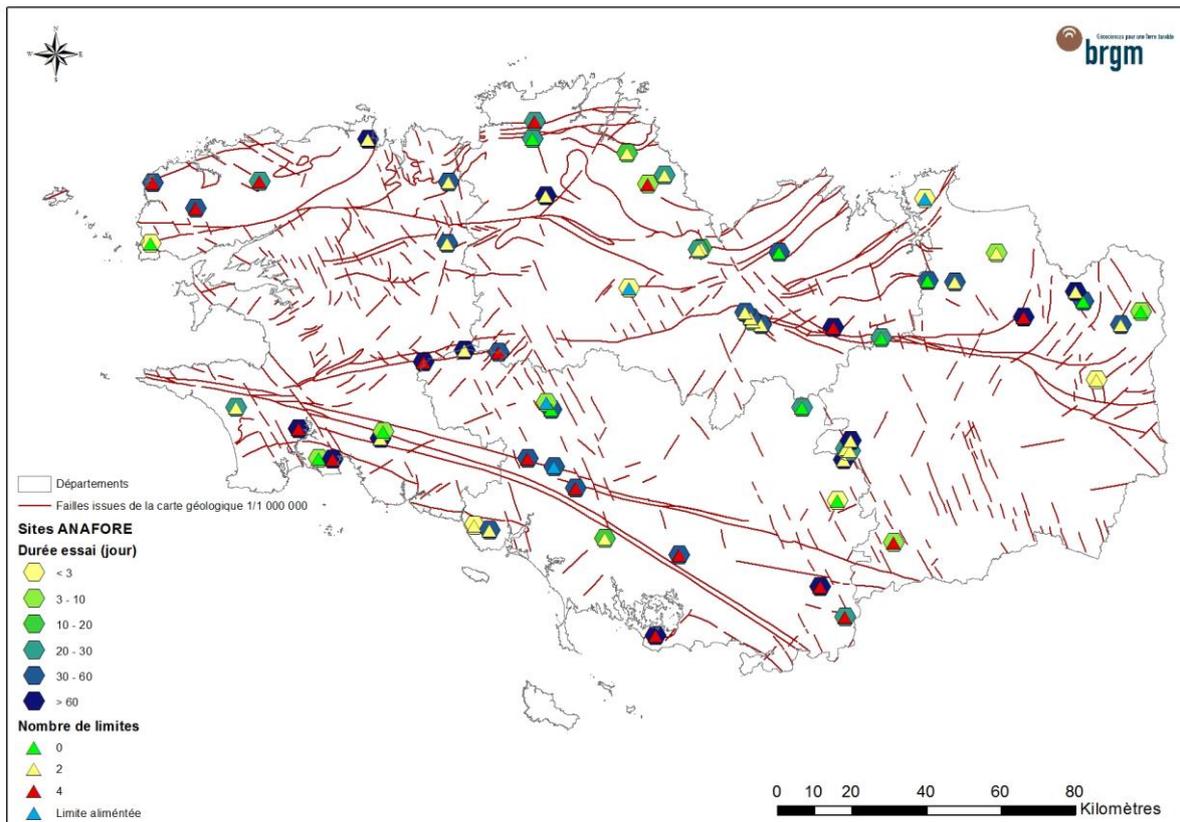


Illustration 84 : cartographie des temps de pompage et limites observées sur les essais de pompage

Identification des orientations préférentielles

La mise en relation des forages productifs avec les directions de fracturation préférentielles a été réalisée afin de déterminer si des orientations particulières étaient plus représentées. Dans le cas des essais de pompage présentant des écoulements linéaires aux temps courts (Types F, F-R et F-D), les orientations des failles les plus proches ont été relevées. Le référencement des failles a été réalisé selon la faille référencée la plus probable et non la densité de fracturation. Les orientations retenues pour chacun des sites sont fournies dans le tableau suivant (Illustration 85).

Les orientations observées sont relativement restreintes ce qui permet un regroupement en différentes familles de failles. Quatre familles de failles peuvent être définies. La première est composée des orientations proches du N150 (+/- 20°), la seconde correspond au cas où deux failles proches sont possibles. Ces cas sont limités à des failles d'orientation N150 ou N045 qui sont des orientations conjuguées des premières. Certains sites présentent aussi des failles N045. Quelques sites présentent quant à eux des orientations Nord-Sud. Enfin 3 sites présentent des orientations des failles qui ne sont pas liées aux familles de failles précédemment citées.

Nom du site	Orientation probable de la faille sollicitée
BAIN-DE-BRETAGNE_Les Riais_(35)	N20
BEIGNON_Pont de La Lande_(56)	N150
BENODET_Guenodou_(29)	NS/N40/EW/N150
BROONS_Linee_(22)	N40
BUBRY_Kerpicaud_(56)	N160-N45
CAOUENNEC-LANVEZEAC_Kerléo_(22)	N150
COLLINEE_Etablissement_Kermene_(22)	N30-N120
EPINIAC_Moulin Bretonniere_(35)	N170
GOURIN_Moulin de Conveau_(56)	N40-N140
GUIDEL_Saint-Mathieu_(56)	N10
LA FORET FOUESNANT_Creach par an du_(29)	N170
LA HARMOYE_ForageF4_(22)	N150 - N60
LAMBALLE_La Poterie_(22)	N140
LANDUDEC_Kerlosquet_(29)	N30
MAURON_Le Bas Validee_(56)	N150
MEDREAC_Le Hel_(35)	N135
MEILLAC_Le Ponconnet_(35)	N170
MELGVEN_Kerniouarn_(29)	N155-N50
MONTENEUF_Le Bezier_(56)	N145
PAIMPONT_Les Ruisseaux_(35)	N172
PAIMPONT_Pas du Houx_(35)	N135
PIPRIAC_Le Meneu_(35)	N167
PLEDRAN_Magenta_(22)	N150-N60
PLEDRAN_PontRomain_(22)	N155-N60
PLEGUIEN_Kerio_(22)	N50
PLESDER_Le Hutiere_(35)	N150
PLOEMEUR_Kermadoye_(56)	N20
PLOUDANIEL_La Laiterie_(29)	N20-N150
PLOUIGNEAU_Lannigou_(29)	N150
PLOURIN_Kerenneur_(29)	N155
PLUVIGNER_Kergoudeler_(56)	N55-N135
RIEUX_Les Moulins_(56)	N40
ROSPORDEN_Cite Pen Ar Pont_(29)	N155
SAINT-BRICE-EN-COGLES_Le Petit Frontigne_(35)	N150
SAINT-GLEN_Brehat_(22)	N50
SAINT-JACUT-LES-PINS_Gue Blandin_(56)	N60
SAINT-JEAN-BREVELAY_Kerdaniel_(56)	N155
SAINT-MELOIR-DES-ONDES_Pet en l'air_(35)	NS-155
SAINT-POL-DE-LEON_Kerisnel_(29)	N35
SARZEAU_Le Riellec_(56)	NS
SCRIGNAC_Le Cosquer_(29)	N140
TREBRY_LaPerchais_(22)	N50
VAL D'IZE_La Motte_Saint_Gervais_(35)	N150

Illustration 85 : Orientations probables de la faille sollicitée lors des essais de pompage sur les différents sites. Les couleurs indiquent les familles de failles auxquelles elle ont été associées.

"Familles" de failles	Effectif	%
N150	20	46.5
N150 - N45	9	20.9
N45	6	14.0
NS	5	11.6
Autres	3	7.0
Total	43	100

Illustration 86 : effectifs par familles de failles

Les effectifs (Illustration 86) montrent une prédominance de l'orientation N150 et de ces conjugués (N045). Cet ensemble représente plus de 80% des sites observées.

Bien que régulièrement observés sur les affleurements, les direction NS n'ont que très rarement été repérées à proximité immédiate des forages.

Sur les sites analysés, il semble donc que la fracturation interceptée par les ouvrages (hors altération de l'horizon d'altération) soit principalement liée à l'évènement tectonique de compression ayant créé les directions de fracturation N150 et ses conjugués à N045.

Importance de la drainance

Les diagnostics d'essais de pompage ont mis en avant sur de nombreux sites des effets de drainance (38 sites sur 70). L'observation de ce type d'écoulement n'est pas étonnant compte tenu des modèles conceptuels des aquifères de socle (horizon fracturé pouvant drainer des altérites sus-jacentes). De plus, dans de nombreux cas les forages présentant des phénomènes de drainance sont situés dans ou à proximité des lits des rivières. Sur les 38 sites présentant de la drainance, 17 étaient situés dans les alluvions de cours d'eau et 8 à proximité immédiate. Dans ces cas la drainance apparait assez rapidement dans l'essai en raison de la présence d'alluvions saturés. Dans 13 cas cette drainance provient d'horizon d'altération. Des exemples sont fournis (illustration 87) avec a) un cas de drainance lié aux alluvions d'un cours d'eau et b) un cas de drainance lié à l'horizon d'altération.



Illustration 87 : carte géologique interprétée du site de Bain de Bretagne - Les Riays (gauche) et de site de Paimpont - Les Creux du Canné (avec en rouge le forage étudié ; droite)

Dans un contexte de protection de la ressource, la drainance des alluvions doit être considérée avec précaution lors de la mise en place de périmètres de protection et lors de l'exploitation en période d'étiage. Cette configuration peut aussi rendre particulièrement vulnérable la ressource souterraine en termes de qualité.

Rôle des structures géologiques régionales majeures sur les ouvrages à forte productivité

La répartition spatiale des typologies rencontrées sur les 70 essais analysés dans le cadre du projet ANAFORE est présentée sur l'illustration 88.

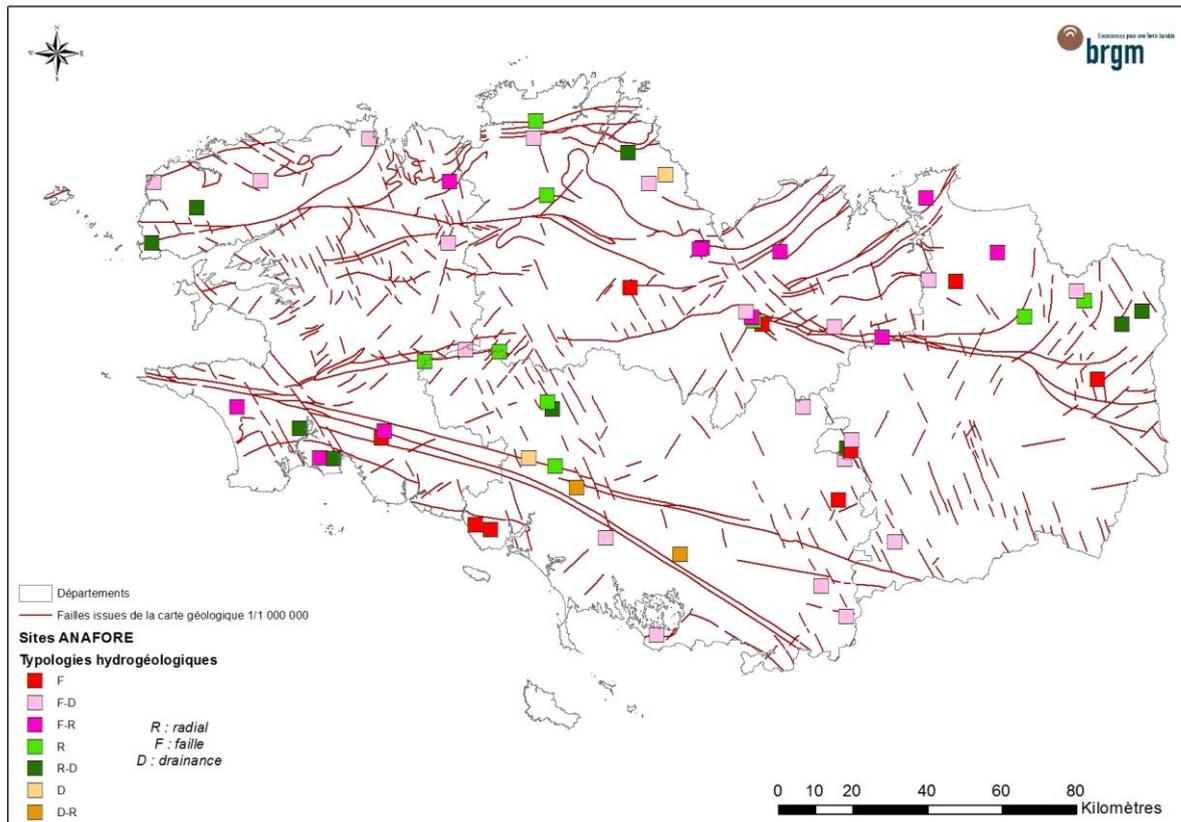


Illustration 88 : Répartition spatiale des typologies hydrogéologiques des sites analysés dans le cadre du projet ANAFORE

Aucune répartition particulière ne semble se dégager. Cependant, si on s'intéresse uniquement aux sites ayant rencontré des typologies linéaires (failles), les structures géologiques régionales majeures (faille de Quessoy/Nort-sur-Erdre, Cisaillements Nord et Sud Armoricaux) sont soulignées par ces sites, dont la répartition ne paraît donc pas aléatoire. L'analyse hydrogéologique confirme donc bien l'importance des failles et les relevés géologiques ont mis en évidence leurs orientations préférentielles. Outre les structures majeures représentées sur l'illustration 88, il faut noter que les petites structures locales, notamment orientées N150, jouent un rôle important (cf. § 0).

Comme expliqué précédemment, le choix des sites ANAFORE s'est basé notamment sur les débits instantanés au soufflage. Or la fiabilité de ces débits instantanés est discutable, notamment pour les forts débits, mesurés sur le terrain avec des récipients de capacité limitée. D'autre part, sur certains sites, les essais de pompage ont été réinterprétés sur des forages voisins du forage productif étudié, ayant souvent un débit au soufflage plus faible que le forage productif. Il a donc paru préférable de s'intéresser au débit moyen de l'essai de pompage longue durée réinterprété lorsqu'ils étaient disponibles ou à défaut aux débits critiques des forages analysés, déterminés lors des essais par paliers (Illustration 89). Cependant les débits critiques renseignent principalement sur les capacités de l'ouvrage mais restent limités pour l'évaluation de l'aquifère.

