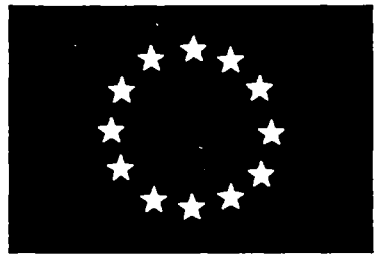
agence de l'eau loire ~ bretagne

Ministère chargé de la santé
DDASS de la Mayenne
Service Santé-Environnement

La Mayenne
élargissez vos horizons !

DOCUMENT PUBLIC

Ressources en eau profonde de qualité et dénitrification naturelle en Mayenne



Étude cofinancée par l'Union Européenne.
Fonds européen de développement régional

Étude réalisée dans le cadre des actions de service Public du BRGM 97-J-205

juillet 1997
r39643

BRGM
L'ENTREPRISE AU SERVICE DE LA TERRE

Cette étude a été réalisée avec la participation du Groupement Départemental de Défense Sanitaire du Bétail de la Mayenne (GDDSBM)

Mots clés : Ressources en eau, socle, Massif Armoricain, Mayenne, dénitrification

En bibliographie ce rapport sera cité de la façon suivante :

G. DUERMAEL, Ressources en eau profonde de qualité et dénitrification naturelle en Mayenne

© BRGM, 1997,ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM

Synthèse

La présente étude met en évidence le potentiel en eaux souterraines dans le département de la Mayenne, en précisant la valeur des ressources mobilisables les plus probables. Elle définit les formations géologiques les plus aptes à les fournir et, dans ces formations, les zones qui apparaissent les plus favorables.

Le plus grave problème qui affecte aujourd'hui les ressources en eau est celui de la qualité, et notamment de sa dégradation par les nitrates : le phénomène de dénitrification naturelle est donc un élément fondamental pour la prise en compte de ces eaux souterraines, malgré l'obligation de les traiter par déferrisation.

La partie quantitative de cette étude comporte 3 volets :

- une sélection des zones les plus favorables où l'accès à l'eau souterraine apparaît le plus facile. Cette sélection, réalisée à partir du traitement des données de plus de 670 forages sélectionnés parmi les 1085 recensés, doit permettre d'éviter la dispersion des travaux de terrain et d'en limiter le coût.

- une évaluation des ressources mobilisables dans chaque zone reconnue favorable. Basée sur des hypothèses raisonnables quant au pourcentage d'eau infiltrée mobilisable, cette évaluation constitue un objectif que l'on peut considérer comme accessible.

- une évaluation des investissements nécessaires pour atteindre les objectifs de production.

Ces résultats, affectés d'une marge d'approximation, "concrétisent" la ressource potentielle en eau souterraine et apportent quelques éléments de décision quant aux zones où les recherches et la mise en exploitation d'eau souterraine peuvent être envisagées en priorité.

Ce sont les schistes et calcaires du Cambrien de la région de Châtres, les schistes et grès du Culm et les schistes et grès du Briovérien sud qui présentent les caractères les plus favorables.

Les très grandes zones couvertes par les granites d'une part, ainsi que celles des schistes et calcaires de Sablé et de Laval d'autre part, sont également favorables, à un degré légèrement moindre cependant.

Les hypothèses de travail adoptées pour cette étude aboutissent globalement à la possibilité d'exploiter dans les zones favorables jusqu'à 17 000 m^3/jour (6,3 millions de m^3/an) et 42 000 m^3 (15,4 millions de m^3/an). Ceci impliquerait la réalisation de 40 à 80

forages positifs qui auront nécessité entre 17 000 à 34 000 mètres de sondages de reconnaissance.

La partie qualitative s'appuie sur 537 analyses, dont plus de 200 ont été recueillies auprès de la DDASS et de particuliers, et plus de 300 recueillies auprès du Groupement de Défense Sanitaire (GDS).

Les résultats, portant sur les nitrates, le fer et les sulfates sont particulièrement intéressants quant aux processus de dénitrification naturelle :

- La plupart des formations géologiques présentent de bonnes proportions d'indices de dénitrification naturelle : de 22 % pour les schistes et calcaires cambriens à 80 % pour les Grès de Gahard.

- Au-delà de 30 m de profondeur, toutes formations géologiques confondues, il n'y a plus que 16 % de forages présentant une eau à plus de 40 mg/l de nitrates; 26 % présentent une eau naturellement peu -voire pas- chargée en nitrates et plus de 56% bénéficient du phénomène de dénitrification naturelle. Par ailleurs, les pourcentages d'eau dénitrifiée, dans chaque formation, sont en très nette augmentation par rapport à la statistique portant sur l'ensemble des forages, toutes profondeurs confondues.

Des analyses isotopiques ont été réalisées sur les eaux recueillies à diverses profondeurs au cours du creusement de 3 forages :

- pour ces 3 forages, les eaux ont une composante générale récente (donc eau "non fossile"),

- les fortes baisses en nitrates en profondeur correspondent le plus souvent à des eaux non tritiées (donc antérieures à 1952),

- une partie des débits des tranches supérieures est mise "hors course" lors du soufflage : il ne s'agit donc pas là d'un débit maximum instantané.

Sommaire

Introduction **6**

1. Cadre Géologique **9**

1.1. L'unité septentrionale 9

1.1.1. Le Briovérien : séries sédimentaires / métasédimentaires protéorozoïques 13
1.1.2. Les granitoïdes protérozoïques 13
1.1.3. Les séries sédimentaires et volcaniques paléozoïques 14
1.1.4. La couverture cénozoïque 17
1.1.5. Structure de l'unité septentrionale 17

1. 2 - L'unité Centrale 19

1.2.1. les séries sédimentaires et volcaniques paléozoïques 19
1.2.2. La couverture cénozoïque 24
1.2.3. Structure de l'unité centrale ; le synclinorium de Laval 24

1.3. L'unité Méridionale 25

1.3.1. Le Briovérien : séries sédimentaires / métasédimentaires protérozoïques 25
1.3.2. Les séries sédimentaires paléozoïques 27
1.3.3. Le granitoïde paléozoïque 28
1.3.4. La couverture cénozoïque 28
1.3.5. Structure de l'unité méridionale 28

1.4. Conclusion : géologie et approche des ressources en eau 29

2. Résultats des études statistiques sur les forages **33**

2.1 Etude statistique globale des forages 33

2.2. Classes d'intérêt des formations géologiques 34

2.3. Productivité des forages et structures géologiques 38

3. Essai de bilans de ressources **43**

3.1. Principe général 43

3.2. Alimentation des nappes souterraines en Mayenne 43

3.3. Formations et zones les plus intéressantes 46

4. Qualité des eaux **50**

4.1. Analyses recueillies 50

4.2. Interprétation 50

4.3. Résultats 51

4.4. approche de la denitrification naturelle par prelevements echelonnes 54

4.4.1. paramètres chimiques (NO3, Fe, SO4) 55
4.4.2 - Analyses isotopiques 57

5. Recommandations d'exploitation 64

5.1. Conditions de routine 64

5.2. Besoins de pointe 64

6. Conclusions 65

Liste des figures

Figure 1 : Principaux domaines géologiques du Massif Armoricain

Figure 2 : Carte géologique de la Mayenne

Figure 3 : Lithostratigraphie de l'unité septentrionale

Figure 4 : Lithostratigraphie de l'unité centrale

Figure 5 : Lithostratigraphie de l'unité méridionale

Figure 6 : Classement des formations géologiques par ordre d'intérêt (Mayenne)

Figure 7 : Classement des formations géologiques par ordre d'intérêt (Bretagne)

Figure 8 : Productivité des forages et accidents structuraux

Figure 9 : Précipitations efficaces moyennes annuelles (1946-1976)

Figure 10 : Carte des zones favorables aux ressources complémentaires

Figure 11: Emplacements des prélèvements et types d'eaux

Figure 12 : Droite de référence delta D/delta ^{18}O

Liste des tableaux

Tableau 1 : Forages existants - données et résultats

Tableau 2 : Formations géologiques et regroupements

Tableau 3 : Classement par ordre d'intérêt

Tableau 4 : Récapitulatif des ressources et coûts

Tableau 5 : Résultats des analyses

Tableau 6 : Ressources en eau souterraine profonde - suivi des forages et prélèvements

Tableau 7 : Ressources en eau souterraine profonde - débits instantanés et teneurs en nitratres

Liste des annexes

Annexe 1 : Evaluation des nouvelles ressources en eau souterraine mobilisables pour l'AEP

Annexe 2 : Quelques notions générales sur les eaux souterraines en pays de socle

Annexe 3 : Démarches et méthodes

Annexe 4 : Evaluation des coûts

Annexe 5 - High-rate denitrification from several electron donors in a schist aquifer

Introduction

CONTEXTE

Le département de la Mayenne est alimenté à 65 % par de l'eau de surface traitée et à 35 % par de l'eau souterraine (également traitée, mais à un degré nettement moindre). En outre, presque la moitié des ressources d'eau souterraine actuellement exploitées est issue de puits ou forages peu profonds : elle est donc menacée par l'accroissement des teneurs en nitrates et devra, à terme, être remplacée.

Sur le plan quantitatif, les deux composantes de la ressource en eau -souterraine et superficielle- sont intimement liées ; elles ne peuvent donc être concurrentes, et se présentent comme complémentaires. Les eaux souterraines sont minoritaires en Mayenne pour la production d'eau potable, en raison des débits unitaires modestes des forages et de leur disponibilité dispersée dans l'espace. Elles peuvent cependant contribuer de façon efficace au renforcement des ressources en eau potable si l'on prend en compte et accepte les contraintes qu'elles imposent :

- la grande hétérogénéité des résultats, liée à la nature du sous-sol et aux phénomènes de fracturation, nécessite de disposer d'un grand nombre d'informations pour dégager des propriétés relatives au potentiel de captage.

- il faut accepter une part d'incertitude dans les recherches appliquées, même si les études hydrogéologiques réduisent notablement l'incidence du hasard.

- dans ce contexte hydrogéologique, les forages positifs doivent être multipliés pour que des volumes d'eau importants puissent être exploités.

Sur le plan qualitatif, l'eau souterraine -si on va la chercher assez en profondeur- bénéficie très souvent du phénomène de dénitrification naturelle ; l'eau dénitrifiée nécessite certes presque toujours un traitement de déferrisation, mais elle présente l'avantage d'être quasiment exempte de nitrates (< 2 mg/l) et de pouvoir être utilisée pour des mélanges, afin de diluer d'autres eaux trop chargées en nitrates.

Il faut rappeler, en outre, que la législation en vigueur pour les eaux de distribution stipule que les eaux de surface brutes (avant traitement) doivent présenter une teneur en nitrates inférieure à 50 mg/l, alors que les eaux souterraines peuvent aller jusqu'à 100 mg/l. Ces dispositions ouvrent des perspectives pour l'utilisation des eaux souterraines en tant que ressource complémentaire.

OBJECTIFS

L'objectif essentiel de l'étude est de fournir aux décideurs les données nécessaires avant la mise en oeuvre de nouvelles ressources en eau : il s'agit donc de déterminer des zones dans lesquelles on pourra exploiter des débits intéressants d'eau souterraine, et d'y estimer les quantités mobilisables.

Sur le plan quantitatif, cette étape doit être le dernier pas avant l'intervention des bureaux d'études qui délimiteront les sites de captages et positionneront les emplacements des ouvrages.

Il s'agira d'abord d'estimer, par zones d'affleurements des formations géologiques, les volumes d'eau transitant par la nappe (à partir des pluies efficaces et de l'infiltration), puis les quantités d'eau mobilisables.

Ensuite, compte tenu des résultats obtenus par l'étude statistique des forages, estimer le nombre de forages d'exploitation nécessaires pour atteindre ces quantités mobilisables.

Enfin, grâce au calcul des probabilités de succès, estimer le nombre d'essais, les métrés de sondages de reconnaissance à effectuer, et arriver ainsi au chiffrage approximatif du coût de l'opération (coût global et coût ramené au m^3).

Sur le plan qualitatif, il s'agit de délimiter au mieux les formations dans lesquelles la dénitrification naturelle se développe, et de déterminer les profondeurs à partir desquelles elle commence à se manifester.

En complément de cette étude, des analyses isotopiques permettront de préciser ce phénomène de dénitrification naturelle, notamment en "datant" les eaux dénitrifiées.

METHODES

L'étude quantitative donnera deux types de résultats :

- les quantités d'eau transitant par le sous-sol: la méthode de calcul fait intervenir les pluies efficaces (= pluies non réévaporées ou transpirées par les végétaux) et une estimation des pourcentages de ruissellement et d'infiltration (à partir du traitement d'hydrogrammes sur des cours d'eau du Massif Armoricain),

- les débits mobilisables: ces valeurs sont obtenues à partir de traitements statistiques sur le plus grand nombre possible de forages dans chaque formation géologique.

Pour chaque population de forages, on détermine le pourcentage d'ouvrages ayant fourni au soufflage un débit supérieur à 10 m^3/h (ce qui permettra d'évaluer un "taux de

réussite"), ainsi que le débit moyen du meilleur quartile (que l'on considérera comme un objectif de débit). Ces hypothèses de travail s'appuient sur les résultats d'enquêtes réalisées sur des terrains identiques du Massif Armoricain en Bretagne: il apparaît en effet que, dans une même formation géologique, les forages réalisés à l'issue d'études hydrogéologiques fournissent des débits d'exploitation (définis après pompages d'essais) voisins des débits au soufflage observés sur les forages implantés au hasard, et que le taux de réussite est, en moyenne, deux fois plus important.

L'étude qualitative s'appuie sur la distinction entre 4 types d'eau possibles, sur le plan des nitrates et de la dénitrification :

- eau peu nitratée : moins de 25 mg/l de nitrates, pas de fer
- eau nitratée : plus de 25 mg/l de nitrates, pas de fer
- eau dénitrifiée : moins de 2 mg/l de nitrates présence de fer et de sulfates
- eau mélangée : mélange d'eau dénitrifiée avec de l'eau de surface nitratée, présence simultanée de nitrates, de fer et de sulfates.

L'étude statistique sur toutes les analyses comportant des teneurs en nitrates, fer et sulfates permet de classer les eaux analysées dans une de ces quatre catégories; dans tous les cas où l'on observe une eau dénitrifiée ou mélangée, il y a présence du phénomène de dénitrification naturelle en profondeur.

1. Cadre Géologique

Le Massif armoricain est l'un des deux principaux massifs cristallins de France. Il est principalement constitué de terrains d'âge protérozoïque (Précambrien supérieur) et paléozoïque (Primaire) (670 à 280 Ma) qui ont été affectés par deux événements orogéniques successifs (formation de chaînes de montagne) : l'orogenèse cadomienne (580 à 540 Ma) et l'orogenèse varisque (ou hercynienne, 360 à 320 Ma). Suite à cette longue évolution, il apparaît composé de trois domaines structuraux majeurs : les domaines nord-armoricain, centre-armoricain et sud-armoricain, séparés par des discontinuités tectoniques fondamentales, les cisaillements nord-armoricain et sud-armoricain (fig. 1).

Le département de la Mayenne est situé au nord-est du Massif armoricain où il s'étend pour partie sur les domaines nord et centre-armoricain ; il comprend ainsi trois grandes unités litho-structurales (fig. 2).

- une unité septentrionale, caractérisée d'une part par des dépôts terrigènes (Briovérien) recoupés par le batholite granitique de la Mancellia, d'âge protérozoïque (ces deux entités formant 80 % de cette unité) et d'autre part par des séries de plate-forme, terrigènes et/ou carbonatées, d'âge paléozoïque inférieur et moyen, discordantes sur les unités antérieures ;

- une unité centrale, comportant des séries sédimentaires et volcaniques d'âge ordovicien à dévonien et de plus caractérisée par d'importantes séries d'âge carbonifère ; ces dernières sont associées à l'ouverture du "bassin de Laval" lors du fonctionnement du cisaillement nord-armoricain.

- une unité méridionale formée, principalement, par des dépôts terrigènes d'âge protérozoïque (Briovérien), et localement par des séries sédimentaires d'âge paléozoïque.

Enfin toutes ces unités anté-mésozoïques, fortement structurées, sont localement surmontées par une couverture sédimentaire discordante d'âge cénozoïque.

1.1. L'UNITE SEPTENTRIONALE

Elle s'étend au nord d'une ligne WNW-ESE Juvigné-Blandouët et couvre ainsi toute la moitié septentrionale du département de la Mayenne (fig.3).

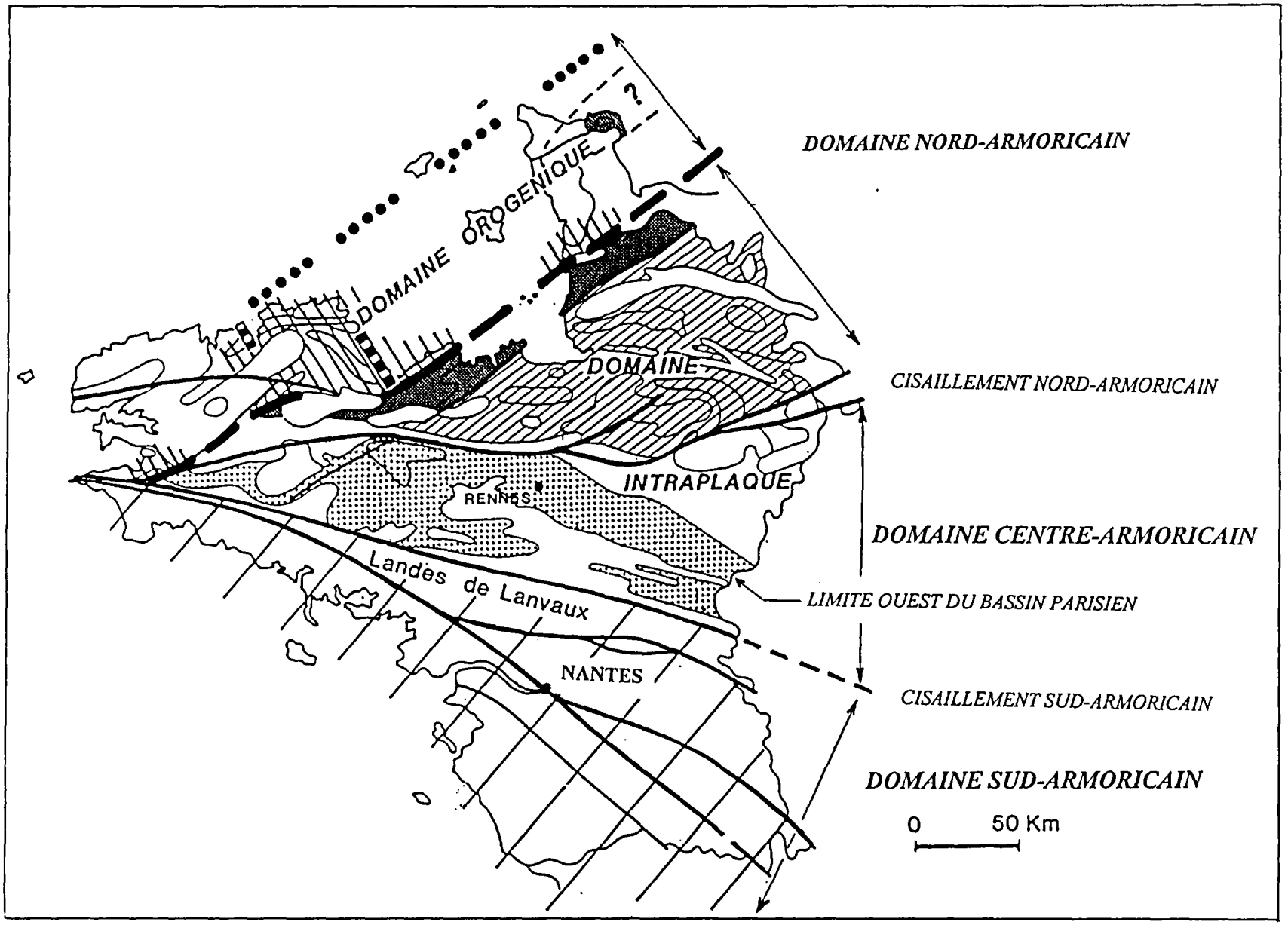


Figure 1 : Principaux domaines du Massif armoricain et de ses marges

Granodiorite de Passais-le-Horps

Synclinal de Domfront-Mortain

N

Alpes Mancelles

Granodiorite de Fougères

CHANTRIGNE

Granodiorite de St-Pierre-des-Nids

Massif de Pail

Unité septentrionale

Synclinal de la Forêt de Mayenne

MAYENNE

Synclinal de Villaines-la-Juhel

Granodiorite d'Izé

EVRON

Synclinal des Coëvrons

Granodiorite d'Alexin-deux-Evailles

LAVAL

Synclinal de la Charnie

Unité méridionale

CRAON

CHEMAZE

Unité centrale (Synclinorium de Laval)

0 5 10
Kilomètres

Légende
Stratigraphie et lithologie

- Holocène : alluvions fluviatiles récentes
- Pléistocène : alluvions fluviatiles anciennes
- Pliocène-Miocène : sables, calcaires et marnes
- Pléistocène-Pliocène : sables, argiles et cailloutis
- Pliocène à Eocène : sables, argiles et cailloutis
- Oligocène-Eocène : grès et calcaires silicifiés, dalles indurées
- Cénomanien-Albien : sables, marnes, craie et argile
- Stéphanien : grès, houille et conglomérats
- Namurien-Viséen sup. : schistes et grès, houille
- Viséen inférieur-Tournaisien : calcaires
- Viséen inférieur-Tournaisien : calcaires, faciès récifal
- Tournaisien-Dévonien sup. : schistes et grès, faciès Culm
- Tournaisien-Dévonien sup. : volcanites acides, rhyolites, dacites, tufs acide
- Tournaisien-Dévonien sup. : volcanites basiques, basaltes, andésites, tufs ba
- Dévonien inf. : grès et calcaires
- Silurien : schistes carbonés et grès
- Silurien : schistes carbonés, grès quartziques
- Silurien : schistes et quartzites
- Silurien : volcanites basiques, basaltes
- Ordovicien sup. : schistes
- Ordovicien sup. : schistes ardoisiers et grès
- Ordovicien : grès et schistes
- Ordovicien moy-sup : schistes noirs ardoisiers, schistes et grès
- Ordovicien moy-sup. : schistes noirs ardoisiers, schistes et grès, schi
- Ordovicien moy. : schistes noirs ardoisiers
- Ordovicien inf. : grès quartziques
- Cambrien sup. : schistes et grès
- Cambrien moy. : grès feldspathiques
- Cambrien moy. : volcanites acides, rhyolites, dacites, tufs acides
- Cambrien inf. : conglomérats et arkoses
- Cambrien inf. : schistes et calcaires, conglomérats
- Protérozoïque sup.- Cambrien : schistes et grès
- Protérozoïque sup. : schistes et grès
- Protérozoïque sup. : schistes tachetés et cornéennes
- PALEOZOIQUE : leucogranites
- PROTEROZOIQUE-PALEOZOIQUE : diorites, gabbros
- PROTEROZOIQUE-PALEOZOIQUE : granodiorites
- PROTEROZOIQUE-PALEOZOIQUE : leucogranites
- PROTEROZOIQUE-PALEOZOIQUE : microgranites, leucogranites

Fig.2 : Géologie du département de la Mayenne

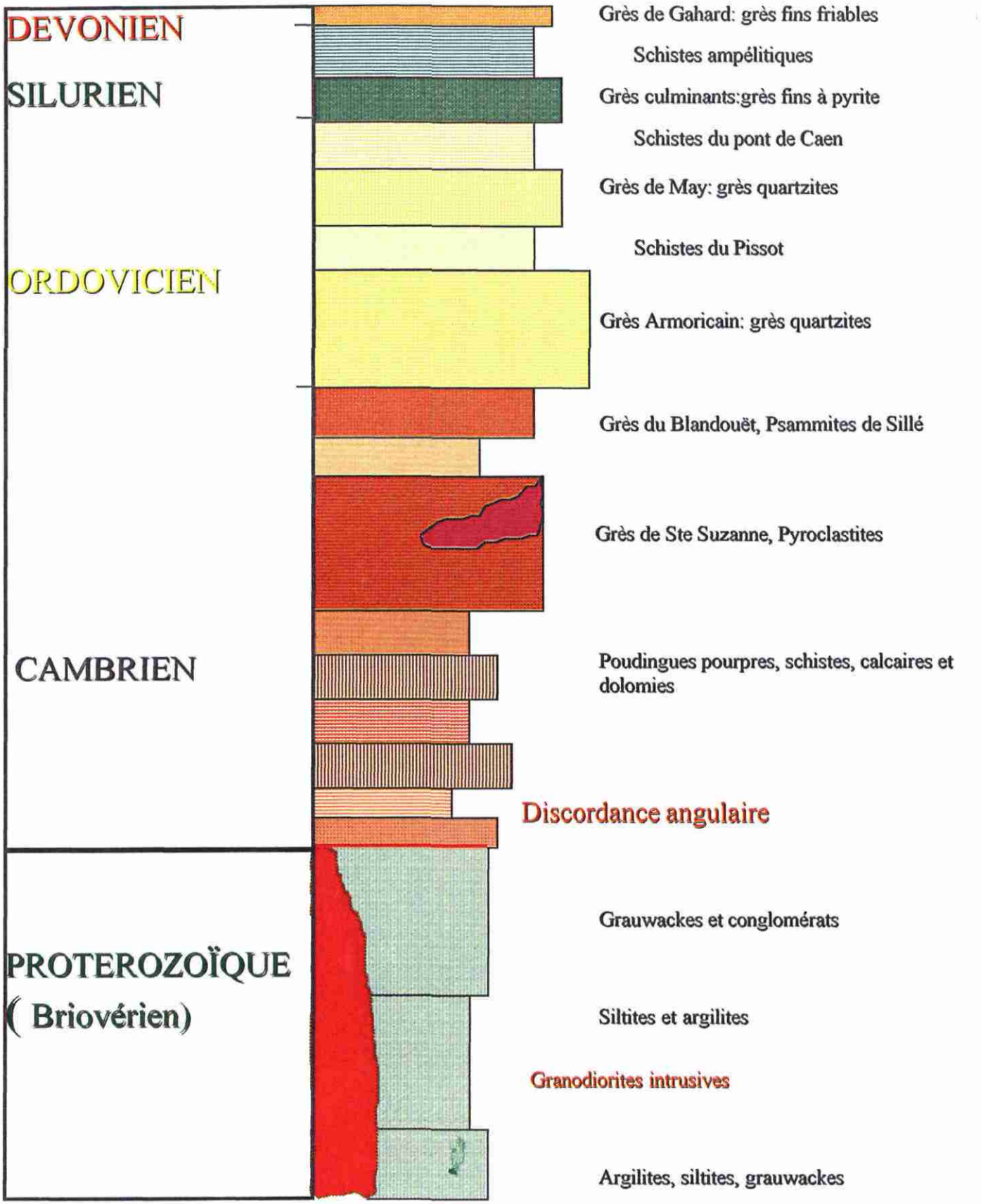


Fig. 3: Lithostrastigraphie de l'unité septentrionale

1.1.1. Le Briovérien : séries sédimentaires / métasédimentaires protéorozoïques

Le Briovérien est l'un des deux ensembles lithologiques principaux (le second étant les granitoïdes) de l'unité septentrionale dont il forme environ 40 %). Il correspond à une puissante série monotone, de type flysch, montrant des alternances centimétriques à plurimétriques de siltites-argilites et de grauwackes. Cependant, statistiquement, trois séquences majeures se succèdent de bas en haut :

- alternance d'argilites, de siltites straticulées et de grauwackes (grès à matrice fine quartzo-phylliteuse abondante emballant des clastes hétérométriques de quartz, de feldspath et de roches), fines à grossières, en bancs souvent granoclassés, de puissance variable, pluricentimétriques à métriques.

- siltites, siltites ardoisières et argilites gris-bleu à noires, avec fines intercalations grauwackeuses.

- grauwackes avec, en base de la séquence, des conglomérats à matrice grauwackeuse, remaniant des galets de quartz et de phtanite.

1.1.2. Les granitoïdes protérozoïques

Les principaux massifs de granitoïdes (qui forment 40 % de l'unité septentrionale) appartiennent au "batholite de la Mancellia" et sont d'ouest en est :

- le massif de Fougères
- le massif d'Alexin-deux-Evailles
- le massif de Passais-Le-Horps
- le massif d'Izé
- le massif de Saint-Pierre-des-Nids.

Tous sont principalement constitués de granodiorites de couleur gris assez sombre, à grain moyen, mais localement à tendance porphyroïde, (phénocristaux isolés de 1 à 2 cm de feldspath potassique), très généralement équantes mais parfois orientées sur les bordures. Ces granodiorites présentent peu d'enclaves, sont très homogènes, et sont composées de quartz, de feldspath, avec le plagioclase toujours dominant, et de biotite abondante ; très souvent elles présentent de plus de la cordiérite, généralement pinnitisée ou totalement rétromorphosée en séricite-muscovite-chlorite.

Ces granodiorites, intrusives dans les séries briovériennes (où elles induisent un métamorphisme de contact) et localement recouvertes en discordance par le conglomérat de base des formations sédimentaires cambriennes, ont été datées à 540 Ma ; elles se mettent donc en place à la fin de l'orogenèse cadomienne, de même que d'autres intrusions de dimensions réduites tel le gabbro de Brée-Neau.

1.1.3. Les séries sédimentaires et volcaniques paléozoïques

Les séries paléozoïques ont une extension limitée dans l'unité septentrionale ; elles sont associées à des structures synformes (plis concaves) étroites, axées soit NE-SW tel le synclinal de la Forêt de Mayenne, celui de Villaines-la-Juhel, et celui des Coëvrons, soit W.NW - E.SE tel le synclinal de Domfront-Mortain (dont seule la terminaison périclinale SE apparaît en Mayenne) et le synclinorium de la Charnie. Les séries paléozoïques sont toujours discordantes sur l'ensemble protérozoïque mais la formation de base peut être soit cambrienne (dans la partie est de l'unité septentrionale) soit ordovicienne dans sa partie ouest (les séries ordoviciennes étant largement transgressives vers l'Ouest et le Sud par rapport aux séries cambriennes).

- *Les séries cambriennes*

Les séries cambriennes apparaissent principalement dans la région des Coëvrons où leur puissance estimée varie de 1300 à 2700 m du NE au S, dans la région de la Charnie où elles dépassent 3000 m de puissance et dans une moindre mesure, dans celle de Villaines-la-Juhel.

↳ *Formation des conglomérats et arkoses du Cambrien inférieur*

Cette formation constitue la base des séries paléozoïques et débute par un conglomérat violacé ("Poudingues pourpres") reposant en discordance angulaire sur le Protérozoïque ; il remanie des galets, principalement de grauwackes et de cornéennes briovériennes et, dans une moindre mesure, de quartz, de volcanites, de granodiorites et de phtanites. Il est surmonté par des arkoses violacées à vertes, à grain grossier à fin, remaniant principalement des grains de quartz, de feldspath illitisé et de micas. La puissance de cette formation varie de 100 à 200 m dans la région de Villaines-la-Juhel et au NE des Coëvrons, mais elle ne dépasse guère 50 m au sud de cette dernière et une dizaine de mètres au nord de la Charnie.

↳ *Formation des schistes et calcaires du Cambrien inférieur*

Cette formation, dont la puissance est évaluée entre 250 m au Nord à 1400 m au SE, montre des faciès terrigènes fins et des faciès carbonatés de plate-forme ; cependant la proportion entre ces deux pôles varie fortement du NW au SE : les carbonates sont presque absents dans la région de Villaines-la-Juhel, ils sont bien exprimés dans les Coëvrons et ils deviennent prépondérants dans la Charnie.

Ces carbonates sont principalement des calcaires sombres, à odeur parfois fétide, en petits bancs, montrant localement des lamines algaires, voire même des

stromatolites (constructions algaires mamelonnées). Dans les Coëvrons ces petits bancs carbonatés sont regroupés en plusieurs unités (3 ?) de 20 à 150 m de puissance et ils sont souvent plus ou moins dolomitisés. Dans la Charnie, les bancs carbonatés forment deux grandes unités : à la base une série de 200 à 300 m de puissance, "le Calcaire d'Evron et la Dolomie de Neau" essentiellement dolomitique et disposées en bancs massifs métriques, au sommet une série à calcaire bleu-noir en petits bancs onduleux "le Calcaire de Châtre-la-Forêt".

Les faciès terrigènes sont essentiellement constitués d'argilites et de siltites verdâtres à matrice plus ou moins carbonatée, associées, au toit de la formation, à de petits bancs de grès fins à matrice carbonatée.

- *Formations terrigènes du Cambrien moyen-supérieur*

Les séries terrigènes du Cambrien moyen et supérieur sont bien exprimées uniquement dans les Coëvrons et la Charnie. Elles débutent par 350 à 400 m de grès quartzites "les Grès de Sainte-Suzanne", de teinte gris-rosé, à grain fin à grossier, disposés en bancs compactes de 10 à 80 cm. Cependant au sein de ces grès apparaissent aussi quelques niveaux de cinérites (ou cendres volcaniques) verdâtres à grain fin, de tuffites à grain grossier et de grès feldspathiques que témoignent d'épisodes volcaniques bien exprimés par ailleurs.

Dans le sud de la Charnie les formations terrigènes cambriennes comportent ensuite une centaine de mètres d'argilites et de siltites micacés "les Psammites de Sillé-le-Guillaume" qui débutent généralement par un horizon de grès feldspathiques et de grès tuffacés ; ces psammites sont coiffées par une série de grès fins "les Grès de Blandouët" ; ces derniers sont de plus en plus rubéfiés vers le sommet jusqu'à devenir franchement des grès ferrugineux.

