

Aquifères de socle :

le point sur les concepts et les applications opérationnelles

En partenariat avec





<http://www.cfh-iah.fr/soclevendee2015>

Aquifères de socle : le point sur les concepts et les applications opérationnelles

Vingtièmes Journées Techniques du Comité Français d'Hydrogéologie
de l'Association Internationale des Hydrogéologues

Livret guide de l'excursion 13 juin 2015

Coorganisateur / Co-organizers



Comité Français
d'Hydrogéologie.

French Chapter of IAH



Association des
Hydrogéologues
de Service Public

Sponsors, parrainages / Sponsors



Livret guide de l'excursion du 13 juin

**Robert Wyns⁽¹⁾, Laurence Chery⁽¹⁾, Paul Henri Mondain⁽²⁾, Claude Roy⁽³⁾,
Patrick Lachassagne⁽⁴⁾, Cecile Le Guern⁽¹⁾**

(1) BRGM, (2) CALLIGEE, (3) Conseil Départemental de Vendée, (4) Danone Waters EVW

I. INTRODUCTION

Cette journée d'excursion nous permettra d'étudier sur le terrain, dans la matinée, l'horizon fissuré caractérisé par des joints horizontaux dans le granite de Mortagne (affleurements de Manis et de Mallièvre). Ces affleurements permettront d'aborder les processus de fracturation du granite liés à l'altération latéritique.

Le panorama du Mont des Alouettes permettra d'aborder le contexte géomorphologique dans lequel se sont développés les différents profils latéritiques du bocage vendéen (paléosurfaces infra-liasiques, Crétacé inférieur et Eocène, dont les profils d'altération ont été réactivés à partir du Miocène).

L'après-midi sera consacré aux sources thermales « tièdes » du granite d'Avrillé, au sud de La Roche sur Yon. Le site du Moulin Neau à Moutiers les Mauxfaits permettra d'observer l'une des sources thermales et de discuter des différentes explications possibles. Le granite d'Avrillé sera étudié sur un affleurement situé au village du Poiroux où affleure la transition entre horizon fissuré et horizon feuilleté.

II. CONTEXTE GEOLOGIQUE ET GEOMORPHOLOGIQUE REGIONAL

La Vendée appartient à la zone interne de l'orogène varisque et constitue la partie méridionale du Massif armoricain. Elle comprend des roches métamorphiques disposées en unités tectoniques allochtones, et des plutons granitiques mis en place à l'Ordovicien, au Dévonien et au Carbonifère (fig.1).

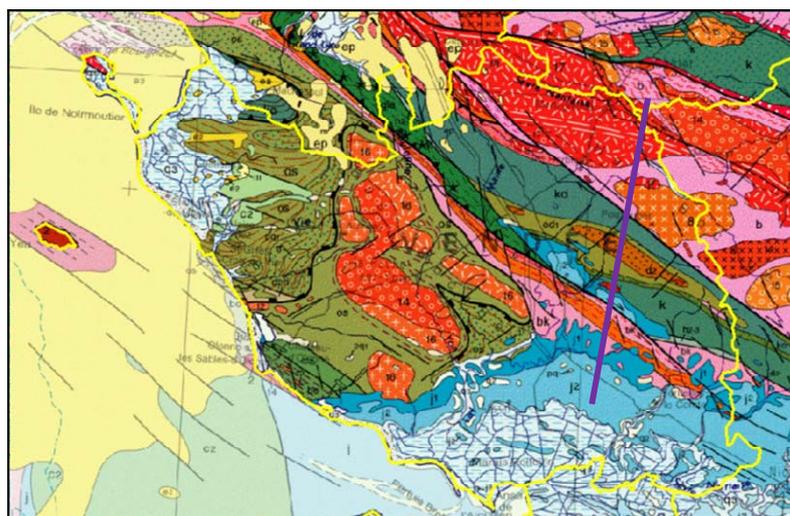


Figure 1 - Carte géologique de la Vendée (d'après la carte géologique de la France à 1/1.000.000. Les contours en jaune sont ceux du département de la Vendée. En violet, tracé de la coupe de la Figure 3

D'un point de vue géomorphologique, le sommet du socle varisque, pénéplané avant la transgression du Lias, est incliné en pente douce vers le sud en direction de la marge aquitaine.