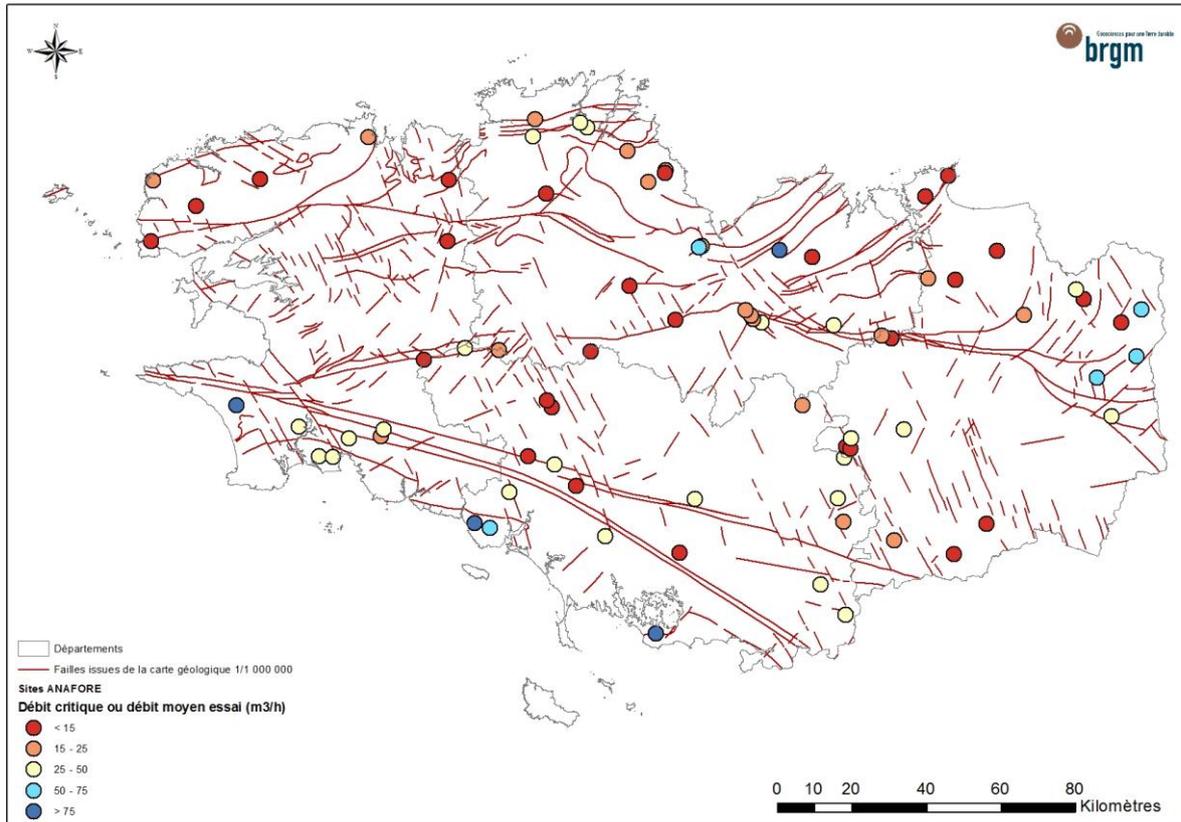


Illustration 89 : Débit critique ou moyen des essais de pompage réinterprétés dans le cadre du projet ANAFORE

En sélectionnant uniquement les débits critiques ou débits moyens de l'essai longue durée supérieurs à 15 m³/h (Illustration 900), on observe que ces forts débits sont localisés dans certains secteurs où les structures géologiques ou la lithologie semblent plus favorables à l'obtention de bons débits :

- Faisceau de faille de Quessoy/Nort-sur-Erdre,
- Bassins éocènes de Bretagne sud (secteur correspondant aux débits les plus élevés),
- Secteur de Fougères, présentant une lithologie favorable (les corénéennes et schistes tachetés).

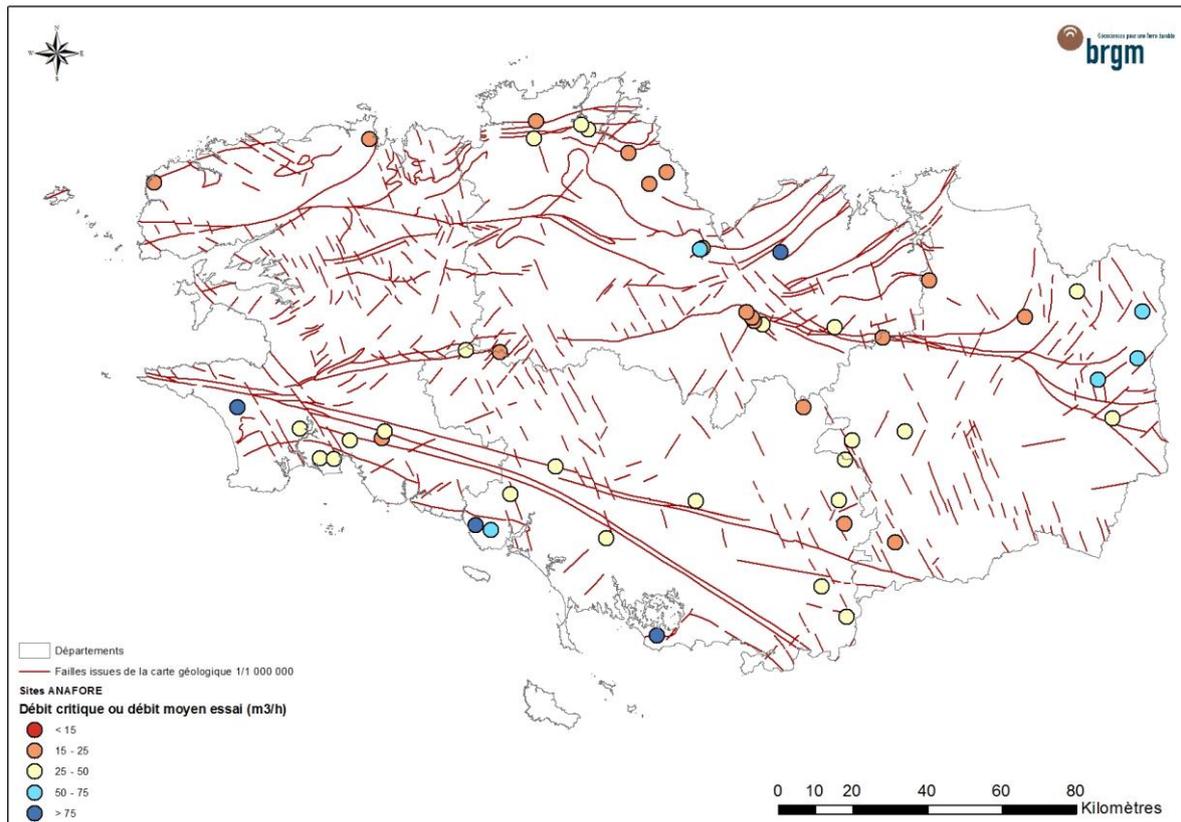


Illustration 90 : Sites ANAFORE dont le débit critique ou le débit moyen de l'essai longue durée est supérieur à $15 \text{ m}^3/\text{h}$

4.2.4. Discussion

Les analyses réalisées ont été contraintes par différentes limitations. Premièrement, les données disponibles sur les différents sites sont très hétérogènes. Il n'a par exemple pas été possible d'étudier effectivement les 100 sites les plus productifs de Bretagne. Pour un bon nombre d'entre eux, aucune donnée n'était disponible, les excluant de fait de l'étude. Sur les sites sélectionnés, la quantité et la qualité variables des données représentent une limitation pour les analyses d'essais de pompage. Le manque d'information sur les variations de débits de pompage peut, dans certains cas, empêcher un diagnostic complet.

La comparaison des limites des aquifères observés n'a pas été possible dans le cadre du projet d'une manière systématique. Le manque d'information sur les coefficients d'emmagasinement et la variabilité des durées de pompage n'a pas permis une analyse complète.

Les analyses de pompage ont été réalisées grâce aux pentes des dérivées de rabattements. Dans ce type d'interprétations, un écoulement linéaire induit une pente positive de 0,5 en représentation bi-logarithmique, un écoulement sphérique (qui a été dans une majorité des configurations considéré comme une drainance) une pente de -0.5 et un écoulement radial une pente nulle (0). Dans le cas où une faille (écoulement linéaire, pente 0,5) est sujette à un effet de drainance (pente -0.5), la dérivée du rabattement peut tendre vers zéro et être interprétée comme un écoulement radial. De ce fait dans les interprétations la présence de drainance et d'écoulement linéaire a pu être sous-estimée. Dans la mesure où ces phénomènes sont déjà les plus présents et que les écoulements radiaux sont minoritaires,

cela n'impacte que très peu les conclusions sur les écoulements estimés avec l'importance du rôle des failles et de la drainance sur une majorité de sites.

Comparaison avec les études existantes

Le projet SILURES Bretagne (Mougin, 2008) a consisté à évaluer et cartographier à l'échelle du 1/250 000 les réserves d'eau souterraine à l'échelle de la région Bretagne, à partir du croisement de plusieurs types d'informations disponibles : coupes géologiques et hydrogéologiques de 12 000 forages géoréférencés, données géophysiques aéroportées (magnétisme des roches et analyses spectrométriques), régime des rivières. Ce projet s'est notamment intéressé à l'horizon d'altération (altérites et horizon fracturé). L'un des résultats majeur du projet SILURES Bretagne est la cartographie du débit du milieu fracturé utile, c'est-à-dire la partie du sous-sol riche en fractures qui apporte la meilleure productivité en termes de débit instantané (Illustration 91).

Si l'on superpose à cette carte les sites ANAFORE ayant rencontré les débits les plus élevés (Illustration 91), on ne constate pas de liens évidents, les plus forts débits n'étant pas forcément situés dans les secteurs identifiés par le projet SILURES comme étant les plus productifs en termes de débit du milieu fissuré utile. Ce résultat était attendu dans la mesure où les éléments recherchés sont différents. Le projet SILURES donne une image du stock d'eau disponible alors que le projet ANAFORE s'intéresse à l'exploitation locale via la structure sollicitées par les forages les plus productifs. Mais cette superposition souligne la complémentarité des deux projets, dont les objectifs et les méthodes sont très différents : SILURES avait pour objectif d'exploiter régionalement une ressource en eau intéressante (notamment en étudiant les capacités de l'horizon d'altération) alors qu'ANAFORE a pour objectif de rechercher des ressources locales exceptionnelles. L'un s'attache à regarder la géologie dans son ensemble (SILURES) et l'autre à ces hétérogénéités (ANAFORE).

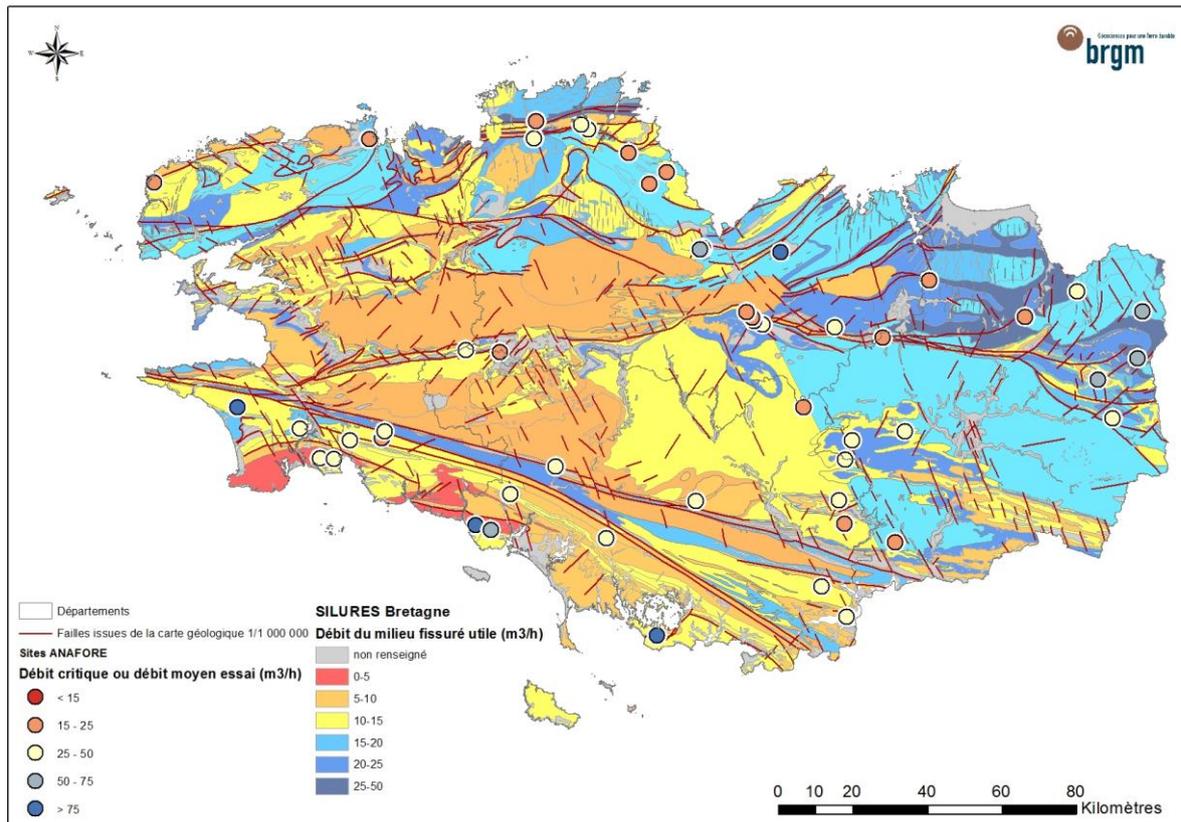


Illustration 91 : Superposition de la cartographie du débit du milieu fracturé utile issue du projet SILURES Bretagne (Mougin, 2008) et de la localisation des sites ANAFORE dont le débit critique ou le débit moyen de l'essai longue durée est supérieur à 15 m³/h.

Par exemple, les sites de Ploemeur et Guidel, sites ANAFORE ayant donné les débits les plus élevés, se trouvent dans des secteurs SILURES *a priori* peu productifs : ces sites ne sont effectivement pas expliqués par SILURES car ils sont essentiellement liés à la présence de failles. En revanche, les sites ANAFORE du secteur de Fougères se trouvent bien dans les secteurs SILURES identifiés comme productifs et le projet Anafore a montré l'importance de la lithologie sur ces sites. La combinaison des projets ANAFORE et SILURES permet donc de balayer l'ensemble des cas de forages productifs en domaine de socle rencontrés en Bretagne.

4.2.5. Conclusions

Les analyses hydrogéologiques réalisées dans le cadre du projet ANAFORE apportent de nouvelles connaissances sur les propriétés des aquifères de socle du Massif Armoricaïn. La prise en compte d'aspects tectoniques structuraux, souvent négligés dans les études régionales, fournit des explications sur la répartition des sites à forte productivité à l'échelle régionale.

Les diagnostics de pompage montrent qu'une majorité des forages à fort débit présentent aux temps courts des écoulements linéaires indiquant le rôle de failles dans les écoulements. Cette analyse montre l'importance des failles principalement sur les forages les plus productifs. La présence de ces failles conduit à une augmentation de la productivité des ouvrages en augmentant la surface d'échange entre le puits et l'aquifère lorsque le forage intercepte une fracture de dimension notable (quelques dizaines de mètres à centaines de mètres).

Un second élément important mis en avant dans le cadre de cette étude est l'importance des phénomènes de drainance. En effet, de nombreux sites ont été interprétés comme présentant de la drainance d'horizons sus-jacents pouvant provenir des alluvions (voire des cours d'eau qui leurs sont associés) ou des horizons d'altération.

Ensemble ces éléments montrent que pour de nombreux sites la productivité est liée à la présence de failles dans lesquelles sont implantés les forages qui drainent par la suite des réservoirs plus larges (alluvions ; horizons d'altération). Très peu de sites présentent sur l'intégralité de leur essai de pompage des écoulements linéaires indiquant des failles ou contacts lithologiques de grande ampleur (Ploemeur, Guidel, Val-d'Izé...). Très peu de sites ne présentent pas de limites étanches, ce qui indique qu'une majorité de ces réservoirs sont d'extension limitée (aquifères compartimentés).