- *Formations volcaniques acides du Cambrien moyen-supérieur*

Ainsi qu'en témoignent les niveaux tuffacés interstratifiés dans les "Grès de Sainte-Suzanne" et les "psammites de Sillé-le-Guillaume", l'activité volcanique a été importante durant cette période. Au cours de différents épisodes paroxysmaux, elle s'est ainsi concrétisée par l'apparition d'unités volcaniques et volcano-clastiques à chimisme acide dont les principales s'observent à l'est de Villaines-la-Juhel dans le massif de Pail, dans les Coëvrons près de Voutré, et au sud et à l'est de la Charnie. Ces unités volcaniques comportent principalement des pyroclastites (ignimbrites, cinérites, tufs rhyolitiques) et accessoirement des coulées rhyolitiques, qui témoignent du caractère explosif de ce volcanisme. Par ailleurs, sur le pourtour des centres éruptifs se mettent en place également, de puissantes séries volcanoclastiques associées au démantèlement des édifices volcaniques.

- ***Les séries ordoviciennes***

En Mayenne ces séries sont bien exprimées dans les synclinaux de la Forêt de Mayenne, de Villaines-la-Juhel et de Domfront-Mortain. Elles sont nettement transgressives par rapport au Cambrien, et sont essentiellement terrigènes avec une succession d'épisodes gréseux et silto-argileux dont la puissance est de l'ordre de 800 m.

↳ *Formation du "Grès armoricain" de l'Ordovicien inférieur (Arénigien)*

Le "Grès armoricain" dont la puissance est de l'ordre de 300 m dans le synclinal de Villaines-la-Juhel, débute, localement, par quelques mètres de conglomérat à galets de quartz ; cette série est cependant essentiellement constituée de grès gris-blanc, durs, massifs, quartzeux voir quartziteux, à grain moyen-fin, disposés en bancs pluridécimétriques à métriques avec de minces interbancs de grès fin micacés en plaquettes.

↳ *Formation des schistes de l'Ordovicien moyen (Llanvirnien - Llandeilien)*

Cette série, dénommée tantôt "Schistes à Calymènes", "Schistes du Pissot", "Schistes d'Andouillé, et "Schistes d'Angers" a une puissance variant de 70 à 180 m. Elle est constituée d'argilites et de siltites gris-noir, parfois micacées, au sein desquelles apparaissent quelques minces niveaux d'oolithes ferrugineuses.

↳ *Formation des grès de l'Ordovicien moyen-supérieur*

Cette série dénommée "Grès de May" ou "Grès de St-Germain-sur-Ille" a une puissance de l'ordre de 160 m dans le synclinal de Villaines-la-Juhel. A sa partie inférieure elle présente des quartzites gris-rose, à grain fin, finement micacés, disposés en gros bancs et à sa partie supérieure des grès sombres verdâtres à intercalations d'argilites micacées verdâtres à noires.

↳ *Formation des schistes et de la tillite de l'Ordovicien supérieur*

Progressivement les argilites sombres observées au sommet des "Grès de May" deviennent nettement prépondérantes et on passe ainsi à la formation des "Schistes du Pont-de-Caen" parfois considérés, du fait du passage progressif, comme le membre supérieur de la formation de St Germain.

Cette formation de Pont-de-Caen, essentiellement constituée d'argilites noires finement micacées, à une puissance proche de 120 m, et elle est coiffée par 15 à 20 m d'argilites jaunes micro-conglomératiques "la Tillite de Feugerolles" qui remanient des galets de carbonates et de grès de May.

- *Les séries siluriennes*

Elles constituent le coeur du synclinal de Villaines-la-Juhel et occupent de ce fait une surface non négligeable, mais leur puissance est réduite. Elles débutent par 60 à 80 m de grès fins, les "grès culminants", blancs à gris sombre, disposés en bancs décimétriques ; ces grès, bien qu'essentiellement quartzeux, montrent une proportion significative de feldspath et ils sont de plus caractérisés par une abondance de pyrite en grains ou en nodules. Ils sont surmontés par une série de schistes, plus ou moins ampélitiques, à rares bancs de grès quartzites noirs.

- *Les séries dévoniennes*

Elles apparaissent uniquement au coeur du synclinal de la Forêt de Mayenne. Elles débutent par des schistes argileux sombres à bancs de quartzites noirs, (comparables à ceux des séries siluriennes) et évoluent vers des grès fins, "les grès de Gahard", souvent friables et montrant des niveaux ferrugineux.

1.1.4. La couverture cénozoïque

Dans l'unité septentrionale, la couverture cénozoïque est bien exprimée notamment dans la région de Mayenne, où se situe la convergence entre deux couloirs tectoniques : l'un, axé N.NW - S.SE, se suit depuis Chantrigné jusqu'à Evron, l'autre, axé W.SW - E.NE, se suit depuis le sud d'Ernée jusqu'à la région d'Alençon. Dans la région de Mayenne apparaît ainsi une série de 5 à 10 m de sables et graviers éocènes parfois indurés en dalles de grès siliceux ; celle-ci est localement coiffée par une série de 5 à 10 m de sables et graviers pliocène.

1.1.5. Structure de l'unité septentrionale

- *Les déformations associées à l'orogenèse cadomienne :*

- la nette discordance angulaire des formations paléozoïques sur les séries briovériennes, illustre très clairement l'existence d'une déformation plicative intense, protérozoïque, témoin de l'orogenèse cadomienne. A ces plis est associée une schistosité de flux de plan axial, qui se développe dans un climat de métamorphisme régional de faible intensité (anchizone-épizone).

- l'orogenèse cadomienne se caractérise aussi dans cette unité, par l'intrusion de massifs granodioritiques dans les séries sédimentaires briovériennes ; cette mise en place entraîne le développement dans ces séries, d'une auréole de métamorphisme de

contact, qui se surimpose au métamorphisme régional, et se traduit par l'apparition de schistes tachetés (à blastes de cordiérite et biotite) et de cornéennes, très dures, massives, avec une importante néoformation minérale (quartz, biotite, muscovite, cordiérite).

- enfin, localement, tel sur la bordure nord du massif de Passais - Le Horps, se développe un cisaillement dextre tardi-orogénique, qui se traduit notamment par une virgation des structures cadomiennes du briovérien, et par une intense fracturation des cornéennes, fracturation de plus soulignée par de multiples petits filonnets de quartz.

- ***Les déformations associées à la distenstion cambrienne***

Au début du cambrien, après une période d'intense érosion qui aboutit notamment à l'exhumation des massifs granodioritiques, le socle protérozoïque est affecté par une importante phase distensive. Celle-ci se traduit notamment par l'individualisation de fossés d'effondrement tel celui de la Charnie, celui des Coëvrons et celui de Pail. Ces fossés délimités par des failles orientées N60-70 se caractérisent par une intense activité volcanique et une accumulation des séries sédimentaires cambriennes dont la puissance souligne la subsidence active de ces grabens.

- ***Les déformations associées à l'orogenèse varisque***

L'orogenèse varisque qui se développe du Dévonien moyen au Carbonifère, se traduit par une déformation plicative (formation de plis à différentes échelles) particulièrement bien exprimée par le synclinal de la Charnie et celui des Coëvrons ; dans ce dernier elle est associée à une schistosité de plan axial, généralement de fracture, avec néanmoins localement un début de recristallisation (anchizone), plus ou moins marquée suivant la lithologie des formations.

L'orogenèse varisque se traduit aussi par des décrochevauchements (accidents tectoniques à déplacement horizontal) orientés N20 à N60, tel celui situé à la limite entre synclinal des Coëvrons et le massif granodioritique d'Izé dans lequel se développe une foliation cataclastique.

Elle se traduit enfin par l'individualisation de la zone de cisaillement nord-armoricain qui sépare les domaines nord et centre-armoricain. La branche principale de ce cisaillement prend une inflexion N.NW - E.SE au niveau du département de la Mayenne et se situe au niveau du bassin de Laval (unité centrale) ; cependant elle présente aussi un diverticule, axé SW-NE, dont la trace se suit depuis Bourgon jusqu'aux "Alpes Mancelles" ; les rejeux multiples de cette importante zone cisaillante sont à l'origine des étroits synclinaux de la Forêt de Mayenne, de Villaines-la-Juhel et du massif de Pail.

- *Les déformations cassantes tardi et post-paléozoïques*

La déformation paroxysmale de l'orogenèse varisque achève la structuration majeure du domaine nord-armoricain ; le bâti ainsi obtenu est cependant soumis, par la suite, à une tectonique cassante. Celle-ci débute vraisemblablement dès la fin du paléozoïque et comprend deux principales familles de failles, axées N40-50 et N150-160, dont les rejeux, pour certaines d'entre elles, se poursuivent jusqu'au Plio-Quaternaire. La famille N150-160 est notamment représentée par le couloir de failles, qui se suit depuis Chantrigné jusqu'au sud d'Evron, en passant par Saint Fraimbault-des-Prières au NE de Mayenne ; ce couloir est, en effet, souligné par une succession de bassins tertiaires éocènes à pliocènes, qui témoignent des rejeux tardifs de ces accidents qui jouent tantôt en faille normale, tantôt en décrochement dextre.

La famille N40-50 est elle-même bien représentée dans la Charnie où elle montre aussi des jeux décrochants dextres.

1. 2 - L'UNITE CENTRALE

Elle constitue une vaste bande axée NW-SE, qui, sur environ 20 km de large et 60 km de long, prend en écharpe le département de la Mayenne depuis la région de St-Pierre-la-Cour au NW, jusqu'à St-Loup-du-Dorat au SE. Cette unité correspond à un vaste synclinorium "le synclinal de Laval", dessiné par les formations paléozoïques ordoviciennes à carbonifères (Fig.4).

1.2.1. les séries sédimentaires et volcaniques paléozoïques

- *Les séries ordoviciennes*

Les séries ordoviciennes sont transgressives sur les séries cambriennes qu'elles recouvrent en discordance au Sud de la Charnie, alors que par ailleurs, sur tout le pourtour du synclinorium, elles reposent sur les unités protérozoïques. Les séries ordoviciennes présentant des faciès tout à fait comparables à ceux observés dans l'unité septentrionale, avec de bas en haut :

- les grès blancs quartzeux arénigiens de la formation du "grès armoricain",
- les siltites et schistes ampélitiques ordovicien moyen, de la formation d'Andouillé,
- les grès quartzeux et les grès fins psammitiques, ordovicien moyen-supérieur, de la formation de St-Germain-sur-Ille,
- les schistes, siltites et tillites, ordovicien supérieur, de la Formation de Pont-de-Caen.

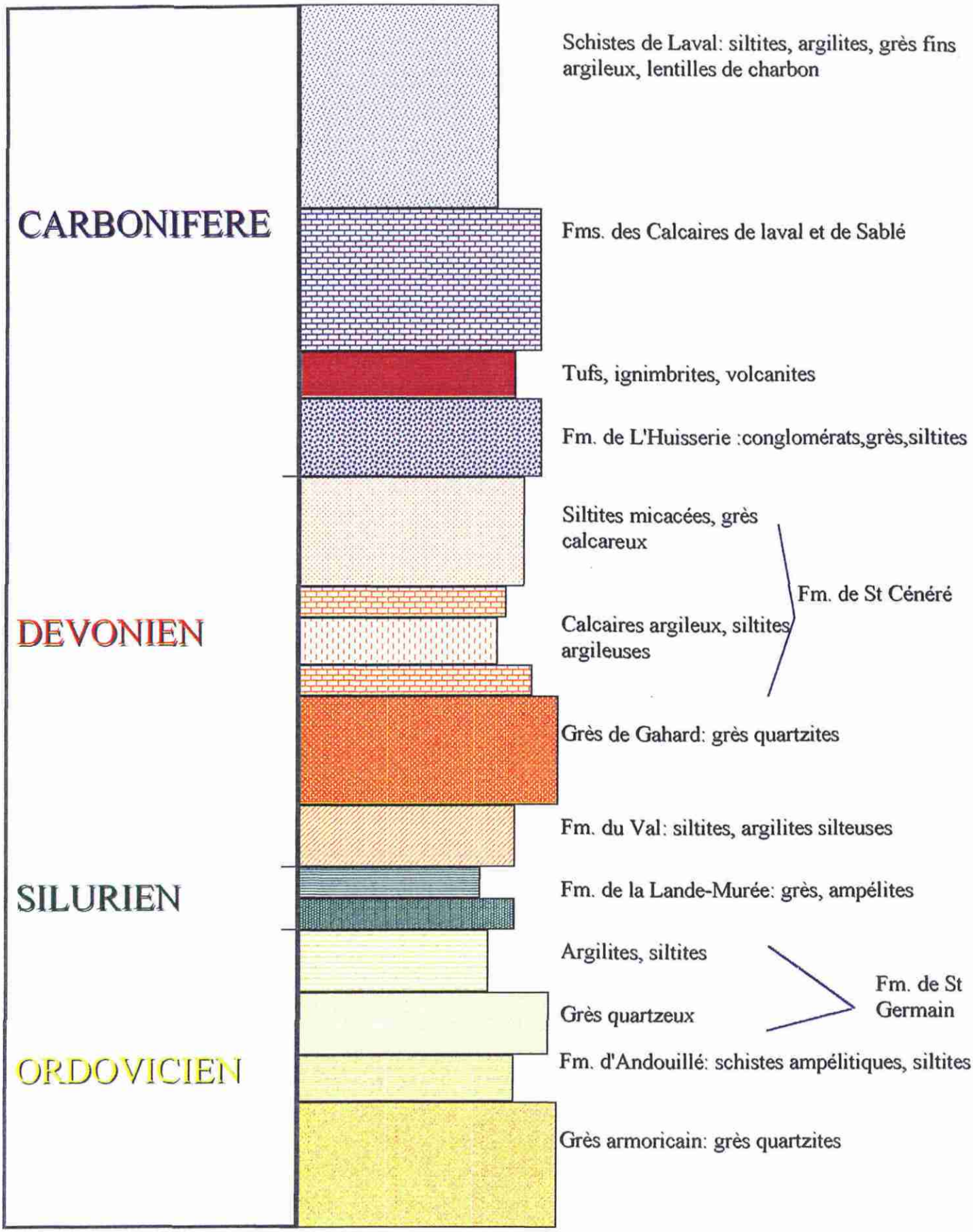


Fig.4: Lithostratigraphie de l'unité centrale

Il faut cependant noter que le "grès armoricain" n'apparaît pas sur le flanc sud du synclinorium de Laval. Cette absence parait due à des accidents NW-SE qui mettent en contact avec le protérozoïque, soit les schistes de la Formation d'Andouillé, soit, plus généralement, les grès de la Formation de St-Germain. Enfin, cette dernière formation, parait présenter une évolution latérale vers le sud-est du flanc méridional du synclinorium de Laval : localement dénommée "Formation du Chatellier" et "Formation de l'Eulardière", elle est constituée de grès fin quartzeux et de psammites dont la puissance est réduite à une dizaine de mètres, alors que les séries à schistes et siltites, équivalents de la formation de Pont-de-Caen, atteignent 150 à 200 m de puissance.

- ***Les séries siluriennes***

Elles sont bien exprimées sur le flanc nord du synclinorium, notamment en bordure de la Charnie, et dans la terminaison périclinale à l'ouest de Laval ; mais, sur le flanc sud elles disparaissent localement sous les transgressions carbonifères.

↳ *Formation des grès, ampélites et siltites du Silurien inférieur et moyen*

Dénommée Formation de la Lande-Murée, elle débute par un membre gréseux, "les grès culminants", dont la puissance varie de 10 à 20 m ; celui-ci est constitué de grès quartzeux mal stratifiés, gris foncé, riches en pyrite ; ce membre basal est surmonté par des ampélites noires feuilletées, à rares petits bancs gréseux, dont la puissance est de l'ordre de 30 m.

↳ *Formation des siltites argileuses et grès du Silurien supérieur à Dévonien basal*

Cette formation, dénommée "Formation du Val" occupe une vaste étendue sur le pourtour du synclinorium de Laval ; elle est essentiellement constituée de faciès schisteux sombres, siltites quartzeuses noirâtres à matrice séricito-chloriteuse, siltites à lamines riches en petits débris de muscovite, siltites à nodules carbonatés pyriteux ; cependant elle comprend aussi, notamment dans sa partie supérieure, des bancs décimétriques de grès quartzite bleu-noir, et de grès tendres riches en muscovite.

- ***Les séries dévoniennes***

Elles occupent des étendues assez importantes au nord-ouest du synclinorium de Laval et comprennent trois formations principales :

↳ *Formation des grès et siltites du Dévonien basal*

Cette formation appelée "Grès de Gahard" sur le flanc nord du synclinorium de Laval et "Formation du Monlin-du-Grez" sur son flanc sud, est principalement constituée de grès quartzeux ou quartzitiques, gris à blanchâtres, parfois micacés ou ferrugineux ; ces grès disposés en bancs décimétriques à la base et pluridécimétriques au sommet, sont associés à des interbancs de siltites quartzo-micacés. La puissance de cette formation varie généralement de 60 à 200 m ; cependant sur le flanc sud, localement, elle disparaît totalement sous les séries transgressives carbonifères.

↳ *Formation des schistes argileux et des calcaires argileux bioclastiques du Dévonien inférieur*

Cette formation dénommée "Formation de St Cénéré" sur le flanc nord du synclinorium et "Formation de la Ragottière" sur le flanc sud, a une puissance de 80 à 150 m ; cependant, sur le flanc sud, elle peut être, totalement dissimulée par les séries transgressives carbonifères. Dans sa moitié inférieure elle est constituée de siltites argilo-micacés et de calcaires argileux, et dans sa moitié supérieure, de calcaires bioclastiques à niveaux terrigènes. Cependant, la proportion de faciès carbonatés varie et si sur le flanc sud ces derniers sont souvent les plus fréquents, sur le flanc nord, les faciès schisteux peuvent devenir nettement prédominants.

↳ *Formation des siltites micacés, des grès calcareux et des calcaires argileux du Dévonien inférieur sommital*

Cet ensemble, raviné par les séries carbonifères transgressives, apparaît uniquement sur le flanc nord du synclinorium, où sa puissance est de l'ordre de 300 m. Il est constitué principalement par des siltites argilo-micacées, gris brun, lesquelles sont associées, dans la partie inférieure de la formation, à des grès calcareux décalcifiés et à des calcaires argileux en bancs plurimétriques.

- ***Les séries carbonifères***

Les séries carbonifères constituent la spécificité du synclinorium de Laval ; elles correspondent à l'ouverture, à cette époque, d'un bassin "le bassin de Laval", engendré par les rejeux du grand accident cisaillant nord-armoricain. Constituant tout le coeur du synclinorium, elles occupent de vastes étendues et présentent une lithologie variée avec des associations de faciès terrigènes, de faciès carbonatés et de volcanites.

- *Formation des siltites, grès, conglomérats et volcanites du Carbonifère inférieur (Tournaisien)*

Cet ensemble, dénommé "formation de l'Huisserie" (ou "culm inférieur"), débute fréquemment par un mince niveau volcanique acide (blaviérite) ; sur le flanc nord du synclinorium, ce dernier est surmonté par des siltites puis par des grès grauwackeux verdâtres associés à des conglomérats polygéniques comportant des galets de différentes natures à matrice grauwackeuse dont la puissance est de l'ordre de 100 m ; ensuite cette formation est essentiellement constituée de volcanites acides (tufs, ignimbrites, rhyolites) qui sont particulièrement bien exprimées entre Argentré et Saulges.

Sur le flanc sud du synclinorium on observe le même type de faciès, avec un grand développement d'une part de conglomérats et microconglomérats associés à des siltites, et d'autre part, localement, de volcanites acides, tel dans la région d'Entrammes et de Villiers-Charlemagne ou de volcanites basiques à intermédiaires (tufs spillitiques et spillites) dans la région de St-Loup-du-Dorat.

- *Formation calcaire du carbonifère inférieur (Tournaisien supérieur - Viséen moyen)*

Sur le flanc nord du synclinorium de Laval, la série précédente est surmontée par un ensemble carbonaté, "la formation du calcaire de Sablé" ; cette dernière dont la puissance est de l'ordre de 250 m, comprend principalement des calcaires sombres bioclastiques et oolithiques, disposés en bancs décimétriques à métriques.

Sur le flanc sud du synclinorium la série débute par un ensemble silto-gréseux de 100 m de puissance, "la formation de Changé" qui passe progressivement à un ensemble carbonaté, "la formation du calcaire de Laval" ; ce dernier, peu fossilifère, présente deux principaux faciès, calcaires lités gris-noir, souvent dolomitiques et calcaires récifaux de type waulsortiens, massifs, gris-rosé à veines bleues ; enfin, localement, ces calcaires sont partiellement ou entièrement silicifiés.

- *Formation des schistes du carbonifère inférieur-moyen (Viséen sup. - Namurien)*

Dénommé "formation des schistes de Laval" ou "formation de Heurtebise", elle occupe de vastes étendues au coeur du synclinorium de Laval. Elle est essentiellement constituée par des alternances de grès fin argileux et de siltites beige-verdâtre à noires souvent micacées ; cependant, dans sa partie basale, apparaissent aussi, des niveaux microconglomératiques, à matrice tuffacée abondante, associés à des lentilles charbonneuses qui, localement, ont été exploitées pour la houille.

1.2.2. La couverture cénozoïque

Dans l'unité centrale la couverture cénozoïque comprend au sud-est de Laval, quelques placages, d'extension réduite, de sables et grès siliceux éocènes et de rares faluns miocènes ; cependant elle est principalement constituée de sables et graviers à galets, d'âge pliocène. Ces derniers apparaissent notamment sur le flanc sud du coeur du synclinorium de Laval, où ils forment une large bande axée NW-SE, depuis Forcé au NW jusqu'à St-Loup-du-Dorat au SE. Cette bande offre la particularité de suivre grossièrement la formation carbonatée du carbonifère inférieur et il apparaît en effet que ces sables sont souvent piégés dans les karsts de ces calcaires. Ces sables pliocènes constituent aussi par ailleurs, de petits placages, témoins résiduels d'une couverture antérieure plus vaste, notamment près de Saulges, d'Entrammes, et au SE de Laval ; dans ce dernier site ils semblent piégés dans un petit graben associé à des failles axées N.NW-S.SE.

1.2.3. Structure de l'unité centrale ; le synclinorium de Laval

- *Les déformations associées à l'orogenèse varisque*

Le synclinorium de Laval est situé sur la limite entre les domaines nord-armoricain et centre-armoricain et de ce fait sa structuration est essentiellement associée à l'individualisation du cisaillement nord-armoricain. En effet, après une période de quiescence tectonique à l'Ordovicien-Dévonien inférieur, durant laquelle se développe une sédimentation de plate-forme, des signes de distension apparaissent dès le Carbonifère inférieur : discordance des séries carbonifères sur les séries paléozoïques antérieures, variations d'épaisseur rapides et importantes dans les dépôts, développement du volcanisme. Cette phase distensive s'achève après le dépôt des "schistes de Laval", à la fin du Carbonifère inférieur ; il se développe alors (Namurien-Wesphatien) une importante phase plicative ; celle-ci se traduit par des plis axés N110, déversés vers le N.NE, et associés d'une part à une schistosité de plan axial de fracture / flux (anchizone) et d'autre part à des écaillages à vergence NE. Enfin les rejeux du cisaillement nord-armoricain se poursuivent au moins jusqu'au Carbonifère supérieur, ainsi qu'en témoignent les sédiments terrigènes stéphaniens; ces derniers discordants sur les séries du Carbonifère inférieur se déposent dans des petits bassins, tels celui de St-Pierre-la-Cour à l'ouest de Laval, qui s'ouvrent en "pull-apart" le long de ce cisaillement.

- *Les déformations cassantes tardi à post-paléozoïques*

Comme l'unité septentrionale, l'unité centrale montre deux principales familles de failles qui jouent tantôt en décrochement, tantôt en faille normale. La famille des failles N 150-160 est bien représentée à l'ouest et à l'est de Laval, où toute une série de failles en relais, suit grossièrement le cours de la Mayenne. La famille des failles N10-40 est bien exprimée sur le flanc sud-est du synclinorium, qui apparaît particulièrement tectonisé ;

en effet, ce flanc sud-est est non seulement dilascéré par les failles N10-40 mais aussi par des failles N110 (subparallèles à la stratigraphie) antérieurs aux précédentes. Il apparaît que ces failles N110 sont vraisemblablement précoces et qu'elles sont probablement directement liées aux rejeux carbonifères du cisaillement nord-armoricain.

1.3. L'UNITE MERIDIONALE

Elle forme le 1/3 sud du département de la Mayenne et correspond à un vaste anticlinorium, axé NW-SE, constitué par les séries protérozoïques du Briovérien ; cet anticlinorium est bordé sur son flanc nord par le synclinorium de Laval et sur son flanc sud par les séries ordovico-siluriennes du domaine de Bretagne centrale (Fig.5).

1.3.1. Le Briovérien : séries sédimentaires / métasédimentaires protérozoïques

Le Briovérien occupe 95 % de la surface de l'unité méridionale et correspond à une puissante (1500 à 2000 m de puissance ?), série détritique terrigène, composée principalement de grauwackes et siltites. Cependant, en dépit d'une grande monotonie, cette série parait organisée en 3 mégaséquences qui sont de bas en haut :

- le mégaséquence inférieure (500 m ?), dont la base est inconnue, est essentiellement composé de bancs métriques à décamétriques de grauwackes verdâtres, fines à grossières, très riches en clastes de feldspath, associées à des interbancs décimétriques de siltites vertes. Dans les bancs de grauwackes on observe de plus, des niveaux ou des lentilles de microconglomérats et de conglomérats, à petits galets de quartz. Enfin, vers le sommet de cette séquence, la puissance des bancs grauwackeux diminue corrélativement à l'augmentation de celle des interbancs de siltites, lesquelles finissent par devenir prépondérantes.

- la mégaséquence médiane (500 m ?) débute par 50 m de schistes noirs pyriteux ; ils sont surmontés par des grès feldspathiques verdâtres associés à des siltites vertes, en bancs plurimétriques, qui évoluent vers des grès fins quartzeux et des siltites grises en bancs décimétriques. Elle se termine par une alternance de bancs centimétriques à décimétriques de grès fins noirs, parfois à nodules carbonatés, de rares carbonates et siltites grises à débit ardoisier.

- la mégaséquence supérieure débute par 250 m de siltites vertes, fines, argilo-micacées, alternant avec des siltites vertes, grossières, varvées ; cet ensemble est surmonté par 250 m de siltites vertes, fines, argileuses, homogènes, comportant de rares niveaux carbonatés et des bancs de grès quartzeux, assez fréquents au sommet de la série ; elle se termine par 150 m de grès fins quartzitiques, en bancs décimétriques à métriques, associés à des siltites vertes plus ou moins argileuses.

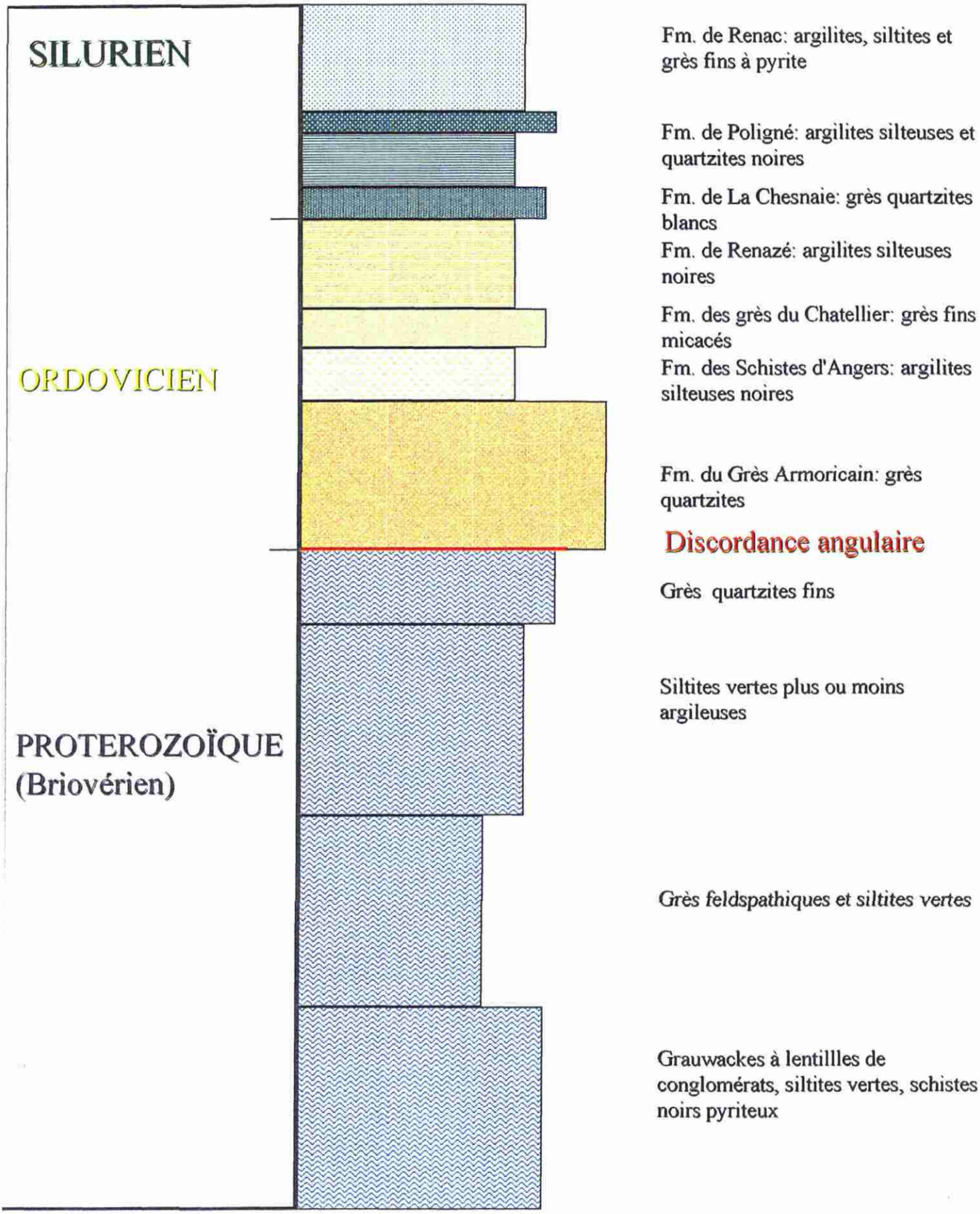


Fig. 5: Lithostratigraphie de l'unité méridionale

1.3.2. Les séries sédimentaires paléozoïques

Elles ont une extension très limitée, à l'extrême sud-ouest de l'unité méridionale, dans le département de la Mayenne. Elles débutent par les séries ordoviciennes et dessinent une structure synclinale dont le coeur est occupé par les séries siluriennes.

- *Les séries ordoviciennes*

↳ *Formation du "grès armoricain" de l'Ordovicien inférieur (Arénigien)*

Cette formation repose généralement directement sur le Briovérien ; cependant, localement, à sa base apparaît une série de schistes, grès et conglomérats rouges, la série des "schistes pourpres". Le grès armoricain, dont la puissance est ici de l'ordre de 200 à 300 m et augmente vers l'Ouest, est essentiellement constitué de grès quartzites gris clair, en bancs de 0,10 à 1 m, associés à de minces interbancs silto-micacés. Au sein de ce grès apparaissent de plus, localement, des horizons ferrifères. Enfin, à l'ouest de St-Aignan-sur-Roë, cette formation gréseuse comporte un membre médian à siltites argileuses à débit ardoisier.

↳ *Formation des schistes de l'Ordovicien moyen (Llandvirnien - Llandeslien)*

Cette formation dénommée "schistes à calymènes" ou "schistes d'Angers" est essentiellement constituée d'argilites silteuses noirâtres, à débit ardoisier.

↳ *Formation des grès de l'Ordovicien moyen-supérieur*

Cette formation, localement dénommée "grès du Chatelier" est peu développée dans cette zone. Elle est constituée de grès fins, parfois micacés.

↳ *Formation des schistes de l'Ordovicien supérieur*

Cette formation, dénommée "formation de Renazé" est difficile à distinguer des "schistes d'Angers" en l'absence des grès interformationnels précédents. Elle est en effet constituée aussi d'argilites silteuses noirâtres à débit ardoisier.

- **Les séries siluriennes**

Elles occupent le coeur du synclinal et comportent de bas en haut :

- une série de grès quartzites blanchâtres, à grain fin, peu développée,

- une série d'argilites silteuses, parfois ampélitiques, coiffée par un niveau plurimétrique de quartzites noires,

- une série de schistes bleu-nuit, parfois ampélitiques, avec des sphéroïdes fossilifères riches en pyrite, associés à un niveau silto-gréseux et à des grès fins à pyrite.

1.3.3. Le granitoïde paléozoïque

Le Briovérien de l'unité méridionale est recoupé par un leucogranite constituant le massif du Pertre, dont l'extrémité orientale se situe dans le département de la Mayenne. Ce granite associé à l'orogenèse varisque est cependant anté-carbonifère, étant remanié sous forme de galets dans les conglomérats du Tournaisien. Par ailleurs, des filons de microgranites sont fréquents sur le flanc nord de l'unité méridionale et en bordure du synclinorium de Laval où ils recoupent tant le Briovérien que le Paléozoïque.