Pour les ressources exceptionnelles, il est donc nécessaire non seulement de rechercher des failles pouvant servir de drain mais aussi d'évaluer quels réservoirs seront sollicités et comment ces failles peuvent drainer les ressources environnantes. Quelques sites présentaient des débits importants sur le court terme mais qui n'ont pas pu être maintenus faute de réservoir suffisant à drainer sur le long terme. D'autre part, la présence de phénomènes de drainance peut entraîner des arrivées d'eau plus superficielles de qualité médiocre. En effet, bien que de nombreux sites sollicitent des arrivées d'eau profonde, nombre de sites montrant de la drainance indique que la réserve n'est pas obligatoirement profonde. De ce fait, des risques de contamination existent et sont à prendre en compte lors de l'exploitation des captages, et de la réalisation des périmètres de protection.

L'analyse des directions des failles et de la fracturation montre que les directions N150 et ses conjuguées (N045) semblent être des directions à fort potentiel. Ceci est illustré à l'échelle régionale par la présence de nombreux sites dans le faisceau de la faille de Quessoy-Nord-Sur-Erdre mais aussi à l'échelle locale où des structures N150 ou N045 semblent souvent sollicitées. Ces observations montrent donc le fort impact de la tectonique récente sur les ressources en eau mobilisables à l'échelle régionale.

Toutes ces informations permettent de généraliser à une échelle régionale l'apport de la tectonique récente sur les ressources en eaux souterraines. Ceci permet notamment l'identification des zones à fort potentiel à l'échelle régionale.

5. Cartographie des Zones Potentiellement Productives (ZPP)

Cette partie correspond à l'Objectif n°2 de l'étude ANAFORE, et donc à la déclinaison cartographique en Zones Potentiellement Productives (ZPP) en eaux souterraines.

L'analyse des 100 sites (des 100 forages) étaient une condition *sine qua none* avant le passage à cette étape importante du projet. Sans cette première analyse (Objectif n°1), l'étude s'en serait tenue à des analyses statistiques sans avoir fait le tour des paramètres hydro/géologiques qui entrent en jeu dans la caractérisation des eaux souterraines à l'échelle du forage et de la Bretagne. Cette caractérisation à l'échelle d'un site par exemple dans le cadre du projet CASPAR, avait mis trois années dans lesquelles l'ensemble des acquisitions scientifiques s'étaient succédées. ANAFORE a tenté de récupérer le même type de données mais pour 100 sites sur toute la Bretagne afin d'avoir une vue générale de 100 « CASPAR » et ceci sur le même pas de temps de trois années de 2017 à 2019.

Les données utilisées pour la cartographie sont des données à l'échelle du 1/50 000 : cartes géologiques au 1/50 000 du BRGM harmonisées pour toute la Bretagne et les failles (ou structures tectoniques) de ces mêmes cartes géologiques.

La cartographie des ZPP est donc valable à l'échelle du 1/100 000.

Sont venus s'ajouter à ces données géologiques, les bassins versants d'ordre 1 à 2 afin de compléter les limites des zones quand les deux autres limites précédentes ne suffisaient pas ou étaient incomplètes. En effet, les failles quand celles-ci ne sont plus observables sur le terrain, les géologues ne les ont pas représentées. Afin de pouvoir fermer les ZPP, les maquette d'informations géologiques locales, ont été complété par les limites des bassins versants immédiats.

Malgré les analyses de détail réalisées sur les 100 forages, une recherche d'arguments cartographiques a été menée en combinant des objets ayant un lien avec l'hydrogéologie : débits instantanés de la BD forages SILURES-ANFORE, BD des sources de l'IGN notamment.

5.1. RECHERCHE D'ARGUMENTS CARTOGRAPHIQUES ET STATISTIQUES

5.1.1. Caractérisation des failles et fractures

Une réflexion a été menée entre le géologue et le géostatisticien afin d'identifier des objets naturels qui permettraient de caractériser d'autres objets naturels linéaires comme les failles et les fractures, sur des arguments hydrogéologiques. Usuellement et historiquement, c'est le débit moyen instantané issu des forages, par faille ou structure linéaire, qui fait office de paramètre discriminant pour l'évaluation du potentiel hydrogéologique des failles et/ou fractures en fonction de leur orientation.

Cependant, les forages (et les débits instantanés associés) ne sont pas des objets naturels et leur implantation est biaisée par le fait qu'elle peut être faite: (1) par un bureau d'études, (2) par un soucier local ou encore (3) aléatoirement.

Après réflexion, les seuls objets naturels qui sont apparus comme reflétant l'hydrogéologie d'un territoire, ont été les sources naturelles. L'IGN possède une base de données sur les sources dans la BDTPO. C'est celle-ci qui a été utilisée pour caractériser le potentiel hydrogéologique des failles et fractures des cartes géologiques au 1/50 000 de la Bretagne.

Les débits instantanés moyens par failles & fractures

Les statistiques des débits moyens instantanés par failles ou structures linéaires ont été faites pour : (1) les linéaments issus de la géophysique aéroporté (champ magnétique), (2) les linéaments extraits automatiquement du mnt de la Bretagne au pas de 50 m, (3) les failles de la carte géologique du massif armoricain au 1/250 000 et enfin (4) les failles des cartes géologiques au 1/50 000, en n'utilisant que les forages avec un débit instantané supérieur à 10 m³/h.

Seuls les résultats sur les failles des cartes géologiques du BRGM au 1/50 000 sont présentés ici car les autres ne peuvent pas convenir pour une échelle de restitution au 1/100 000.

Classes d'orientation	Nombre de linéaments	Longueur totale (en m)	Débits inst. moyens (en m ³ /h)	Débit inst. moy./km. Linéaire
1 (0 - 20)	279	252026	34,55	38
2 (20 - 40)	458	482373	36,11	34
3 (40 - 60)	366	407349	40,59	36
4 (60 - 80)	327	367532	41,96	37
5 (80 - 100)	204	300622	34,54	23
6 (100 - 120)	323	396922	39,01	32
7 (120 - 140)	268	277001	35,55	34
8 (140 - 160)	609	696071	37,93	33
9 (160 - 180)	533	532065	39,46	40

Illustration 92 : Résultats statistiques des débits moyens instantanés pour les failles des cartes géologiques au 1/50 000 avec les forages > à 10 m³/h

Ainsi **les débits instantanés moyens par failles et/ou fractures n'ont pas produit une discrimination flagrante des failles et/ou fractures en fonction de leur orientation** (Illustration n°92). Ils ne sont pas le reflet des observations faites sur le terrain et ont été abondonnés.

Densité des sources par failles & fractures

La base de données sur les sources de l'IGN contenu dans la BDTOPPO a été confrontée aux failles et/ou fractures des cartes géologiques au 1/50 000. Etant donné qu'il n'existe pas de données quantitatives associées à chaque source, la méthode s'est orientée sur le calcul de la densité de sources suivant la méthode dite du « Kernel Density » (KDE).

En statistique, l'estimation du « Kernel Density » est un moyen non paramétrique d'estimer la fonction de densité de probabilité d'une variable aléatoire. Le « Kernel density » calcule pour une magnitude pour une unité d'aire définie (ici 250 m) à partir des points ou des lignes considérés (ici les sources), en utilisant la fonction « kernel » pour faire correspondre une surface lissée avec chaque point ou ligne (en cherchant des points jusqu'à 5 000 m). Ceci aboutit à une image de densité des sources qui va être superposer aux failles et/ou fractures pour leur attribuer à chacune une valeur de densité de sources.

En classant les failles et /ou fractures, il est ainsi possible de comparer la densité de sources par orientation de failles et /ou fractures (Illustration n°93).

Classes d'orientation		Densité de sources (Kernel density)
1	(0 - 20)	0,79
2	(20 - 40)	0,66
3	(40 - 60)	0,66
4	(60 - 80)	0,57
5	(80 - 100)	0,43
6	(100 - 120)	0,48
7	(120 - 140)	0,44
8	(140 - 160)	0,59
9	(160 - 180)	0,72

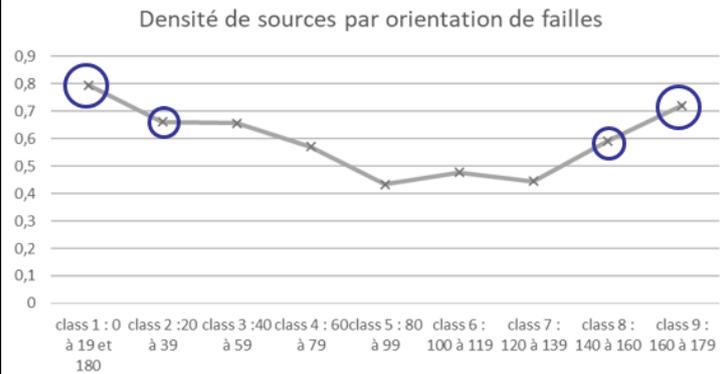


Illustration 93 : Résultats statistiques des débits moyens instantanés pour les failles des cartes géologiques au 1/50 000 avec les forages > à 10 m³/h (En ordonnées : le Kernel Density et en abscisses : les classe de failles de 20° en 20°)

Les densités de sources par orientation des failles et/ou fractures montrent un bon facteur discriminant avec une courbe en berceau qui oppose les failles et /ou fractures d'orientation Nord-Sud (NS) à celles d'orientation Est-Ouest (EW) (Illustration n°93). Le passage des unes aux autres est presque doublé ce qui correspond aux observations faites sur le terrain sur l'ensemble des sites analysés.

Conclusion

Les orientations des failles et/ou fractures observées sont confirmées par les densités de sources. Les failles et/ou fractures sub NS à N150° sont bien des structures tectoniques favorables à la présence d'eau souterraine (Illustration n°94).

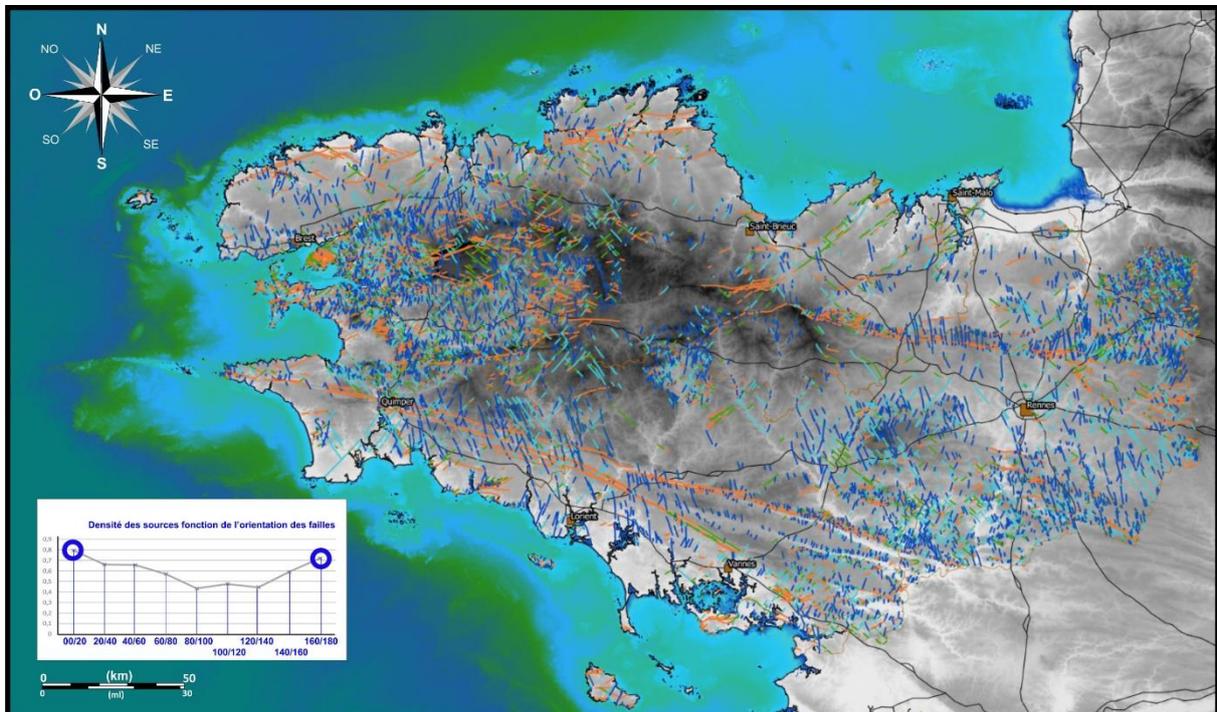


Illustration 94 : Densité des sources en fonction de l'orientation des failles (de bleu nuit: favorable à orange peu favorable)

Les failles majeures

Afin de compléter, l'analyse sur les failles, un regard a été porté sur les failles orientées NS à N150° ayant eu une activité tectonique plus importante que d'autres. Cette activité tectonique s'est appuyée sur l'évaluation des rejets apparents horizontaux les plus importants (Illustration n°95).

Les failles de l'illustration ci-dessous sont les failles régionales orientées favorablement à la présence d'eau souterraine, à partir des arguments déduits des analyses de terrain et des densités de sources, et ayant les rejets (décalages entre deux repères géologiques identiques) horizontaux apparents les plus importants (de plus de la dizaine de centaines de mètres) (Illustration n°95).

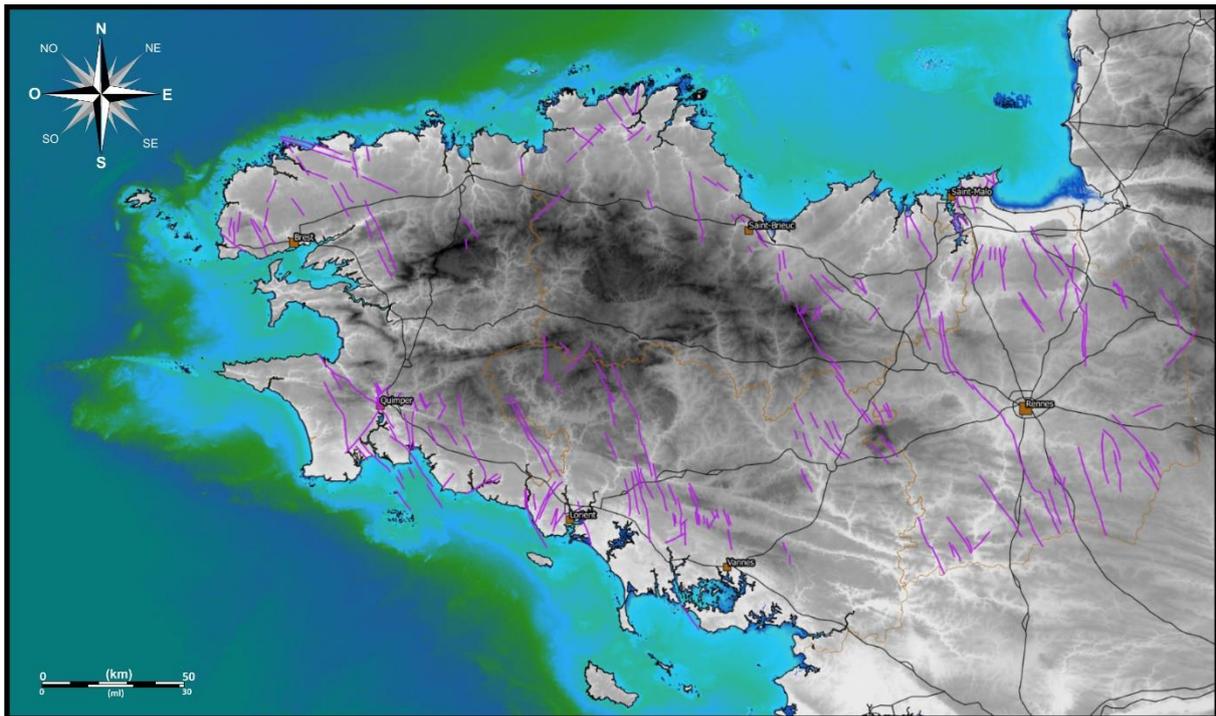


Illustration 95 : failles régionales avec les rejets apparents tectoniques les plus importants

5.1.2. Caractérisation des lithologies

Différentes méthodes de géostatistique ont été testées sur la carte des lithologies au 1/50 000 des cartes géologiques. Hélas, rapidement, les résultats peu convaincants, ont montrés qu'il fallait améliorer les caractérisations lithologiques et donc l'harmonisation à l'échelle de la Bretagne.

Différentes méthodes d'évaluation des lithologies

Le « Weight of Evidence » (WoE) :

Le WOE est une approche statistique (Bonham-Carter, 1994) qui utilise les règles de Bayes pour combiner des données probantes avec l'hypothèse d'indépendance conditionnelle. Cette approche est une approche de type « Favorability mapping », utilisant des méthodes classiques de la recherche de zones favorables pour la prospection minière.

L'application de cette méthode suppose la présence d'un ensemble de points d'apprentissage sur une surface d'étude couverte de polygones (géologiques par exemple). Le principe du calcul consiste à estimer pour chaque unité lithologique la probabilité d'y trouver une occurrence (minéralisée ou un forage d'eau ici) par rapport à la probabilité de la trouver à l'extérieur de cette unité. En pratique, la méthode que nous avons employée consiste à calculer le ratio du pourcentage d'indices contenus dans une formation sur le pourcentage de surface couvert par cette même formation, ce qu'on peut écrire ainsi:

$$\mathbf{WoE} = (\% \text{ indices}) / (\% \text{ surface formation } X)$$

Quand on étend ce calcul à toutes les formations de la zone d'étude, cela revient à calculer une densité relative d'indices par unité de surface de chaque formation. En première analyse, plus **WoE** est élevé, plus la probabilité de trouver une occurrence par unité de surface est élevée et donc, plus cette formation est productive.

Le **WoE** est un estimateur simple du potentiel d'une formation à contenir des minéralisations. En première intention et si les occurrences sont nombreuses, c'est une méthode satisfaisante de recherche de favorabilité.

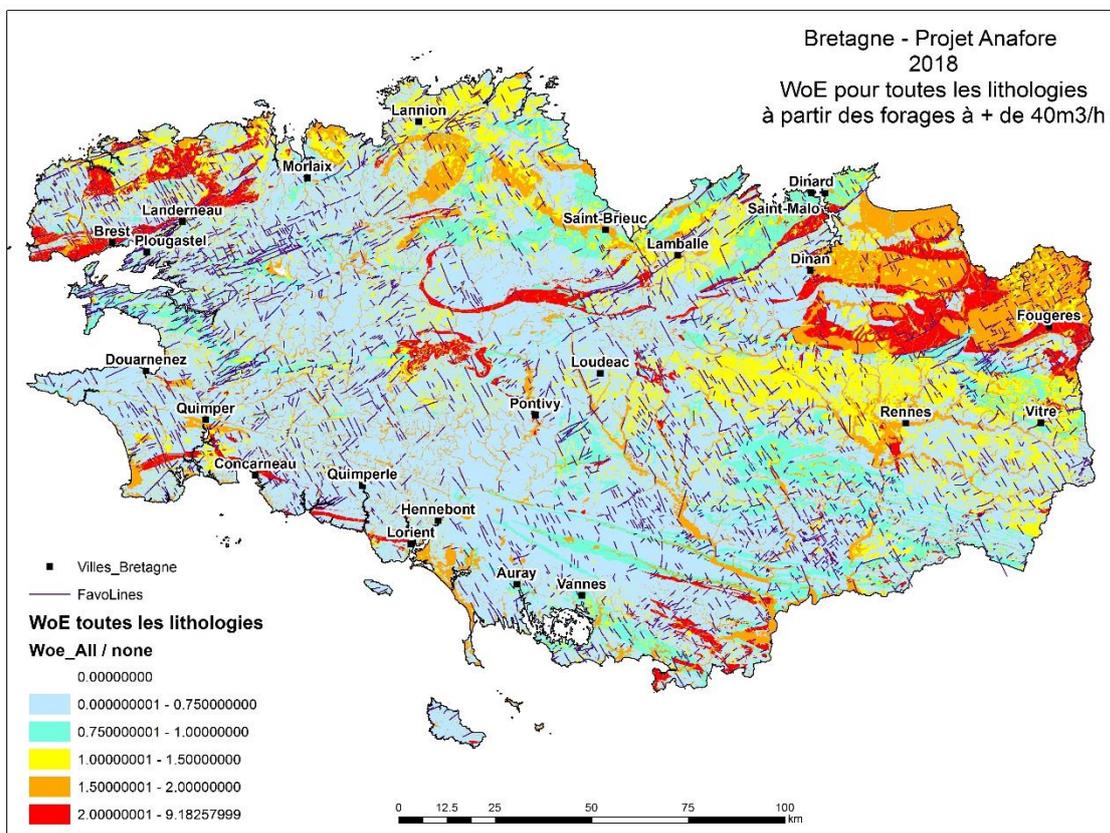


Illustration 96 : WoE des lithologies au 1/50 000 de Bretagne pour des débits supérieurs à 40 m³/h

Cette méthode met en évidence des résultats déjà connus (auréole de métamorphisme, granodiorites) mais il reste un nombre important des lithologies avec une **favorabilité** quasi identique donc peu discriminante (Illustration n°96).

La CBA (ou Cell Based Association) :

Est une méthode de favorabilité, développée au BRGM (Tourlière et al., 2015), pour pallier à certains défauts du WoE comme sa « non prise en compte » d'environnements complexes, sa

sensibilité au positionnement des points et à la qualité des contours. La méthode CBA Cell Based Association, consiste à découper la zone d'étude par une grille régulière de cellules codées par 1 ou 0 (présence ou absence) avec une taille de cellules (2,5 X 2,5 km), déterminée de telle façon que la majorité des cellules contiennent au moins 2 informations.

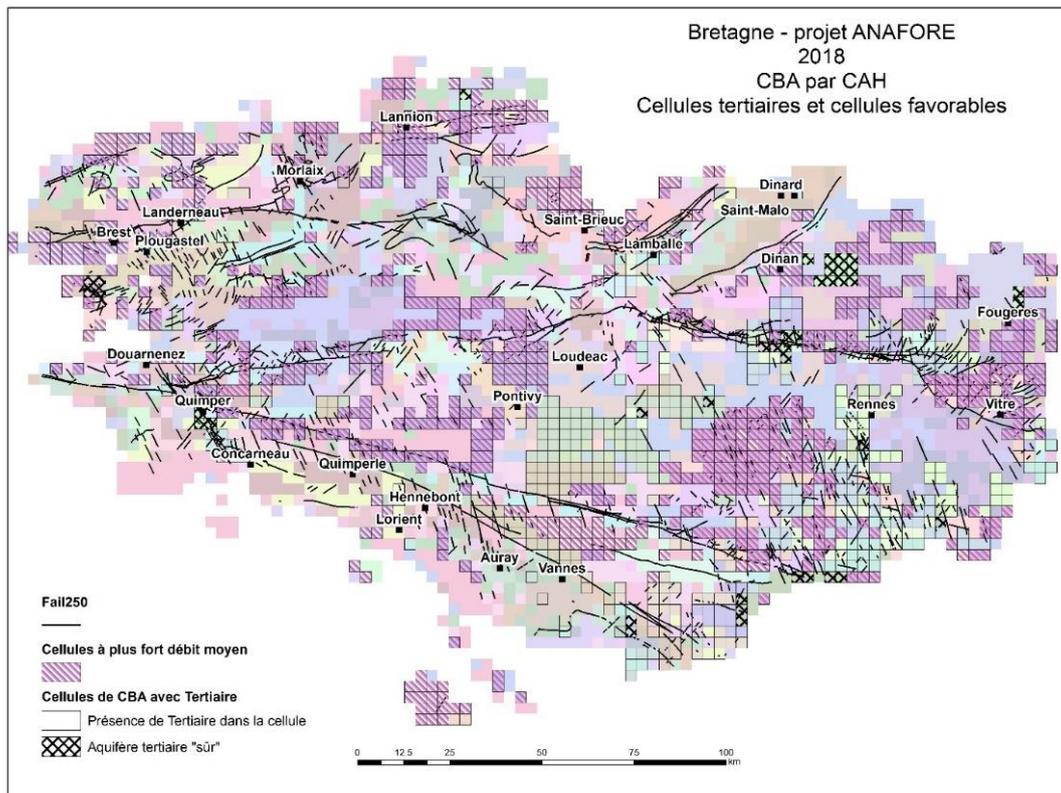


Illustration 97 : CBA par CHA – classification par cellule ayant les débits instantanés les moins aux plus importants en Bretagne.

Cette méthode a aussi mise en évidence des résultats déjà connus (auréole de métamorphisme, granodiorites ou grès paléozoïques) mais la représentation cartographique n'était par satisfaisante (Illustration n°97).

La méthode retenue

Finalement après ces premiers essais, la méthode retenue a été de refaire des harmonisations lithologiques plus précises et plus fines pour refaire des statistiques de débits instantanés moyens par contexte lithologique (nature des roches ou de groupe de roches ; Illustration n°98). La caractérisation de contextes lithologiques s'est faite à partir d'une carte régionale harmonisée des lithologies des cartes géologiques au 1/50 000 pour lesquelles ont été calculées les débits instantanés moyens (en m³/h).

Cette harmonisation a été faite 3 fois. L'illustration 98 est un exemple de regroupement au regard de la minéralogie des formations géologiques magmatiques, minéralogie qui peut influencer l'altération.

Par exemple pour les roches métasédimentaires, une harmonisation en trois grandes familles de schistes à dominante gréseuse, pélitique et argileuse a été retenue. Malgré tout, ce travail fait remonter des résultats connus mais comme les deux autres méthodes purement numériques présente aussi des limites (Illustration n°99).

En conclusion, une plus grande expertise pourrait entrer dans l'harmonisation par une connaissance plus poussée des qualités intrinsèques de roches de l'ensemble de la Bretagne.

Ainsi, certaines formations dont les lithologies sont identiques pourraient être séparées car s'il s'agit du même type de roches, suivant le secteur où elles se trouvent, elles pourraient être plus ou moins déformées.

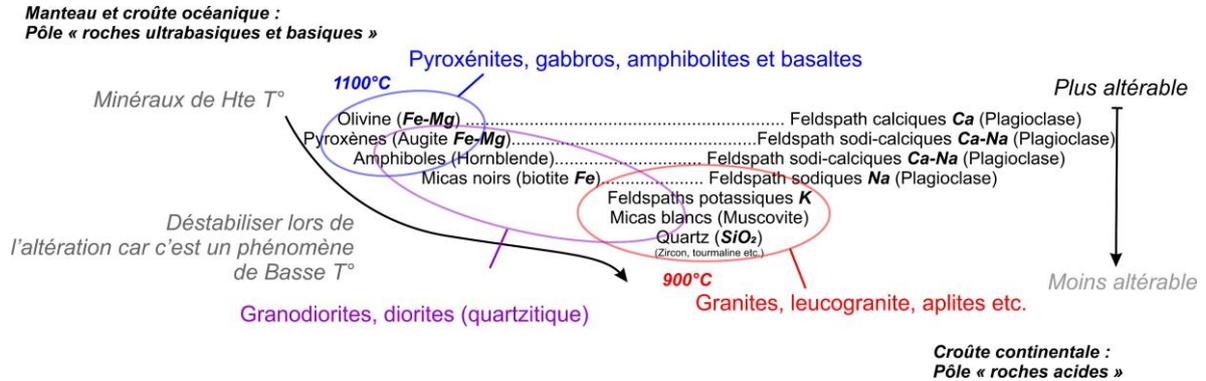


Illustration 98 : grandes familles de roches magmatiques et leur minéralogie, et leur relation avec l'altération ; les cercles correspondent à des regroupements possibles.

Lithologies ou familles lithologiques (harmonisées)	Somme des débits instantanés (m3/h)	Nombre de forages	Surface de la lithologie (en km²)	Débit instantané moyen (m3/h)	Classes	Dénomination des classes
Schistes indifférenciés	45	2	16	22,50		non significatif
Basaltes & dolérites	1395,6	75	78	18,61	C1	Très Favorable
Paragneiss	3305,5	279	221	11,85		
Paragneiss & micaschistes	1511	136	90	11,11		
Corneennes & schistes tachetés	8080,77	768	1317	10,52		
Micaschistes, amphibolites & gneiss	296,75	30	28	9,89	C2	Favorable
Micaschistes & quartzites	959,1	100	119	9,59		
Tufs & volcanites	1051,3	118	194	8,91		
Micaschistes & gneiss	2459	282	234	8,72		
Schistes à dominante gréseuse	6643,55	765	1034	8,68	C3	Moyennement favorable
Amphibolites (roches ultrabasiques et basiques)	4180,5	489	426	8,55		
Schistes à dominante pélitique	23626,15	2782	1230	8,49		
Breches & conglomérats	1093,31	138	164	7,92		
Granodiorites & monzogranites	14233,21	1798	2126	7,92		
Micaschistes, quartzites & gneiss	398,2	51	74	7,81		
Schistes à dominante argileuse	4231,83	542	1162	7,81	C4	Moyennement peu favorable
Migmatites & anatectites	6772,4	902	876	7,51		
Gres & quartzites	9239,84	1240	2064	7,45		
Orthogneiss & gneiss ocellés	6394,5	890	851	7,18		
Micaschistes	1720	252	380	6,83	C5	Peu favorable
Schistes & quartzites	277,2	42	92	6,60		
Micaschistes & gneiss (d'auréole)	981,3	150	261	6,54		
Schistes carbonates	359	55	133	6,53		
Laves acides	300,2	46	36	6,53		
Mylonites	240,9	41	60	5,88		
Schistes verts	117,8	24	19	4,91		
Granites (Leucogranites etc.)	763,88	156	4709	4,90		

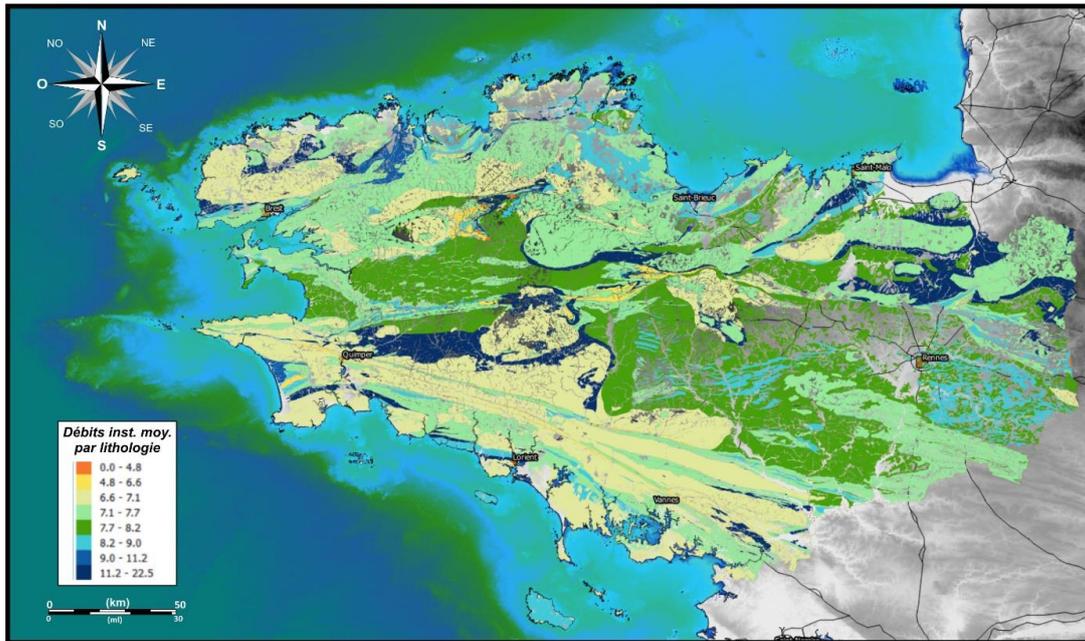


Illustration 99 : en haut , débits instantanés moyens (en m³/h) après harmonisation des lithologies bretonnes au 1/50 000, et en bas, répartition cartographique.