1.3.4. La couverture cénozoïque

Dans l'unité méridionale la couverture cénozoïque montre de rares placages résiduels de sables et grès siliceux éocènes et quelques petites occurrences de faluns miocènes, à l'est de Chateau-Gontier ; mais elle est essentiellement constituée par des sables et graviers pliocènes. Ceux-ci constituent généralement des occurrences d'extension modérée, tel à l'ouest de Congrier, dans la région de la Roë, au nord de Chateau-Gontier et dans la région de Soeurdre, où leur puissance est de l'ordre de 5 à 6 m. Cependant, à l'ouest de Chateau-Gontier sur la rive ouest de la Mayenne, ces sables, constituent une vaste occurrence N.S., de 20 km de long depuis Houssay jusqu'à Chemazé, sur quelques kilomètres de large. De plus dans cette unité la puissance de ces sables dépasse régulièrement 10 m.

1.3.5. Structure de l'unité méridionale

- ***Les déformations associées à l'orogenèse cadomienne***

Contrairement à l'unité septentrionale, l'unité méridionale n'est affectée par aucune déformation cadomienne ; ceci souligne clairement que les domaines nord-armoricain et centre-armoricain correspondent à deux entités géodynamiques différentes.

- ***Les déformations associées à l'orogenèse varisque***

Toute la structuration de l'unité méridionale est associée à l'orogenèse varisque. Tant les séries briovériennes que les séries ordovico-siluriennes sont affectées par une intense

déformation plicative se traduisant, aux différentes échelles, par des plis droits (localement déjetés) axés N110-120. A ces plis est associée une schistosité de plan axial, de flux (anchizone-épizone) avec un gradient croissant du Nord au Sud.

- ***Les déformations cassantes tardi à post-paléozoïques***

Dans cette unité s'observent aussi deux familles de failles N150-160 et N10-40 ; la première est de loin la plus importante et la répartition de ces failles, détermine notamment deux principaux couloirs de fracturation ; l'un se situe dans le prolongement sud de celui de l'ouest de Laval (cf l'unité centrale) et passe dans la région de Chateau-Gontier ; l'autre débute au nord de Craon et se développe ensuite vers le Sud-Est.

1.4. CONCLUSION : GEOLOGIE ET APPROCHE DES RESSOURCES EN EAU

Les formations protérozoïques et paléozoïques du département de la Mayenne ne présentent pas, pour la majeure partie d'entre elles, des lithologies compatibles avec une bonne perméabilité primaire ; de ce fait elles ne constituent pas, en général, de bons aquifères :

- Les granodiorites de l'unité septentrionale sont naturellement de roches compactes et peu perméables.

- Les séries briovériennes, tant dans l'unité septentrionale que méridionale sont principalement constituées de grauwackes et de siltites, à matrice argilo-micacée développée, et sont donc peu perméables. Cependant dans l'unité méridionale existent aussi des séquences à dominante de grès (série médiane) dans lesquels la porosité primaire peut être suffisamment bonne, pour la formation d'un aquifère non négligeable ; le repérage de ces aquifères potentiels, demande néanmoins une connaissance fine de la géologie locale.

- Les grandes séries gréseuses paléozoïques (grès de Ste Suzanne Cambrien moyen-supérieur, grès armoricain ordovicien inférieur, grès de May ou de St Germain ou du Chatelier Ordovicien moyen-supérieur), sont très généralement quartzitiques et n'offrent donc qu'une faible porosité primaire. Quant au grès silurien ("grès culminants") et dévonien inférieur (grès de Gahard), a priori favorables, ils sont généralement assez peu développés.

- Les séries schisteuses paléozoïques, du fait de leur richesse en minéraux argileux sont peu perméables.

- Les séries carbonatées du Cambrien inférieur, particulièrement développées au S.E. de l'unité septentrionale, dans la Charnie et dans une moindre mesure dans les Coëvrons

pourraient, a priori, être favorables ; cependant, il apparaît que ces carbonates sont souvent dolomitisés et ils n'offrent de ce fait qu'une porosité médiocre. De plus ils ne semblent pas karstifiés.

En définitive, seules les séries carbonatées du Carbonifère inférieur (calcaires de Sablé et de Laval), qui affleurent largement dans l'unité centrale au coeur du synclinorium de Laval, présentent des caractères compatibles avec la présence d'une grande nappe aquifère : bonne perméabilité primaire, fracturation et même karstification importante (cette dernière venant après et grâce à la fracturation).

Les formations sableuses cénozoïques présentent aussi des caractères de porosité, compatibles avec un bon aquifère ; cependant la puissance de ces sables n'est pas toujours suffisante (souvent <10 m) et ils peuvent de plus comporter localement soit une fraction argileuse relativement abondante, soit une silicification les transformant en dalles quartzitiques. Par ailleurs, leur position dans la topographie conditionne leur saturation en eau.

Si la perméabilité primaire de la majeure partie des séries de la Mayenne est médiocre, ces dernières peuvent néanmoins acquérir une perméabilité secondaire, postérieurement à leur formation, et constitue ainsi, localement, des aquifères intéressants.

Cette perméabilité secondaire peut s'acquérir par altération des roches : ainsi les granodiorites peuvent-elles être arénisées en surface ; cependant, dans l'unité septentrionale il ne semble pas que ce phénomène se soit développé sur une profondeur suffisante (ou alors, les arènes ont été érodées) pour constituer un réservoir d'importance. De même les grès quartzitiques peuvent être désilicifiés et former alors des grès sableux, mais ce type d'évolution demeure aussi très localisé.

Cette porosité secondaire peut aussi s'acquérir par fracturation des roches, les fractures constituant alors des drains qui favorisent la circulation de l'eau. Ce phénomène, bien qu'étant très hétérogène dans sa répartition spatiale, est nettement plus fréquent et "performant" que le précédent ; les données géologiques déjà acquises permettent, dès à présent, de déterminer des zones où il est particulièrement significatif et où devraient donc se situer a priori les aquifères les plus intéressants ; on distingue ainsi 3 principaux couloirs de failles, orientés NNW- SSE :

- Le couloir Chantrigné-Evron : dans cette zone, les failles en relais,ont été particulièrement actives et ce jusqu'à l'Eocène - Pliocène, comme en témoignent les petits grabens qui les jalonnent et qui sont comblés par les séries éocènes et pliocènes. Ces failles affectent principalement les granodiorites des massifs de Passais-le-Horps et d'Alexain-deux-Evailles, ainsi que les formations carbonatées de la bordure nord du synclinal de la Charnie.

- Le couloir Laval - Chateau-Gontier : il suit grossièrement le cours de la Mayenne et les failles se suivent en relais depuis le NW de Laval, jusqu'au sud de Chateau-Gontier.

Ces failles prennent en écharpe les formations paléozoïques de la terminaison périclinale ouest et du flanc sud du synclinorium de Laval, puis le Briovérien de l'unité méridionale.

- Le couloir Livré - Craon - Chérancé - Segré : les failles en relais affectent le Briovérien de l'unité méridionale, puis, au-delà de la Mayenne, les séries paléozoïques ; la présence de petits grabens pliocènes dans ce couloir, montre que ces failles ont joué jusqu'à la fin du Tertiaire.

On distingue aussi un couloir de failles NE-SW ; celui-ci se suit depuis les "Alpes mancelles" jusque dans la région de Bourgon au NW du synclinorium de Laval ; il correspond à un diverticule du cisaillement nord-armoricain et a joué dès le Carbonifère, induisant la formation des étroits synclinaux de la Forêt de Mayenne et de Villaines-la-Juhel. Cependant ce couloir a été actif aussi au Tertiaire, ainsi qu'en témoignent les dépôts pliocènes de la région de Mayenne et la bordure faillée du Sud du synclinal de Villaines-la-Juhel.

Par ailleurs, on distingue aussi d'autres zones tectonisées qui bien que moins étendues que les précédentes, sont suffisamment conséquentes pour favoriser la présence d'un aquifère :

- Le flanc sud et la terminaison périclinale du synclinal de Domfront - Mortain, où, tant les grès ordoviciens que la granodiorite, sont affectés par un réseau de failles NE-SW.

- Le Massif de Paille où aux failles NE-SW du couloir Alpes Mancelles - Bourgon, se superpose un réseau de failles NW-SE, qui affectent les séries cambriennes et ordoviciennes essentiellement gréseuses.

- Le flanc sud du synclinal de la Charnie où les grès cambro-ordoviciens sont découpés par un réseau de failles axées NE-SW.

- Le flanc sud-est du synclinorium de Laval où les formations gréseuses ordovico-carbonifères sont affectées par un réseau assez serré de failles axées NE-SW et parfois NW-SE.

- Le flanc nord-est des massifs granodioritiques de Passais-le-Horps et d'Izé où un cisaillement NW-SE induite une mylonisation des granodiorites et une fracturation des cornéennes de bordure, dans lesquelles s'injectent, de plus, de nombreux filonnets de quartz.

Enfin, certains accidents isolés, paraissent aussi suffisamment conséquents pour favoriser la présence d'un aquifère non négligeable, notamment :

- La faille axée NE-SW qui de Champgénéteux à la Chauvelière prend en écharpe le nord du massif granodioritique d'Izé.

- La faille axée NE-SW, qui, à l'ouest d'Ernée, affecte le sud du massif granodioritique de Fougères et le Briovérien métamorphique.

- La faille axée NE-SW, qui au SE de Juvigné, détermine le contact entre les grès et schistes ordoviciens et le massif granodioritique de St-Hilaire-du-Maine.

Il est cependant possible de trouver des secteurs favorables en dehors de ces zones, des territoires fracturés pouvant être rencontrés un peu partout. Par ailleurs, il conviendrait d'examiner de plus près le caractère favorable de ces zones de failles connues en comparant leur orientation aux états de contraintes régnant dans la région actuellement. En effet, nombre de ces couloirs de failles peuvent a priori (et sauf arguments contraires issus des résultats de forages) être constitués de fractures ne jouant pas en ouverture et/ou n'étant pas réactivées régulièrement.

2. Résultats des études statistiques sur les forages

2.1 ETUDE STATISTIQUE GLOBALE DES FORAGES

Un tri a été effectué sur l'ensemble des points d'eau en documentation (Banque du Sous-Sol et recherches auprès des foreurs et sur le terrain). En effet, l'étude a pour objectif la ressource en eau souterraine **profonde** et il n'était pas logique de prendre en compte les ouvrages dont la profondeur est inférieure à 10 mètres. Donc le nombre de points, initialement de 1085, a été ramené à **676** (Tab.1).

Il a été ensuite nécessaire de définir les formations géologiques susceptibles de représenter des unités hydrogéologiques et, à cet effet, un certain nombre de regroupements a été effectué ; ces regroupements sont explicités dans le tableau 2.

Le tableau récapitulatif (tableau 3) comporte ensuite, par formation géologique, le nombre de forages recensés, leur débit moyen, leur profondeur moyenne.

Le calcul statistique fait d'abord apparaître le pourcentage de forages dont le débit instantané en fin de foration est égal ou supérieur à 10 m^3/h, ce qui correspond à un forage reconnu comme "réussi". Ce chiffre servira de base à l'estimation du taux de réussite.

La moyenne des débits supérieurs à 10 m^3/h offre un intérêt réel lorsque le pourcentage de forages réussis est important.

Enfin, le débit moyen du meilleur quartile de la population de forages recensés permet de fixer, pour la formation géologique considérée, un objectif de débit ; on admettra en effet que les débits d'exploitation des forages réalisés seront au moins de l'ordre des débits instantanés (débits au soufflage) des forages qui ont fait l'objet de la présente statistique (forages peu profonds -entre 40 et 70 mètres- et implantés au hasard) :

- la plupart des forages pour alimentation en eau potable feront l'objet d'études hydrogéologiques,

- ils atteindront de plus grandes profondeurs (100 mètres environ).

Cette hypothèse de travail est rendue plausible par les résultats obtenus en Bretagne, à la suite d'études hydrogéologiques menées par des bureaux d'études (en particulier ANTEA, filiale du BRGM, dans le granite de la région de Fougères).

C'est ensuite le classement par ordre d'intérêt qui fera apparaître les formations les plus intéressantes sur le plan de la ressource en eau.

2.2. CLASSES D'INTERET DES FORMATIONS GEOLOGIQUES

Afin de disposer d'un critère permettant de classer les formations par classes d'intérêt, un "indice global" a été établi: c'est le résultat du produit *débit moyen du meilleur quartile* x *pourcentage de forages réussis (> 10 m³/h)*

L'indice global s'étend entre les valeurs 0 et 22,5. Du côté maximum, on note les schistes et calcaires cambriens ainsi que les schistes et grès du Culm et ceux du Briovérien sud. Du côté minimum, on note les schistes carbonés et grès quartzitiques du Silurien, ainsi que les schistes et grès du Briovérien nord.

Les classes d'intérêt ont été définies selon les critères ci-dessous pour la Mayenne.

Classe d'intérêt 1

Cette classe comprend les formations dont l'indice global est supérieur à 15. Les débits (débits moyens des quartiles supérieurs = objectifs de débits) sont égaux ou supérieurs à 30 m^3/h (600 m^3/jour). Les pourcentages de débits supérieurs à 10 m^3/h dépassent 50 % ; ceci correspond à des coefficients de réussite probables, ou, en tous cas, fixés comme objectifs, de l'ordre de 80 %.

Classe d'intérêt 2

Cette classe comprend les formations dont l'indice global est compris entre 10 et 15. Les objectifs de débits sont compris entre 25 m^3/h (500 m^3/jour) et 30 m^3/h (600 m^3/jour).

Les pourcentages de débits > 10 m^3/h sont compris entre 35 et 45 %, soit des pourcentages de réussite probables compris entre 70 % et 80 %.

Classe d'intérêt 3

Cette classe comprend les formations dont l'indice global est compris entre 5 et 10. Les objectifs de débits sont compris entre 20 m^3/h (400 m^3/jour), et 25 m^3/h (500 m^3/jour).

Les pourcentages de débits > 10 m^3/heure sont compris entre 25 % et 35 % ce qui laisse prévoir des coefficients de réussite compris entre 50 % et 70 %.

Département: MAYENNE		FORAGES EXISTANTS : DONNEES & RESULTATS					
Les débits annoncés sont des débits instantanés; les débits effectivement exploitables peuvent être plus faibles.							
	DONNEES BRUTES			FREQUENCE DES RESULTATS POSITIFS			
Formation géologique	Nombre	Débit moyen (m3/h)	Profondeur moyenne	% de forages > 10 m3/h	Moyenne des débits>10 m3/h	Débit moyen du meilleur quartile	Ordre d'intérêt
Alluvions	9		50,1				
Séries tertiaires	41	11,6	42,4	44%	23,4	31,7	2
Cénomanien-Albien (terrains secondaires)	0						
Schistes de Laval	30	10,6	51,4	40%	20,8	25,7	2
Calcaire de Sablé et de Laval *	49	9,2	45,2	39%	20	25,6	2
Schistes et grès du Culm	34	17,2	53,7	50%	30,8	44,9	1
Volcanites (Carbonifère)	11	9,5	69,5	27%	27,7	22,5	
Grès de Gahard	39	8,7	51,7	33%	19,8	22	3
Schistes carbonés - grès quartzites	25	2,3	58	0%		4,9	4
Schistes et grès ordoviciens	23	10,8	55	43%	21,2	28,8	2
Schistes noirs d'Angers	3		57,3				
Grès armoricain	5		66,3				
Schistes et grès feldspathiques	4		42,3				
Pyroclastites	0						
Schistes et calcaires cambriens *	29	12,4	45,3	52%	20,5	29,7	1
Schistes et grès du Brioverien Sud	123	13,2	49,2	50%	22,7	32,4	1
Cornéennes & schistes tachetés	76	9	53,9	26%	24,9	25,7	3
Schistes et grès du Brioverien Nord	22	7,3	63,5	23%	18,2	18,2	4
Granodiorites, microgranites, leucogranites ..	153	11,2	49,3	36%	25,4	30,7	2
Ensemble	676	10,5	50,8				
* Formations pour lesquelles des valeurs exceptionnellement fortes ("effet de pépite") ont été otées de l'échantillonnage							

Tableau 1 : FORAGES EXISTANTS - DONNEES ET RESULTATS

		HYDROGEOLOGIE DU DEPARTEMENT DE LA MAYENNE	
		FORMATIONS GEOLOGIQUES	
Ordre	***AGE_STRATIGRAPHIQUE***	***LITHOLOGIE***	***FORMATION GEOLOGIQUE REGROUPEE***
1	Holocène	alluvions fluviatiles récentes	Alluvions
2	Pléistocène	alluvions fluviatiles anciennes	Alluvions
3	Pliocène-Miocène	sables, argiles et cailloutis	Séries tertiaires
4	Pléistocène-Pliocène	sables, argiles et cailloutis	Séries tertiaires
5	Pliocène à Eocène	sables, argiles et cailloutis	Séries tertiaires
6	Oligocène-Eocène	grès et calcaires silicifiés, dalles indurées	Séries tertiaires
7	Cénomanien-Albien	sables, marnes, craie et argile	Terrains secondaires
8	Stéphanien	grès houille et conglomérats	Schistes de Laval
9	Namurien-Viséen supérieur	schistes et grès, houille	Schistes de Laval
10	Viséen inférieur-Tournaisien	calcaires	Calcaires de Sablé et de Laval
11	Viséen inférieur-Tournaisien	calcaires, faciès récifal	Calcaires de Sablé et de Laval
12	Tournaisien-Dévonien supérieur	schistes et grès, faciès Culm	Schistes et grès du Culm
13	Tournaisien-Dévonien supérieur	volcanites acides, rhyolites, dacites, tufs acides	Volcanites (Carbonifère)
14	Tournaisien-Dévonien supérieur	volcanites basiques, basaltes, andésites, tufs basiques	Volcanites (Carbonifère)
15	Dévonien inférieur	grès et calcaires	Grès de Gahard
16	Silurien	schistes carbonés et grès	Schistes carbonés, grès quartziques
17	Silurien	schistes et quartzites	Schistes carbonés, grès quartziques
18	*Ordovicien supérieur (Pont-de-Caen)*	*schistes*	*Schistes et grès (Ordovicien)*
19	Ordovicien supérieur (Renazé)	schistes ardoisiers et grès	Schistes et grès (Ordovicien)
20	Ordovicien moyen-supérieur (Pissot-May)	schistes noirs ardoisiers, schistes et grès	Schistes et grès (Ordovicien)
21	*Ordovicien moyen-supérieur (Pissot-May-Caen)*	*schistes noirs ardoisiers, schistes et grès*	*Schistes et grès (Ordovicien)*
22	Ordovicien moyen-supérieur (St-Germain)	schistes noirs ardoisiers, schistes et grès	Schistes et grès (Ordovicien)
23	Ordovicien moyen (Schistes noirs d'Angers)	schistes noirs ardoisiers	Schistes noirs d'Angers
24	Ordovicien inférieur	grès quartziques	Grès armoricains
25	Cambrien supérieur (Blandouët)	schistes et grès	schistes et grès feldspathiques
26	Cambrien moyen (Ste-Suzanne)	grès feldspathiques	schistes et grès feldspathiques
27	Cambrien moyen (Pyroclastites)	volcanites acides, rhyolites, dacites, tufs acides	pyroclastites
28	Cambrien inférieur	schistes et calcaires, conglomérats	Schistes et calcaires cambriens
29	Protérozoïque supérieur-C	schistes et grès	Briovérien sud
30	Protérozoïque supérieur	schistes tachetés et cornéennes	Cornéennes et schistes tachetés
31	Protérozoïque supérieur	schistes et grès	Briovérien nord
32	Protérozoïque-paléozoïque	granodiorites	granodiorites, granites, microgranites, leucogranites
33	Protérozoïque-paléozoïque	microgranites, leucogranites	granodiorites, granites, microgranites, leucogranites

Tableau 2 : FORMATIONS GEOLOGIQUES ET REGROUPEMENTS

Classement par ordre d'intérêt
des différentes formations géologiques
Tableau récapitulatif

Formation géologique	Nombre	% de forages > 10 m3/h	Moyenne des débits>10 m3/h	Débit moyen du meilleur quartile	Indice global	Ordre d'intérêt
Schistes et grès du Culm	34	50%	30,8	44,9	22,5	1
Schistes et grès du Brioverien Sud	123	50%	22,7	32,4	16,2	1
Schistes et calcaires cambriens *	29	52%	20,5	29,7	15,4	1
Séries tertiaires	41	44%	23,4	31,7	13,95	2
Schistes et grès ordoviciens	23	43%	21,2	28,8	12,4	2
Granodiorites, microgranites, leucogranites ..	153	36%	25,4	30,7	11,1	2
Schistes de Laval	30	40%	20,8	25,7	10,3	2
Calcaire de Sablé et de Laval *	49	39%	20	25,6	10,0	2
Grès de Gahard	39	33%	19,8	22	7,3	3
Cornéennes & schistes tachetés	76	26%	24,9	25,7	6,7	3
Schistes et grès du Brioverien Nord	22	23%	18,2	18,2	4,2	4
Schistes carbonés - grès quartzites	25	0%		4,9	0,0	4
Alluvions	9					
Cénomanien-Albien (terrains secondaires)						
Volcanites (Carbonifère)	11	27%	27,7	22,5		
Schistes noirs d'Angers	3					
Grès armoricain	5					
Schistes et grès feldspathiques	4					
Pyroclastites	0					

* Formations pour lesquelles des valeurs exceptionnellement fortes ("effet de pépite") ont été otées de l'échantillonnage

Tableau 3 : CLASSEMENT PAR ORDRE D'INTERET

Classe d'intérêt 4

Cette classe comprend les formations l'indice global est inférieur à 5. Les objectifs de débits sont inférieurs à 20 m^3/h (400 m^3/jour).

Les pourcentages de débits > 10 m^3/heure n'excèdent pas 15 %.

Le classement des formations géologiques par classes d'intérêt est représenté dans le tableau 3.

La carte de la figure 6 permet de visualiser les différentes formations en fonction de leur ordre d'intérêt et de leur extension géographique.

Avertissement : La "classe d'intérêt est un concept relatif ; les limites entre classes sont conventionnelles ou arbitraires ; en région Bretagne où la même démarche a été suivie, les limites retenues sont les suivantes :

- classe d'intérêt 1 : indice global > 7
- classe d'intérêt 2 : indice global entre 7 et 5
- classe d'intérêt 3 : indice global entre 5 et 2,5
- classe d'intérêt 4 : indice global < 2,5

Comparés à ce qui est connu ailleurs dans le Massif Armoricain, les résultats observés en Mayenne sont exceptionnellement bons : la carte de la figure 7 représente le classement des formations rencontrées en Mayenne selon les limites de classes d'intérêt retenues en région Bretagne : 3 formations seulement présentent un intérêt inférieur à l'ordre de 1. Ceci nous a incités à relever très sensiblement les limites de classes de façon à mettre en évidence ce qui est vraiment le meilleur.

En pratique, l'intérêt des eaux souterraines dépend des situations locales, en particulier de l'importance des besoins et du coût des solutions alternatives. En matière de "perspectives eau souterraine profonde" l'essentiel du territoire départemental apparaît comme favorable à exceptionnellement favorable. Les secteurs pouvant être jugés médiocres ou mauvais apparaissent minoritaires.

2.3. PRODUCTIVITE DES FORAGES ET STRUCTURES GEOLOGIQUES

Le chapitre consacré à la géologie de la Mayenne conclut à la pauvreté théorique en eau de la plupart des formations, du moins dans le cadre de leur porosité intrinsèque.

Les résultats de l'étude statistique amènent à penser que la plupart de ces formations ont acquis une perméabilité de fissures qui compense cette faible perméabilité "lithologique".

PRODUCTIVITE DES FORAGES

CLASSEMENT DES FORMATIONS GEOLOGIQUES PAR ORDRE D'INTERET (Mayenne)

- ordre d'intérêt non déterminé par manque de forages
- 1
- 2
- 3
- 4

0 5 10

Kilomètres

Figure 6 : CLASSEMENT DES FORMATIONS GEOLOGIQUES PAR ORDRE D'INTERET (selon la classification de la Mayenne)

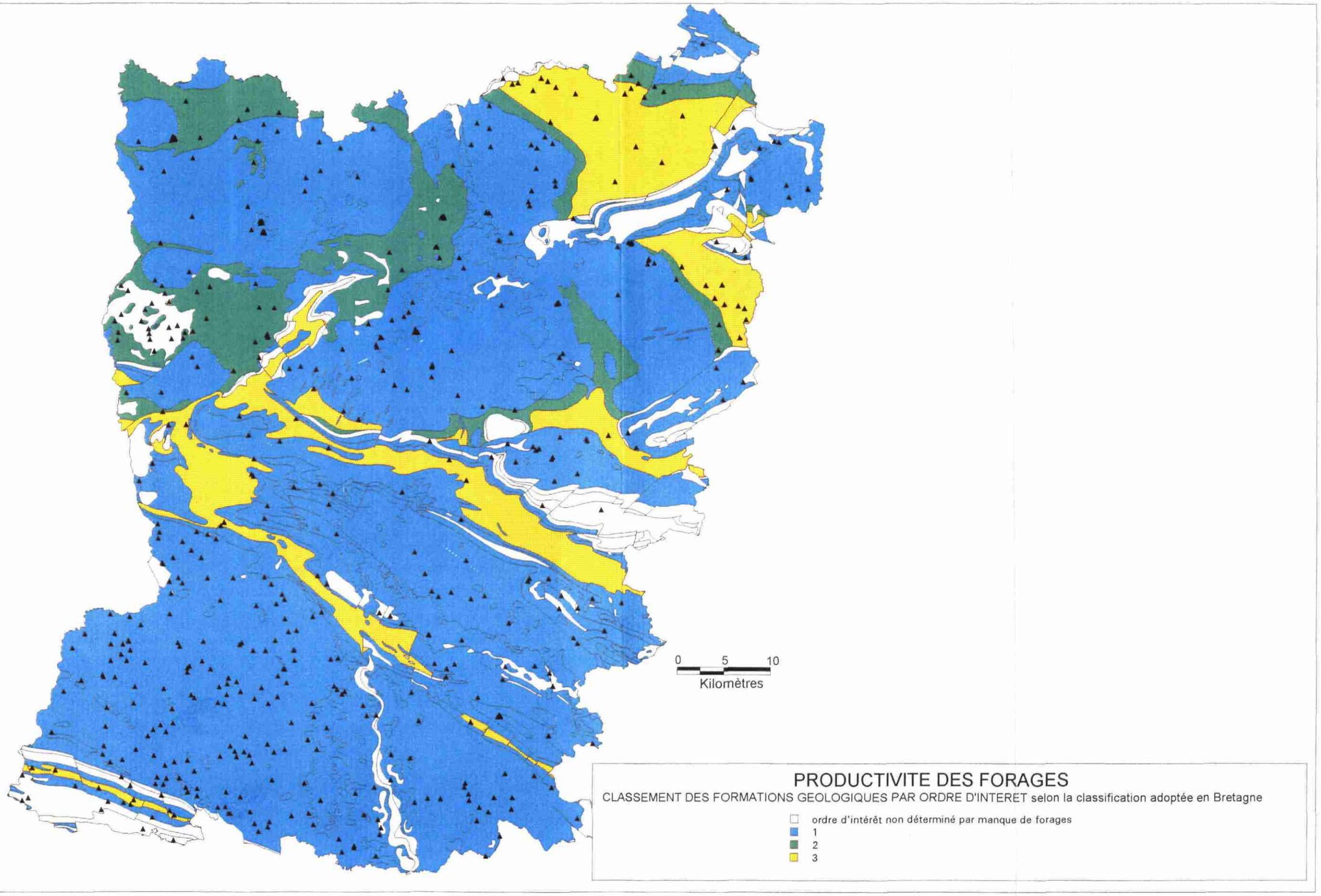


Figure 7 : CLASSEMENT DES FORMATIONS GEOLOGIQUES PAR ORDRE D'INTERET (selon la classification de Bretagne)

La carte de la figure 8 positionne les forages recensés, avec des figurés proportionnels aux débits instantanés obtenus, sur un fond structural tel qu'il ressort de la carte géologique, c'est-à-dire en faisant apparaître les accidents majeurs.

L'examen de cette carte montre que certains forts débits sont certes obtenus sur ces axes d'accidents majeurs, notamment les failles de direction NNW-SSE et NE-SW.

Toutefois, il est difficile d'établir des distinctions entre des accidents majeurs -et encore plus de situer avec exactitude leurs trajets- et des accidents mineurs, non observables sur le terrain, et qui n'ont donc pas été reportés sur la carte géologique : or ces fissures sont souvent le siège de circulations susceptibles de fournir des débits non négligeables. C'est d'ailleurs la raison pour laquelle les études hydrogéologiques préalables à la réalisation de forages s'appliquent à rechercher, par voies photogéologique, émanométrique (dosages de certaines émanations naturelles, radon par exemple) ou géophysique, ces réseaux de fissures.

Il est donc certain qu'une recherche d'eau orientée d'emblée vers des zones d'accidents majeurs augmente les chances de réussite, mais cela ne veut pas dire qu'il faille négliger les zones situées hors de ces "couloirs" structuraux et "noeuds linéamentaires" plurikilométriques : les forages que nous avons recensés et étudiés statistiquement l'attestent, d'autant plus que ceux-ci, pour la plupart, ont été implantés au hasard, sans étude hydrogéologique préalable.

Il faudrait, certes, un nombre de forages beaucoup plus grand, avec une répartition homogène sur l'ensemble du territoire, pour établir une corrélation entre les zones d'accidents et les axes hydrogéologiquement favorables.

Par ailleurs, il peut exister d'importants accidents complètement obturés, ou colmatés par des argiles ou d'autres minéralisations, comme il peut exister de petites failles ouvertes, siège de circulations d'eau très productives.

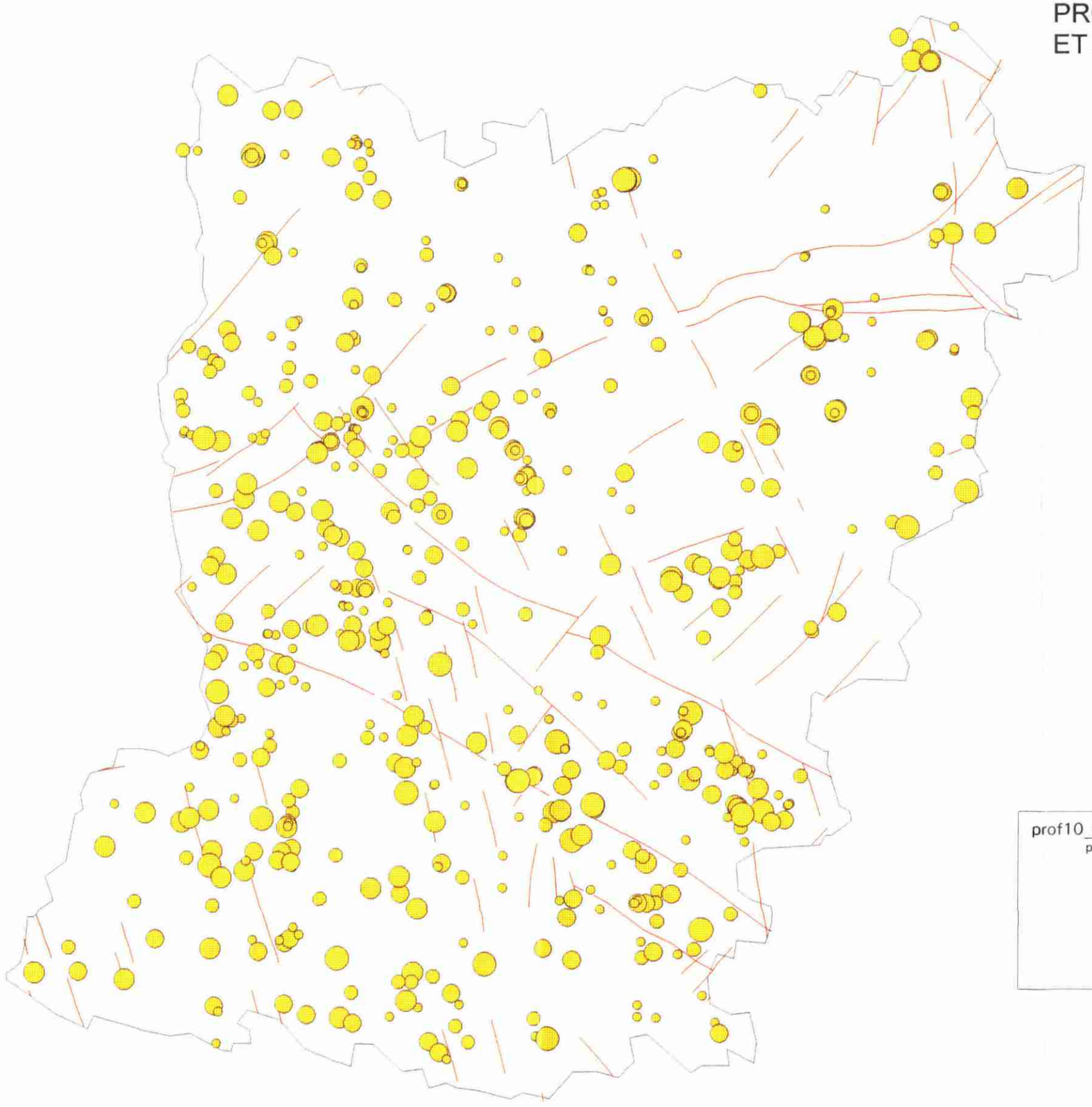
Sur le plan pratique de la recherche de sites pour champs captants, la méthode suivante peut être recommandée :

- étude statistique des forages existants appliquée aux formations géologiques,
- identification des linéaments (photogéologie, émanométrie, géophysique) et étude du cadre de contraintes actuelles (recherche de zones de distension "ouvertes"),

ces deux premières phases aboutissant à la sélection de zones potentiellement favorables

- étude hydrogéologique, avec sondages de reconnaissance et forages d'essais,
- implantation des ouvrages.