5.1.3. Dernière entité utilisée : les bassins versants immédiats

Enfin, une dernière entité qui est venue compléter la cartographie des ZPP, correspond aux limites des bassins versants des cours d'eau d'ordre 1 à 2. Tracés automatiquement, ils ont été sélectionnés à partir de nombre de forages supérieurs à 40 m³/h qu'ils contenaient (Illustration n° 100).

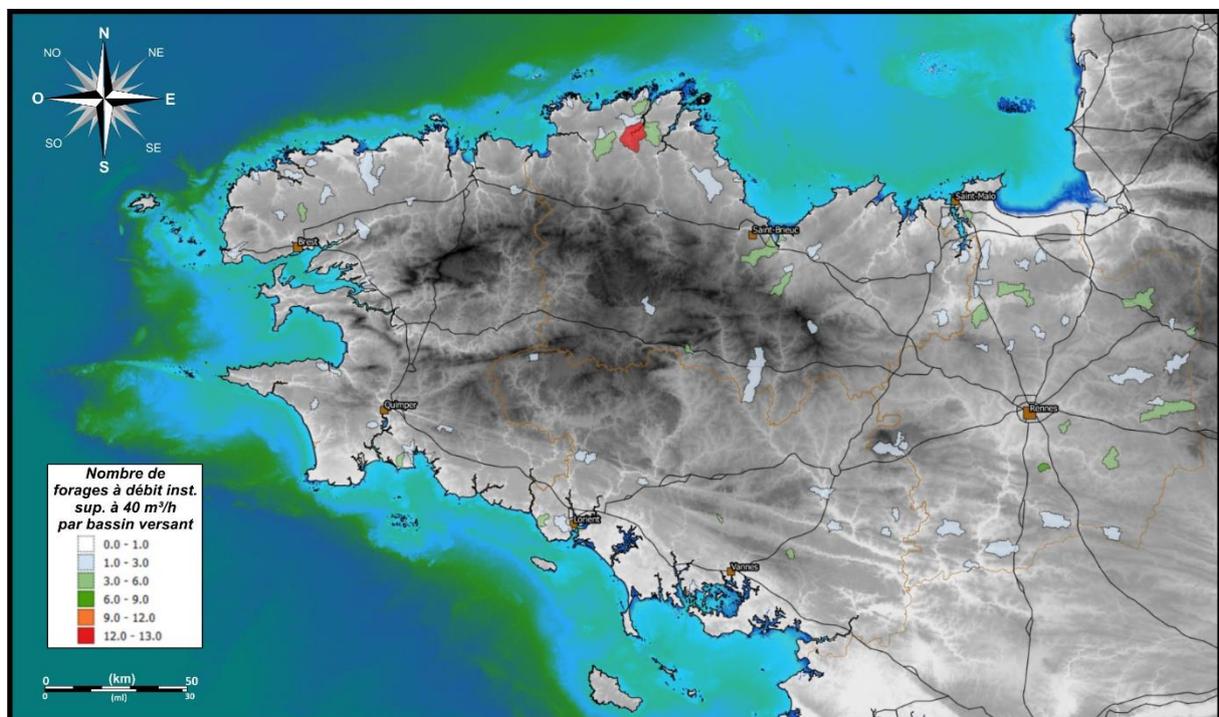


Illustration 100 : nombre des forages avec un débit instantané supérieur à 40 m³/h par bassin versant de cours d'eau d'ordre 1 à 2.

Du fait que les forages ayant un débit instantané supérieur à 40 m³/h, correspondait à 1,79 % des 19 684 forages de la base SILURES-ANAFORE, ces bassins versants nommés : « bassins versants immédiats », ont constitué des territoires avérés de la présence en eaux souterraines.

5.1.4. Délimitation des Zones Potentiellement Productives

La délimitation des ZPP s'est faite à la main sans cartographie automatique pour faire intervenir au maximum, les conclusions déduites des anaphores géologiques et hydrogéologiques.

Les géostatistiques sont venues compléter et aider à la traduction cartographique.

Ainsi les limites des ZPP sont des limites combinées entre des limites géologiques et des limites topographiques. Les limites géologiques utilisées sont les limites entre les différentes formations géologiques, les failles et les fractures des cartes géologiques au 1/50 000. Les limites topographiques prennent le relais des limites géologiques à travers les limites des bassins versants immédiats et complètent la délimitation des ZPP lorsque les failles et les fractures des cartes géologiques s'arrêtaient brutalement.

Un exemple détaillé de la Zone Potentiellement Productive du secteur de Paimpont, est montré ci-dessous dans l'illustration n°101.

Pour cette ZPP, sa délimitation est une limite composite au 1/50 :000 entre :

- les failles favorables à la présence d'eau souterraine des cartes géologiques au 1/50 000 du BRGM,
- les limites lithologiques (limites de deux formations géologiques ici les « Grès armoricains » dans la ZPP et les « Schistes de Pont-Péan » hors de la ZPP) des cartes géologiques au 1/50 000 du BRGM,
- et les limites des bassins versants des cours d'eau d'ordre 1 à 2 (Illustration n° 101).

A l'intérieur de cette ZPP, on retrouve la présence de nombreux forages avec des débits instantanés supérieurs à 40 m³/h et trois forages ANAFORE, ce qui atteste la présence d'eau souterraine.

Pour chaque ZPP de l'illustration n°102, le nombre d'arguments scientifiques présents sur la zone ont été notés. Ce nombre s'étale sur quatre valeurs de 1 à 4 (1 pour un argument scientifique et 4 pour 4 arguments scientifiques présents).

Ce nombre n'est pas un critère de qualité pour chaque zone puisque ANAFORE a montré que la présence d'eau souterraine était un assemblage de paramètres géologiques où il était difficile de déterminer les parts respectives de chacun, entre faille, lithologie, altération et histoire géologique.

Une ZPP avec un nombre d'arguments de 1 correspond à une zone délimitée par analogie avec la connaissance de zones similaires mise en évidence par l'analyse ANAFORE.

Il est possible de délimiter d'autres zones (ZPP) en s'appuyant sur les critères mis en évidence par le projet ANAFORE. Le travail peut être réalisé sur un territoire et une échelle plus circonscrite.

L'illustration n°102 est la carte des 38 ZPP délimitées sur la Bretagne à la suite de cette étude.

L'illustration n°103 correspond au tableau contenant les caractéristiques de ces 38 ZPP. Les superficies sont comprises entre 0,7 et 25 km².

La superficie totale des ZPP sur la Bretagne est de 295,5 km², et elles balayent l'ensemble des 10 typologies.

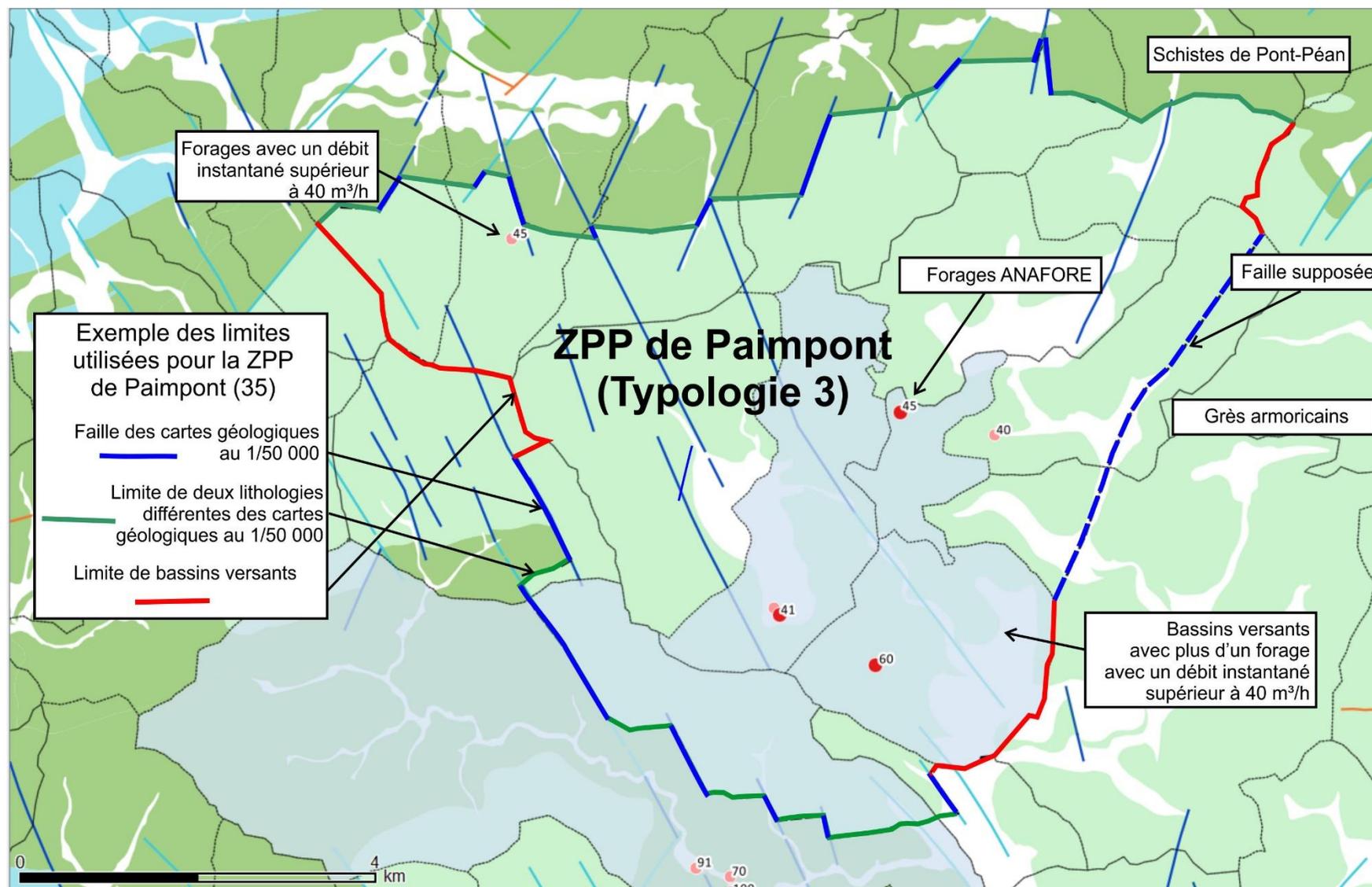


Illustration 101 : exemple de la limite composite pour la délimitation des ZPP, ici celle du secteur de Paimpont (35).