PRODUCTIVITE DES FORAGES
ET ACCIDENTS STRUCTURAUX



prof10_debit0_4 par DEBIT_CUMULE_2
prof > = 10 et débit > = 0.4m3/h

50	- 200	(30)
20	- 50	(86)
10	- 20	(141)
5	- 10	(120)
0,4	- 5	(238)

Figure 8 ; PRODUCTIVITE DES FORAGES ET ACCIDENTS STRUCTURAUX

3. Essai de bilans de ressources

3.1. PRINCIPE GENERAL

L'approche des bilans de ressources fera intervenir, pour évaluer l'alimentation des nappes, les "pluies efficaces", c'est-à-dire les volumes d'eau de pluie ni réévaporée ni transpirée par les végétaux et qui peuvent, de ce fait, contribuer au ruissellement et à l'infiltration ; les valeurs de ces pluies efficaces sont calculées à partir des données de pluies, températures, humidité et durées d'insolation enregistrées sur un territoire donné, et à l'aide de formules mises en oeuvre notamment par les agronomes (formule de TURC, par exemple).

L'estimation du pourcentage d'eau infiltrée par rapport à la pluie efficace a été établie à partir de l'étude d'hydrogrammes de quelques cours d'eau du Massif Armoricain, notamment le Scorff en Bretagne (infiltration # 40 % du volume total écoulé) et de l'Hyrome en Pays de la Loire (infiltration de 25 à 30 % de l'écoulement).

On adoptera donc comme hypothèse de travail qu'en moyenne **33 % (un tiers) des eaux de pluie efficace s'infiltrent**, le reste s'écoulant en ruissellement superficiel.

Une autre hypothèse de travail concerne le pourcentage de cette eau infiltrée que l'on peut considérer comme raisonnablement mobilisable, compte tenu des débits à conserver dans les cours d'eau en période d'étiage, (encore que les prélèvements d'eau souterraine à des fins d'AEP, aient des impacts plutôt positifs sur le débit d'étiage des cours d'eau) et des contraintes économiques. Il est clair que 5 % est un ordre de grandeur vraisemblable qui doit pouvoir être assez largement modulé selon les conditions locales.

3.2. ALIMENTATION DES NAPPES SOUTERRAINES EN MAYENNE

Dans la figure 9, les courbes représentent les isovaleurs de pluies efficaces en mm. Les pluies efficaces sont variables d'une année à l'autre. Cependant, l'inertie des nappes est généralement suffisante pour qu'on puisse raisonner en terme d'"année moyenne". En fonction de divers paramètres -dont l'altitude en particulier- les pluies efficaces sont très inégales à l'intérieur du département.

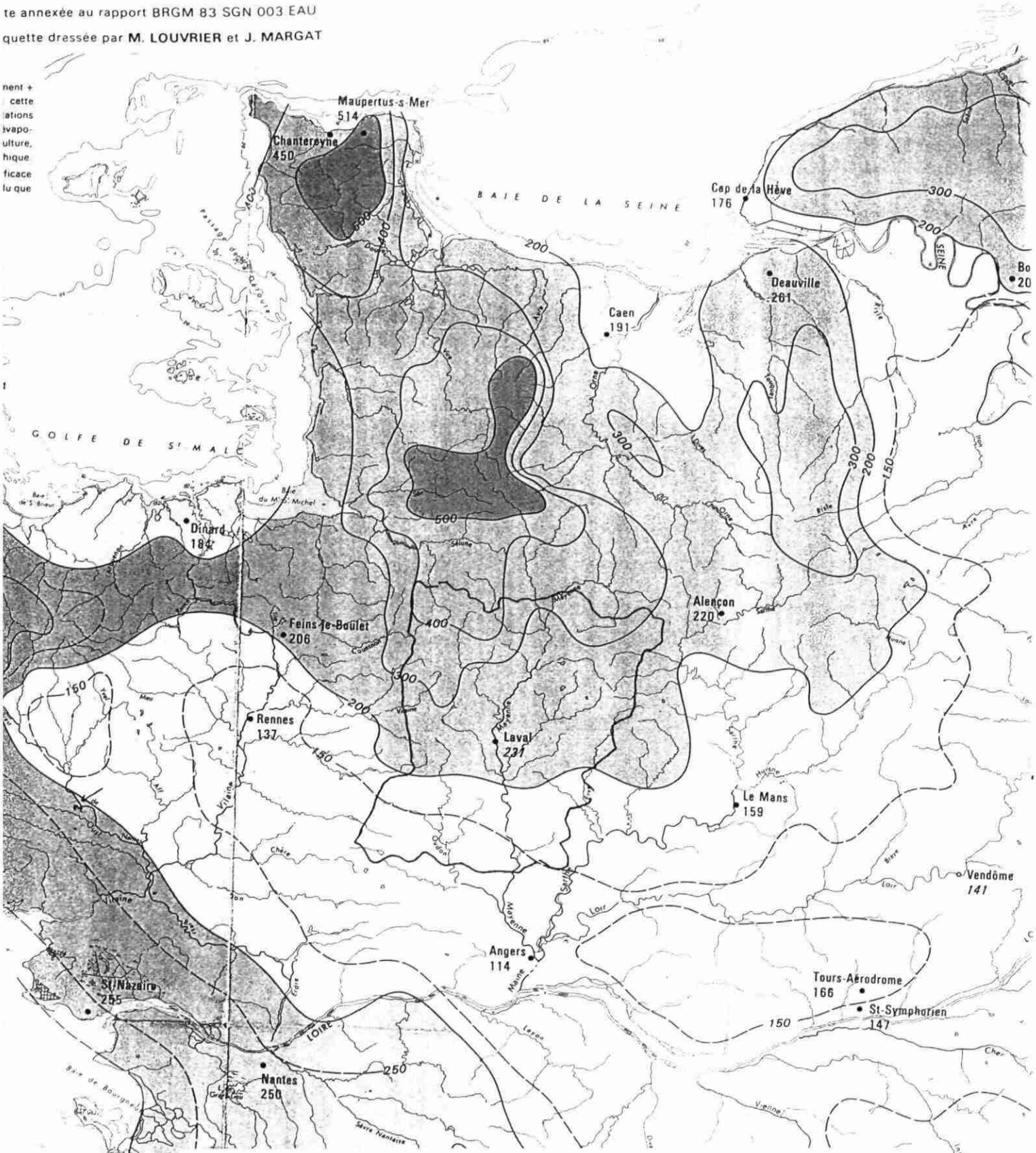
La partie la plus arrosée en pluies efficaces est l'extrémité nord-ouest de la Mayenne (région de Landivy), avec plus de 400 mm par an en moyenne. En revanche, le Sud du département (région de Château-Gontier et Cossé-le-Vivien) ne reçoit en moyenne que 150 à 200 mm de pluies efficaces par an.

L'alimentation moyenne -au prorata des surfaces- pour le département est de **257 mm de pluies efficaces** pour une année moyenne, soit environ **1 300 millions de m^3.**

te annexée au rapport BRGM 83 SGN 003 EAU

quette dressée par **M. LOUVRIER** et **J. MARGAT**

nent + cette ations vapo- ulture, hique ficace lu que



FRANCE
PRÉCIPITATIONS EFFICACES
MOYENNES ANNUELLES
(1946-1976)

Figure 9

Un tiers de ce volume s'infiltre dans le sous-sol, ce qui représente un volume de **435 millions de m^3** d'apports aux nappes souterraines

Le ratio de **5 %**, retenu au paragraphe précédent, représente, à partir du volume calculé ci-dessus, une **ressource souterraine potentielle plausible de 21,8 millions de m^3/an** environ, soit près de **60 000 m^3/jour.**

Ces volumes correspondent à un **débit moyen de 700 l/s**, ce qui donne un **débit spécifique moyen**, compte tenu de la superficie du département, de **0,13 l/s/km².**

Les modules moyens interannuels d'écoulement des cours d'eau dans le département de la Mayenne sont compris entre 4 et 11 l/s/km² et les **débits spécifiques d'étiage entre 0,5 et 1,5 l/s/km²** : ainsi, des prélèvements globaux de 0,13 l/s/km² dans les nappes ne représenteraient s'ils étaient soustraits au circuit de l'eau, que **25 % des débits spécifiques d'étiage les plus faibles,** ce qui resterait dans une proportion tout-à-fait raisonnable. En fait, l'essentiel des débits prélevés en sous-sol est très vite rendu au milieu naturel ; cependant, des déficits estivaux sont possibles dans les cas (à éviter) où prélèvements et restitutions n'ont pas lieu dans les mêmes bassins ou positions de bassins versants.

Les prélèvements journaliers moyens actuels d'eau souterraine s'élèvent à 36 000 m^3/jour, soit environ 3 % de la recharge annuelle moyenne des nappes.

Il s'agit là de ressources actuelles, et non de ressources potentielles nouvelles. Cependant, le présent peut interférer avec le futur ; certains forages en service peuvent occuper les seules situations favorables (sur les plans technique et économique) au confortement d'un besoin existant et, de ce fait, "empiéter" sur le ration de 5 %. Aussi pour rester dans la logique exposée plus haut, **nous admettons que les nouvelles ressources en eau souterraine mobilisables dans des conditions économiques acceptables représentent 2 à 5 % des volumes infiltrés.** Ces ratios sont utilisés dans les évaluations qui suivent. Proposer comme ressources en eau profonde mobilisables pour l'AEP un pourcentage des pluies infiltrées identique pour tout le département est une commodité d'exposé. Il est clair que l'objectif de 2 à 5 % peut être modulé selon les secteurs. Rien empêche de la dépasser très significativement lorsque l'accès à l'eau souterraine de bonne qualité est facile et que les ressources alternatives sont peu abondantes, ou dégradées.

Nous avons retenu ici à titre d'hypothèse de travail, en supposant que les prélèvements existants soient également répartis, les valeurs de ressources nouvelles facilement mobilisables suivantes :

- classes d'intérêt 1 et 2 : de 2 à 5 % des volumes annuellement infiltrés,
- classe d'intérêt 3 : de 2 à 4 % de l'infiltration,
- classe d'intérêt 4 : de 2 à 3 de l'infiltration.

3.3. FORMATIONS ET ZONES LES PLUS INTERESSANTES

Afin de ne pas présenter une vision trop synthétique des résultats, et sachant que les formations géologiques n'ont pas nécessairement les mêmes caractéristiques hydrogéologiques sur l'ensemble du département, certaines de ces formations, notamment les granites et les schistes briovériens, ont été subdivisées en zones géographiques, qui sont le plus souvent délimitées par des surfaces d'affleurement.

Par ailleurs, certaines formations du fait de leur faible extension ou du nombre trop restreint de données qui leur sont attribuées, n'ont pas été incluses dans des zones de ressources intéressantes (Schistes noirs d'Angers, Grès armoricain, schistes et grès du Culm).

Cela n'exclut pas, bien au contraire, la possibilité d'implanter des forages sur ces zones si leurs caractéristiques s'avèrent par ailleurs favorables.

Les zones susceptibles de fournir des ressources importantes sont donc les suivantes (Fig. 10) :

- pour les formations granitiques :

- le massif de Fougères
- le massif de Le Horps
- le massif de la région de Mayenne
- le massif de Izé-St.Pierre des Nids

- pour les cornéennes :

- la zone de Mayenne
- la zone d'Ernée
- la zone de Désertines

- pour les schistes briovériens de la zone méridionale :

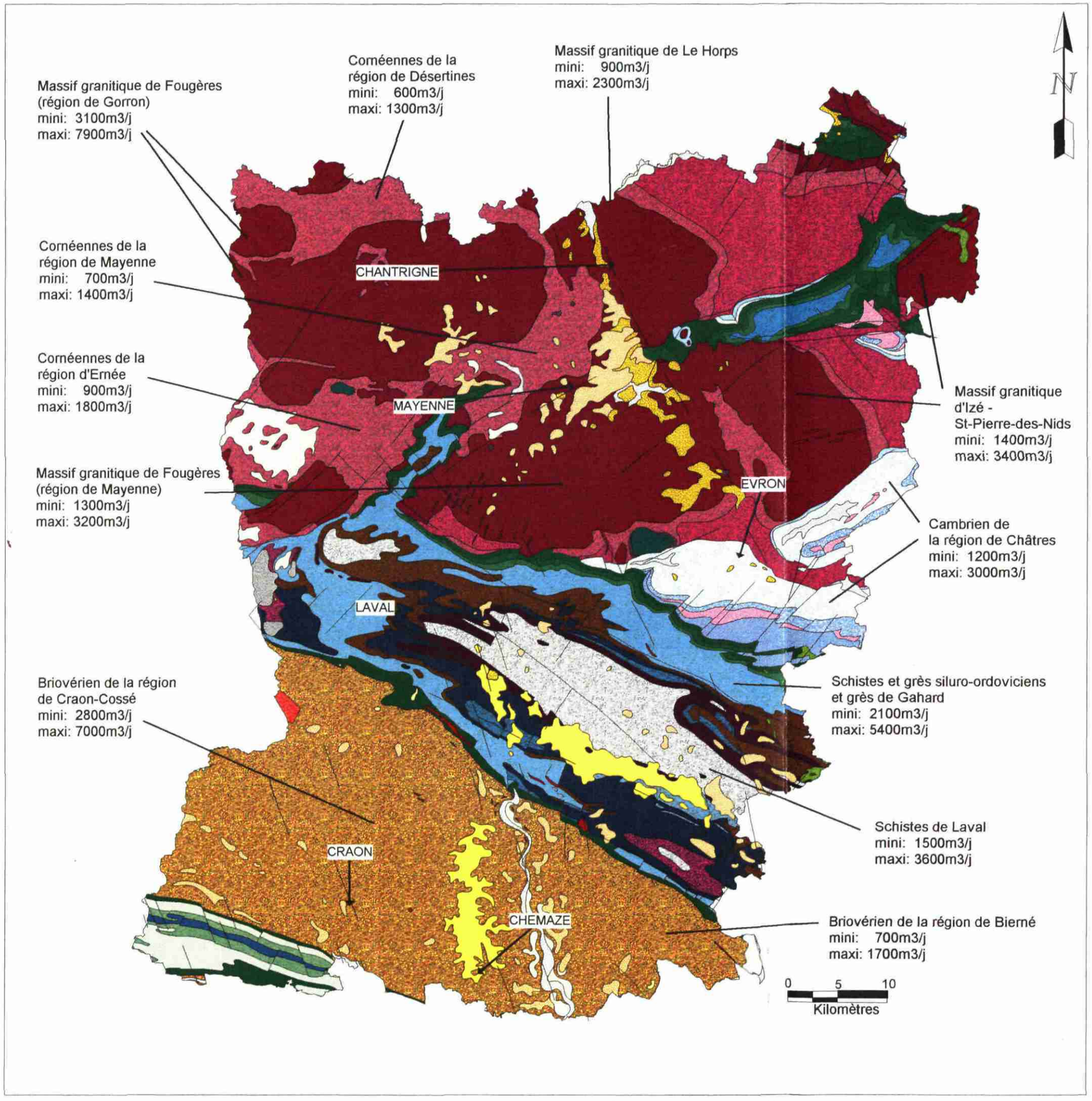
- la zone de Craon-Cossé (à l'Ouest de la Mayenne)
- la zone de Bierné (à l'Est de la Mayenne)

- les terrains cambriens de la région de Châtres

- la zone des schistes siluriens, des schistes et grès ordoviciens et des Grès de Gahard ceinturant le bassin de Laval

- les Schistes de Laval (Carbonifère supérieur)

SECTEURS FAVORABLES A LA PRODUCTION D'EAU SOUTERRAINE EN MAYENNE



Légende
Stratigraphie et lithologie

- Holocène : alluvions fluviatiles récentes
- Pléistocène : alluvions fluviatiles anciennes
- Pliocène-Miocène : sables, calcaires et marnes
- Pléistocène-Pliocène : sables, argiles et cailloutis
- Pliocène à Eocène : sables, argiles et cailloutis
- Oligocène-Eocène : grès et calcaires silicifiés, dalles indurées
- Cénomanien-Albien : sables, marnes, craie et argile
- Stéphanien : grès, houille et conglomérats
- Namurien-Viséen sup. : schistes et grès, houille
- Viséen inférieur-Tournaisien : calcaires
- Viséen inférieur-Tournaisien : calcaires, faciès récifal
- Tournaisien-Dévonien sup. : schistes et grès, faciès Culm
- Tournaisien-Dévonien sup. : volcanites acides, rhyolites, dacites, tufs acide
- Tournaisien-Dévonien sup. : volcanites basiques, basaltes, andésites, tufs ba
- Dévonien inf. : grès et calcaires
- Silurien : schistes carbonés et grès
- Silurien : schistes carbonés, grès quartziques
- Silurien : schistes et quartzites
- Silurien : volcanites basiques, basaltes
- Ordovicien sup. : schistes
- Ordovicien sup. : schistes ardoisiers et grès
- Ordovicien : grès et schistes
- Ordovicien moy-sup : schistes noirs ardoisiers, schistes et grès
- Ordovicien moy-sup. : schistes noirs ardoisiers, schistes et grès, schi
- Ordovicien moy. : schistes noirs ardoisiers
- Ordovicien inf. : grès quartziques
- Cambrien sup. : schistes et grès
- Cambrien moy. : grès feldspathiques
- Cambrien moy. : volcanites acides, rhyolites, dacites, tufs acides
- Cambrien inf. : conglomérats et arkoses
- Cambrien inf. : schistes et calcaires, conglomérats
- Protérozoïque sup.- Cambrien : schistes et grès
- Protérozoïque sup. : schistes et grès
- Protérozoïque sup. : schistes tachetés et cornéennes
- PALEOZOIQUE : leucogranites
- PROTEROZOIQUE-PALEOZOIQUE : diorites, gabbros
- PROTEROZOIQUE-PALEOZOIQUE : granodiorites
- PROTEROZOIQUE-PALEOZOIQUE : leucogranites
- PROTEROZOIQUE-PALEOZOIQUE : microgranites, leucogranites

Fig. 10 : Secteurs favorables à la production d'eau souterraine et géologie du département de la Mayenne

Pour chacune de ces zones, les tableaux de ressources et de calculs économiques présentés en annexe indiquent :

* **les volumes mobilisables**, à partir de la superficie de la zone, des pluies efficaces, du pourcentage d'infiltration et du ratio de mobilisation

* **le nombre de forages d'exploitation** à prévoir, en fonction de l'objectif de débit (débit moyen du meilleur quartile) et du taux de réussite applicable (deux fois le pourcentage de forages réussis, dans les limites de 50 à 80 %). Ce taux de réussite applicable est fixé au double du pourcentage de forages dépassant 10 m^3/h au soufflage.

* **le nombre de forages d'exploration** nécessaires (nombre de forages d'exploitation affecté d'un taux de 30 % d'échecs possibles, arrondi à l'unité)

* **le nombre de sites à explorer** (nombre de forages d'exploration reconnaissance affecté du taux de réussite arrondi à l'unité)

* **le métré de sondages de reconnaissance** (2 x 100 mètres par site).

Compte tenu de ces résultats, des estimations de coûts globaux et d'incidence sur le prix du m^3 d'eau mobilisé complètent ces tableaux.

Pour chaque zone, l'évaluation des ressources mobilisables a été effectuée pour les 2 ratios (mini et maxi probables) indiqués en 3.2.

Les principaux résultats sont récapitulés sur le tableau 4 ci-après.

Les méthodes mises en oeuvre pour les estimations de ressources sont détaillées en annexe 3.

Le détail des coûts unitaires utilisés pour les calculs est présenté en annexe 4.

Le tableau récapitulatif des ressources et des coûts pour l'ensemble du département de laMayenne (tableau 4), fait apparaître que la mobilisation des 17 200 m^3/jour (hypothèse minimale à 2%) sur les zones reconnues favorables atteindrait un **coût global de 96 millions de Francs, alors que la mobilisation de 4200 m3/jour (hypothèse maximale) atteindrait le coût global de près de 200 millions de francs.**

DEPARTEMENT DE LA MAYENNE

RECAPITULATIF DES RESSOURCES ET COÛTS

		Ressources		Débits attendus par forage			Coûts en MF		Incidence sur le prix du m3 (en F/m3) Sans subvention Emprunt 9% sur 20 ans		Incidence sur le prix du m3 (en F/m3) Avec subvention 70% et emprunt 9% sur 20 ans		
Zones	Hypothèse %	Volumes Mm3/an	Volumes m3/jour	en m3/jour (1)	en m3/an	Nombre forages	Coût Recherche (2)	Coût total (3)	Recherche	Total	Recherche	Total	
Massif granitique de FOUGERES (Région de GORRON)	2%	1,14	3100	600	224000	6	2,64	14,64	0,25	1,41	0,08	0,42	
	5%	2,87	7900	600	224000	13	5,84	31,84	0,22	1,22	0,07	0,36	
Massif granitique de LE HORPS	2%	0,33	900	600	224000	2	1,04	5,04	0,35	1,67	0,10	0,50	
	5%	0,83	2300	600	224000	4	1,98	9,98	0,26	1,32	0,08	0,40	
Massif granitique de FOUGERES (région de MAYENNE)	2%	0,47	1300	600	224000	3	1,32	7,32	0,31	1,71	0,09	0,51	
	5%	1,17	3200	600	224000	6	2,64	14,64	0,25	1,37	0,07	0,41	
Massif granitique de IZE-ST.PIERRE DES NIDS	2%	0,50	1400	600	224000	3	1,32	7,32	0,29	1,60	0,09	0,48	
	5%	1,24	3400	600	224000	6	2,64	14,64	0,23	1,29	0,07	0,39	
Cornéennes de la région de MAYENNE	2%	0,26	700	500	188000	2	1,14	5,14	0,48	2,17	0,14	0,65	
	4%	0,52	1400	500	188000	3	1,52	7,52	0,32	1,58	0,10	0,48	
Cornéennes de la région d'ERNEE	2%	0,33	900	500	188000	2	1,14	5,14	0,38	1,71	0,11	0,51	
	4%	0,65	1800	500	188000	4	2,28	10,28	0,38	1,73	0,12	0,52	
Cornéennes de la région de DESERTINES	2%	0,23	600	500	188000	2	1,14	5,14	0,54	2,45	0,16	0,73	
	4%	0,47	1300	500	188000	3	1,52	7,52	0,35	1,75	0,11	0,53	
Briovérien de la région de CRAON-COSSE	2%	1,03	2800	650	237000	5	2,16	12,16	0,23	1,29	0,07	0,39	
	5%	2,57	7000	650	237000	11	4,60	26,60	0,20	1,13	0,06	0,34	
Briovérien de la région de BIERNE	2%	0,26	700	650	237000	2	0,94	4,94	0,40	2,08	0,12	0,62	
	5%	0,64	1700	650	237000	3	1,32	7,32	0,23	1,25	0,07	0,38	
Cambrien de la région de CHATRES	2%	0,45	1200	600	224000	3	1,32	7,32	0,32	1,78	0,10	0,53	
	5%	1,11	3000	600	224000	6	2,54	14,54	0,25	1,43	0,08	0,43	
Schistes & grès siluriens,ordoviciens, Grès de Gahard	2%	0,78	2100	400	146000	6	2,84	14,84	0,40	2,08	0,12	0,63	
	5%	1,96	5400	400	146000	14	6,72	34,72	0,38	1,94	0,11	0,58	
Schistes de LAVAL	2%	0,53	1500	500	188000	3	1,32	7,32	0,27	1,51	0,08	0,45	
	5%	1,32	3600	500	188000	8	3,38	19,38	0,28	1,61	0,08	0,48	
TOTAUX	Hyp.2%	6,31	17200,00			39,00	18,32	96,32	0,35	1,79	0,11	0,54	MOYENNES
	Hyp. 4 ou 5%	15,35	42000,00			81,00	36,98	198,98	0,28	1,47	0,08	0,44	

(1) temps de fonctionnement 20 heures par jour
(2) coût prévisionnel correspondant au volume des travaux de recherche (phases I et II) nécessaire à la mise en évidence et à la certification des nouvelles ressources potentielles
(3) les installations définitives (terrain, forage, pompe, station de traitement, raccordements hydrauliques, périmètres de protection...) sont évaluées à 2 MF par forage dans chaque cas.

Tableau 4 : RECAPITULATIF DES RESSOURCES ET COÛTS

4. Qualité des eaux

4.1. ANALYSES RECUEILLIES

Le problème le plus grave relatif à la qualité des eaux souterraines étant la présence de nitrates, les analyses dépouillées concernent essentiellement les teneurs en NO3, ainsi que le fer et les sulfates, qui permettent d'appréhender le phénomène de dénitrification naturelle en profondeur.

Les analyses sont d'origine multiple :

- une partie provient soit de la DDASS, soit directement des maîtres d'ouvrage et concerne 198 analyses,

- l'autre partie provient de campagnes effectuées sous l'égide du GDS (Groupement Départemental de Défense Sanitaire du Bétail de la Mayenne) et concerne 339 analyses.

4.2. INTERPRETATION

Nous avons distingué (cf annexe 3 - chapitre 3) quatre types d'eaux pour ce qui concerne les nitrates et la dénitrification naturelle :

- les eaux peu nitratées : teneur en nitrates inférieure à 25 mg/l, pas de fer et pas -ou très peu- de sulfates,

- les eaux nitratées: teneur en nitrates supérieure à 25 mg/l, pas de fer et pas -ou très peu- de sulfates,

- les eaux dénitrifiées: teneur en nitrates inférieure à 2 mg/l, présence de fer (>0,3 mg/l) et de sulfates,

- les eaux mélangées, rencontrées généralement dans des forages mettant en communication des eaux superficielles nitratées et des eaux profondes dénitrifiées; elles ont des teneurs en nitrates supérieures à 2 mg/l, du fer (plus de 0,3 mg/l) et des sulfates.

4.3. RESULTATS

Le tableau n° 5 synthétise, par formation géologique, les résultats des analyses par types d'eau.

Afin de bien cerner le phénomène de dénitrification naturelle, nous avons calculé un pourcentage d'eaux dénitrifiées en cumulant les nombres d'eaux dénitrifiées et d'eaux mélangées : en effet, si tous les forages étaient réalisés avec une cimentation annulaire en tête efficace, la plupart de ceux qui présentent une eau mélangée fourniraient en réalité une eau dénitrifiée. En d'autres termes, une eau mélangée est la signature du phénomène de dénitrification naturelle.

Une première observation intéressante est que toutes les formations géologiques présentent, à des degrés plus ou moins importants, des indices de dénitrification naturelle. Il y a, certes, des pourcentages très différents entre des formations comme les schistes et calcaires cambriens (22 %) et les grès de Gahard (80 %), mais dans aucune formation on n'observe une absence totale de dénitrification.

Cette observation conduit à ne pas limiter strictement la recherche d'eaux naturellement dénitrifiées aux formations susceptibles de renfermer des sulfures : il semble que tout aquifère dans des conditions de milieu réducteur (cas des nappes captives) puisse être le siège de phénomènes de dénitrification naturelle, avec, certes des processus diifférents.

Nous avons étudié séparément les eaux des forages dont la profondeur est supérieure à 30 mètres ; l'observation ne porte plus alors que sur 299 analyses.

On note que, si le pourcentage des eaux peu nitratées n'augmente pratiquement pas par rapport à celui de l'ensemble des forages, celui des eaux nitratées diminue pratiquement de moitié et le pourcentage des eaux soumis à la dénitrification naturelle passe de 41 % à 57 %.

Il apparaît donc très clairement que la profondeur des ouvrages est un facteur favorable au développement de la dénitrification naturelle. L'exemple est particulièrement flagrant pour les schistes et grès du Briovérien de la région méridionale : le pourcentage d'eaux dénitrifiée passe de 39 % (toutes profondeurs confondues) à 62 % (profondeurs supérieures à 30 mètres).

On peut donc conclure que toutes les formations géologiques, à des degrés divers, peuvent être le siège de phénomènes de dénitrification naturelle, et que la profondeur des ouvrages est un facteur déterminant pour son développement.

La carte de la figure 11 présente l'implantation géographique des points de prélèvement et leur caractérisation par types d'eau.

Le processus de dénitrification naturelle est décrit en annexe 3

RESULTATS DES ANALYSES						
Sur l'ensemble des prélèvements (toutes profondeurs confondues)						
	Nombre analyses	Eau pas ou peu nitratée	Eau nitratée	Eau dénitrifiée	Eau mélangée	Pourcentage d'eau dénitrifiée
Alluvions	13	1	5	2	5	54%
Séries tertiaires	32	6	12	9	5	44%
Cénomanien-Albien (terrains secondaires)						
Schistes de Laval	11	3	3	2	3	45%
Calcaire de Sablé et de Laval *	13	1	6	0	6	46%
Schistes et grès du Culm	17	5	2	5	5	59%
Volcanites (Carbonifère)	6	2	3	0	1	17%
Grès de Gahard	10	1	1	3	5	80%
Schistes carbonés - grès quartzites	14	2	4	3	5	57%
Schistes et grès ordoviciens	9	3	1	1	4	56%
Schistes noirs d'Angers	7	2	2	0	3	43%
Grès armoricain	9	1	5	1	2	33%
Schistes et grès feldspathiques	3	2	0	0	1	33%
Pyroclastites	2	0	2	0	0	0%
Schistes et calcaires cambriens *	18	7	7	2	2	22%
Schistes et grès du Brioverien Sud	184	47	66	26	45	39%
Cornéennes & schistes tachetés	50	7	25	4	14	36%
Schistes et grès du Brioverien Nord	29	3	11	2	13	52%
Granodiorites, microgranites, leucogranites ..	110	15	56	8	31	35%
TOTAL	537	108	211	68	150	
Pourcentages globaux		20%	39%	13%	28%	41%
Echantillonnage non significatif						
Sur les forages de profondeur > 30 mètres						
	Nombre analyses	Eau pas ou peu nitratée	Eau nitratée	Eau dénitrifiée	Eau mélangée	Pourcentage d'eau dénitrifiée
Alluvions	5	0	0	1	5	100%
Séries tertiaires	18	4	3	7	4	61%
Cénomanien-Albien (terrains secondaires)						
Schistes de Laval	8	3	1	2	2	50%
Calcaire de Sablé et de Laval *	3	2	1	0	0	0%
Schistes et grès du Culm	15	5	1	5	4	60%
Volcanites (Carbonifère)	5	2	2	0	1	20%
Grès de Gahard	7	0	1	3	3	86%
Schistes carbonés - grès quartzites	10	1	2	3	4	70%
Schistes et grès ordoviciens	6	2	1	1	4	67%
Schistes noirs d'Angers	5	2	2	0	1	20%
Grès armoricain	6	1	2	1	2	50%
Schistes et grès feldspathiques	2	1	0	0	1	50%
Pyroclastites	2	0	2	0	0	0%
Schistes et calcaires cambriens *	14	6	5	1	2	21%
Schistes et grès du Brioverien Sud	100	27	11	26	36	62%
Cornéennes & schistes tachetés	14	0	4	3	7	71%
Schistes et grès du Brioverien Nord	20	3	3	2	12	70%
Granodiorites, microgranites, leucogranites ..	56	8	20	7	21	50%
TOTAL	299	67	61	62	109	
Pourcentages globaux		22%	20%	21%	36%	57%
Echantillonnage non significatif						

Tableau 5 : RESULTATS DES ANALYSES

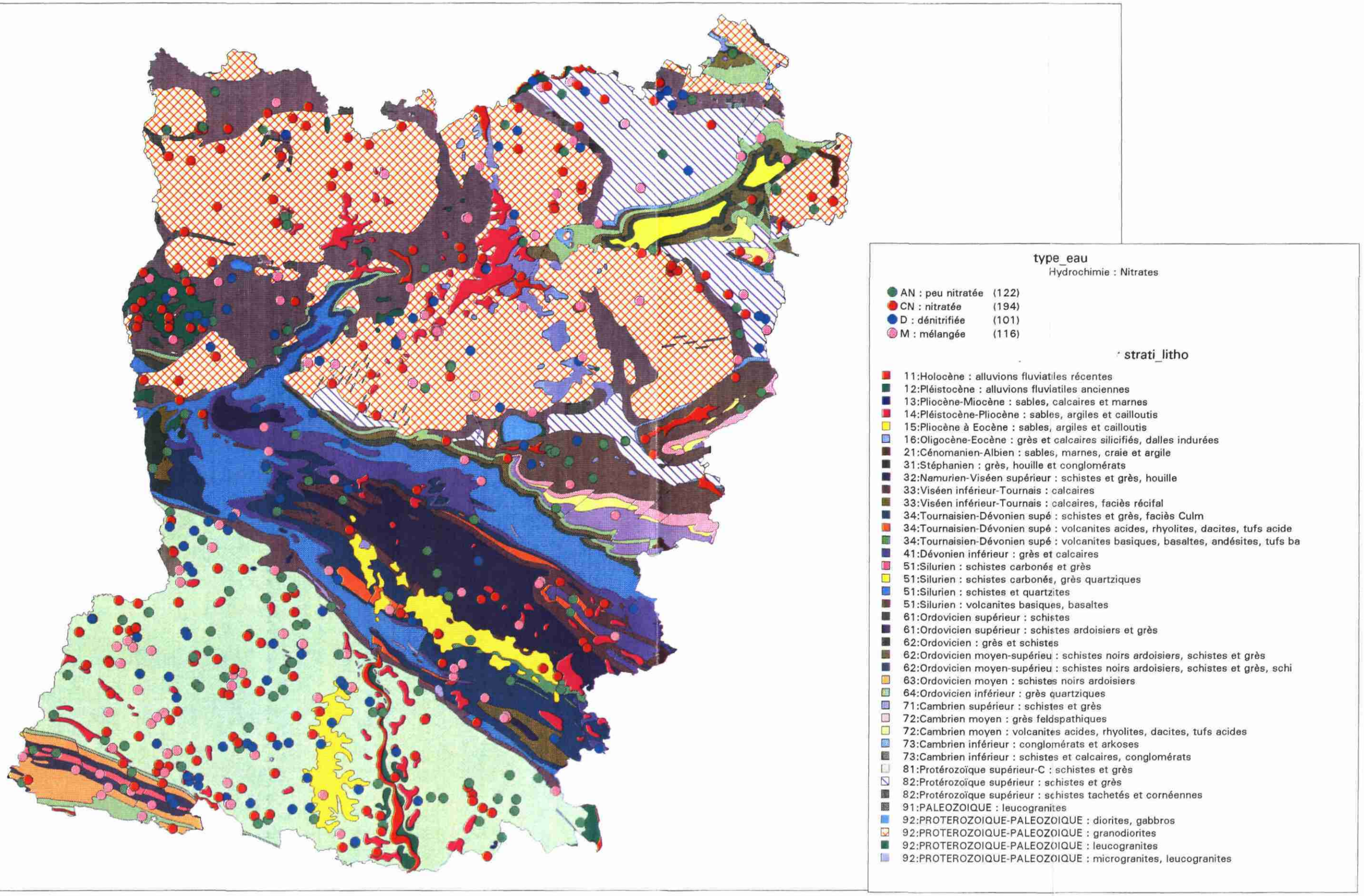


Figure 11 : EMPLACEMENTS DES PRELEVEMENTS ET TYPES D'EAUX

4.4. APPROCHE DE LA DENITRIFICATION NATURELLE PAR PRELEVEMENTS ECHELONNES

La proportion importante de forages présentant une signature de dénitrification naturelle conduit examiner ce processus de manière plus approfondie, et il a été demandé au BRGM de réaliser une investigation plus poussée dans ce domaine.

Il a donc été décidé d'effectuer des prélèvements d'eau au fur et à mesure de l'avancement de 3 forages réalisés -si possible- dans des formations géologiques différentes.

Les dosages prévus sur les échantillons recueillis étaient ceux des nitrates, du fer et des sulfates.

La chute des teneurs en nitrates et l'apparition de fer lorsqu'on atteint certaines profondeurs étant la signature du phénomène de dénitrification, ces deux paramètres étaient indispensables. Pour ce qui concerne les sulfates, leur présence atteste de la réaction classique d'oxydation des sulfures (cf. description de la dénitrification naturelle en annexe 3) et il a été jugé intéressant de les doser également.

Par ailleurs, il avait été demandé d'examiner le problème de l'âge des eaux dénitrifiées et de tenter une approche de leur trajet souterrain par la méthode isotopique.

Il a donc été décidé d'effectuer également, aux mêmes niveaux que pour les dosages chimiques, des prélèvements en vue d'analyses isotopiques.

Les paramètres retenus ont été l'oxygène 18 (O18), le deutérium (2H) et le tritium (3H).

L'oxygène 18 et le deutérium de la molécule d'eau permettent d'identifier les familles d'eaux souterraines, leurs relations avec les précipitations et leur évolution ; le tritium permet d'identifier des eaux récentes et d'estimer le temps de transit.

Les prélèvements ont été effectués dans les conditions suivantes :

- les forages étant réalisés par la technique du "marteau fond de trou", les déblais et l'eau sont évacués par "soufflage" ; on peut ainsi observer toute nouvelle arrivée d'eau. Des prélèvements ont donc été effectués à chaque nouvelle arrivée d'eau au cours de l'avancement.

- l'eau prélevée a été filtrée et répartie en flacons de 1 litre destinés aux dosages isotopiques, et en 2 flacons de 10 cl, l'un pour les dosages de nitrates et sulfates, l'autre étant destiné au dosage du fer et recevant une dose d'acide nitrique afin de garder le fer en solution.

Les trois forages concernés sont situés :

- à Montenay, sur le massif granitique de Fougères dans la région de Gorron : 6 prélèvements entre 13 et 51 mètres,

- à La Roe, dans les schistes briovériens de la région de Craon-Cossé : 6 prélèvements entre 23 et 50 mètres,

- à Cigné (commune d'Ambrières-les-Vallées), sur le granite du massif de Fougères : 4 prélèvements entre 33 et 75 mètres.

4.4.1. paramètres chimiques (NO3, Fe, SO4)

4.4.1.1. Résultats

Les résultats des analyses sont consignés dans le tableau n° 6.

Ils font notamment apparaître que, dans les trois forages, le phénomène de dénitrification naturelle est très fortement probable, puisque les teneurs en nitrates décroissent avec la profondeur, et que l'on observe simultanément un développement du fer dissous.

Les teneurs en sulfates restent modestes et surtout constantes -voire en diminution- avec la profondeur.

4.4.1.2. Interprétation

Les teneurs observées lorsqu'on passe d'une couche à l'autre avec une nouvelle arrivée d'eau, qu'il s'agisse des nitrates ou du tritium, peuvent amener à penser que, une partie du débit des couches sus-jacentes ayant été mis "hors course", la teneur de la couche est égale à 0.

En réalité, il se peut que les débits mis hors course soient encore plus importants, et que les teneurs soient supérieures à 0... voire égale à la teneur mesurée si tout le débit des couches sus-jacentes a été mis hors course.

Lorsque la différence de débit entre deux niveaux est importante, la teneur mesurée est proche de la valeur réelle : les teneurs en nitrates des niveaux les plus profonds du forage de Montenay sont proches de la limite de détection.

		DEPARTEMENT DE LA MAYENNE						
		RESSOURCES EN EAU SOUTERRAINE PROFONDE						
		SUIVI DES FORAGES ET PRELEVEMENTS						
FORAGE DE MONTENAY			*(Granite)*					
Profondeurs	Débits de l'ouvrage en m3/h	teneur en nitrates (débit total)	teneur en nitrates (arrivée d'eau)	teneur en fer	teneur en sulfates	Isotope O 18 + ou - 0,1 0/00	Isotope H 2 (Deuterium) + ou - 0,8 0/00	Isotope H 3 (Tritium) en UHT + ou - 2
13	0,2	32,2	32,20	<0,02	14,9	-6,4	-40	10
17	1,3	20,6	18,49	0,05	15,9	-6,7	-41,2	7,7
25	4,5	12,7	9,49	0,08	13,5	-6,7	-41,4	6,7
29	6,3	6,6	-8,65	<0,02	14	-6,7	-41,1	5,2
35	10,8	0,3	-8,52	0,26	12,3	-6,9	-41,9	4,1
51	30	0,1	-0,01	1,57	9,9	-6,7	-41,7	3,7
		teneurs en nitrates négatives						
FORAGE DE LA ROE			*(Schistes briovériens)*					
Profondeurs	Débits de l'ouvrage en m3/h	teneur en nitrates (débit total)	teneur en nitrates (arrivée d'eau)	teneur en fer	teneur en sulfates	Isotope O 18 + ou - 0,1 0/00	Isotope H 2 (Deuterium) + ou - 0,8 0/00	Isotope H 3 (Tritium) en UHT + ou - 2
23	1	65,9	65,90	<0,02	20	-6,7	-40,8	11
26	3	65,3	65,00	0,07	16,9	-6,7	-41,5	10
32	5	60,9	54,30	<0,02	16,7	-6,7	-41,7	11
38	5,4	57,7	17,70	0,05	16,6	-6,7	-41,1	11
41	5,7	52,5	-41,10	0,02	17,1	-6,7	-41,2	9
50	7	35,2	-40,65	0,13	18,3	-6,6	-41,8	7
		teneurs en nitrates négatives						
FORAGE DE CIGNE			*(Granite)*					
Profondeurs	Débits de l'ouvrage en m3/h	teneur en nitrates (débit total)	teneur en nitrates (arrivée d'eau)	teneur en fer	teneur en sulfates	Isotope O 18 + ou - 0,1 0/00	Isotope H 2 (Deuterium) + ou - 0,8 0/00	Isotope H 3 (Tritium) en UHT + ou - 2
33	0,3	64,3	64,30	8,2	7,5	-6,6	-39,2	6,6
45	1,2	43,3	36,30	0,08	5	-6,6	-40,4	7,9
65	1,5	38,8	20,80	0,2	8,1	-6,7	-41,5	7
75	1,9	23,7	-32,92	0,05	16	-5,8	-34,9	8,6
		teneurs en nitrates négatives						

TABLEAU 6 :

Ressources en eau souterraine profonde : suivi des forages et prélèvements

Cette observation confirme donc que le débit instantané d'un ouvrage n'est pas obligatoirement un débit maximum. Dans le cas du forage de Montenay, nous avons calculé les débits sus-jacents théoriques compatibles avec des arrivées ramenées à des teneurs en nitrates égales à 0 ; ces calculs font apparaître que 26 % des débits des arrivées sus-jacentes (soit près de 8 m^3/h) ne sont pas pris en compte dans le débit instantané de fin de forage (cf. tableau 7).

L'évolution des teneurs en nitrates, compte tenu de ces remarques, montre que l'apparition de la dénitrification au cours de la foration est très brutale, sur 1 ou 2 mètres, et qu'elle se manifeste à des profondeurs diverses : 29 mètres à Montenay, 41 mètres à La Roe et 45 mètres à Cigné (si il y a effectivement dénitrification pour ce dernier ouvrage).

Le fer est présent dans les eaux dénitrifiées, mais son apparition n'est pas synchrone avec les arrivées à teneur en nitrates nulle : ses teneurs commencent à croître à l'arrivée d'eau suivante.

Pour ce qui concerne les sulfates, on constate des teneurs relativement modestes et constantes avec l'augmentation de la profondeur, malgré l'apparition de la dénitrification : cette observation amène à penser que la réaction de dénitrification n'est pas la réaction classique, liée à la présence de sulfures. Cela permet d'envisager que le phénomène de dénitrification n'est pas limité aux seuls milieux renfermant des sulfures, mais qu'il peut se développer dans n'importe quelle formation lorsque les conditions sont réunies pour créer un milieu réducteur (nappes captives notamment).

Des compléments d'interprétation sur la dénitrification, le fer et les sulfates, sont présentés plus loin, grâce aux apports des dosages isotopiques.

4.4.2 - Analyses isotopiques

Forage de la Roe (schistes briovériens) :

Les valeurs des isotopes stables de la molécule d'eau (deutérium et oxygène 18) restent constantes, dans la limite d'erreur sur les échantillons de tous les niveaux. Cela signifie que les eaux des différents niveaux rencontrés ont la même origine. La situation de ces eaux dans un diagramme δD vs $\delta\ ^{18}O$ par rapport à la droite mondiale des eaux météoriques (figure 12) montre que leur origine météorique n'est pas altérée (par exemple, il n'y a pas de mélange avec une eau qui aurait circulé plus profondément et aurait échangé avec les minéraux silicatés). De même il n'y a pas de mélange avec une eau qui se serait infiltrée à une période plus ancienne ou à un endroit géographiquement différent.

DEPARTEMENT DE LA MAYENNE

RESSOURCES EN EAU SOUTERRAINE PROFONDE

DEBITS INSTANTANES ET TENEURS EN NITRATES

FORAGE DE MONTENAY

Profondeurs	Débits de l'ouvrage en m3/h	teneur en nitrates (débit total)	teneur en nitrates (arrivée d'eau)	débit cumulé des arrivées sus-jacentes dans le débit total (m3/h)	débit mis "hors course" en m3/h
13	0,2	32,2	32,20		
17	1,3	20,6	18,49		
25	4,5	12,7	9,49		
29	6,3	6,6	-8,65	3,3	1,2
35	10,8	0,3	-8,52	0,5	5,8
51	30	0,1	-0,01	10	0,8
Débits non pris en compte dans le débit total "au soufflage">>>>					***7,8 soit 26%***
		teneurs en nitrates négatives !!!			

TABLEAU 7 : Ressources en eau souterraine profonde : débits instantanés et teneurs en nitrates

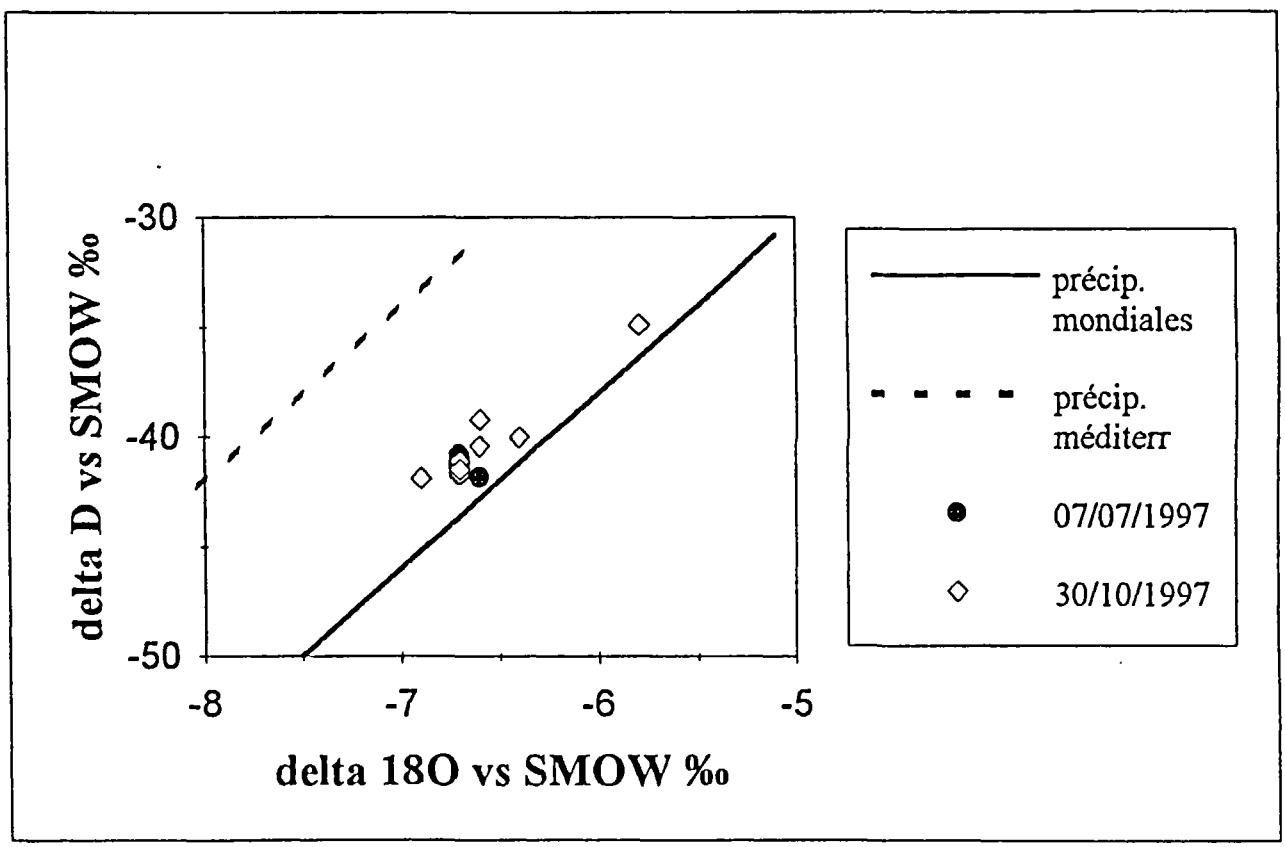


FIGURE 12 - Droite de référence delta D/delta ^{18}O des précipitations actuelles

Pour ce qui concerne le tritium, il faudrait connaître la courbe d'évolution au cours du temps des teneurs en tritium des précipitations dans la région d'étude. Ces valeurs ne sont pas disponibles. Il faut alors se comparer à d'autres régions. Une chronique depuis 1962 existe pour Thonon les bains et les données recueillies au Mans entre 1964 et 1986 sont assez proches de ces dernières. Mais il y a d'autres données de l'Ouest de la France, acquises ces 2 dernières années, qui montrent que les précipitations sont beaucoup moins riches en tritium qu'à Thonon. Elles sont, selon une moyenne annuelle, actuellement autour de 20 UT à Thonon ; elles varient au cours de l'année entre 2 à 12 UT à Brest et entre 4 et 18 à Naizin (près de Pontivy dans le Morbihan), les teneurs les plus fortes étant en mai et les plus basses en janvier-février.

La première difficulté réside dans le choix de la chronique des teneurs en tritium à utiliser. Compte tenu de la proximité, on pourrait prendre comme référence la courbe du Mans. Cependant cette chronique est incomplète : il n'y a pas de données au delà de 1986. Compte-tenu de la similarité des valeurs avant cette date avec celles de Thonon, on est alors tenté d'utiliser les données de Thonon pour la période 1986-1997.

Une fois tombée sur le sol et infiltrée, l'eau présente une teneur en tritium qui évolue toujours à la baisse (décroissance de 50 % en 12,43 ans). Par ailleurs, on peut interpréter les valeurs mesurées selon diverses hypothèses, allant du modèle "piston" pur (l'eau analysée a chassé l'ensemble des eaux préexistantes) aux modèles faisant intervenir divers degrés de dispersion.

Les 11 UT mesurées dans les eaux rencontrées entre 0 et 38 mètres de profondeur font plus penser à des valeurs supérieures à celles de Brest. Ces eaux ont à première vue une composante récente, c'est à dire post-1952. Il est difficile de calculer un âge puisqu'on n'est pas sûr de la courbe des précipitation. Néanmoins, en se basant sur la courbe du Mans/Thonon, et en appliquant un modèle de piston pur, les teneurs en tritium sont compatibles avec un âge compris entre 5 et 15 ans. Cependant, la teneur mesurée peut résulter d'un mélange entre des eaux de différentes teneurs en tritium, dont au moins une composante est récente. En revanche, lorsque l'on considère les teneurs en tritium des 2 derniers prélèvements (41 et 54 mètres), celles-ci peuvent révéler une teneur en tritium de l'eau de la couche égale à 0, à condition que les débits sus-jacents mis hors course ne soient pas trop importants. Toutefois, si l'on calcule, pour les nitrates, quels seraient les débits sus-jacents restés en course pour des teneurs égales à 0 pour ces deux couches, on arrive, pour ces mêmes débits, à des valeurs aussi égales à 0 pour le tritium. Il semble donc très probable que les arrivées d'eau de 41 et 50 mètres soient exemptes de nitrates et non tritiées, ce qui leur donnerait une ancienneté d'au moins 45 ans. La stabilité des valeurs en isotopes stables et les variations des teneurs en tritium semble montrer qu'il n'y a pas de mélange, que les eaux se sont infiltrées au même endroit mais à des périodes différentes : les plus profondes avant 1952 et les autres plus récemment.

Il convient alors de se poser le problème de l'existence ou non d'une dénitrification, ces eaux anciennes pouvant n'avoir jamais été nitratées. La présence de fer penche en faveur

de réaction d'oxydo-réduction qui pourrait être de la dénitrification, même si elle s'est faite sans sulfures, donc sans production de sulfates.

Pour ce qui concerne le fer, les teneurs mesurées sont peut-être sensiblement sous-estimées, puisque le mode d'exhaure de l'eau est le "soufflage", et que ce procédé induit un brassage avec l'air pouvant occasionner une part d'oxydation et donc de précipitation du fer (passage de Fe^{2+} à Fe^{3+} qui est moins soluble).

Concernant les sulfates, il faut ajouter que le phénomène de dénitrification peut s'effectuer même en l'absence de sulfures et donc sans production de sulfates. Il faut cependant qu'il y ait nécessairement un "donneur d'électrons". Cela peut tout-à-fait être réalisé par de la matière organique, il faut alors vérifier la disponibilité de matière organique, certainement pas dans la roche, mais plutôt dans l'eau, regarder l'évolution de la courbe de CO2.

La certitude d'une dénitrification ne peut être établie que par la présence d'azote, ou par la présence de N_2O (gaz toxique attaquant la couche d'ozone) si la réaction de dénitification s'est arrêtée avant la production d'azote. Dans le cas d'une dénitrification par la matière organique, il convient de doser le CO2. (CO2 total et CO2 organique).

On peut aussi observer, parfois, des reprécipitations de minéraux sulfatés (minéraux de type "jarosite") qui précipitent des sulfates, lesquels ne peuvent alors être décelés dans les eaux, sinon par une analyse chimique complète permettant d'effectuer des calculs thermodynamiques. Bien que l'on n'ait pu mettre ce phénomène en évidence ici, on ne peut non plus l'exclure.

La réduction du Fe^{3+} en Fe^{2+} peut être simplement due à une oxydation de la matière organique, et pas nécessairement dans le cadre d'une réaction de dénitrification. Ce n'est donc pas une preuve irréfutable d'une dénitrification : il faudrait pour cela des dosages de l'azote 15, ou des dosages d'azote ou de N2O. Il pourrait donc s'agir d'une eau qui n'a jamais été nitratée.

La présence plus ou moins soudaine en profondeur, d'une eau nettement plus ancienne peut donc signifier qu'il existe une couche réalisant les conditions d'un confinement de la nappe, d'un régime de quasi-captivité.

Bien que l'on puisse penser sérieusement à de la dénitrification, une teneur égale à 0 n'est pas nécessairement une preuve, bien que sur des eaux anciennes, dépourvues de tritium, on ait pu trouver des nitrates. D'ailleurs, compte tenu des cycles végétaux naturels, en dehors de toute influence anthropique, il se pourrait qu'il y ait toujours un léger "bruit de fond" de nitrates (entre 5 et 10 mg/l. Il faudrait, bien entendu, connaître l'historique de la région sur le plan de la culture et des fertilisations.

Le passage, sur une épaisseur relativement faible, d'une eau reconnue comme récente, à une eau non tritiée, donc vieille d'au moins une cinquantaine d'année, amène à penser

qu'il peut s'agir d'une réaction à cinétique relativement lente. Il faudrait une coupe beaucoup plus précise pour en déduire des conclusions nette sur la cinétique. Ailleurs dans le socle (à Naizin), on note des cinétiques beaucoup plus rapides (division par 2 de la teneur en nitrates en 2 à 8 jours, résultant d'un test de traçage entre 2 forages) ; sur d'autres sites, en présence de sulfures, on a mesuré que la durée de "demi-vie" des nitrates s'effectuait sur 1 à 3 ans.

Des études menées sur la dénitrification naturelle ont par ailleurs montré qu'elle n'était pas forcément le résultat d'une seule réaction, mais des 3 types de réactions connues (cf annexe 5).

Au vu des 3 dosages d'isotopes, on peut dire que les eaux circulent très rapidement dans les 30 premiers mètres ; ensuite, il se passe quelque chose....

Forage de Cigné (granite)

Les teneurs en tritium aux alentours de 6 (inférieures à celles La Roe) font penser d'emblée qu'il s'agit d'eau mélangées -et ce dès le premier niveau- à des eaux sans tritium, si l'on se réfère aux précipitations du Mans/Thonon. Compte-tenu des valeurs de δD et $\delta 18O$, les deux pôles du mélange l'eau ancienne (ante 1952) et l'eau post 1952 ont une origine météorique non modifiée par des échanges et se sont infiltrés à peu près au même endroit. Pour les différents niveaux elles ont des parcours et des âges similaires.

Le dernier prélèvement (à 75 mètres de profondeur) montre une proportion d'eau qui s'est rechargée de manière différente, qui se distingue nettement des autres d'après les données d'isotopes stables, mais toujours avec une proportion de pluies récentes importante. Si la différence des teneurs en nitrates entre les niveaux -41m et -50 m était due à de la dénitrification par oxydation de minéraux sulfurés, la teneur en sulfates devrait être supérieure (au moins 8 + 16, soit 24 mg/l). Il se peut que la zone de recharge soit différente -par exemple sous une forêt avec absence de nitrates- et on y trouve plus de sulfates que sur les autres niveaux. Il est alors probable que ce niveau n'a jamais été pollué par les nitrates et il y a certainement d'autres réactions ou processus en cause que celles de l'oxydation des sulfures par les nitrates.

Forage de Montenay (granite)

On observe une baisse notable des teneurs en tritium avec la profondeur, avec des augmentations de débit très nettes cette fois. Les valeurs δD/ δO ne varient pratiquement pas et restent près de la courbe qui caractérise les eaux météoriques actuelles. On observe une très grosse chute en tritium sur les derniers niveaux, avec de forts débits ; il peut donc y avoir un mélange avec une eau ancienne, mais les différents pôles semblent avoir, de par les teneurs en isotopes stables, une histoire similaire -bien que plus ou moins ancienne- et une zone d'infiltration identique. Un mélange entre une eau à 32, 2 mg/l de NO3 et 10 UT avec une eau à 0 UT et 0 mg/l de NO3 produirait une eau à 3,7 UT et 12 mg/L NO3, ce qui tendrait à prouver que l'eau rencontrée à 51 m de

profondeur a perdu au moins 12 mg/l, de nitrates et plus si la composante ancienne (anté-1952) était chargée en nitrates.

D'une manière générale, il subsiste des incertitudes du fait déjà que les eaux sont recueillies sur toute la colonne du forage, avec des proportions de débits non rigoureusement établies entre chaque niveau. Des prélèvements effectués en posant des packers afin de limiter les prélèvements à une seule couche, ou des prélèvements réalisés à l'avancement du forage (mais avec pose de packer pour isoler les arrivées supérieures), donneraient sans doute des résultats beaucoup plus probants et plus précis. Cela pourrait faire l'objet d'un programme de recherche spécifique. Il faudrait alors à cette occasion faire des dosages de gaz (CO2, N2 et argon) et de carbone organique.

En conclusion, on peut dire que dans les eaux des 3 forages, il y a une composante récente. Il est vérifié, par les teneurs en nitrates tout autant que par les teneurs en tritium, qu'une partie des débits des tranches supérieures est "mis hors-course" lors du soufflage et que cela pourrait attribuer à la dernière arrivée d'eau des teneurs en nitrates et en tritium égales à 0 (pour le forage de la Roe notamment), ou en tout cas très faibles. Il y a sans doute une proportion non négligeable d'eau ancienne. Pour le forage de Cigné, on peut penser que les eaux au-delà de 45 mètres n'ont jamais été dénitrifiées parce que jamais nitratées, ce qui pourrait expliquer l'absence quasi-totale de fer.

5. Recommandations d'exploitation

5.1. CONDITIONS DE ROUTINE

Sachant que les débits obtenus par les forages d'eau souterraine restent souvent modestes, il peut s'avérer sage de prévoir une marge de manoeuvre et de ne pas exploiter ces forages toujours au maximum de leurs possibilités. Des pompages d'essai de très longue durée -de plusieurs semaines à plusieurs mois- devront être menés sur les forages d'essai et les forages définitifs d'exploitation, afin de déterminer avec fiabilité les limites de leur réservoir et de programmer les débits et les rythmes de l'exploitation. Il pourra être plus avantageux dans la durée de prévoir un forage de plus et de ménager des périodes d'arrêt.

5.2. BESOINS DE POINTE

Cette mesure qui consiste à prévoir un ou plusieurs ouvrages supplémentaires sera encore plus nécessaire lorsqu'on se trouvera en face de besoins accrus, en période de pointe. C'est en effet pendant ces périodes, qui se situent en étiage, que les niveaux des nappes seront au plus bas et certaines arrivées supérieures pourront se tarir. Il importe donc de "pousser" le creusement des forages jusqu'à des profondeurs importantes, de l'ordre de 100 à 120 mètres, et de considérer les possibilités de rabattement (dépendant des profondeurs auxquelles surviennent les arrivées d'eau) comme un des critères importants du choix des sondages les plus intéressants pour être transformés en ouvrage d'exploitation. . Des forages exécutés en Bretagne jusqu'à près de 300 mètres (une dizaine de forages sur des parkings de magasins "Leclerc" dans le Finistère) ont montré que des arrivées d'eau importantes (de 15, 20 et même 30 m^3/h) pouvaient se manifester à des grandes profondeurs (150, 200 et 250 m) : ces apports seront de la plus grande importance lorsque, en été, des besoins accrus se manifesteront, et que les niveaux des nappes seront bas !

Par ailleurs, le ratio de 5 % des eaux infiltrées retenu pour le calcul des ressources globales mobilisables peut être considéré comme arbitraire et fixé comme un ordre de grandeur théorique et global ; tout projet doit faire l'objet d'une étude particulière, en prévoyant, notamment, des mesures d'optimisation de l'exploitation.

6. Conclusions

L'étude réalisée sur les ressources en eau souterraine profonde dans le socle du département de la Mayenne aboutit à proposer l'exploitation de volumes compris entre **17 000 et 42.000 m^3/jour complémentaires**, ce qui représente entre 17 et 42 % des prélèvements actuels, toutes origines confondues.

Ces chiffres résultent d'hypothèses de travail consistant à fixer entre 5 % et 8 % des volumes d'eau infiltrée le ratio de ressource mobilisable, ce qui revient, compte-tenu des prélèvements existants, à fixer entre 2 % et 5 % des eaux infiltrées le ratio de ressources nouvelles.

Un certain nombre de captages d'eau souterraine actuels, le plus souvent de faible profondeur, sont atteints par le seuil fatidique des 50 mg/l de nitrates: le total de leurs prélèvements dépasse les 10 000 m^3/j et il faudra donc les supprimer ; compte tenu des observations intéressantes effectuées sur la dénitrification naturelle en profondeur, il sera sans doute possible, pour un certain nombre d'entre eux, de remplacer l'ouvrage actuel par un forage profond sur le même site, ce qui limitera très sensiblement le coût de l'opération, sana toutefois faire l'économie d'une étude hydrogéologique préalable.

Le dépouillement de plus de 500 analyses fait apparaître que **toutes les formations géologiques peuvent être le siège de phénomènes de dénitrification naturelle,** et que la **profondeur des ouvrages est déterminante** pour leur manifestation. Bien que cette dénitrification naturelle ne résolve pas tous les problèmes, puisqu'elle oblige, dans la plupart des cas, à effectuer une déferrisation, son importance reste considérable.

Les analyses isotopiques des eaux à différentes profondeurs montrent que les eaux dénitrifiées sont également dépourvues de tritium, et qu'elles sont donc antérieures à 1952.