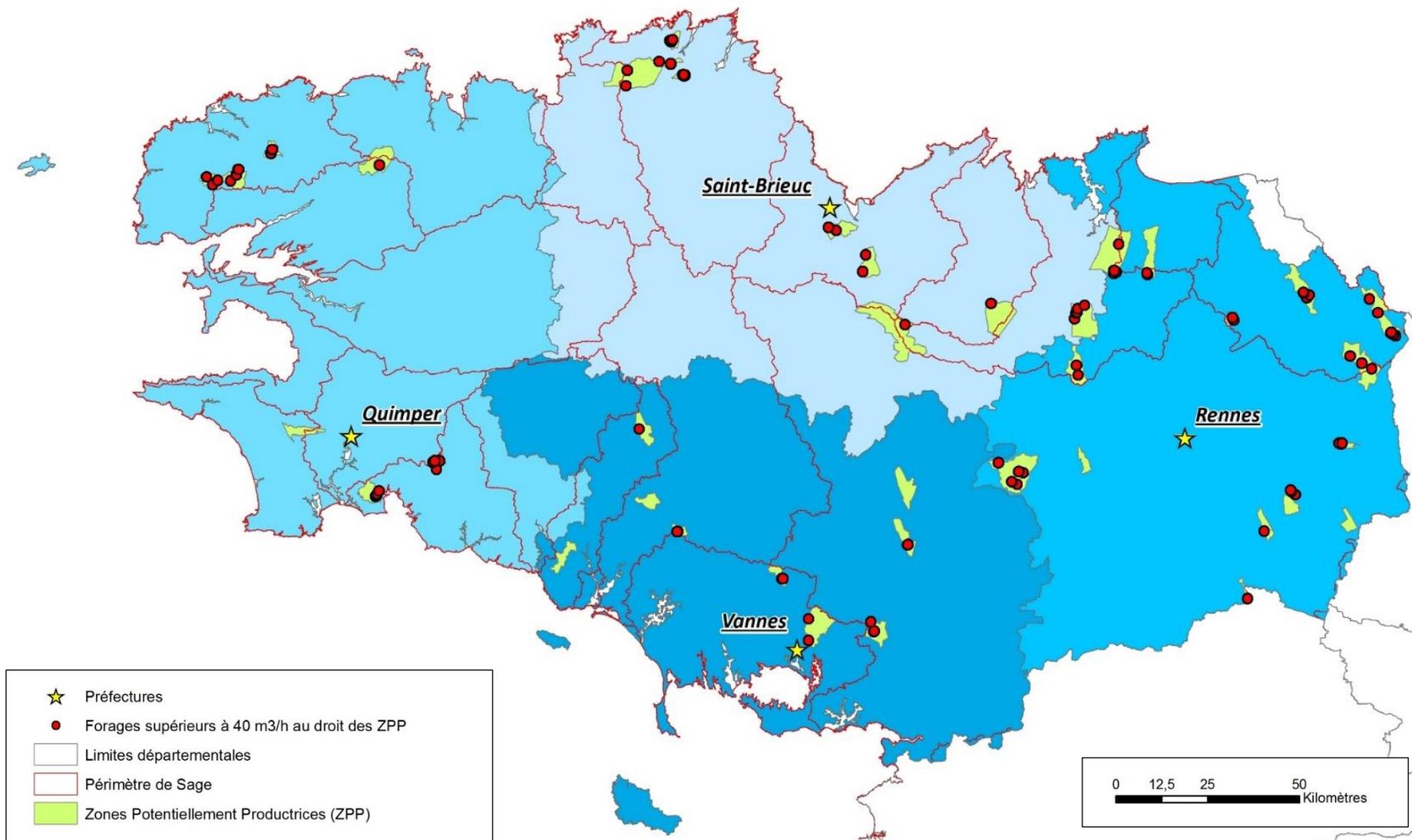


Illustration 102 : carte des 38 ZPP sur la Bretagne issues de l'étude ANAFORE

Identifiant	Nom du Projet	Département	SAGE d'appartenance	Nombre de forages ANAFORE de la ZPP	Nombre de forages avec un débit instantané supérieur à 40 m ³ /h dans la ZPP	Somme des débits supérieurs à 40 m ³ /h de la ZPP	Surface de la ZPP (en km ²)	Typologies ANAFORE de la ZPP	Nombre d'arguments scientifiques	Description succincte de l'aquifère de socle
5	ANAFORE	22	Argoat-Tregor-Goelo	1	5	463.0	2.81	8	2	Faïlle + altération
6	ANAFORE	22	Argoat-Tregor-Goelo - Baie de Lannion	1	9	950.0	22.41	9	3	Lithologie + Faïlle + Altération
7	ANAFORE	22	Argoat-Tregor-Goelo	1	8	875.0	0.71	9	2	Lithologie + Faïlle + Altération
8	ANAFORE	22	Rance, Fremur et Baie de Beausais	2	6	532.0	13.19	1 & 2	2	Faïlle + Lithologie + Altération
9	ANAFORE	22	Baie de Saint-Brieuc	2	2	80.0	6.25	1	1	Faïlle + Lithologie + Altération
22	ANAFORE	22	Baie de Saint-Brieuc	0	6	305.0	6.87	1	2	Faïlle + Lithologie + Altération
24	ANAFORE	22	Arguenon - Baie de la Fresnaye - Rance, Fremur et Baie de Beausais	2	1	50.0	13.45	5	2	Faïlle + Filon + Altération
38	ANAFORE	22	Vilaine - Baie de Saint-Brieuc - Arguenon - Baie de la Fresnaye - Rance, Fremur et Baie de Beausais	4	3	275.0	25.38	10	2	Faïlle + Altération
2	ANAFORE	29	Bas Leon	2	3	141.0	3.16	2	2	Faïlle + Altération
3	ANAFORE	29	Bas Leon	0	5	227.0	6.68	2	3	Faïlle + Altération
4	ANAFORE	29	Bas Leon	0	3	148.0	3.18	2	2	Faïlle + Lithologie + Altération
13	ANAFORE	29	Elorn - Leon-Tregor	0	3	130.0	10.98	2	2	Faïlle + Lithologie + Altération
14	ANAFORE	29	Ouest Cornouaille - Odet	0	0	0.0	5.07	8	1	Faïlle + Altération
25	ANAFORE	29	Sud Cornouaille	2	4	165.0	2.71	7	2	Faïlle + Altération + Lithologie
30	ANAFORE	29	Sud Cornouaille	3	6	325.0	5.91	8	3	Faïlle + Altération + Lithologie
11	ANAFORE	35	Vilaine	0	0	0.0	3.79	6	2	Faïlle + Lithologie
18	ANAFORE	35	Vilaine	0	4	260.0	5.81	6	2	Faïlle + Lithologie
19	ANAFORE	35	Vilaine	0	0	0.0	3.32	6	2	Faïlle + Lithologie
20	ANAFORE	35	Vilaine	0	1	300.0	0.97	6	1	Faïlle
21	ANAFORE	35	Rance, Fremur et Baie de Beausais	0	2	310.0	7.86	6	1	Faïlle + Altération
23	ANAFORE	35	Couesnon	2	4	281.0	9.39	1 & 2	3	Lithologie + Faïlle + Altération
29	ANAFORE	35	Vilaine	1	0	0.0	2.96	4	2	Faïlle + Lithologie
31	ANAFORE	35	Couesnon	1	6	375.0	11.23	1 et 2	3	Lithologie + Faïlle + Altération
32	ANAFORE	35	Couesnon - Vilaine	3	4	341.0	14.65	1	3	Lithologie + Faïlle + Altération
33	ANAFORE	35	Vilaine	3	8	485.0	19.66	3	4	Faïlle + Lithologie + Altération
34	ANAFORE	35	Bassins cotiers de la region de Dol de Bretagne - Rance, Fremur et Baie de Beausais	1	3	184.0	9.23	1 & 2	3	Faïlle + Filon + Lithologie + Altération
36	ANAFORE	35	Couesnon	1	2	209.0	1.93	2	2	Faïlle + Lithologie + Altération
37	ANAFORE	35	Vilaine	1	4	224.0	2.24	3	2	Faïlle + Lithologie
1	ANAFORE	56	Scorff	0	0	0.0	5.16	8	2	Faïlle + Altération + Lithologie
10	ANAFORE	56	Scorff	2	1	154.0	5.48	1	2	Faïlle + Lithologie + Altération
12	ANAFORE	56	Vilaine	1	4	235.0	6.94	7 & 2	2	Faïlle + Altération + lithologie
15	ANAFORE	56	Vilaine	0	3	280.0	6.04	1 & 2	3	Faïlle + Lithologie
16	ANAFORE	56	Golfe du Morbihan et ria d'Etel	0	2	298.0	12.15	7 & 2	1	Faïlle + Altération + Lithologie
17	ANAFORE	56	Vilaine	0	0	0.0	7.80	6	2	Faïlle + Lithologie
26	ANAFORE	56	Blavet	1	0	0.0	4.20	7	2	Faïlle + Altération + Lithologie
27	ANAFORE	56	Blavet	1	2	108.0	2.20	7	2	Faïlle + Altération + Lithologie
28	ANAFORE	56	Golfe du Morbihan et ria d'Etel	0	4	213.0	3.08	6	2	Faïlle + Altération + Lithologie
35	ANAFORE	22-35	Bassins cotiers de la region de Dol de Bretagne - Rance, Fremur et Baie de Beausais	2	6	373.0	20.67	1 & 2	3	Faïlle + Filon + Lithologie + Altération

Illustration 103 : tableau des 38 ZPP sur la Bretagne issues de l'étude ANAFORE

6. Conclusions de l'approche combinée : géologie - hydrogéologie

Les **analyses géologiques** ont montré que les 100 forages appartenant à une classification typologique de **10 typologies distinctes**, qui s'accordent avec la carte géologique et surtout à l'histoire géologique du Massif armoricain.

La **typologie 1** intitulée : « *Auréole de métamorphisme recoupée par des failles ou fractures NS, N150° et/ou N045°* », regroupe à **29%** des forages ANAFORE. La **typologie 2** intitulée : « *Une lithologie magmatique (granites, granodiorite) recoupée par des failles ou fractures NS, N150° et/ou N045°* », regroupe **17%**. La **typologie 3** intitulée : « *Synclinal paléozoïque recoupée par des failles ou fractures NS, N150° et/ou N045°* » regroupe **12%** des forages suivie par la **typologie 7** intitulée : « *Failles et fractures transtensives NS, N150° et/ou N045° recoupant le Cisaillement Sud Armoricaïn* », regroupe **10%**. Et enfin, la **typologie 8**, intitulée : « *Failles et fractures transtensives NS, N150° et/ou N045° au Sud du Cisaillement Sud Armoricaïn ou structures satellites ou réutilisant une structure ancienne* », regroupe **9%**.

Quatre typologies sont approximativement égales en effectif. Les **typologies : 4** intitulée : « *Profil d'altération sous le paléozoïque recoupé par des failles ou fractures NS, N150° et/ou N045°* », **et 5** intitulée : « *Filons magmatiques dans une lithologie des failles ou fractures NS, N150° et/ou N045°* », **regroupent chacune 6% des forages alors que les typologies : 6** : intitulée : « *Lithologie perméable dans une lithologie peu perméable recoupée par des failles ou fractures NS, N150° et/ou N045°* », **et 10** intitulée : « *Aquifère avec multi profils d'altération le long de la faille de Quessoy-Nort-sur-Erdre* », **regroupent respectivement 5% et 4% des forages.**

Enfin, une dernière typologie, la typologie **9**, intitulée : « *Lithologies effusives (volcanites) recoupées par des failles ou fractures transtensives N150° et N045° et/ou NS* », ne regroupe que **2%** des forages.

Ces typologies varient par leur contexte géologique et s'accorde sur un modèle de déformation tectonique post-hercynien (Illustration n°104).

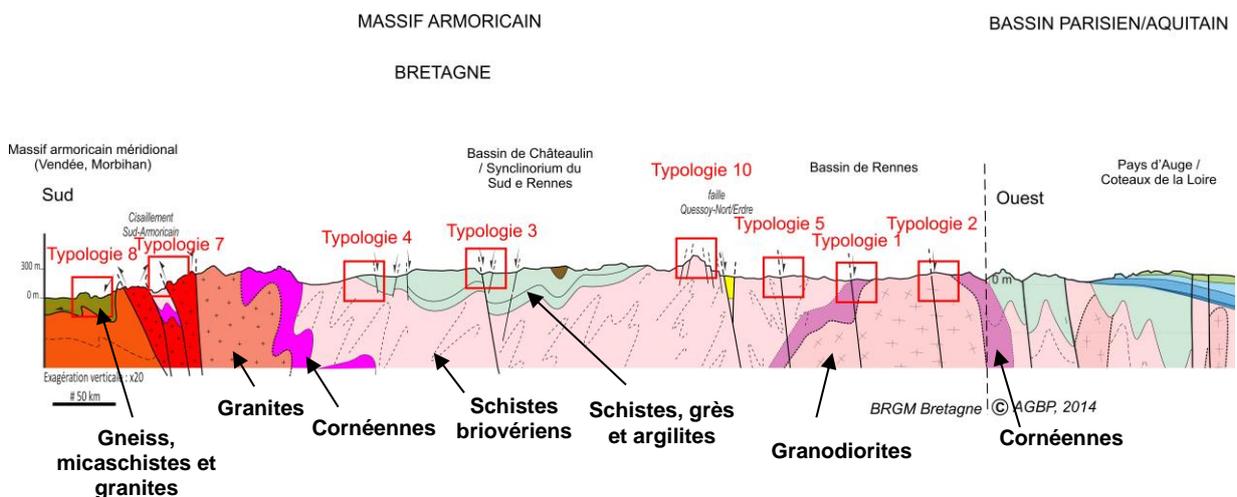


Illustration 104 : Coupe géologique du Massif armoricain jusqu'à sa bordure avec le bassin de Paris, et position des typologies ANAFORE (les typologies 6 et 9 n'ont pas pu être représentées).

A l'échelle du site :

1. les lithologies (la nature des roches) ne constituent pas à elles seules l'explication des aquifères productifs. Le raisonnement doit donc s'orienter vers les contextes géologiques. Les lithologies les plus compétentes mécaniquement pourraient bien être les lithologies les plus propices à la présence d'eau souterraine. Les roches ont pu acquérir cette compétence mécanique au cours des temps géologiques comme les coréennes par exemple ;
2. les failles sont omniprésentes sur les 100 sites avec des orientations dominantes et récurrentes : N150° +/- 10, NS +/- 10 et N045° +/- 10, correspondant à un système transtensif. Ces directions de failles/fractures sont les orientations préférentielles favorables à la recherche d'eau souterraine. Elles expliquent la présence de forages productifs dans des lithologies qui statistiquement montrent des débits instantanés moyens peu favorables. Dans certains secteurs, des failles anciennes de N070° à N090°, ont la bonne orientation pour être réactivées et participer à la création de structures perméables ;
3. l'altération est elle aussi omniprésente (avec au moins un profil d'altération par site). Soit ce profil d'altération est décalé par les failles, soit il existe plusieurs profils superposés ou emboîtés. Sur 4 sites d'ANAFORE, il existe jusqu'à environ 4 à 5 profils d'altération superposés-emboîtés et décalés par des failles N150° +/- 10 ;
4. la dualité/interaction entre les failles et l'altération semble être le paramètre important pour définir le caractère productif de chaque site, indépendamment des lithologies. Les failles décalent les profils d'altération, favorisent le développement d'un gradient hydraulique qui favorise le développement du ou des profils d'altération, et notamment leur enracinement le long des structures perméables ;
5. et l'altération crée une porosité d'altération qui vient se surimposer à une porosité de fracture liée à l'action des failles. Cette histoire pourrait avoir débuté dès la fin du Paléozoïque entre 300/250 millions d'années jusqu'après l'Eocène moyen (41 million d'années) pour l'essentiel et l'Oligocène (Le Rupélien).

Les **anaphores hydrogéologiques** apportent de nouvelles connaissances sur les propriétés des aquifères de socle du massif armoricain.

La mise en relation entre l'hydrogéologie et les éléments structuraux (anaphores géologiques) fournit des explications sur la répartition des sites à forte productivité à l'échelle régionale. L'analyse des directions des failles et de la fracturation montrent que les directions N150° à NS et leurs conjuguées (N045°) semblent être des directions à fort potentiel sur les sites ayant des écoulements de type fracture, et ceci est d'autant plus vrai qu'à l'échelle régionale, de nombreux sites se situent dans le faisceau des failles de Quessoy-Nord-Sur-Erdre ou encore dans le Sud Bretagne, au niveau de faille NS à N150° comme c'est le cas pour la typologie 8.

Les diagnostics de pompage montrent qu'une majorité des forages à fort débit, présentent aux temps courts des écoulements linéaires (fractures de dimension notable). Ces résultats pourraient souligner le fait que le rôle de failles ou de structures satellites est prépondérant.

Un second élément mis en avant par la réinterprétation des essais de pompage est l'importance des phénomènes de drainance observés sur de nombreux sites. Ces horizons sus-jacents peuvent être les alluvions ou les horizons d'altération. Même si de nombreux sites sollicitent des arrivées d'eau profonde, ce phénomène de drainance peut entraîner des

arrivées d'eau superficielles de qualité médiocre qui devra être pris en compte lors de l'exploitation des captages à cause de l'apport potentiel de contaminations.

En résumé, ces éléments montrent que pour de nombreux sites, la productivité est liée à la présence de failles dans lesquelles sont implantés les forages qui drainent par la suite des réservoirs plus larges (alluvions ; horizons d'altération). Très peu de sites présentent sur l'intégralité de leur essai de pompage des écoulements linéaires indiquant des failles ou contacts lithologiques de grande ampleur (Ploemeur, Guidel, Val-d'Izé...). Très peu de sites ne présentent pas de limites étanches, ce qui indique qu'une majorité de ces réservoirs sont d'extension limitée.