ANNEXE 1

Evaluation des nouvelles ressources en eau souterraine mobilisables pour l'AEP

RESSOURCES NOUVELLES ET CALCUL ECONOMIQUE SUR UNE ZONE				
	Département:	MAYENNE		
Nom de la zone :	MASSIF GRANITIQUE DE FOUGERES (REGION DE GORRON)			
Surface en Km²:	430			
Pluies efficaces moyennes/an en mm :	400			
		HYPOTHESE:	2% des pluies infiltrées	
Ressources de la zone (en m3/an)	1147000	soit en m3/jour:	3100	
(=P.eff. x 1/3 x 2%)				
Ressource en m3/an :	1147000		Taux de réussite	
Objectif de débit de la zone:	30,7	(Qm de 25%sup.)	(% deQ>10 m3/h) :	0,36
Nombre de forages			Taux de réussite	
en phase d'exploitation :	6		***applicable :***	0,72
(ressource/j. / objectif de débit /20 et arrondi)			(taux réussite x 2 entre 50 et 80%)	
Nombre de forages				
en phase d'exploration :	8			
(n forages d'exploitation + 30% et arrondi)		PHASES I+II		
		Coût sondages	1200	KF
Nombre de sites à explorer :	12	Coût essais	1440	KF
(n forages d'exploration / taux réussite applicable et arrondi)				
Métré de sondages	2400	**Total phases I+II**	**2640**	**KF**
(n sites à explorer X 100 m x 2 sondages)				
Coût unitaire sondages		PHASE III		
avec études (KF au ml)	0,50	**Coût réalisation**	**12**	**MF**
Coût unitaire essais (en KF): 1 essai par forage d'exploration	180			
Coût unitaire d'un forage		**Coût total**	**14,64**	**MF**
réalisé et raccordé (en MF)	2			
Hypothèse 1		coût au m3 phases I+II	0,25	F
(pas de subvention et		coût au m3 réalisation...	1,15	F
emprunt à 9% sur 20 ans)		coût total au m3	**1,40**	**F**
Hypothèse 2		*coût au m3 phase I+II*	0,08	F
(subvention 70% +		coût au m3 réalisation...	0,34	F
emprunt à 9% sur 20 ans)		coût total au m3	**0,42**	**F**

RESSOURCES NOUVELLES ET CALCUL ECONOMIQUE SUR UNE ZONE				
	Département:	**MAYENNE**		
Nom de la zone :	**MASSIF GRANITIQUE DE FOUGERES (REGION DE GORRON)**			
Surface en Km²:	**430**			
Pluies efficaces moyennes/an en mm :	**400**			
		HYPOTHESE:	**5% des pluies infiltrées**	
Ressources de la zone (en m3/an)	**2867000**	**soit en m3/jour:**	**7900**	
(=P.eff. x 1/3 x 5%)				
Ressource en m3/an :	**2867000**		**Taux de réussite**	
Objectif de débit de la zone:	**30,7**	(Qm de 25%sup.)	(% deQ>10 m3/h) :	**0,36**
Nombre de forages			**Taux de réussite**	
en phase d'exploitation :	**13**		**applicable :**	**0,72**
(ressource/j. / objectif de débit /20 et arrondi)			(taux réussite x 2 entre 50 et 80%)	
Nombre de forages				
en phase d'exploration :	**18**			
(*n forages d'exploitation* + 30% et arrondi)		PHASES I+II		
		Coût sondages	2600	KF
Nombre de sites à explorer :	**26**	Coût essais	3240	KF
(n forages d'exploration / taux réussite applicable et arrondi)				
Métré de sondages	**5200**	**Total phases I+II**	**5840**	**KF**
(n sites à explorer X 100 m x 2 sondages)				
Coût unitaire sondages		PHASE III		
avec études (KF au ml)	*0,50*	***Coût réalisation***	**26**	**MF**
Coût unitaire essais (en KF): 1 essai par forage d'exploration	180			
Coût unitaire d'un forage		**Coût total**	**31,84**	**MF**
réalisé et raccordé (en MF)	2			
Hypothèse 1		coût au m3 phases I+II	0,22	F
(pas de subvention et		coût au m3 réalisation...	0,99	F
emprunt à 9% sur 20 ans)		coût total au m3	**1,22**	**F**
Hypothèse 2		coût au m3 phase I+II	0,07	F
(*subvention 70% +*		*coût au m3 réalisation...*	*0,30*	*F*
emprunt à 9% sur 20 ans)		coût total au m3	**0,36**	**F**

RESSOURCES NOUVELLES ET CALCUL ECONOMIQUE SUR UNE ZONE				
	Département:	MAYENNE		
Nom de la zone :	MASSIF GRANITIQUE DE LE HORPS			
Surface en Km²:	150			
Pluies efficaces moyennes/an en mm :	330			
		HYPOTHESE:	2% des pluies infiltrées	
Ressources de la zone (en m3/an)	330000	soit en m3/jour:	900	
(=P.eff. x 1/3 x 2%)				
Ressource en m3/an :	330000		Taux de réussite	
Objectif de débit de la zone:	30,7	(Qm de 25%sup.)	(% deQ>10 m3/h) :	0,36
Nombre de forages			Taux de réussite	
en phase d'exploitation :	2		applicable :	0,72
(ressource/j. / objectif de débit /20 et arrondi)			(taux réussite x 2 entre 50 et 80%)	
Nombre de forages				
en phase d'exploration :	3			
(n forages d'exploitation + 30% et arrondi)		PHASES I+II		
		Coût sondages	500	KF
Nombre de sites à explorer :	5	Coût essais	540	KF
(n forages d'exploration / taux réussite applicable et arrondi)				
Métré de sondages	1000	**Total phases I+II**	1040	KF
(n sites à explorer X 100 m x 2 sondages)				
Coût unitaire sondages		PHASE III		
avec études (KF au ml)	0,50	**Coût réalisation**	4	MF
Coût unitaire essais (en KF): 1 essai par forage d'exploration	180			
Coût unitaire d'un forage		***Coût total***	***5,04***	***MF***
réalisé et raccordé (en MF)	2			
Hypothèse 1		coût au m3 phases I+II	0,35	F
(pas de subvention et		coût au m3 réalisation...	1,33	F
emprunt à 9% sur 20 ans)		coût total au m3	**1,67**	**F**
Hypothèse 2		coût au m3 phase I+II	0,10	F
(subvention 70% +		coût au m3 réalisation...	0,40	F
emprunt à 9% sur 20 ans)		coût total au m3	**0,50**	**F**

RESSOURCES NOUVELLES ET CALCUL ECONOMIQUE SUR UNE ZONE				
	Département:	MAYENNE		
Nom de la zone :	MASSIF GRANITIQUE DE LE HORPS			
Surface en Km²:	150			
Pluies efficaces moyennes/an en mm :	330			
		HYPOTHESE:	5% des pluies infiltrées	
Ressources de la zone (en m3/an)	*825000*	*soit en m3/jour:*	*2300*	
(=P.eff. x 1/3 x 5%)				
Ressource en m3/an :	825000		**Taux de réussite**	
Objectif de débit de la zone:	30,7	*(Qm de 25%sup.)*	*(% deQ>10 m3/h) :*	0,36
Nombre de forages			**Taux de réussite**	
en phase d'exploitation :	4		**applicable :**	0,72
(ressource/j. / objectif de débit /20 et arrondi)			(taux réussite x 2 entre 50 et 80%)	
Nombre de forages				
en phase d'exploration :	6			
(n forages d'exploitation + 30% et arrondi)		PHASES I+II		
		Coût sondages	900	KF
Nombre de sites à explorer :	9	Coût essais	1080	KF
(n forages d'exploration / taux réussite applicable et arrondi)				
Métré de sondages	1800	**Total phases I+II**	1980	KF
(n sites à explorer X 100 m x 2 sondages)				
Coût unitaire sondages		PHASE III		
avec études (KF au ml)	0,50	**Coût réalisation**	8	MF
Coût unitaire essais (en KF): 1 essai par forage d'exploration	180			
Coût unitaire d'un forage		**Coût total**	9,98	MF
réalisé et raccordé (en MF)	2			
Hypothèse 1		coût au m3 phases I+II	0,26	F
(pas de subvention et		coût au m3 réalisation...	1,06	F
emprunt à 9% sur 20 ans)		coût total au m3	**1,33**	**F**
Hypothèse 2		coût au m3 phase I+II	0,08	F
(subvention 70% +		coût au m3 réalisation...	0,32	F
emprunt à 9% sur 20 ans)		coût total au m3	**0,40**	**F**

RESSOURCES NOUVELLES ET CALCUL ECONOMIQUE SUR UNE ZONE					
	Département:	MAYENNE			
Nom de la zone :	MASSIF GRANITIQUE DE FOUGERES (REGION DE MAYENNE)				
Surface en Km²:	260				
Pluies efficaces moyennes/an en mm :	270				
		HYPOTHESE:	2% des pluies infiltrées		
Ressources de la zone (en m3/an)	468000	soit en m3/jour:	1300		
(=P.eff. x 1/3 x 2%)					
Ressource en m3/an :	468000		Taux de réussite		
Objectif de débit de la zone:	30,7	(Qm de 25%sup.)	(% deQ>10 m3/h) :		0,36
Nombre de forages			Taux de réussite		
en phase d'exploitation :	3		applicable :		0,72
(ressource/j. / objectif de débit /20 et arrondi)			(taux réussite x 2 entre 50 et 80%)		
Nombre de forages					
en phase d'exploration :	4				
(n forages d'exploitation + 30% et arrondi)		PHASES I+II			
		Coût sondages	600	KF	
Nombre de sites à explorer :	6	Coût essais	720	KF	
(n forages d'exploration / taux réussite applicable et arrondi)					
Métré de sondages	1200	**Total phases I+II**	1320	KF	
(n sites à explorer X 100 m x 2 sondages)					
Coût unitaire sondages		PHASE III			
avec études (KF au ml)	0,50	**Coût réalisation**	6	MF	
Coût unitaire essais (en KF): 1 essai par forage d'exploration	180				
Coût unitaire d'un forage		**Coût total**	7,32	MF	
réalisé et raccordé (en MF)	2				
Hypothèse 1		coût au m3 phases I+II	0,31	F	
(pas de subvention et		coût au m3 réalisation...	1,40	F	
emprunt à 9% sur 20 ans)		coût total au m3	**1,71**	**F**	
Hypothèse 2		*coût au m3 phase I+II*	0,09	F	
(subvention 70% +		coût au m3 réalisation...	0,42	F	
emprunt à 9% sur 20 ans)		coût total au m3	**0,51**	**F**	

RESSOURCES NOUVELLES ET CALCUL ECONOMIQUE SUR UNE ZONE				
	Département:	MAYENNE		
Nom de la zone :	MASSIF GRANITIQUE DE FOUGERES (REGION DE MAYENNE)			
Surface en Km²:	260			
Pluies efficaces moyennes/an en mm :	270			
		HYPOTHESE:	5% des pluies infiltrées	
Ressources de la zone (en m3/an)	1170000	soit en m3/jour:	3200	
(=P.eff. x 1/3 x 5%)				
Ressource en m3/an :	1170000		Taux de réussite	
Objectif de débit de la zone:	30,7	(Qm de 25%sup.)	(% deQ>10 m3/h) :	0,36
Nombre de forages			Taux de réussite	
en phase d'exploitation :	6		applicable :	0,72
(ressource/j. / objectif de débit /20 et arrondi)			*(taux réussite x 2 entre 50 et 80%)*	
Nombre de forages				
en phase d'exploration :	8			
(n forages d'exploitation + 30% et arrondi)		PHASES I+II		
		Coût sondages	1200	KF
Nombre de sites à explorer :	12	Coût essais	1440	KF
(n forages d'exploration / taux réussite applicable et arrondi)				
Métré de sondages	2400	**Total phases I+II**	2640	**KF**
(n sites à explorer X 100 m x 2 sondages)				
Coût unitaire sondages		PHASE III		
avec études (KF au ml)	0,50	**Coût réalisation**	12	**MF**
Coût unitaire essais (en KF): 1 essai par forage d'exploration	180			
Coût unitaire d'un forage		**Coût total**	14,64	**MF**
réalisé et raccordé (en MF)	2			
Hypothèse 1		*coût au m3 phases I+II*	0,25	F
(pas de subvention et		coût au m3 réalisation...	1,12	F
emprunt à 9% sur 20 ans)		coût total au m3	**1,37**	**F**
Hypothèse 2		coût au m3 phase I+II	0,07	F
(subvention 70% +		coût au m3 réalisation...	0,34	F
emprunt à 9% sur 20 ans)		coût total au m3	**0,41**	**F**

RESSOURCES NOUVELLES ET CALCUL ECONOMIQUE SUR UNE ZONE				
	Département:	MAYENNE		
Nom de la zone :	MASSIF GRANITIQUE DE IZE - ST.PIERRE DES NIDS			
Surface en Km²:	275			
Pluies efficaces moyennes/an en mm :	270			
		HYPOTHESE:	2% des pluies infiltrées	
Ressources de la zone (en m3/an)	495000	soit en m3/jour:	1400	
(=P.eff. x 1/3 x 2%)				
Ressource en m3/an :	495000		**Taux de réussite**	
Objectif de débit de la zone:	30,7	(Qm de 25%sup.)	(% deQ>10 m3/h) :	0,36
Nombre de forages			**Taux de réussite**	
en phase d'exploitation :	3		**applicable :**	0,72
(ressource/j. / objectif de débit /20 et arrondi)			(taux réussite x 2 entre 50 et 80%)	
Nombre de forages				
en phase d'exploration :	4			
(n forages d'exploitation + 30% et arrondi)		PHASES I+II		
		Coût sondages	600	KF
Nombre de sites à explorer :	6	Coût essais	720	KF
(n forages d'exploration / taux réussite applicable et arrondi)				
Métré de sondages	1200	**Total phases I+II**	1320	**KF**
(n sites à explorer X 100 m x 2 sondages)				
Coût unitaire sondages		PHASE III		
avec études (KF au ml)	0,50	**Coût réalisation**	6	**MF**
Coût unitaire essais (en KF): 1 essai par forage d'exploration	180			
Coût unitaire d'un forage		**Coût total**	7,32	**MF**
réalisé et raccordé (en MF)	2			
Hypothèse 1		coût au m3 phases I+II	0,29	F
(pas de subvention et		coût au m3 réalisation...	1,33	F
emprunt à 9% sur 20 ans)		coût total au m3	**1,62**	**F**
Hypothèse 2		coût au m3 phase I+II	0,09	F
(subvention 70% +		coût au m3 réalisation...	0,40	F
emprunt à 9% sur 20 ans)		coût total au m3	**0,49**	**F**

RESSOURCES NOUVELLES ET CALCUL ECONOMIQUE SUR UNE ZONE

	Département:	**MAYENNE**			
Nom de la zone :	**MASSIF GRANITIQUE DE IZE - ST.PIERRE DES NIDS**				
Surface en Km²:	**275**				
Pluies efficaces moyennes/an en mm :	**270**				
		HYPOTHESE:	**5% des pluies infiltrées**		
Ressources de la zone (en m3/an)	**1238000**	**soit en m3/jour:**	**3400**		
(=P.eff. x 1/3 x 5%)					
Ressource en m3/an :	***1238000***		***Taux de réussite***		
Objectif de débit de la zone:	**30,7**	(Qm de 25%sup.)	(% deQ>10 m3/h) :		**0,36**
Nombre de forages			**Taux de réussite**		
en phase d'exploitation :	**6**		**applicable :**		**0,72**
(ressource/j. / objectif de débit /20 et arrondi)			(taux réussite x 2 entre 50 et 80%)		
Nombre de forages					
en phase d'exploration :	**8**				
(n forages d'exploitation + 30% et arrondi)		PHASES I+II			
		Coût sondages	1200	KF	
Nombre de sites à explorer :	**12**	Coût essais	1440	KF	
(n forages d'exploration / taux réussite applicable et arrondi)					
Métré de sondages	**2400**	**Total phases I+II**	**2640**	**KF**	
(n sites à explorer X 100 m x 2 sondages)					
Coût unitaire sondages		PHASE III			
avec études (KF au ml)	0,50	**Coût réalisation**	**12**	**MF**	
Coût unitaire essais (en KF): 1 essai par forage d'exploration	180				
Coût unitaire d'un forage		**Coût total**	**14,64**	**MF**	
réalisé et raccordé (en MF)	2				
Hypothèse 1		coût au m3 phases I+II	0,23	F	
(pas de subvention et		coût au m3 réalisation...	1,06	F	
emprunt à 9% sur 20 ans)		coût total au m3	**1,30**	**F**	
Hypothèse 2		coût au m3 phase I+II	0,07	F	
(subvention 70% +		coût au m3 réalisation...	0,32	F	
emprunt à 9% sur 20 ans)		coût total au m3	**0,39**	**F**	

RESSOURCES NOUVELLES ET CALCUL ECONOMIQUE SUR UNE ZONE				
	Département:	MAYENNE		
Nom de la zone :	CORNEENNES DE LA REGION DE MAYENNE			
Surface en Km²:	130			
Pluies efficaces moyennes/an en mm :	300			
		HYPOTHESE:	2% des pluies infiltrées	
Ressources de la zone (en m3/an)	260000	soit en m3/jour:	700	
(=P.eff. x 1/3 x 2%)				
Ressource en m3/an :	260000		**Taux de réussite**	
Objectif de débit de la zone:	25,7	(Qm de 25%sup.)	(% deQ>10 m3/h) :	0,26
Nombre de forages			**Taux de réussite**	
en phase d'exploitation :	2		**applicable :**	0,52
(ressource/j. / objectif de débit /20 et arrondi)			(taux réussite x 2 entre 50 et 80%)	
Nombre de forages				
en phase d'exploration :	3			
(n forages d'exploitation + 30% et arrondi)		PHASES I+II		
		Coût sondages	600	KF
Nombre de sites à explorer :	6	Coût essais	540	KF
(n forages d'exploration / taux réussite applicable et arrondi)				
Métré de sondages	1200	**Total phases I+II**	1140	**KF**
(n sites à explorer X 100 m x 2 sondages)				
Coût unitaire sondages		PHASE III		
avec études (KF au ml)	0,50	**Coût réalisation**	4	**MF**
Coût unitaire essais (en KF): 1 essai par forage d'exploration	180			
Coût unitaire d'un forage		**Coût total**	5,14	**MF**
réalisé et raccordé (en MF)	2			
Hypothèse 1		coût au m3 phases I+II	0,48	F
(pas de subvention et		coût au m3 réalisation...	1,69	F
emprunt à 9% sur 20 ans)		coût total au m3	**2,17**	**F**
Hypothèse 2		*coût au m3 phase I+II*	*0,14*	F
(subvention 70% +		coût au m3 réalisation...	0,51	F
emprunt à 9% sur 20 ans)		coût total au m3	**0,65**	**F**

RESSOURCES NOUVELLES ET CALCUL ECONOMIQUE SUR UNE ZONE					
	Département:	MAYENNE			
Nom de la zone :	CORNEENNES DE LA REGION DE MAYENNE				
Surface en Km²:	130				
Pluies efficaces moyennes/an en mm :	300				
		HYPOTHESE:	4% des pluies infiltrées		
Ressources de la zone (en m3/an)	520000	soit en m3/jour:	1400		
(=P.eff. x 1/3 x 4%)					
Ressource en m3/an :	520000		Taux de réussite		
Objectif de débit de la zone:	25,7	(Qm de 25%sup.)	*(% deQ>10 m3/h) :*		0,26
Nombre de forages			Taux de réussite		
en phase d'exploitation :	3		**applicable :**		0,52
(ressource/j. / objectif de débit /20 et arrondi)			(taux réussite x 2 entre 50 et 80%)		
Nombre de forages					
en phase d'exploration :	4				
(n forages d'exploitation + 30% et arrondi)		PHASES I+II			
		Coût sondages	800	KF	
Nombre de sites à explorer :	8	Coût essais	720	KF	
(n forages d'exploration / taux réussite applicable et arrondi)					
Métré de sondages	1600	**Total phases I+II**	**1520**	**KF**	
(n sites à explorer X 100 m x 2 sondages)					
Coût unitaire sondages		PHASE III			
avec études (KF au ml)	0,50	**Coût réalisation**	**6**	**MF**	
Coût unitaire essais (en KF): 1 essai par forage d'exploration	180				
Coût unitaire d'un forage		**Coût total**	**7,52**	**MF**	
réalisé et raccordé (en MF)	2				
Hypothèse 1		coût au m3 phases I+II	0,32	F	
(pas de subvention et		coût au m3 réalisation...	1,26	F	
emprunt à 9% sur 20 ans)		coût total au m3	**1,58**	**F**	
Hypothèse 2		coût au m3 phase I+II	0,10	F	
(subvention 70% +		coût au m3 réalisation...	0,38	F	
emprunt à 9% sur 20 ans)		coût total au m3	**0,48**	**F**	

RESSOURCES NOUVELLES ET CALCUL ECONOMIQUE SUR UNE ZONE				
	Département:	MAYENNE		
Nom de la zone :	CORNEENNES DE LA REGION D'ERNEE			
Surface en Km²:	140			
Pluies efficaces moyennes/an en mm :	350			
		HYPOTHESE:	2% des pluies infiltrées	
Ressources de la zone (en m3/an)	327000	soit en m3/jour:	900	
(=P.eff. x 1/3 x 2%)				
Ressource en m3/an :	327000		Taux de réussite	
Objectif de débit de la zone:	25,7	(Qm de 25%sup.)	(% deQ>10 m3/h) :	0,26
Nombre de forages			Taux de réussite	
en phase d'exploitation :	2		applicable :	0,52
(ressource/j. / objectif de débit /20 et arrondi)			*(taux réussite x 2 entre 50 et 80%)*	
Nombre de forages				
en phase d'exploration :	3			
(n forages d'exploitation + 30% et arrondi)		PHASES I+II		
		Coût sondages	600	KF
Nombre de sites à explorer :	6	Coût essais	540	KF
(n forages d'exploration / taux réussite applicable et arrondi)				
Métré de sondages	1200	***Total phases I+II***	1140	KF
(n sites à explorer X 100 m x 2 sondages)				
Coût unitaire sondages		PHASE III		
avec études (KF au ml)	0,50	**Coût réalisation**	4	MF
Coût unitaire essais (en KF): 1 essai par forage d'exploration	180			
Coût unitaire d'un forage		***Coût total***	***5,14***	**MF**
réalisé et raccordé (en MF)	2			
Hypothèse 1		coût au m3 phases I+II	0,38	F
(pas de subvention et		*coût au m3 réalisation...*	1,34	F
emprunt à 9% sur 20 ans)		coût total au m3	**1,72**	**F**
Hypothèse 2		*coût au m3 phase I+II*	0,11	F
(subvention 70% +		coût au m3 réalisation...	0,40	F
emprunt à 9% sur 20 ans)		coût total au m3	**0,52**	**F**

RESSOURCES NOUVELLES ET CALCUL ECONOMIQUE SUR UNE ZONE					
	Département:	MAYENNE			
Nom de la zone :	CORNEENNES DE LA REGION D'ERNEE				
Surface en Km²:	140				
Pluies efficaces moyennes/an en mm :	350				
		HYPOTHESE:	4% des pluies infiltrées		
Ressources de la zone (en m3/an)	653000	soit en m3/jour:	1800		
(=P.eff. x 1/3 x 4%)					
Ressource en m3/an :	653000		Taux de réussite		
Objectif de débit de la zone:	25,7	(Qm de 25%sup.)	(% deQ>10 m3/h) :		0,26
Nombre de forages			***Taux de réussite***		
en phase d'exploitation :	4		**applicable :**		0,52
(ressource/j. / objectif de débit /20 et arrondi)			(taux réussite x 2 entre 50 et 80%)		
Nombre de forages					
en phase d'exploration :	6				
(n forages d'exploitation + 30% et arrondi)		PHASES I+II			
		Coût sondages	1200	KF	
Nombre de sites à explorer :	12	Coût essais	1080	KF	
(n forages d'exploration / taux réussite applicable et arrondi)					
Métré de sondages	2400	**Total phases I+II**	**2280**	**KF**	
(n sites à explorer X 100 m x 2 sondages)					
Coût unitaire sondages		PHASE III			
avec études (KF au ml)	0,50	**Coût réalisation**	**8**	**MF**	
Coût unitaire essais (en KF): 1 essai par forage d'exploration	180				
Coût unitaire d'un forage		**Coût total**	**10,28**	**MF**	
réalisé et raccordé (en MF)	2				
Hypothèse 1		coût au m3 phases I+II	0,38	F	
(pas de subvention et		coût au m3 réalisation...	1,34	F	
emprunt à 9% sur 20 ans)		coût total au m3	**1,72**	**F**	
Hypothèse 2		coût au m3 phase I+II	0,11	F	
(subvention 70% +		coût au m3 réalisation...	0,40	F	
emprunt à 9% sur 20 ans)		coût total au m3	**0,52**	**F**	

RESSOURCES NOUVELLES ET CALCUL ECONOMIQUE SUR UNE ZONE				
	Département:	MAYENNE		
Nom de la zone :	CORNEENNES DE LA REGION DE DESERTINES			
Surface en Km²:	85			
Pluies efficaces moyennes/an en mm :	410			
		HYPOTHESE:	2% des pluies infiltrées	
Ressources de la zone (en m3/an)	232000	soit en m3/jour:	600	
(=P.eff. x 1/3 x 2%)				
Ressource en m3/an :	232000		**Taux de réussite**	
Objectif de débit de la zone:	25,7	(Qm de 25%sup.)	(% deQ>10 m3/h) :	0,26
Nombre de forages			**Taux de réussite**	
en phase d'exploitation :	2		**applicable :**	0,52
(ressource/j. / objectif de débit /20 et arrondi)			(taux réussite x 2 entre 50 et 80%)	
Nombre de forages				
en phase d'exploration :	3			
(n forages d'exploitation + 30% et arrondi)		PHASES I+II		
		Coût sondages	600	KF
Nombre de sites à explorer :	6	Coût essais	540	KF
(n forages d'exploration / taux réussite applicable et arrondi)				
Métré de sondages	1200	**Total phases I+II**	1140	**KF**
(n sites à explorer X 100 m x 2 sondages)				
Coût unitaire sondages		PHASE III		
avec études (KF au ml)	0,50	**Coût réalisation**	4	**MF**
Coût unitaire essais (en KF): 1 essai par forage d'exploration	180			
Coût unitaire d'un forage		**Coût total**	5,14	**MF**
réalisé et raccordé (en MF)	2			
Hypothèse 1		coût au m3 phases I+II	0,54	F
(pas de subvention et		coût au m3 réalisation...	1,89	F
emprunt à 9% sur 20 ans)		coût total au m3	**2,43**	**F**
Hypothèse 2		coût au m3 phase I+II	0,16	F
(subvention 70% +		coût au m3 réalisation...	0,57	F
emprunt à 9% sur 20 ans)		coût total au m3	**0,73**	**F**

RESSOURCES NOUVELLES ET CALCUL ECONOMIQUE SUR UNE ZONE					
	Département:	MAYENNE			
Nom de la zone :	CORNEENNES DE LA REGION DE DESERTINES				
Surface en Km²:	*85*				
Pluies efficaces moyennes/an en mm :	410				
		HYPOTHESE:	4% des pluies infiltrées		
Ressources de la zone (en m3/an)	***465000***	***soit en m3/jour:***	***1300***		
(=P.eff. x 1/3 x 4%)					
Ressource en m3/an :	**465000**		**Taux de réussite**		
Objectif de débit de la zone:	**25,7**	(Qm de 25%sup.)	(% deQ>10 m3/h) :		**0,26**
Nombre de forages			**Taux de réussite**		
en phase d'exploitation :	**3**		**applicable :**		**0,52**
(ressource/j. / objectif de débit /20 et arrondi)			*(taux réussite x 2 entre 50 et 80%)*		
Nombre de forages					
en phase d'exploration :	**4**				
(n forages d'exploitation + 30% et arrondi)		PHASES I+II			
		Coût sondages	800	KF	
Nombre de sites à explorer :	**8**	*Coût essais*	720	KF	
(n forages d'exploration / taux réussite applicable et arrondi)					
Métré de sondages	**1600**	***Total phases I+II***	**1520**	**KF**	
(n sites à explorer X 100 m x 2 sondages)					
Coût unitaire sondages		PHASE III			
avec études (KF au ml)	0,50	**Coût réalisation**	**6**	**MF**	
Coût unitaire essais (en KF): 1 essai par forage d'exploration	180				
Coût unitaire d'un forage		***Coût total***	**7,52**	**MF**	
réalisé et raccordé (en MF)	2				
Hypothèse 1		coût au m3 phases I+II	0,36	F	
(pas de subvention et		*coût au m3 réalisation...*	1,41	F	
emprunt à 9% sur 20 ans)		coût total au m3	**1,77**	**F**	
Hypothèse 2		*coût au m3 phase I+II*	0,11	F	
(subvention 70% +		coût au m3 réalisation...	0,42	F	
emprunt à 9% sur 20 ans)		coût total au m3	**0,53**	**F**	

RESSOURCES NOUVELLES ET CALCUL ECONOMIQUE SUR UNE ZONE				
	Département:	MAYENNE		
Nom de la zone :	BRIOVERIEN DE LA REGION DE CRAON - COSSE			
Surface en Km²:	810			
Pluies efficaces moyennes/an en mm :	190			
		HYPOTHESE:	2% des pluies infiltrées	
Ressources de la zone (en m3/an)	1026000	soit en m3/jour:	2800	
(=P.eff. x 1/3 x 2%)				
Ressource en m3/an :	1026000		Taux de réussite	
Objectif de débit de la zone:	32,4	(Qm de 25%sup.)	(% deQ>10 m3/h) :	0,5
Nombre de forages			Taux de réussite	
en phase d'exploitation :	*5*		***applicable :***	*0,8*
(ressource/j. / objectif de débit /20 et arrondi)			(taux réussite x 2 entre 50 et 80%)	
Nombre de forages				
en phase d'exploration :	7			
(n forages d'exploitation + 30% et arrondi)		PHASES I+II		
		Coût sondages	900	KF
Nombre de sites à explorer :	9	Coût essais	1260	KF
(n forages d'exploration / taux réussite applicable et arrondi)				
Métré de sondages	*1800*	***Total phases I+II***	**2160**	***KF***
(n sites à explorer X 100 m x 2 sondages)				
Coût unitaire sondages		PHASE III		
avec études (KF au ml)	0,50	**Coût réalisation**	**10**	**MF**
Coût unitaire essais (en KF): 1 essai par forage d'exploration	180			
Coût unitaire d'un forage		**Coût total**	**12,16**	**MF**
réalisé et raccordé (en MF)	2			
Hypothèse 1		coût au m3 phases I+II	0,23	F
(pas de subvention et		coût au m3 réalisation...	1,07	F
emprunt à 9% sur 20 ans)		coût total au m3	**1,30**	**F**
Hypothèse 2		coût au m3 phase I+II	0,07	F
(subvention 70% +		*coût au m3 réalisation...*	*0,32*	*F*
emprunt à 9% sur 20 ans)		coût total au m3	**0,39**	**F**

RESSOURCES NOUVELLES ET CALCUL ECONOMIQUE SUR UNE ZONE				
	Département:	MAYENNE		
Nom de la zone :	BRIOVERIEN DE LA REGION DE CRAON - COSSE			
Surface en Km²:	810			
Pluies efficaces moyennes/an en mm :	190			
		HYPOTHESE:	5% des pluies infiltrées	
Ressources de la zone (en m3/an)	2565000	soit en m3/jour:	7000	
(=P.eff. x 1/3 x 5%)				
Ressource en m3/an :	2565000		Taux de réussite	
Objectif de débit de la zone:	32,4	(Qm de 25%sup.)	(% deQ>10 m3/h) :	0,5
Nombre de forages			Taux de réussite	
en phase d'exploitation :	11		applicable :	0,8
(ressource/j. / objectif de débit /20 et arrondi)			(taux réussite x 2 entre 50 et 80%)	
Nombre de forages				
en phase d'exploration :	15			
(n forages d'exploitation + 30% et arrondi)		PHASES I+II		
		Coût sondages	1900	KF
Nombre de sites à explorer :	19	Coût essais	2700	KF
(n forages d'exploration / taux réussite applicable et arrondi)				
Métré de sondages	3800	**Total phases I+II**	**4600**	**KF**
(n sites à explorer X 100 m x 2 sondages)				
Coût unitaire sondages		PHASE III		
avec études (KF au ml)	0,50	**Coût réalisation**	**22**	**MF**
Coût unitaire essais (en KF): 1 essai par forage d'exploration	180			
Coût unitaire d'un forage		**Coût total**	**26,60**	**MF**
réalisé et raccordé (en MF)	2			
Hypothèse 1		coût au m3 phases I+II	0,20	F
(pas de subvention et		coût au m3 réalisation...	0,94	F
emprunt à 9% sur 20 ans)		*coût total au m3*	**1,14**	**F**
Hypothèse 2		coût au m3 phase I+II	0,06	F
(subvention 70% +		coût au m3 réalisation...	0,28	F
emprunt à 9% sur 20 ans)		coût total au m3	**0,34**	**F**

RESSOURCES NOUVELLES ET CALCUL ECONOMIQUE SUR UNE ZONE					
	Département:	MAYENNE			
Nom de la zone :	BRIOVERIEN DE LA REGION DE BIERNE				
Surface en Km²:	225				
Pluies efficaces moyennes/an en mm :	170				
		HYPOTHESE:	2% des pluies infiltrées		
Ressources de la zone (en m3/an)	255000	soit en m3/jour:	700		
(=P.eff. x 1/3 x 2%)					
Ressource en m3/an :	255000		Taux de réussite		
Objectif de débit de la zone:	32,4	(Qm de 25%sup.)	*(% deQ>10 m3/h) :*		*0,5*
Nombre de forages			Taux de réussite		
en phase d'exploitation :	2		***applicable :***		*0,8*
(ressource/j. / objectif de débit /20 et arrondi)			(taux réussite x 2 entre 50 et 80%)		
Nombre de forages					
en phase d'exploration :	3				
(n forages d'exploitation + 30% et arrondi)		PHASES I+II			
		Coût sondages		400	KF
Nombre de sites à explorer :	4	Coût essais		540	KF
(n forages d'exploration / taux réussite applicable et arrondi)					
Métré de sondages	800	**Total phases I+II**		940	**KF**
(n sites à explorer X 100 m x 2 sondages)					
Coût unitaire sondages		PHASE III			
avec études (KF au ml)	0,50	**Coût réalisation**		4	**MF**
Coût unitaire essais (en KF): 1 essai par forage d'exploration	180				
Coût unitaire d'un forage		**Coût total**		4,94	**MF**
réalisé et raccordé (en MF)	2				
Hypothèse 1		coût au m3 phases I+II		0,40	F
(pas de subvention et		coût au m3 réalisation...		1,72	F
emprunt à 9% sur 20 ans)		coût total au m3		**2,12**	**F**
Hypothèse 2		coût au m3 phase I+II		0,12	F
(subvention 70% +		*coût au m3 réalisation...*		0,52	F
emprunt à 9% sur 20 ans)		coût total au m3		**0,64**	**F**

RESSOURCES NOUVELLES ET CALCUL ECONOMIQUE SUR UNE ZONE				
	Département:	MAYENNE		
Nom de la zone :	BRIOVERIEN DE LA REGION DE BIERNE			
Surface en Km²:	225			
Pluies efficaces moyennes/an en mm :	170			
		HYPOTHESE:	5% des pluies infiltrées	
Ressources de la zone (en m3/an)	638000	soit en m3/jour:	1700	
(=P.eff. x 1/3 x 5%)				
Ressource en m3/an :	638000		**Taux de réussite**	
Objectif de débit de la zone:	32,4	(Qm de 25%sup.)	(% deQ>10 m3/h) :	0,5
Nombre de forages			***Taux de réussite***	
en phase d'exploitation :	3		**applicable :**	0,8
(ressource/j. / objectif de débit /20 et arrondi)			(taux réussite x 2 entre 50 et 80%)	
Nombre de forages				
en phase d'exploration :	4			
(n forages d'exploitation + 30% et arrondi)		PHASES I+II		
		Coût sondages	600	KF
Nombre de sites à explorer :	6	Coût essais	720	KF
(n forages d'exploration / taux réussite applicable et arrondi)				
Métré de sondages	1200	**Total phases I+II**	1320	KF
(n sites à explorer X 100 m x 2 sondages)				
Coût unitaire sondages		PHASE III		
avec études (KF au ml)	0,50	**Coût réalisation**	6	MF
Coût unitaire essais (en KF): 1 essai par forage d'exploration	180			
Coût unitaire d'un forage		**Coût total**	7,32	MF
réalisé et raccordé (en MF)	2			
Hypothèse 1		*coût au m3 phases I+II*	*0,23*	*F*
(pas de subvention et		coût au m3 réalisation...	1,03	F
emprunt à 9% sur 20 ans)		coût total au m3	**1,26**	**F**
Hypothèse 2		coût au m3 phase I+II	0,07	F
(subvention 70% +		coût au m3 réalisation...	0,31	F
emprunt à 9% sur 20 ans)		coût total au m3	**0,38**	**F**

RESSOURCES NOUVELLES ET CALCUL ECONOMIQUE SUR UNE ZONE					
	Département:	MAYENNE			
Nom de la zone :	CAMBRIEN DE LA REGION DE CHATRES				
Surface en Km²:	290	*(comprenant les cornéennes de St-Gemmes-le-Robert et le Briovérien voisin)*			
Pluies efficaces moyennes/an en mm :	230				
		HYPOTHESE:	2% des pluies infiltrées		
Ressources de la zone (en m3/an)	445000	***soit en m3/jour:***	1200		
(=P.eff. x 1/3 x 2%)					
Ressource en m3/an :	445000		**Taux de réussite**		
Objectif de débit de la zone:	29,7	(Qm de 25%sup.)	(% deQ>10 m3/h) :	0,52	
Nombre de forages			**Taux de réussite**		
en phase d'exploitation :	3		**applicable :**	0,8	
(ressource/j. / objectif de débit /20 et arrondi)			(taux réussite x 2 entre 50 et 80%)		
Nombre de forages					
en phase d'exploration :	4				
(n forages d'exploitation + 30% et arrondi)		PHASES I+II			
		Coût sondages	600	KF	
Nombre de sites à explorer :	6	Coût essais	720	KF	
(n forages d'exploration / taux réussite applicable et arrondi)					
Métré de sondages	1200	**Total phases I+II**	1320	**KF**	
(n sites à explorer X 100 m x 2 sondages)					
Coût unitaire sondages		PHASE III			
avec études (KF au ml)	0,50	**Coût réalisation**	6	**MF**	
Coût unitaire essais (en KF): 1 essai par forage d'exploration	180				
Coût unitaire d'un forage		**Coût total**	7,32	**MF**	
réalisé et raccordé (en MF)	2				
Hypothèse 1		coût au m3 phases I+II	0,32	F	
(pas de subvention et		coût au m3 réalisation...	1,48	F	
emprunt à 9% sur 20 ans)		coût total au m3	**1,80**	**F**	
Hypothèse 2		coût au m3 phase I+II	0,10	F	
(subvention 70% +		coût au m3 réalisation...	0,44	F	
emprunt à 9% sur 20 ans)		coût total au m3	**0,54**	**F**	

RESSOURCES NOUVELLES ET CALCUL ECONOMIQUE SUR UNE ZONE					
	Département:	MAYENNE			
Nom de la zone :	CAMBRIEN DE LA REGION DE CHATRES				
Surface en Km²:	290	(comprenant les cornéennes de St-Gemmes-le-Robert et le Briovérien voisin)			
Pluies efficaces moyennes/an en mm :	230				
		HYPOTHESE:	5% des pluies infiltrées		
Ressources de la zone (en m3/an)	1112000	soit en m3/jour:	3000		
(=P.eff. x 1/3 x 5%)					
Ressource en m3/an :	1112000		**Taux de réussite**		
Objectif de débit de la zone:	29,7	(Qm de 25%sup.)	(% deQ>10 m3/h) :	0,52	
Nombre de forages			**Taux de réussite**		
en phase d'exploitation :	6		**applicable :**	0,8	
(ressource/j. / objectif de débit /20 et arrondi)			(taux réussite x 2 entre 50 et 80%)		
Nombre de forages					
en phase d'exploration :	8				
(n forages d'exploitation + 30% et arrondi)		PHASES I+II			
		Coût sondages	1100	KF	
Nombre de sites à explorer :	11	Coût essais	1440	KF	
(n forages d'exploration / taux réussite applicable et arrondi)					
Métré de sondages	2200	**Total phases I+II**	2540	**KF**	
(n sites à explorer X 100 m x 2 sondages)					
Coût unitaire sondages		PHASE III			
avec études (KF au ml)	0,50	**Coût réalisation**	12	**MF**	
Coût unitaire essais (en KF): 1 essai par forage d'exploration	180				
Coût unitaire d'un forage		**Coût total**	14,54	**MF**	
réalisé et raccordé (en MF)	2				
Hypothèse 1		*coût au m3 phases I+II*	0,25	F	
(pas de subvention et		coût au m3 réalisation...	1,18	F	
emprunt à 9% sur 20 ans)		coût total au m3	**1,43**	**F**	
Hypothèse 2		coût au m3 phase I+II	0,08	F	
(subvention 70% +		coût au m3 réalisation...	0,35	F	
emprunt à 9% sur 20 ans)		coût total au m3.	**0,43**	**F**	

RESSOURCES NOUVELLES ET CALCUL ECONOMIQUE SUR UNE ZONE				
	Département:	MAYENNE		
Nom de la zone :	SCHISTES & GRES SILURIENS, ORDOVICIENS + GRES GAHARD			
Surface en Km²:	490	*(comprenant les Grès de Gahard et les schistes & grès ordoviciens)*		
Pluies efficaces moyennes/an en mm :	240			
		HYPOTHESE:	2% des pluies infiltrées	
Ressources de la zone (en m3/an)	***784000***	***soit en m3/jour:***	***2100***	
(=P.eff. x 1/3 x 2%)				
Ressource en m3/an :	**784000**		**Taux de réussite**	
Objectif de débit de la zone:	**20**	(Qm de 25%sup.)	(% deQ>10 m3/h) :	**0,29**
Nombre de forages			**Taux de réussite**	
en phase d'exploitation :	**6**		**applicable :**	**0,58**
(ressource/j. / objectif de débit /20 et arrondi)			(taux réussite x 2 entre 50 et 80%)	
Nombre de forages				
en phase d'exploration :	**8**			
(n forages d'exploitation + 30% et arrondi)		PHASES I+II		
		Coût sondages	1400	KF
Nombre de sites à explorer :	**14**	Coût essais	1440	KF
(n forages d'exploration / taux réussite applicable et arrondi)				
Métré de sondages	**2800**	**Total phases I+II**	**2840**	**KF**
(n sites à explorer X 100 m x 2 sondages)				
Coût unitaire sondages		PHASE III		
avec études (KF au ml)	0,50	**Coût réalisation**	**12**	**MF**
Coût unitaire essais (en KF): 1 essai par forage d'exploration	180			
Coût unitaire d'un forage		**Coût total**	**14,84**	**MF**
réalisé et raccordé (en MF)	2			
Hypothèse 1		coût au m3 phases I+II	0,40	F
(pas de subvention et		coût au m3 réalisation...	1,68	F
emprunt à 9% sur 20 ans)		coût total au m3	**2,07**	**F**
Hypothèse 2		coût au m3 phase I+II	0,12	F
(subvention 70% +		coût au m3 réalisation...	0,50	F
emprunt à 9% sur 20 ans)		coût total au m3	**0,62**	**F**

RESSOURCES NOUVELLES ET CALCUL ECONOMIQUE SUR UNE ZONE				
	Département:	MAYENNE		
Nom de la zone :	***SCHISTES & GRES SILURIENS, ORDOVICIENS + GRES GAHARD***			
Surface en Km²:	**490**	(comprenant les Grès de Gahard et les schistes & grès ordoviciens)		
Pluies efficaces moyennes/an en mm :	**240**			
		HYPOTHESE:	**5% des pluies infiltrées**	
Ressources de la zone (en m3/an)	**1960000**	**soit en m3/jour:**	**5400**	
(=P.eff. x 1/3 x 5%)				
Ressource en m3/an :	**1960000**		**Taux de réussite**	
Objectif de débit de la zone:	**20**	(Qm de 25%sup.)	(% deQ>10 m3/h) :	**0,29**
Nombre de forages			**Taux de réussite**	
en phase d'exploitation :	**14**		***applicable :***	***0,58***
(ressource/j. / objectif de débit /20 et arrondi)			(taux réussite x 2 entre 50 et 80%)	
Nombre de forages				
en phase d'exploration :	**19**			
(n forages d'exploitation + 30% et arrondi)		PHASES I+II		
		Coût sondages	3300	KF
Nombre de sites à explorer :	**33**	Coût essais	3420	KF
(n forages d'exploration / taux réussite applicable et arrondi)				
Métré de sondages	**6600**	**Total phases I+II**	**6720**	**KF**
(n sites à explorer X 100 m x 2 sondages)				
Coût unitaire sondages		PHASE III		
avec études (KF au ml)	0,50	**Coût réalisation**	**28**	**MF**
Coût unitaire essais (en KF): 1 essai par forage d'exploration	180			
Coût unitaire d'un forage		**Coût total**	**34,72**	**MF**
réalisé et raccordé (en MF)	2			
Hypothèse 1		coût au m3 phases I+II	0,38	F
(pas de subvention et		coût au m3 réalisation...	1,56	F
emprunt à 9% sur 20 ans)		coût total au m3	**1,94**	**F**
Hypothèse 2		coût au m3 phase I+II	0,11	F
(subvention 70% +		coût au m3 réalisation...	0,47	F
emprunt à 9% sur 20 ans)		coût total au m3	**0,58**	**F**

RESSOURCES NOUVELLES ET CALCUL ECONOMIQUE SUR UNE ZONE				
	Département:	MAYENNE		
Nom de la zone :	SCHISTES DE LAVAL			
Surface en Km²:	360	(comprenant le Calcaire de Laval, le Calcaire de Sablé, les Volcanites,		
Pluies efficaces moyennes/an en mm :	220			
		HYPOTHESE:	2% des pluies infiltrées	
Ressources de la zone (en m3/an)	528000	soit en m3/jour:	1400	
(=P.eff. x 1/3 x 2%)				
Ressource en m3/an :	528000		Taux de réussite	
Objectif de débit de la zone:	25,7	(Qm de 25%sup.)	(% deQ>10 m3/h) :	0,4
Nombre de forages			Taux de réussite	
en phase d'exploitation :	3		applicable :	0,8
(ressource/j. / objectif de débit /20 et arrondi)			(taux réussite x 2 entre 50 et 80%)	
Nombre de forages				
en phase d'exploration :	4			
(n forages d'exploitation + 30% et arrondi)		PHASES I+II		
		Coût sondages	600	KF
Nombre de sites à explorer :	6	Coût essais	720	KF
(n forages d'exploration / taux réussite applicable et arrondi)				
Métré de sondages	1200	**Total phases I+II**	**1320**	**KF**
(n sites à explorer X 100 m x 2 sondages)				
Coût unitaire sondages		PHASE III		
avec études (KF au ml)	0,50	**Coût réalisation**	**6**	**MF**
Coût unitaire essais (en KF): 1 essai par forage d'exploration	180			
Coût unitaire d'un forage		***Coût total***	**7,32**	**MF**
réalisé et raccordé (en MF)	2			
Hypothèse 1		coût au m3 phases I+II	0,27	F
(pas de subvention et		coût au m3 réalisation...	1,24	F
emprunt à 9% sur 20 ans)		coût total au m3	**1,52**	**F**
Hypothèse 2		coût au m3 phase I+II	0,08	F
(subvention 70% +		coût au m3 réalisation...	0,37	F
emprunt à 9% sur 20 ans)		coût total au m3	**0,46**	**F**

RESSOURCES NOUVELLES ET CALCUL ECONOMIQUE SUR UNE ZONE				
	Département:	MAYENNE		
Nom de la zone :	SCHISTES DE LAVAL			
Surface en Km²:	360	(comprenant le Calcaire de Laval, le Calcaire de Sablé, les Volcanites,		
Pluies efficaces moyennes/an en mm :	220			
		HYPOTHESE:	5% des pluies infiltrées	
Ressources de la zone (en m3/an)	1320000	soit en m3/jour:	3600	
(=P.eff. x 1/3 x 5%)				
Ressource en m3/an :	1320000		Taux de réussite	
Objectif de débit de la zone:	25,7	(Qm de 25%sup.)	(% deQ>10 m3/h) :	0,4
Nombre de forages			*Taux de réussite*	
en phase d'exploitation :	8		**applicable :**	0,8
(ressource/j. / objectif de débit /20 et arrondi)			(taux réussite x 2 entre 50 et 80%)	
Nombre de forages				
en phase d'exploration :	11			
(n forages d'exploitation + 30% et arrondi)		PHASES I+II		
		Coût sondages	*1400*	KF
Nombre de sites à explorer :	14	Coût essais	1980	KF
(n forages d'exploration / taux réussite applicable et arrondi)				
Métré de sondages	2800	**Total phases I+II**	**3380**	**KF**
(n sites à explorer X 100 m x 2 sondages)				
Coût unitaire sondages		PHASE III		
avec études (KF au ml)	0,50	**Coût réalisation**	**16**	**MF**
Coût unitaire essais (en KF): 1 essai par forage d'exploration	180			
Coût unitaire d'un forage		**Coût total**	**19,38**	**MF**
réalisé et raccordé (en MF)	2			
Hypothèse 1		coût au m3 phases I+II	0,28	F
(pas de subvention et		coût au m3 réalisation...	1,33	F
emprunt à 9% sur 20 ans)		coût total au m3	**1,61**	**F**
Hypothèse 2		coût au m3 phase I+II	0,08	F
(subvention 70% +		coût au m3 réalisation...	0,40	F
emprunt à 9% sur 20 ans)		*coût total au m3*	**0,48**	**F**

ANNEXE 2

QUELQUES NOTIONS GENERALES SUR LES EAUX SOUTERRAINES EN PAYS DE SOCLE

Les avantages de l'eau souterraine

Lorsque les conditions techniques et économique permettent d'exploiter des eaux souterraines profondes, celles-ci présentent de nombreux avantages :

- leurs ressources sont généralement bien réparties dans l'espace,
- leurs réserves permettent une disponibilité moins liée aux fluctuations saisonnières,
- elles sont moins vulnérables que les eaux superficielles vis-à-vis des pollutions accidentelles ou diffuses,
- leurs phénomènes de "dénitrification naturelle", relativement courants en profondeur; en revanche il est presque toujours nécessaire de procéder à un traitement de déferrisation et de démanganéisation de l'eau,
- leur qualité microbiologique est généralement bonne,
- les périmètres de protection sont plus facilement mis en oeuvre,
- leurs coûts de mise en oeuvre sont relativement modestes

La nature du sous-sol

A l'exception de quelques petits bassins comblés par des sables et graviers d'âge tertiaire, le sous-sol de la Mayenne est essentiellement composé de roches dures, massives (granites, grès, schistes, calcaires...), peu perméables et qui forment le socle armoricain.

Au cours des temps géologiques les mouvements tectoniques ont produit un grand nombre de failles, accompagnées de fractures et de fissures, où l'eau s'est infiltrée et, par dissolution et altération de certains constituants de la roche, a pu améliorer les capacités de stockage et les possibilités de circulations souterraines.

Cette "perméabilité" acquise est répartie de façon très hétérogène; l'application des méthodes de recherche, fondées notamment sur une interprétation photogéologique et des mesures géophysiques, permet cependant d'augmenter très sensiblement les chances de succès lors des travaux de réalisation de forages.

L'alimentation de la ressource souterraine

Les nappes souterraines sont alimentées par les eaux d'infiltration, elles-mêmes issues d'une partie des précipitations (pluies efficaces).

Les pluies efficaces sont la partie des pluies totales qui, non reprise par l'évaporation et par les plantes (évapotranspiration), reste disponible pour le ruissellement et/ou l'infiltration vers les nappes.

La part de l'infiltration peut être évaluée à partir de l'exploitation des hydrogrammes journaliers des cours d'eau. Le débit d'un cours d'eau est en effet alimenté d'une part par le ruissellement superficiel et, d'autre part, par le drainage souterrain des nappes. Le fait que la plupart des cours d'eau présentent encore un certain débit après une longue période sans pluie atteste de cette alimentation souterraine.

Importance des forages d'eau souterraine

L'eau souterraine profonde seule ne peut prétendre alimenter les grands centres; en revanche, elle peut être bien adaptée aux besoins de petites ou moyennes agglomérations, soit en ressource principale, soit en appoint aux ressources existantes. Cet appoint s'applique au plan quantitatif, mais il peut aussi participer à l'amélioration qualitative.

Un forage considéré comme "réussi", implanté à la suite d'une étude hydrogéologique et d'essais rigoureux, peut produire 20 à 30 m^3/h, soit 400 à 600 m^3/jour. Cette performance peut paraître modeste, mais il convient de remarquer que

- des exceptions existent, puisque l'on connaît des forages produisant plus de 1 000 m^3/jour.
- un débit de 500 m^3/jour permet, en milieu rural, d'alimenter 3000 à 3500 habitants.
- lorsque les conditions sont favorables, plusieurs forages peuvent être regroupés en "champ captant" et produire de 1500 à 2000 m^3/jour.

Relations nappes/rivières

Tout pompage souterrain est un préjudice, par soutirage ou par un "manque à gagner" pour le réseau hydrographique. Pratiquement en raison de la lenteur des trajets souterrains, le préjudice au réseau de surface est différé il est annulé à chaque fois quela distance entre le pompage et le cours d'eau est suffisante pour que la recharge par les pluies efficaces d'hiver intervienne avant que l'influence du pompage ne se fasse sentir à la rivière.

Il faut considérer par ailleurs :

- qu'au moment de l'étiage, un pompage en nappe a moins de répercussion sur le débit du cours d'eau qu'un prélèvement direct,
- que l'exploitation d'eau souterraine augmente la capacité d'accueil des aquifères, en laissant plus de place pour l'infiltration des pluies efficaces de la saison suivante, ce qui va dans le sens d'un écrêtement des crues,

- l'eau pompée à des fins d'AEP -contrairement à l'eau destinée à l'irrigation- est très peu "consommée" ; une fraction importante, après utilisation -et une certaine dégradation de la qualité- retourne très rapidement au milieu naturel, ce qui va dans le sens d'une augmentation du débit d'étiage des cours d'eau.

En quelque sorte, si l'exploitation des eaux de surface peut se comparer à la dépense d'une "épargne" réalisée pendant la période hivernale précédente, l'exploitation des eaux souterraines peut s'apparenter à un "emprunt" qui est "remboursé" lors de la période hivernale qui va suivre.

Toutefois, l'exploitation des eaux souterraines permet un "découvert": en effet, s'il y a eu une surexploitation temporaire de la nappe, les pluies efficaces de l'hiver suivant combleront le déficit.

Globalement une exploitation significative d'eau souterraine à des fins d'AEP participe à la régularisation du régime des cours d'eau : diminution des crues, renforcement des étiages. **Toutefois, compte tenu de l'importance écologique des débits transitant en étiage par les cours d'eau, le planificateur doit veiller à ce que les transferts de bassins** (eau pompée en sous-sol dans un bassin versant et rejetée, après utilisation, dans un autre bassin, ou dans une autre portion du même bassin) **s'équilibrent.**

Protection des ressources exploitées

Si l'on considère une moyenne des ressources potentielles retenues, l'exploitation de plus de 11 millions de m^3/an peut être mise en oeuvre par une soixantaine de forages produisant chacun entre 400 et 500 m^3/jour. Sachant que l'aire d'alimentation d'un forage en territoire de socle représente entre 40 et 60 hectares, l'addition de ces surfaces ne totalise pas plus de 2 400 à 3 500 ha à protéger, dont probablement la moitié par des périmètres de protection rapprochés à mesures assez contraignantes, et l'autre moitié par des périmètres de protection éloignée, où la seule application de la réglementation générale peut être suffisante. Ces 3 500 hectares sont à comparer aux surfaces qu'il faudrait objectivement protéger pour garantir la qualité de l'eau d'une prise en rivière fournissant les mêmes volumes annuels.

ANNEXE 3

DEMARCHES ET METHODES

1. DÉBITS DES FORAGES

1.1. Généralités

L'analyse des données (débit instantanés et profondeurs) fournies par les forages réalisés dans le département de la Mayenne permet de hiérarchiser les formations géologiques entre elles en fonction de la probabilité d'y trouver un débit donné.

Plus l'échelle est petite (département), plus la vision est synthétique: les regroupements auxquels il est nécessaire de procéder conduisent alors à des unités géologiques et géographiques constituées en réalité d'un grand nombre de sous-ensembles aux caractéristiques nuancées.

Plus l'échelle de hiérarchisation est grande, meilleure est la précision, avec des unités géologiques et géographiques d'autant plus homogènes qu'elles sont de dimensions réduites.

Cependant, le nombre d'informations disponibles limite les possibilités de "zoom" : on considère qu'une population de moins de 30 forages n'a pas de signification statistique ; ses résultats (débit moyen, profondeur moyenne etc.) sont indiqués dans les tableaux, dans la mesure où ils peuvent traduire une tendance importante à connaître, mais ils ne sont pas utilisés au classement des zones par ordre d'intérêt.

Il s'agit de **résultats statistiques,** obtenus pour des populations relativement hétéroclites, composées, le plus souvent pour l'essentiel, de forages implantés au hasard et, pour une très faible part, de forages implantés sur la base de réflexions hydrogéologiques. Le but de recherches cohérentes n'est pas de retrouver les valeurs moyennes mais, au moins, celle du quartile supérieur.

Par ailleurs, il ne faut exclure ni la possibilité de mettre en évidence des situations favorables dans des secteurs connus comme globalement peu intéressants, ni la possibilité d'échecs dans des secteurs globalement très favorables.

L'observation montre, en fait, que de bons résultats existent dans à peu près toutes les formations géologiques ; ils sont nettement plus nombreux dans certaines, beaucoup plus rares dans d'autres.

Une fréquence élevée d'apparition d'un débit "intéressant" a deux significations :

- retrouver l'équivalent sera plus facile et moins coûteux qu'ailleurs (moins de tentatives pour obtenir un succès) ;

- la fréquence étant en quelque sorte une image de l'étendue des zones dont la perméabilité permet d'obtenir un débit instantané donné, un débit d'exploitation a d'autant plus de chances de se rapprocher du débit instantané obtenu à la foration ou de l'égaler, que la fréquence de celui-ci est élevée dans la zone considérée.

1.2. critères utilisés

Les **débits instantanés** (débits exhaurés par l'action de l'air comprimé utilisé comme fluide de foration et mesurés en cours de réalisation des ouvrages) sont avec les profondeurs, les seules valeurs disponibles en grand nombre. Les profondeurs existantes étant en moyenne très voisines. c'est la variable "débits instantanés" qui a été utilisée pour caler les critères de classement des différentes formations.

Deux critères ont été retenus :

a) <u>Le pourcentage de forages ayant fourni un débit instantané au moins égal à 10 m^3/heure</u>. Selon les formations géologiques, le paramètre (% Q > 10 m^3/h) varie de façon très significative, de 0 % à 52 %.

Ce critère peut être considéré comme une image des **probabilités de succès**, que des études hydrogéologiques pertinentes amélioreront fortement :

- les forages ne seront pas implantés au hasard,
- leur profondeur sera de l'ordre de 100 m, alors qu'elle est d'une cinquantaine de mètres pour les ouvrages recensés.

b) <u>Le débit moyen du quartile supérieur</u> : c'est la moyenne des débits des 25 % "meilleurs forages" de chaque population concernée. Ce paramètre (Q 25 % sup.) varie également de façon très significative : de 5 m^3/h à 45 m^3/h. On a considéré que cette valeur, atteinte par le quart des forages implantés au hasard, était suffisamment fréquente pour correspondre à des conditions aquifères d'une certaine extension et que **les débits exploitables** (par des forages de 100 m ou plus) pourraient y être voisins **des débits instantanés** des forages d'une cinquantaine de mètres.

1.3. Objectifs fixés aux futures recherches

Il s'agit essentiellement de définir, dans un contexte géographique et géologique donné, la faisabilité technique et économique d'exploitation de l'eau souterraine : débits

pérennes disponibles, filières de traitement, caractéristiques des ouvrages (forages) adaptés aux conditions locales, conditions de protection de la ressource.

1.3.1 Objectifs de débits

On peut fixer comme objectif raisonnable pour les débits exploitables d'être au moins égaux, en moyenne, au débit instantané moyen de 25 % des meilleurs résultats de la zone considérée. Cela signifie en particulier que la réflexion conduisant à la sélection des sites favorables et à l'implantation des sondages doit être menée en s'appuyant plus sur les dimensions de ces sites et les pronostics de ressources que sur la possibilité d'y mettre en évidence un débit instantané particulièrement important.

1.3.2 Objectifs de réussite

Une réussite est caractérisée par l'atteinte des objectifs de débit; son niveau n'est pas partout équivalent : selon les formations géologiques et les secteurs géographiques, l'objectif de débit peut varier de moins de 18 m^3/h à plus de 40 m^3/h.

Au vu des résultats obtenus après réalisation d'une étude hydrogéologique préliminaire, on peut estimer que la sélection scientifique des sites de forage réduit au moins de moitié le caractère aléatoire du résultat. Les objectifs de débit sont alors affectés d'un taux de réussite au moins double du pourcentage actuel de forages dont le débit atteint ou dépasse 10 m^3/heure dans chaque population observée.

Pour se rapprocher des conditions de terrain, il a par ailleurs été considéré :

- que le taux de réussite prévisible était plafonné à 80 % : le risque d'échec subsiste même dans les formations paraissant les plus intéressantes;

- qu'il ne pouvait, dans les formations plus "difficiles", être inférieur à 50 % : deux fois le pourcentage de forages implantés au hasard ayant atteint les objectifs de débit.

1.4. Définition des classes d'intérêt

A partir de l'ensemble des données sur les forages disponibles dans le département, 4 classes d'intérêt ont été définies en considérant à la fois les pourcentages des débits $\geq$ 10 m^3/h et les débits des quartiles supérieurs. Un indice global a été créé en multipliant ces deux paramètres l'un par l'autre : un débit un peu inférieur peut être compensé par un pourcentage un peu supérieur et vice-versa.

En face de chaque formation géologique ayant pu être individualisée ont été reportés :

- le nombre de forages qui a pu y être recensé,
- le pourcentage de ces forages ayant fourni un débit instantané d'au moins 10 m^3/heure,
- le débit moyen de ces forages ayant produit au moins 10 m^3/h,
- le débit moyen de 25 % des "meilleurs forages" connus dans la formation considérée,
- l'indice global d'intérêt.

Le nombre de forages initialement recensé est de 1085 ; toutefois, certains d'entre eux n'avaient pas fait l'objet de mesures de débit et, par ailleurs, dans le cadre de cette étude consacrée aux eaux souterraines profondes, il a été considéré que les ouvrages d'une profondeur inférieure à 10 mètres ne pouvaient être pris en compte. Ainsi, le nombre de forages représentatifs s'élève à 681.

1.5. Définition des formations et zones les plus intéressantes

Sachant que les formations géologiques ne conservent pas, sur toute l'étendue du département, le même potentiel hydrogéologique, les résultats quantitatifs de l'étude sont présentés par "zones".

Ces zones sont délimitées par :

- une formation géologique reconnue hydrogéologiquement favorable
- une large étendue d'affleurement de cette formation
- un nombre de points d'observation suffisant pour valider les calculs statistiques

Remarque : il subsiste sur la carte quelques zones non prises en compte en raison du nombre insuffisant d'informations qu'elles contiennent.

1.6. Discussion - Limite des méthodes d'évaluation employées

Les raisonnements suivis sont fondés sur la statistique puisque l'on travaille sur des implantations d'ouvrages effectuées "au hasard" ; ils utilisent le matériau disponible en compensant son imperfection par le nombre de données, mais ils conservent toutefois une part d'approximation.

Toutefois, une formation définie comme très intéressante ne pourra, avec davantage de données, devenir médiocre : il faudrait pour cela que l'implantation des forages existants ait "consommé" toutes les situations favorables qui y existent; à l'inverse, les formations classées médiocres aujourd'hui, ou bien resteront médiocres, ou bien pourront être mieux classées lorsque la connaissance pourra en être améliorée. La réalisation de recherches cohérentes basées sur des données hydrogéologiques aussi rigoureuses que possible devrait, globalement, avoir tendance à "tirer vers le haut" les probabilités définies ici.

Il est vrai que certains paramètres peuvent introduire des distorsions entre les prévisions et la réalité.

1.6.1. Imperfection des données

Les débits indiqués par les foreurs ne sont pas forcément mesurés avec la précision souhaitable; certains foreurs peuvent penser avoir intérêt à minorer leurs résultats, d'autres, à les majorer. Cependant, ces imprécisions et/ou manipulations ne modifient pas l'ordre de grandeur des débits et, compte tenu de la large ouverture de l'éventail des valeurs, ne semblent pas en mesure de pouvoir remettre en cause leur classement.

Les forages sont "imparfaits", dans le sens où ils ne traversent pas la totalité des horizons aquifères : payés au nombre de mètres forés, ils sont arrêtés par leurs maîtres d'ouvrage dès que leurs objectifs, souvent limités à quelques m^3/h, leur paraissent atteints. Ainsi, le plus souvent, les débits importants (supérieurs à 10 m^3/h) ne sont obtenus que par "hasard". Il est certain que l'accroissement de la profondeur moyenne des forages s'accompagne d'une amélioration très sensible de leurs performances.

On peut considérer que les résultats présentés dans cette étude (pronostics de débits et probabilités de réussite) sont des résultats par défaut, du simple fait que les sondages de reconnaissance employés à la mise en évidence des nouvelles ressources en eau souterraine devront être nettement plus profonds (de l'ordre de 100 à 120 m en moyenne) que les forages standards.

1.6.2. Effets de "pépite"

Un nombre limité de forages aux résultats exceptionnellement élevés peut être suffisant pour gonfler le débit moyen d'une population et le rendre peu significatif. Cet effet serait peu sensible si la population était nombreuse et n'interviendrait pas sur les pourcentages de réussite.

Dans les populations traitées en Mayenne, quelques débits exceptionnellement élevés ont été observés, dans les calcaires de Laval ainsi que dans les schistes et calcaires cambriens: ces points ont été retirés des statistiques, compte tenu des faibles populations de forages implantés sur ces formations.

1.6.3. Utilisation du débit instantané comme critère principal d'évaluation

Pendant la réalisation d'un forage, l'air comprimé utilisé comme fluide de foration (méthode du "marteau fond de trou") crée une émulsion avec l'eau rencontrée et provoque un véritable pompage tant que dure le creusement. Le débit ainsi exhauré peut être mesuré à tous moments, il dépend de la perméabilité des terrains traversés, de leur faculté à laisser circuler l'eau. Le débit mesuré en cours ou en fin de foration est dit **instantané** : il n'est observé que pendant un temps court (quelques heures au

maximum) ; le débit réellement exploitable en est en général différent, sensiblement plus faible.

Le débit d'exploitation d'un forage (débit pouvant être produit en continu) est conditionné par :

- la ressource et les conditions de recharge de l'aquifère (ce facteur est rarement, dans le Massif armoricain, le paramètre limitant principal) ;

- les caractéristiques du forage lui-même et des terrains qu'il a traversés : on peut considérer que le débit maximum qu'il peut produire (indépendamment des autres facteurs limitants) est représenté par son débit instantané ;

- la transmissivité des diverses zones du sous-sol aquifère concernées par les pompages (extension progressive de l'influence du pompage, du "cône de dépression" qu'il engendre).

Or, un débit instantané n'est représentatif que de la perméabilité (transmissivité) locale (celle des terrains traversés et des quelques mètres ou dizaines de mètres situés autour) et ne permet pas de préjuger de l'évolution de ce paramètre au-delà du volume sollicité par le pompage par émulsion réalisé pendant la foration. Le débit d'exploitation ne peut s'approcher du débit instantané, ou l'égaler, que dans la mesure où les conditions de perméabilité rencontrées par le forage restent équivalentes dans un volume de terrain suffisant. Si ces conditions varient dans l'espace concerné, le débit d'exploitation dépend de leur valeur moyenne.

Une valeur de débit instantané n'a une signification utile que dans la mesure où sa fréquence d'apparition est importante. C'est pourquoi on a retenu comme objectif de débit la moyenne de débit de 25 % des meilleurs forages de chaque classe de population, ce qui semble une proportion suffisante pour avoir des chances de correspondre à des aquifères d'une certaine extension. Ceci, bien entendu, est et sera à nuancer dans un grand nombre de cas, parfois en plus, parfois en moins.

2. EVALUATION DES RESSOURCES MOBILISABLES

2.1. Principe

Les ressources globales d'un secteur sont indiquées par la valeur moyenne des pluies efficaces qu'il reçoit (référence : "Précipitations efficaces moyennes annuelles (1946-1976) - M. Louvrier et J. Margat, rapport BRGM 83 SGN 003 EAU).

Par convention, les ressources souterraines renouvelables sont estimées dans tous les secteurs à un tiers des ressources globales.

Les ressources souterraines nouvelles mobilisables sont estimées être de l'ordre de 5 % des ressources souterraines renouvelables. Elles sont supposées concentrées sur les zones les plus intéressantes, mais les surfaces d'alimentation peuvent intégrer des zones voisines non prises en compte (jugées trop peu intéressantes ou manquant d'informations).

2.2. Justification des conventions

2.2.1. Part des pluies efficaces infiltrées

Dans l'état actuel des connaissances, à l'échelle des bassins versants dans le Massif armoricain, l'infiltration vers les nappes représente d'un peu moins de 30 % à, un peu plus de 45 % des précipitations efficaces. Fixer à 33 % de la pluie efficace la part de l'infiltration à l'échelle de chaque secteur apparaît un compromis raisonnable, ne risquant pas de s'écarter fortement de la réalité.