La réinterprétation des essais de pompages pour chaque forage lorsque ceux-ci étaient de bonne qualité et disponibles ont permis :

1. de montrer que le **fonctionnement hydraulique/hydrogéologique** de chaque site permettait aussi un classement typologique, au nombre de 5, depuis un comportement hydraulique dans une faille ou corridor de déformation de roches (1), à une faille puis de la drainance associée (2), à un comportement hydraulique radial homogène (3) puis à de la drainance associée (4) et enfin à de la compartimentation (5) (Illustration n°105).
2. de montrer une bonne **relation entre les comportements hydrauliques et la géologie** des sites ;
3. de montrer **l'importance de la fracturation** avec la dominance de la typologie hydraulique montrant un comportement hydraulique dans une faille ou un corridor de déformation de roches, et la mise en avant du rôle de la fracturation plutôt orientée N150° ;
4. de montrer **un fort lien avec la partie supérieure des aquifères** qui peut être de deux natures distinctes : soit alluviale (relation à la rivière) soit latéritique (relation avec l'altération) ;
5. de montrer la **limitation liée aux données des essais de pompages car hétérogènes ou incomplètes** (temps de pompage trop courts ou pompage interrompu) ;
6. et enfin, de montrer que les **débits d'exploitation ou critiques les plus élevés étaient localisés** et associés avec les structures tectoniques régionales de même orientation préférentielle que celle identifiée par l'analyse géologique sur trois zones à fort potentiel : la faille Quessoy-Nort-sur-Erdre (QN/E), le prolongement à terre des bassins éocènes majeurs marins du sud Bretagne et le secteur de Fougères.

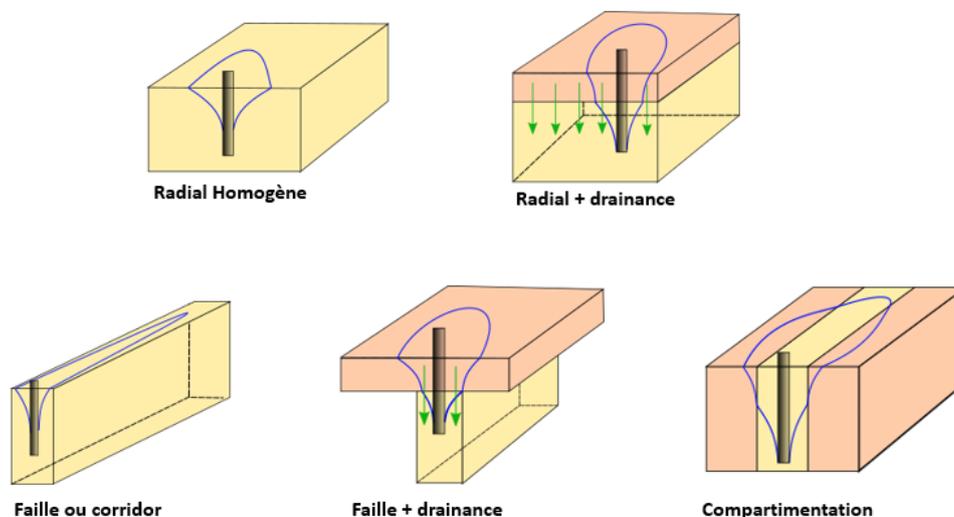


Illustration 105 : Classement des forages ANAFORE par typologie hydraulique/hydrogéologique

En résumé, cette étude a permis :

1. de mieux diagnostiquer ces circulations souterraines de ces réservoirs souterrains très productifs de Bretagne et de permettre une meilleure protection pour le futur ;
- 2.
3. de préciser comment mieux les rechercher, par la caractérisation des relations lithologies (histoire géologique), failles et l'altération des roches ;
4. et enfin, de définir quels secteurs peuvent être propices en eaux souterraines par la cartographie de 38 Zones Potentiellement Productives (ZPP).

Ces résultats et nouvelles compréhensions sont majeurs, notamment dans une perspective de changement climatique et d'augmentation de la demande. Ils permettront d'apporter des réponses opérationnelles à l'adaptation et à la bonne gestion de la ressource en eau en Bretagne.

7. Bibliographie

- 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>
- Ayraud, V., Aquilina, L., Pauwels, H., Labasque, T., Pierson-Wickmann, A.-C., Aquilina, A.-M., Gallat, G., 2006. Physical, biogeochemical and isotopic processes related to heterogeneity of a shallow crystalline rock aquifer. *Biogeochemistry* 81, 331–347. <https://doi.org/10.1007/s10533-006-9044-4>
- Ayraud, V., L. Aquilina, T. Labasque, H. Pauwels, J. Molenat, A. C. Pierson-Wickmann, V. Durand, O. Bour, C. Tarits, P. Le Corre, E. Fourre, P. Mérot, and P. Davy, 2008 - Compartmentalization of physical and chemical properties in hard rock aquifers deduced from chemical and groundwater age analyses, *Appl. Geochem.* 23/9, 2686-2707.
- 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>
- Berthe, D., Choukroune, P. et Gapais, D., (1979), « Quartz Fabrics and Progressive Gneissification of Granites By Simple Shear - Example of the South Armerican Shear Zone. » - *Bulletin de Minéralogie*, 102(2-3), 265-272.
- Berthe, D., Choukroune, P. et Jégouzo, P., (1979), « Orthogneiss, mylonite and non coaxial deformation of granites : the example of the South Armorican Shear Zone. » - *Journal of Structural Geology*, 1(1), 31-42.
- Bernard-Griffiths, J., Peucat, J.J., Sheppard, S. et Vidal, P., (1985), « Petrogenesis of Hercynian leucogranites from the southern Armorican Massif : contribution of REE and isotopic (Sr, Nb, Pb and O) geochemical data to the study of source rock characteristics and ages. », *Earth and Planetary Science Letters*, 74, 235-250.
- 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., 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., Ayoud J.A. and Prirard Y.M., 1989. Use of pressure derivative in well-test Deruyck B., Ehlig-Economides C. and Joseph J., 1992. Testing design and analysis. *Oilfield and analysis*. 28-45.

Bosse, V., Féraud, G., Ruffet, G., Ballèvre, M., Peucat, J.-J. et De Jong, K., (2000), « Late Devonian subduction and early-orogenic exhumation of eclogite-facies rocks from the Champtoceaux Complex (Variscan belt, France) », *Geological journal*, 35, 297-325.

Bourdet, Whittle T.M., Dougals, A.A., and Pirard V.M., 1983. A new set of type curves simplifies well test analysis, *World Oil*, 196, 95-106.

Bourdet D., Ayoud J.A. and Pirard Y.M., 1989. Use of pressure derivative in well-test interpretation, *SPE*, 293-302.

Brown, M. et Dallmeyer, R.D., (1996), « Rapid Variscan exhumation and the role of magma in core complex formation : southern Brittany metamorphic belt, France », *Journal of Metamorphic Geology*, 14, 361-379.

Brun, J.P., Guennoc, P., Truffert, C., Vairon, J. et Program, T.A.W.G.O.T.G.-D., (2001), « Cadomian tectonics in northern Brittany : a contribution of 3-D crustal-scale modelling. », *Tectonophysics*, 331, 229-246.

Brun, J.-P., Ballard, J.-F. et Le Corre, C., (1991), « Identification of Ordovician block-tilting in the Hercynian fold belt of Central Brittany (France) : field evidence and computer models. », *Journal of Structural Geology*, 13(4), 419-429.

Cagnard F., (2008), Carte géologique harmonisée du département du Finistère, BRGM/RP-56273-FR, 435 p., 12 fig., 2 tabl., 3 pl. hors-texte.

Carn, A., Thomas E., Jegou J.P., Branellec M., Loislard, Schroetter J.-M., 2008 – RAPSODI: Recherche d'Aquifères Profonds dans le SOcle du Département de l'Ille-et-Vilaine, Rapport final, BRGM/RP-56749-FR, 108 p., 68 ill.

Conan, C., Bouraoui, F., Turpin, N., de Marsily, G., Bidoglio, G., 2003. Modeling flow and nitrate fate at catchment scale in Brittany (France). *Journal of Environmental Quality* 32, 2026–2032.

Cooper H.H. and Jacob C.E., 1946. A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well field history. *Am. Geoph. Union Trans.* 27, 526-534.

Deruyck B., Ehlig-Economides C. and Joseph J., 1992. Testing design and analysis. *Oilfield and analysis*. 28-45.

Dewandel B, Lachassagne P, Wyns R, et al., 2006 - A generalized 3-D geological and hydrogeological conceptual model of granite aquifers controlled by single or multiphase weathering, *Journal of Hydrology*. 330/1-2, 260-284.

Dewandel, B, Petelet-Giraud, E et Lucassou, F, avec la collaboration de F. Kock et V. Vergnaud, 2015. Etudes complémentaires sur les forages de la vallée de l'Aff: Réinterprétation des essais de pompage, analyses physico-chimiques et isotopiques. Rapport final. BRGM/RP-64225-FR, 71p., 35 ill., 13 tabl., 3 ann.

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>

Dewandel, B., Aunay, B., Maréchal, J.C., Roques, C., Bour, O., Mouglin, B., Aquilina, L., 2014. Analytical solutions for analysing pumping tests in a sub-vertical and anisotropic fault zone draining shallow aquifers. *Journal of Hydrology* 509, 115–131. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.11.014>

Dewandel, B., Jeanpert, J., Ladouche, B., Join, J.-L., Maréchal, J.-C., 2017. 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., Caballero, Y., Perrin, J., Boisson, A., Dazin, F., Ferrant, S., Chandra, S., Maréchal, J.-C., 2017. A methodology for regionalizing 3-D effective porosity at watershed scale in crystalline aquifers. *Hydrological Processes* 31, 2277–2295. <https://doi.org/10.1002/hyp.11187> interpretation. *SPE*, 293-302.

Durand S., (1960), *Le Tertiaire de Bretagne : Etude stratigraphique, sédimentologique et tectonique*, Thèse d'état, Mémoire de la Société Géologique et Minéralogique de Bretagne, 389 p.

Estéoule-Choux J., (1967), *Contribution à l'étude des Argiles du Massif Armoricaire. Argiles des altérations et argiles des bassins sédimentaires tertiaires*, Thèse de doctorat, Université de Rennes, série C, n° d'ordre 63, n° de série 26, 319 p.

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>

Gapais, D., Lagarde, J.L., Le Corre, C., Audren, C., Jégouzo, P., Casas Sainz, A. et Van Den Driessche, J., (1993), « La zone de cisaillement de Quiberon : témoin d'extension de la chaîne varisque en Bretagne méridionale au Carbonifère. », *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris*, II (316), 1123-1129.

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>

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>

Graviou, P., Peucat, J.J., Auvray, B. & Vidal, P., (1988), « The Cadomian Orogeny in the Northern Armorican Massif : petrological and geochronological constraints on a geodynamic model. », *Hercynica*, 4(1), 1-13.

Gringarten, A., Ramey, H., Raghavan, R., 1974. Unsteady-state pressure distribution created by a well with a single infinite-conductivity vertical fracture. Society of Petroleum Engineers journal 347–360.

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.

Guillocheau, F. et Rolet, M., (1982), « La Sédimentation Paléozoïque Ouest-Armoricaine. », Bulletin de la Société Géologique et Minéralogique de Bretagne, 14(2), 45-62.

Guillocheau F., Bonnet S., Bourquin S., Dabard M.-P., Outin J.-M. et Thomas E., (1998), Mise en évidence d'un réseau de paléovallées ennoyées (paléorias) dans le Massif armoricain : une nouvelle interprétation des sables pliocènes armoricains, C.R. Acad. Sci., 327, 237-243.

Gutierrez, A., Dewandel, B. 2013. L'interprétation des pompages d'essai : quelles nouveautés ? Géologues, 178, 49-52.

Hantush M. S., 1961. Drawdown around partially penetrating well. Proc Am Soc Civil Eng 87:83–98

Hunt B., Scott D., 2005. Extension of Hantush and Boulton solutions. J Hydrol Eng 10(3):223–236.

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>

Le Corre, C., Auvray, B., Ballèvre, M. et Robardet, M., (1991), « Le Massif Armoricain. », Scientifical Geological Bulletin, 44(1-2), 31-103.

Le Hebel, F., Vidal, O., Kienast, J.R. et Gapais, D., (2002), « Les « Porphyroïdes » de Bretagne méridionale : une unité de HP-BT dans la chaîne hercynienne. », Comptes Rendus Geoscience, 334, 205-211.

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>

Le Borgne T., Bour O, Riley MS, Gouze P, Pezard PA, Belghoul A, Lods G, Le Provost R, Greswell RB, Ellis PA, Isakov E, Last BJ, 2007 - Comparison of alternative methodologies for identifying and characterizing preferential flow paths in heterogeneous aquifers. Journal of hydrology 345 (3-4): 134-148.

Martin C., 2010, Détermination de la sensibilité potentielle des roches cristallophylliennes à l'altération chimique à partir de leur composition chimique. Etudes de Géographie Physique, UMR 6012 "ESPACE" - Équipe G.V.E. 2010, XXXVII, pp.3-11.

Mauroux B., Wyns R., Castagnac C., Prognon C., Zammit C., Martelet G., Lions J., Touchard F. et Karnay G. avec la collaboration de Jaouen T. et Thomas E., 2009 - SILURES Limousin - module 1- SILURES « Base de données » Recueil des données, interprétations et bilans - Rapport final - Rapport BRGM/RP-57901-FR, 365 pages, 54 illustrations, 24 tableaux, 25 annexes.

Mougin B., Dewandel B., Petelet-Giraud, E, Schroetter, JM, Kock F. *etc.*, (*en cours*) Compréhension des forages de la vallée de l’Aff : Réinterprétation des essais de pompage, analyses physico-chimiques et isotopiques.

Mougin B., Allier D., Blanchin R., Carn A., Courtois N., Gateau C., Putot E., collaboration Jegou J.-P., Lachassagne P., Stollsteiner P. et Wyns R. (2008) - SILURES Bretagne - Rapport final - Année 5 - BRGM/RP-56457-FR - 129 p., 37 ill., 7 ann. 2 planches.

Morzadec-Kerfourn, M.,-T., (1974), Variation de la ligne de rivage armoricaine au Quaternaire : Analyses polliniques de dépôts organiques littoraux, Thèse d’état, Rennes, Mémoire de la Société géologique et minéralogique de Bretagne 17, 208 p.

Passchier, C.W., Trouw, R.A.J., 2005. *Microtectonics*, second ed. Springer-Verlag, Berlin.

Pauwels, H., Foucher, J.-C., Kloppmann, W., 2000. Denitrification and mixing in a schist aquifer: influence on water chemistry and isotopes. *Chemical Geology* 168, 307–324.

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](https://doi.org/10.1016/S0883-2927(98)00003-1)

Perrot J. et al., (2005), Analysis of the Mw 4.3 Lorient earthquake sequence : a multidisciplinary approach to the geodynamics of the Armorican Massif, westernmost France, *Geophysical Journal International*, 162, 935–950.

Penhate, A., (1994), « The Variscan - Carboniferous of the Armorican Massif » In : J. D. Keppie (Ed.), *Pre-Mesozoic Geology in France*, Springer Verlag, Berlin, pp. 162-168.

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>

Price NJ, Cosgrove J., 1990. *Analysis of Geological Structures*, Cambridge University Press, p. 502.

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>.

M. Ranjran, T. Gleeson and E. Luijendijk., 2015. Is the permeability of crystalline rock in the shallow crust related to depth, lithology or tectonic setting ?, *Geofluids* (2015) 15, 106–119

Robardet, M., Bonjour, J.L., Paris, F., Morzadec, P. et Rachebœuf, P.R., (1994), « Ordovician, Silurian, and Devonian of the Medio-North-Armorican Domain. » In : J. D. Keppie (Ed.), *PreMesozoic Geology in France and related areas*. - Springer Verlag, Berlin, pp. 142-151.

Roques, C., Bour, O., Aquilina, L., Dewandel, B., Leray, S., Schroetter, Jm., 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>

Roques C., Bour O., Aquilina L., Dewandel B., 2016. High-yielding aquifers in crystalline basement: insights about the role of fault zones, exemplified by Armorican Massif, France. *Hydrogeol. J.* doi:10.1007/s10040-016-1451-6

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., Longuevergne L., Dewandel B., Schroetter JM, Le Borgne T., Labasque T., Lavenant N., Hochreutener R. 2012 - Hydrodynamic and geochemical characterization of deep hard rock aquifer (Saint-Brice en Cogless, French Brittany) - IAHS Conference, 2012

Ruhland M (1973) Méthode d'étude de la fracturation naturelle des roches associées à divers modèles structuraux. *Bulletin des Sciences Géologiques* 26: 91–113.

Schlumberger, 2002. Well-test interpretation, SCHLUMBERGER. Rap. 122 p.

Sibson, R.H., 1977. Fault rocks and fault mechanisms. *Journal of the Geological Society*, 133(3), 191-213.

Singhal B. B. S., Gupta R. P., 2010. *Applied Hydrogeology of Fractured Rocks Second Edition* 10.1007/978-90-481-8799-7.

Spane F.A. and Wurstner S.K., 1993. DERIV: a computer program for calculating pressures derivatives for use in hydraulic test analysis.

Talbo, H., Duermael, G., 1995. Contribution à l'actualisation du schéma régional d'alimentation en eau potable; Nouvelles ressources en eau souterraine potentiellement mobilisables. BRGM.

Tarits, C., Aquilina, L., Ayraud, V., Pauwels, H., Davy, P., Touchard, F., Bour, O., 2006. Oxidoreduction 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 piezo metric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage. *Trans. Am. Geoph. Union*, 16, 519-524.

Wyns. R., Guillocheau. F., (1999), Géomorphologie grande longueur d'onde, altération, érosion et bassins épicontinentaux., in Résultats et perspectives, LEDRU.P. (Ed), GéoFrance 3D - résultats et perspectives - ENS - Lyon - France - 23-24/11/1999, Documents BRGM, Orléans : Editions BRGM, N° 293, pp.103-108.

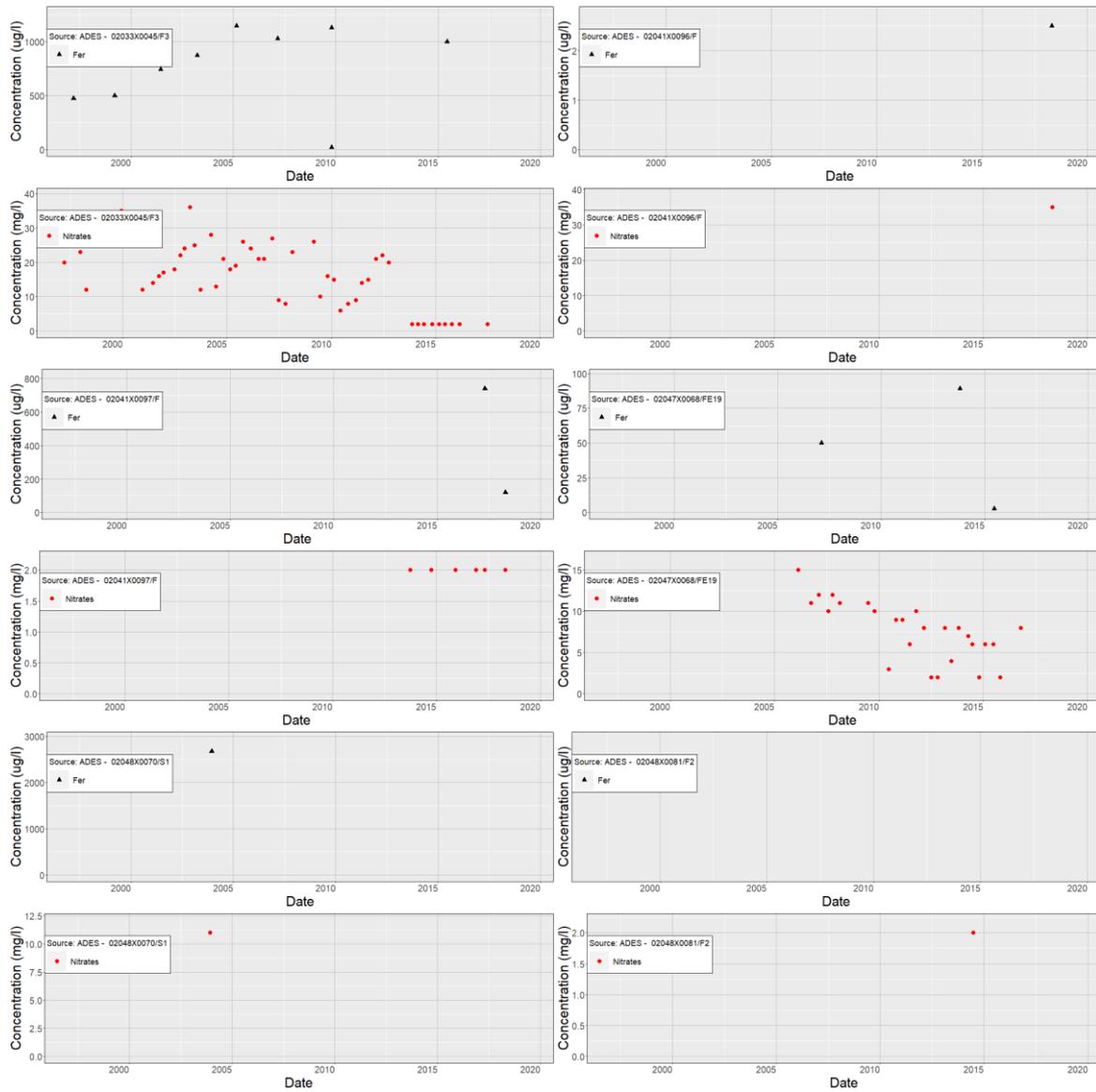
Wyns, R. (1998) - Ressources en eau de la Margeride ouest - PRD 324 - Modélisation de la géométrie (altitude, épaisseur) des arènes granitiques du bassin-versant lozérien de la Truyère (Lozère, Massif Central). Rapport BRGM R 40191, 18 p., 9 fig., 4 pl. hors-texte.

Wyns, R., Baltassat J.M., Lachassagne P., Legchenko A., Vairon J., (2004) - Application of SNMR soundings for groundwater reserves mapping in weathered basement rocks (Brittany, France).- *Bull. Soc. Géol. Fr.*, t. 175, (1).

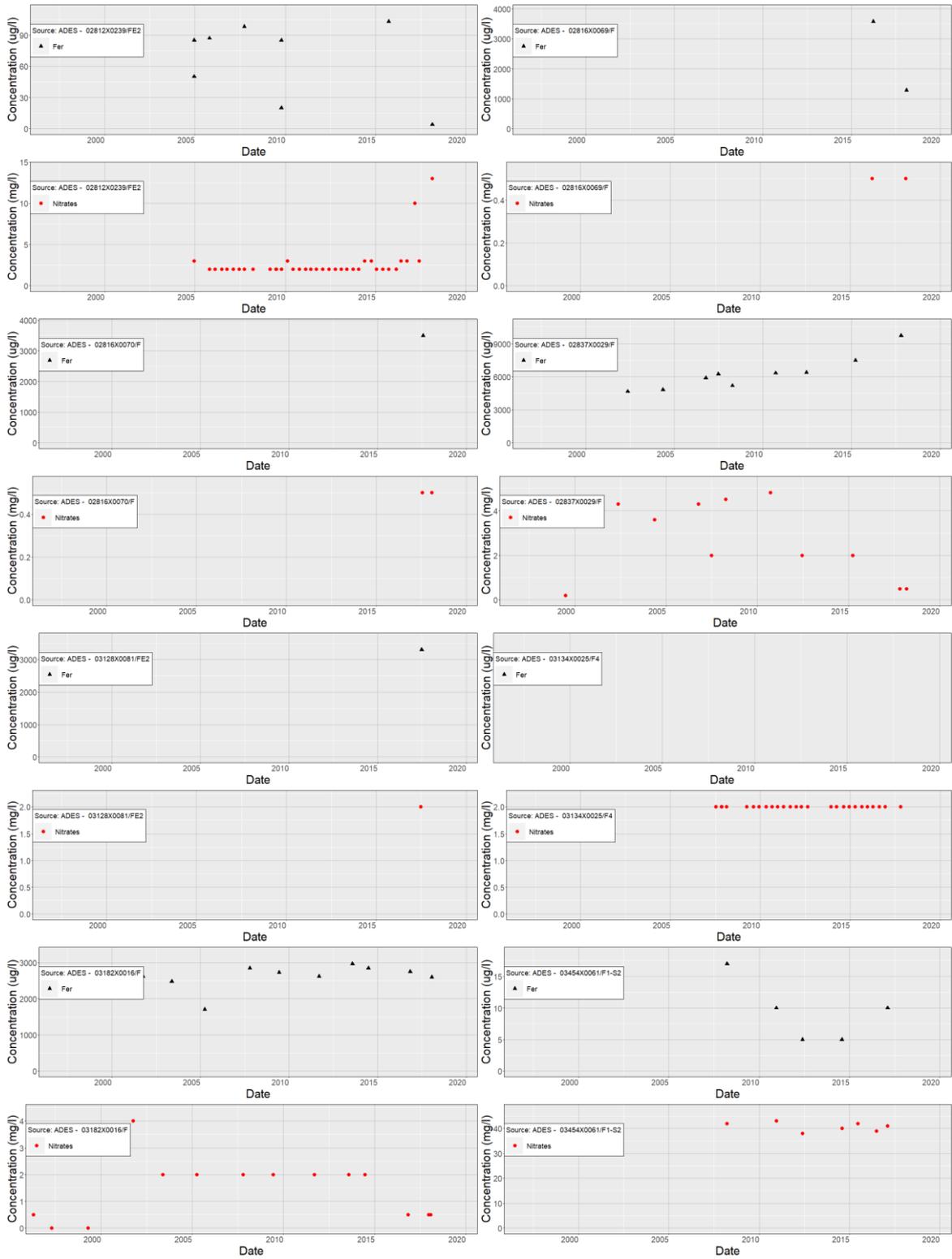
8. Annexes 1 & 2 :

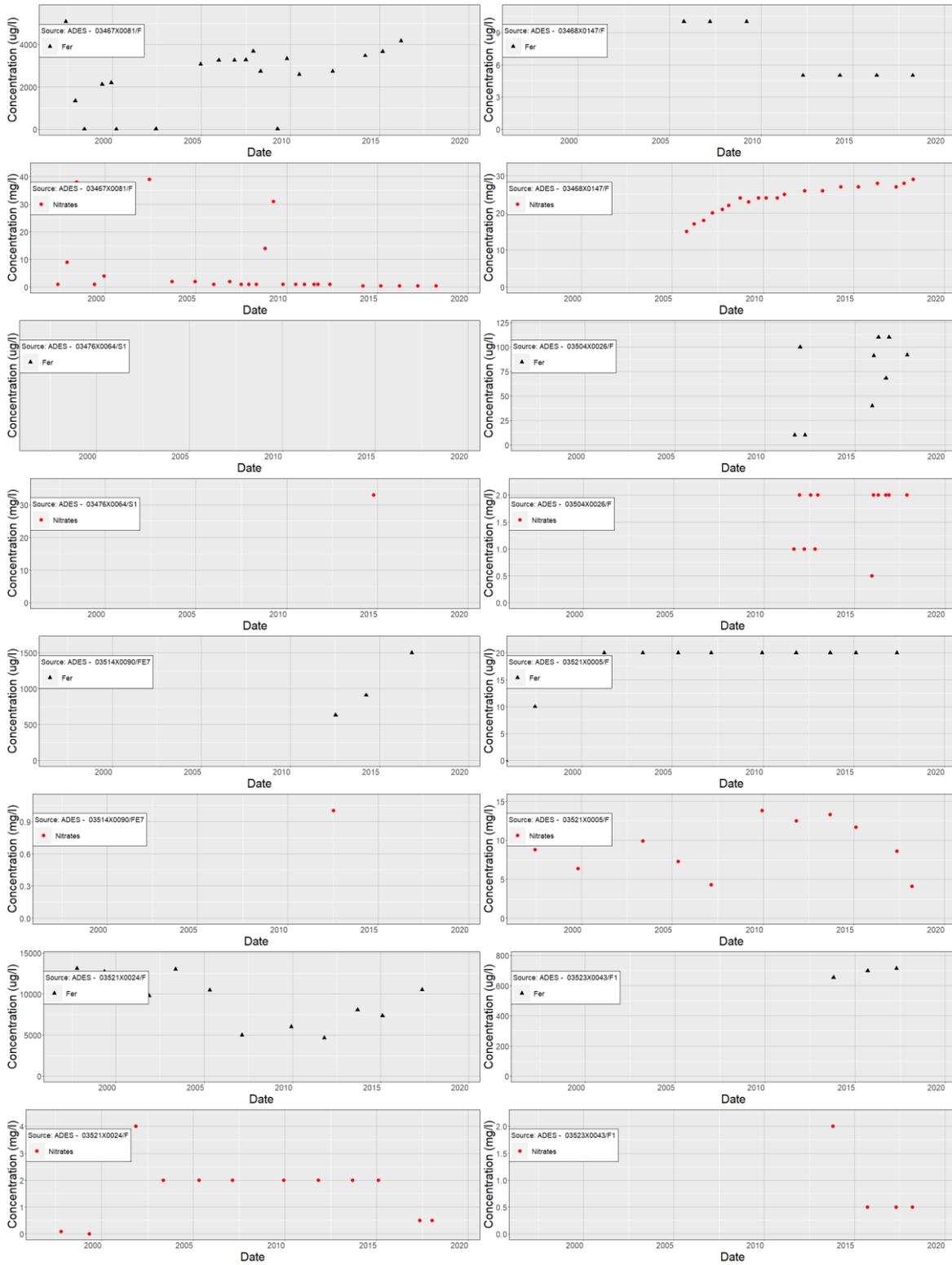
Carte des ZPP du projet ANFORE

Chroniques analysées sur la qualité des eaux extraites d'ADES des forages d'ANAFORE













Géosciences pour une Terre durable

brgm

Centre scientifique et technique
3, avenue Claude-Guillemain
BP 36009
45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34 - www.brgm.fr

Direction Régionale BRETAGNE
Atalante Beaulieu – 2, rue de Jouanet
35700 – Rennes – France
Tél. : 02 99 84 26 70 – Fax : 02 99 84 26 79