2.2.2. Part des ressources mobilisables

On entend par ressource mobilisable, un débit exploitable par la collectivité dans de bonnes conditions économiques et de sécurité. Les conditions économiques sont très variables d'un cas à l'autre :

- telle commune a résolu son problème de qualité insuffisante par un forage d'appoint ne fournissant pas plus de 10 m^3/h d'eau de bonne qualité, dans des conditions très intéressantes, l'ouvrage n'étant qu'à quelques mètres du captage à améliorer.

- dans telle autre situation, 50 m^3/h sont au moins nécessaires pour rentabiliser et rendre les installations de traitement et le transport de l'eau concurrentiels avec les solutions alternatives.

Il n'y a pas d'arguments nettement hydrogéologiques utilisables à l'estimation des ressources mobilisables ; elles dépendent notamment du nombre de sites où des forages d'eau de bonne qualité peuvent être réalisés et de la situation de ces sites par rapport à la localisation des besoins les plus proches: l'échelle à laquelle est réalisé ce travail ne permet pas de déterminer ces paramètres.

Mais l'alimentation en eau potable ne peut être considérée uniquement en termes de rentabilité économique et, de ce point de vue, les ressources mobilisables constituent plutôt un objectif qu'une grandeur techniquement définie. Il est certain que plus le seuil est élevé, et plus l'objectif est difficile à atteindre, jusqu'à devenir impossible. Considérer que les ressources mobilisables pour l'AEP sont de l'ordre de 5 % des pluies efficaces infiltrées parait un objectif raisonnable, pouvant être atteint sans difficultés

techniques majeures et à des coûts financiers acceptables, tout en étant en mesure de fournir un confortement très significatif des ressources de la région.

Proposer comme les sources profondes mobilisables pour l'AEP un pourcentage des pluies efficaces infiltrées en année moyenne, égal pour tout le département est une commodité d'exposé. Il est clair que l'objectif de 5 % peut être modulé selon les secteurs ; rien n'empêche de la dépasser largement lorsque l'accès à l'eau souterraine de bonne qualité est facile et que les ressources alternatives sont peu abondantes ou dégradées.

2.2.3. Concentration des ressources mobilisables sur les seules zones intéressantes

Cela ne signifie nullement qu'il n'existe pas de débits exploitables dans de bonnes conditions ailleurs que dans les "zones intéressantes" mais c'est à l'intérieur de celles-ci qu'ils sont le plus facile à mettre en évidence et qu'en règle générale, les recherches y seront concentrées.

Par ailleurs, par définition, les zones les plus intéressantes sont celles qui sont globalement les plus perméables et où l'infiltration et l'alimentation des nappes doivent être les plus importantes.

3. QUALITE DES EAUX

On peut considérer qu'une eau de bonne qualité est une eau microbiologiquement pure, exempte de pesticides et de nitrates.

Sous réserve que les ouvrages de captage soient réalisés dans les règles, les eaux souterraines profondes sont naturellement biologiquement saines et ne contiennent pas de pesticides. Par ailleurs, leurs concentrations en nitrate sont en général beaucoup moins élevées que dans les eaux superficielles ou dans les eaux peu profondes.

L'absence de nitrate en profondeur peut avoir trois causes :

- l'absence de source de pollution : le forage est réalisé dans un secteur protégé par un couvert de landes ou de bois, à l'écart des industries, des zones d'activités agricoles intensives, des zones urbanisées où l'assainissement est déficient. De telles implantations sont à rechercher prioritairement.

- la lenteur des trajets souterrains: la pollution azotée n'est pas encore arrivée en profondeur. De telles situations doivent être identifiées lors des travaux de reconnaissance pour éviter que, les pompages accélérant les circulations, on ne mette en production des forages où les teneurs en nitrates augmenteraient très vite.

- L'existence dans le sous-sol de phénomènes de dénitrification naturelle. Ce dernier point mérite quelques développements.

La dénitrification naturelle en sous-sol est une réaction biochimique de réduction des nitrates en azote gazeux grâce à la pyrite (sulfure de fer) contenue dans la roche et par l'activité biologique de *thiobacillus dénitrificans*. Globalement, elle peut s'écrire :

$$16NO_3 + 5\,FeS_2 + 2H_2O \xrightarrow[\text{dénitritificans}]{\text{Thiobacillus}} 8N_2 + 5\,FeOOH + 10SO_4 + 4H$$

La réaction libère des sulfates (non gênants), du fer et du manganèse, dont une partie reprécipite dans le terrain et une partie est extraite avec l'eau pompée, obligeant à un traitement.

De nombreux forages, en Mayenne et, plus généralement, dans tout le Massif Armoricain, ayant pourtant fourni des résultats très positifs n'ont jamais été mis en exploitation, sous prétexte que leur eau était ferrugineuse; de telles situations devraient au contraire être recherchées, la présence de fer garantissant l'absence de nitrates (sous réserve d'un équipement adapté des ouvrages empêchant que l'eau profonde, sans nitrate, puisse se trouver mélangée avec de l'eau plus superficielle) ; les procédés de déferrisation sont bien connus, simples et fiables.

Exemple de composition (éléments majeurs) d'une eau de forage naturellement dénitrifiée (eau brute)

1° CATIONS	mg/l	me.l	2°ANIONS	mg/l	me/l
Calcium, en Ca++	11	0,55	Carbonate CO_3^{--}	0,00	0,00
Magnésium, en Mg++	9,7	0,81	Hydrogénocarbonate HCO_3^-	19,0	0,64
Ammonium, en NH+	<0,05	0,00	Chlorure Cl^-	45	1,27
Sodium en Na+	32	1,39	Sulfate SO_4^{--}	46	0,96
Potassium en K+	3,1	0,08	Nitrite NO_2^-	<0,01	0,00
Fer en Fe++	3,6	0,13	Nitrate NO_3^-	<1	0,00
Manganèse en Mn++	0,11	0,00	Phosphate PO_4^{---}	0,1	0,00
Aluminium en Al+++	<0,05	0,00			
		2,96			2,87

La pyrite est progressivement consommée par la réaction ; la dénitrification naturelle en sous-sol est donc un phénomène que l'on peut considérer comme temporaire; toutefois, en Bretagne, des installations exploitent depuis 1977-78 de l'eau souterraine ferrugineuse et sans nitrate.

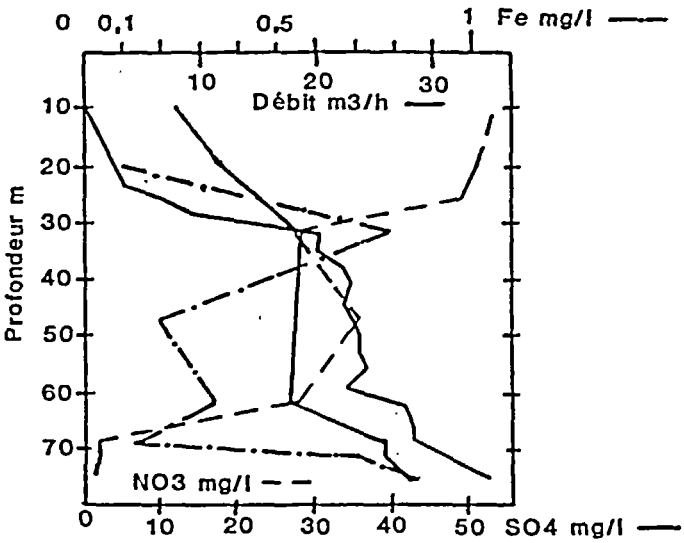
Ce caractère temporaire doit cependant inciter à poursuivre les efforts de réduction des pollutions à la source, les délais offerts par la dénitrification permettant de rechercher des solutions efficaces et acceptables.

Pendant les opérations de réalisation des forages, des mesures spécifiques sont nécessaires :

- évolution des concentrations en nitrates
- évolution des concentrations en fer et en sulfates

au fur et à mesure de l'approfondissement de l'ouvrage, pour détecter la profondeur à partir de laquelle apparaît la dénitrification, permettant ainsi de définir l'équipement qui évitera les mélanges évoqués plus haut. La très grande majorité des forages réalisés à ce jour ne bénéficie d'aucune protection particulière; les teneurs en nitrate qu'on peut y mesurer sont alors peu significatives; par contre, la présence de fer est un bon indicateur même lorsque les effets de la dénitrification se trouvent masqués par le mélange avec des eaux contaminées.

Exemple de mesures " à l'avancement", réalisées en cours de foration



débit instantané
teneurs en nitrate (NO3)
sulfate (SO4)
Fer (Fe)

Forage réalisé à FOUESNANT (29)

Ces différentes observations aboutissent à la définition, vis-à-vis des nitrates, de 4 types d'eau :

- eau non nitratée: pas (ou très peu) de nitrates, pas de fer et très peu de sulfates
- eau nitratée: eau contaminée par les nitrates, pas de fer et très peu de sulfates
- eau dénitrifiée: les nitrates ont disparu. En revanche, présence de fer (> 0,3 mg/l) et sulfates
- eau mélangée: la mauvaise réalisation technique des forages conduit au mélange d'eaux de surface et d'eaux profondes dénitrifiées. Coexistence de nitrates, de fer et de sulfates.

Les résultats d'une analyse d'eau "mélangée" sont paradoxaux: en effet, la coexistence des nitrates et du fer signifierait que le milieu est à la fois oxydant et réducteur!

ANNEXE 4

ÉVALUATION DES COÛTS

Trois phases principales peuvent être distinguées :

- phase 1 : implantation et reconnaissance (sondages),
- phase 2 : essais,
- phase 3 : mise en exploitation.

1. COUTS UNITAIRES

1.1. Première phase

Etude d'implantation, réalisation des sondages de reconnaissance. Le coût moyen peut en être estimé à 500 F HT le mètre linéaire, toutes sujétions comprises.

Le coût est réparti entre :

- le bureau d'étude (hydrogéologues) : sélection, dans les zones intéressantes de sites favorables à explorer, implantation des sondages (géophysique éventuelle), direction et contrôle des chantiers, suivi détaillé des travaux (y compris analyses à l'avancement), mise en forme des données et résultats, compte rendu commenté au maître d'ouvrage (coût moyen estimé à 200 F H.T. le mètre linéaire);

- le foreur : amenée, repli et maintenance des matériels, mises à poste, foration, pré-tubages métalliques, remise en état des lieux (coût moyen estimé à H.T. 300 F le mètre linéaire).

1.2. Deuxième phase : réalisation des essais

Cette phase comprend en fait :

- l'aménagement du sondage sélectionné, en forage (alésage de la tête, mise en place du tubage, cimentation de l'annulaire, nettoyage) ;

- la réalisation de piézomètres ;

- la mise en place d'une pompe immergée et son alimentation en énergie ;

- la réalisation des essais proprement dits : pompage à débit constant pendant au moins 2 mois, avec contrôle du débit de pompage et suivi régulier des niveaux, analyses décadaires en cours d'essai (pH, TH, conductivité, NO_2, NO_3, NH_4, Fe, Mn, SO_4, Cl), une analyse complète en fin d'essai (comprenant notamment les phénols,

hydrocarbures, métaux et pesticides), l'interprétation de l'ensemble, la définition du débit exploitable, des modalités d'exploitation et des traitements à mettre en place.

Par essai, le coût de cette phase peut globalement être estimé à H.T. 180 000 F.

1.3. Troisième phase : mise en exploitation

Les coûts de mise en exploitation sont extrêmement variables. Ils dépendent du débit à exploiter, de la filière de traitement à mettre en place, de la longueur des canalisations de raccordement.

Pour fixer les idées et permettre des comparaisons, on a admis un coût moyen de 2 MF H.T. par forage :

- achat du terrain et aménagement de l'accès	50 KF
- forage d'exploitation et pompe	300 KF
- station de traitement	800 KF
- raccordement hydraulique (1,5 km de PVC Ø 125 mm)	525 KF
- raccordement électrique et divers	75 KF
- protection	250 KF
Total H.T.	**2 000 KF**

Bien entendu, les coûts unitaires peuvent être revus en fonction de l'évolution du marché ou des conditions locales.

2. COÛTS PAR ZONES

Une zone est caractérisée par 3 évaluations :

- le volume des ressources mobilisables ;
- le débit de réussite (ou débit d'objectif). C'est le débit exploitable que l'on peut raisonnablement espérer atteindre dans la zone par des recherches cohérentes ; il est égal au débit moyen de 25 % des meilleurs forages connus ;
- le taux de réussite probable, égal au double du pourcentage des forages de la zone ayant un débit supérieur ou égal à 10 m^3/h. Le taux de réussite est plafonné à 80 % et ne peut être inférieur à 50 %.

Le volume des ressources (exprimé en m^3/h) comparé au débit de réussite indique le nombre n_1 de forages réussis (arrondi à l'unité supérieure) qu'il faut envisager au final. Ce nombre n_1, multiplié par 1,3 (prise en compte d'un quota de 30% échecs: débits réels se révélant insuffisants ou qualité non conforme) indique n_2, nombre d'essais qu'il faut

envisager de réaliser; n_2, affecté du coefficient de réussite probable donne le nombre de sites à explorer n_3 (arrondi à l'unité supérieure), chacun par 2 sondages de 100 m.

Les coûts unitaires sont appliqués :

- première phase : 500 F x n_3 x 2 x 100 m,
- deuxième phase : 180 000 F x n_2,
- troisième phase : 2 MF x n_1.

On a par ailleurs calculé l'amortissement de ces dépenses, rapporté au m^3 produit, selon l'hypothèse d'emprunts à 9 % sur vingt ans avec, d'un côté, 70 % de subvention aux investissements et, de l'autre, pas de subvention.

Exemple :

Dans l'exemple qui suit, deux zones sont comparées, toutes deux disposant du même volume de ressources mobilisables : 750 000 m^3/an (2 055 m^3/j, 85,6 m^3/h).

Dans la zone A

Le débit de réussite est de 24,9 m^3/h, il faut donc prévoir n_1 = 85,6 : 24,9 = 4 forages (3,44) réussis, soit, pour tenir compte des risques d'échec en phase d'essai, n_2 = 4 x 1,3 = 6 (5,2) forages essayés (6 réussites en phase de reconnaissance).

Le pourcentage de débits > 10 m^3/h est de 32 %, le taux de réussite probable est alors de 64 %. Pour obtenir 6 sondages répondant aux critères de réussite, il faut explorer 6 : 0,64 = 9,37, soit 10 sites.

Ainsi

-	phase 1 : 10 x 2 x 100 m x 500 F	1 000 KF
-	phase 2 : 6 x 180 000 F	1 080 KF
	total des recherches	**2 080 KF**
-	phase 3 : 2 000 KF x 4	8 000 KF
	coût total	**10 080 KF**

dans la zone B

Le débit de réussite est de 15 m^3/h et le taux de réussite probable de 50 %. Pour atteindre le même objectif qu'en zone A, il faut envisager d'explorer 16 sites par

32 sondages de 100 m, de réaliser 8 essais, et de mettre en exploitation 6 ouvrages. Les coûts sont alors :

-	phase 1 - reconnaissance	1 600 KF
-	phase 2 - essais	1 440 KF
	total des recherches	**3 040 KF**
-	phase 3 - réalisation	12 000 KF
	coût total	**15 040 KF**

Globalement, l'accès à l'eau est plus onéreux de 50 % en zone B qu'en zone A. Dans les deux cas les investissements sont importants et seraient à comparer à ceux des solutions alternatives, si elles existent en offrant la même sécurité; rapportés au mètre cube produit, ils semblent très supportables et de nature à permettre la distribution d'eau potable entre 3 et 5 francs le m^3.

ANNEXE 5

High-rate denitrification from several electron donors in a schist aquifer

H Pauwels
BRGM, Research Division, Orléans, France

O Legendre, J-C Foucher
BRGM, National Mining Division, Orléans, France

ABSTRACT: The decrease in nitrate concentration in a schist aquifer in Brittany is partly interpreted as the result of denitrifying processes involving several electron donors - organic matter, pyrite, ferrous iron. At least the two first processes are enhanced by the presence of bacteria. A small-scale tracer test has demonstrated a high rate of autotrophic denitrification, explaining the lack of nitrate in some parts of the aquifer. Despite pyrite oxidation, however, the sulphate concentration in the water remains low due to the precipitation of secondary mineral phases such as jarosite and natroalunite; this is presumed to occur mainly in the network of small fissures, where denitrification is more effective, rather than in the large fissures or fractures.

1 INTRODUCTION

Nitrate contamination of both surface water and groundwater due to intensive agricultural activity is a crucial problem in Brittany (western France). In the Coët Dan catchment which is an area of particularly intensive farming, mean annual nitrate concentrations in the river at the basin outlet have frequently exceeded 60 $mg.l^{-1}$ since 1989 (Cann, 1996), and groundwater contamination with values as high as 200 $mg.l^{-1}$ are observed in the shallow zones (Pauwels, 1996). One process of nitrate removal from groundwater that has been observed in other contexts is natural denitrification (Hiscock et al., 1991). This process has been evidenced in the Coët Dan groundwater (Pauwels, 1994), where it is directed by (a) the mineralization of organic matter, and (b) the oxidation of pyrite (detected in rock samples collected during drilling).

The purpose of the present paper is to discuss the effectiveness of these two types of natural denitrification as determined from groundwater sampling and a tracer test.

2 GEOLOGICAL AND HYDROGEOLOGICAL SETTING

The Coët Dan basin is a small catchment (12 km^2) located approximately 70 km southwest of Rennes. It is underlain by Proterozoic (530 Ma) schist, including sandstone, siltstone and claystone, with the top few metres comprising recent alluvium, weathered schist and sandstone from which pyrite has been dissolved.

3 HYDROCHEMICAL BASELINE CONDITIONS

High anthropogenic nitrate (as much as 200 $mg.l^{-1}$) and chloride concentrations have been measured in the shallow part of the Coët Dan aquifer. In addition, hydrogeological investigations peformed on sampling wells (Martelat et al., 1996) indicate that in places shallow groundwater flux penetrates into the deeper parts of the aquifer, potentially contaminating the underlying groundwater in nitrate and chloride. However, whereas SO_4 and CO_2 concentrations are observed to increase with depth, the nitrate concentrations decrease sharply (Fig. 1).

The decrease in NO_3 and increase in SO_4 and CO_2 concentrations with depth have been partly explained by two denitrifying processes (Pauwels, 1994):

1. Denitrification by the oxidation of pyrite:

$$5\,FeS_2 + 14\,NO_3^- + 4H^+ \rightarrow 7N_2 + 10\,SO_4^{2-} + 5\,Fe^{2+} + 2\,H_2O \quad (1)$$

2. Denitrification by the oxidation of organic matter:

$$CH_2O + 4/5\,NO_3^- + 4/5\,H^+ \rightarrow 2/5\,N_2 + CO_2 + 7/5\,H_2O \quad (2)$$

Nevertheless, the SO_4 and CO_2 concentrations, both products of the denitrifying processes, remain relatively low (Fig. 1), which could suggest that the two processes are limited .

Samples collected at various periods indicate that denitrifying bacteria are always present in the groundwater, even where nitrates are absent. They include *Thiobacillus denitrificans*, an autotrophic bacterium that uses sulphides, and also heterotrophic bacteria able to reduce nitrate to nitrite and gaseous nitrogen.

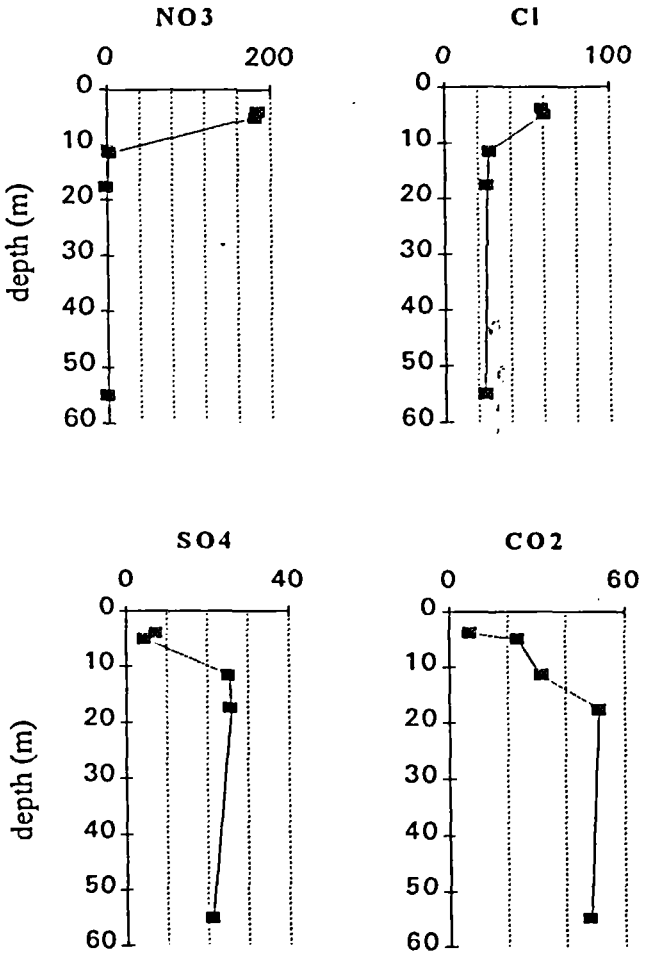


Fig. 1. Variation of nitrate, chloride, sulphate and carbon dioxide ($mg.l^{-1}$) as a function of depth.

4 SMALL-SCALE TRACER TEST

A small-scale tracer test with the injection of nitrate, accompanied with bromide as a conservative component was carried out between an injection well and a production well lying 15.2 m apart. The injection well was screened between 32 m and 82 m depth so that tracer transfer occurred only in the lower part of the aquifer where natural nitrate concentrations are below the detection limit.

The first indications of both tracers arrived virtually simultaneously only five and half hours after injection, with 73% of the bromide as against 47% of the nitrate being recovered after 10 days. According to the model of the observed breakthrough curves, tracer transfer takes place in a dual-porosity medium. Part of the tracer is transported rapidly (less than 40 hours) along large fissures or fractures (of the low-porosity / high-permeability medium). The other part arrives later, after migrating through the small fissures (high-porosity / low-permeability medium) (Pauwels et al., 1997). Global tracer recovery at 73% for bromides and 47% for nitrates indicates a rapid denitrification process.

5 RESULTS AND DISCUSSION

5.1 *Heterotrophic denitrification*

The total dissolved CO_2 increases with depth partly as the result of organic matter oxidation through nitrate reduction, but concentrations remain low and no carbonate mineral phase which could carry the CO_2 has been detected. Moreover, the DOC content in the surface waters is fairly low, indicating that heterotrophic processes of denitrification must be rather limited.

During the tracer test, the DOC in the injection well was too low to explain the nitrate decline by heterotrophic denitrification.

5.2 *Denitrification with oxidation of mineral compounds*

According to equation (1), denitrification through pyrite oxidation must involve an increase of sulphate concentrations. Actual concentrations in the groundwater vary from 5 $mg.l^{-1}$ in the shallow part of the aquifer, where nitrate concentrations are high, to 30-35 $mg.l^{-1}$ in the underlying part. Investigations by X-ray diffraction revealed the presence of two secondary sulphate minerals, jarosite ($KFe_3(SO_4)_2(OH)_6$) and natroalunite ($NaAl_3(SO_4)_2(OH)_6$), which could explain the limited SO_4 concentrations. This indicates that denitrification through pyrite oxidation is more important than would be expected from the SO_4 concentration.

Because no increase in sulphate concentration as the result of nitrate reduction was observed during the tracer test, precipitation of SO_4 in secondary minerals is also suspected

The precipitation of jarosite implies oxidation of Fe^{2+} to Fe^{3+}. In this case, NO_3^- is the only available electron donor and hence ferrous iron participates in the denitrification:

$$NO_3^- + 5\ Fe^{2+} + 6H^+ \rightarrow 1/2\ N_2 + 5\ Fe^{3+} + 3H_2O \quad (3)$$

Gallionella ferruginea, a bacterium capable of mediating such a reaction, was not detected in the water samples.

Ferric ions are also assumed to be partly removed from the water by precipitation of iron hydroxyde as they are observed in the cutting samples.

5.3 *Denitrification kinetics*

The rate of denitrification was also determined through the artificial tracer test. Since bromide is considered to be a conservative tracer, it is possible, from the Br concentration of each water sample collected at the wellhead of the production well, to calculate the concentration of nitrate in the produced water if denitrification had not occurred (i.e. $[NO_3]_0$). The nitrate concentrations were therefore plotted as $\ln([NO_3]/[NO_3]_0)$ vs. time from the tracer-injection pulse; in such diagrams, a first-order model is represented by a straight line. In the present case, two fairly linear segments are observed (Fig. 2a,b).

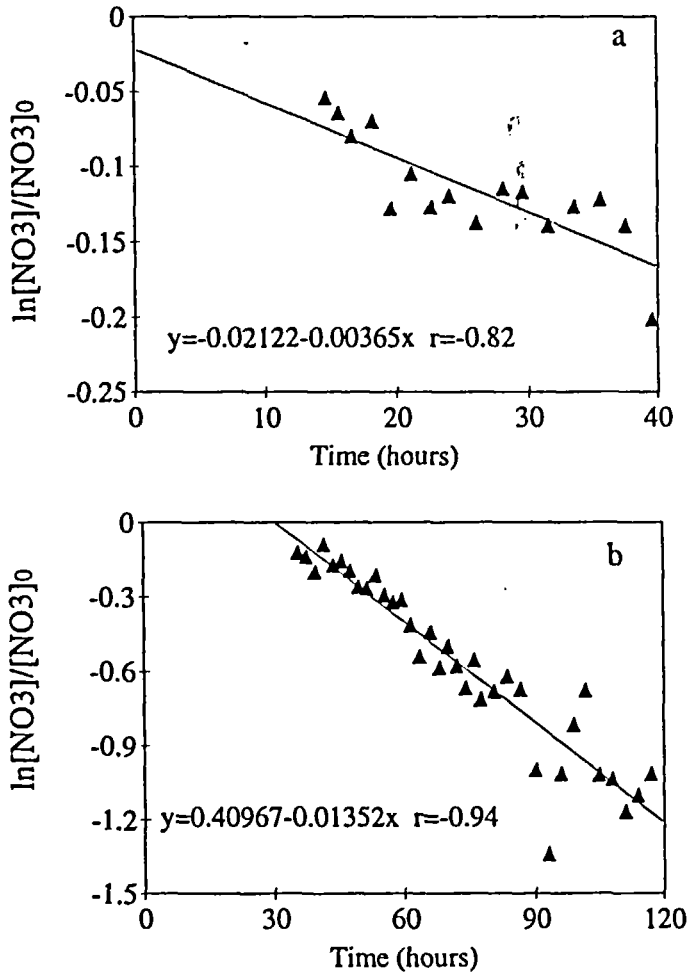


Fig. 2. Plot of the logarithm of nitrate concentration over expected nitrate concentration assuming no denitrification versus time. The solid lines mark the regressions: (a) tracer directly transferred through large fissures, (b) tracer having partly migrated through small fissures

The tagged water arriving in the production well during the first 40 hours, circulated mainly through the high-permeability medium (larger fissures); the denitrification rate determined from the slope gave a half life ($t_{1/2}$) of 7.9 days (Fig. 2a). The tracer arriving at the production well after 40 hours, mainly migrated through the low-permeability medium (smaller fissures); the slope of Figure 2b indicates a higher denitrification rate with a half life ($t_{1/2}$) of only 2.1 days.

A high autotrophic denitrification rate was concluded from the tracer test. By way of comparison, the half life for denitrification with pyrite in the Fuhrberg field, near Hannover, was found to be in the range of 1 to 2.3 years (Frind et al., 1990). During natural circulation in the Coët Dan aquifer, a similar rate to that of the tracer test can be expected. As heterotrophic denitrification is deduced from the chemical composition of the waters, it must occur simultaneously with the autotrophic denitrification, and thus at a high rate.

5.4 *Nitrate transfer and denitrification*

Nitrate concentrations in the deeper part of the aquifer are variable with time (Fig. 3). At some periods and in some places, concentrations below the limit of detection occur from a depth of 7 m. At other periods, nitrate is detected up to 100 m depth: rapid circulation and a lower denitrification rate in the larger fissures and fractures enable nitrate to reach such depths when the water flux is directed downwards. Nitrate contamination of the aquifer must thus be mainly through water circulation in the larger fissures, since waters are rapidly denitrified in the smaller fissures.

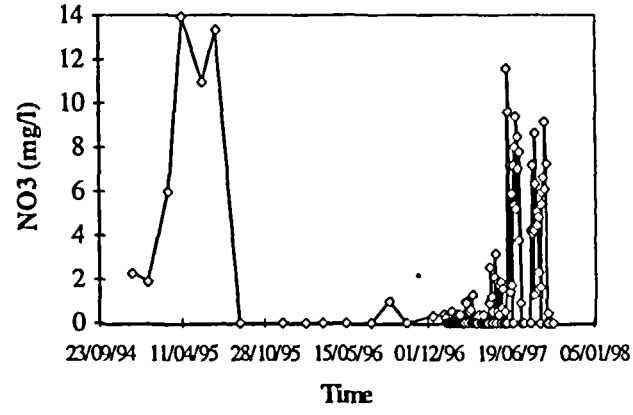


Fig. 3. Nitrate concentration ($mg.l^{-1}$) vs. time in a well screened over 7 to 16 m depth.

Jarosite and natroalunite have been observed in cuttings and their presence could explain the limited sulphate concentrations in the waters. However, thermodynamic calculations, using EQ3 software (Wolery et al., 1990), based on the chemical composition of the waters indicate that these are undersaturated with respect to both minerals, although saturation of some samples with respect to jarosite has been evidenced by using thermodynamic

data of Baron and Palmer (1996). Nevertheless, the denitrification study from the tracer test demonstrated that the kinetics, at least of water-rock interactions, vary according to the size of the fissures. These variations must therefore involve differences in the chemical composition of the waters. Secondary mineral precipitation is probably not uniform in the aquifer and may occur preferentially where SO_4 production is the highest, i.e. in the smaller fissures.

6 CONCLUSIONS:

Three principal conclusions may be drawn from the chemical composition of groundwater and tracer behaviour:

1. Nitrate removal from the aquifer of the Coët Dan basin by denitrification involving three electron donors (organic matter, Fe(II) and pyrite) is rapid.
2. The rate of denitrification through pyrite oxidation is lower in open fractures and large fissures, which allow nitrate to contaminate the aquifer at depth.
3. Denitrification involving pyrite oxidation is more effective than denitrification involving organic matter oxidation: SO_4 and Fe concentrations remain low due to jarosite, natroalunite and iron hydroxide precipitation.

Acknowledgements: This is BRGM contribution N°. 97021. The technical equipment used on site was funded by CST-BVRE. The BRGM Translation Department is thanked for editing the English.

7. REFERENCES:

Baron D. and Palmer C.D. 1996 Solubility of jarosite at 4-35°C. *Geochim. Cosmochim. Acta* 60, 185-195.

Cann, Ch. 1996. Variations des teneurs en azote dans quelques cours d'eau bretons. In P. Mérot & A. Jigorel (eds), Hydrologie dans les pays celtiques. *Les Colloques* **79**, 193-201, INRA, Paris 1996.

Frind, E.O., Duynisveld, W.H.M., Strebel, O. & Boettcher, J. 1990. Modeling of multicomonent transport with microbial transformation in groundwater: the Fuhrberg case. *Water Resour. Res.* 26, 1707-1719.

Hiscock, K.M., Lloyd, J.W. & Lerner, D.N. 1991. Review of natural and artificial denitrification of groundwater. *Wat. Res.*, 25 (9), 1099-1111.

Martelat, A., Lachassagne, P. & Pauwels, H. 1996. Dénitrification naturelle dans un aquifère pyriteux du Morbihan (France), caractéristiques hydro-géologiques du système. Actes du 1er Colloque Interceltique d'Hydrologie et de Gestion des Eaux - Bretagne 96 - Rennes 8-11 July, Edition INSA, 23-24.

Pauwels, H. 1994. Natural denitrification in groundwater in the presence of pyrite: preliminary results obtained at Naizin (Brittany, France). *Min. Mag.*, 58A, 696-697.

Pauwels, H. 1996. Preliminary results on chemical variations in a schist aquifer: implications for nitrate transport and denitrification. In P. Mérot &. A. Jigorel (eds.), Hydrologie and les pays celtiques. *Les Colloques* 79, 111-117, INRA, Paris 1996.

Pauwels, H., Kloppmann, W., Foucher, J-C, Lachassagne, P. & Martelat, A. 1997. Tracer tests applied to nitrate transfer and denitrification studies in a shaly aquifer (Coët-dan basin, Brittany, France). 7th Proceedings on *Water Tracing*, Slovenia, May 1997, In A. Kranjc (ed.) *Tracer Hydrology*, 327-330, Balkema, Rotterdam.

Wolery, T.J., Jackson, K.J., Bourcier, W.L., Bruton, C.J., Viani, B.E., Knauss, K.G. & Delany, J.M. 1990. Current status of the EQ3/6 software package for geochemical modeling. In D.C. Melchior and R.L. Basset (eds), Chemical Modeling of Aqueous Systems II. *American Society Symposium Series, 416*, 104-116, American Chemical Society.

BRGM
Service Géologique Régional des Pays de la Loire
10, rue Henri Picherit - PB 92342 - 44323 NANTES CEDEX 3 - Tél : 02 51 86 01 51