Le sud du département (plaine de Luçon) est occupé par des terrains sédimentaires jurassiques comprenant le Lias et le Dogger, totalisant une épaisseur de l'ordre d'une centaine de mètres. Dans le nord du département, les points culminants sont compris entre 200 et 290 m (granites de Mortagne et de Pouzauges, *Figure 2*) et forment un plateau scellé (*Figure 3*) par le Cénomaniens transgressif (Chambrouet, carte géologique de Bressuire).

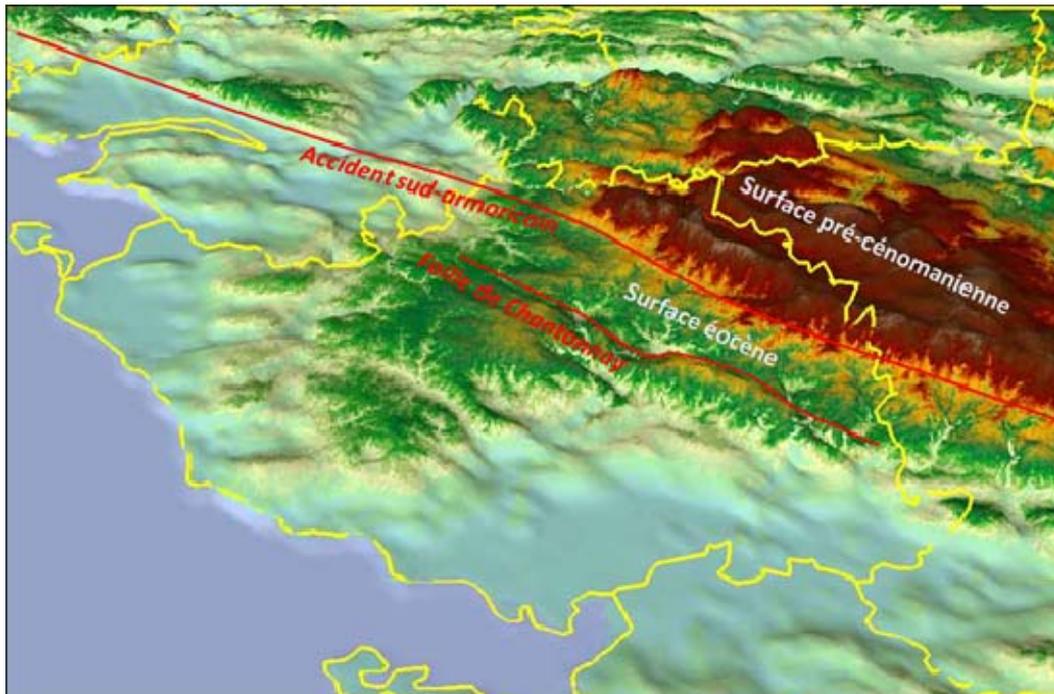


Figure 2 - Esquisse géomorphologique de la Vendée

Sur la bordure sud de ces massifs granitiques, un escarpement de faille de 100 à 200 m abaisse la surface topographique : cet escarpement se confond avec la branche sud du cisaillement dextre sud-armoricain d'âge carbonifère. Sa morphologie actuelle résulte du rejeu en faille normale de cet accident profond, probablement au Crétacé inférieur (ouverture du Golfe de Gascogne). Un rejeu récent (Tertiaire) est possible compte tenu de la fraîcheur du relief mais n'a pu être démontré de manière rigoureuse à ce jour.

Au pied de ce talus de faille, une surface subhorizontale, façonnée à l'Eocène, située vers 100 à 130 m s'étend vers le sud jusqu'à la faille de Chantonay : cette faille normale à regard nord, confondue avec le sillon houiller de Vendée, effondre une bande de Jurassique basculée vers le sud. La surface éocène est préservée sur le compartiment soulevé de cette faille (horst des Essarts), le décalage post-éocène de la faille de Chantonay étant de l'ordre d'une quinzaine de mètres. Au sud du horst des Essarts, l'interface socle-Lias (surface pré-liasique) est inclinée en pente douce vers le sud. Le Jurassique du sud de la Vendée est lui-même tronqué par une surface d'érosion d'âge probable Crétacé inférieur, scellé par des sédiments attribués au Cénomaniens. En Vendée littorale, le Cénomaniens transgressif repose sur le Jurassique (Les Sables d'Olonne), et plus au nord sur le socle (Palluau) : la surface pré-cénomaniennne est partiellement confondue avec la surface éocène.

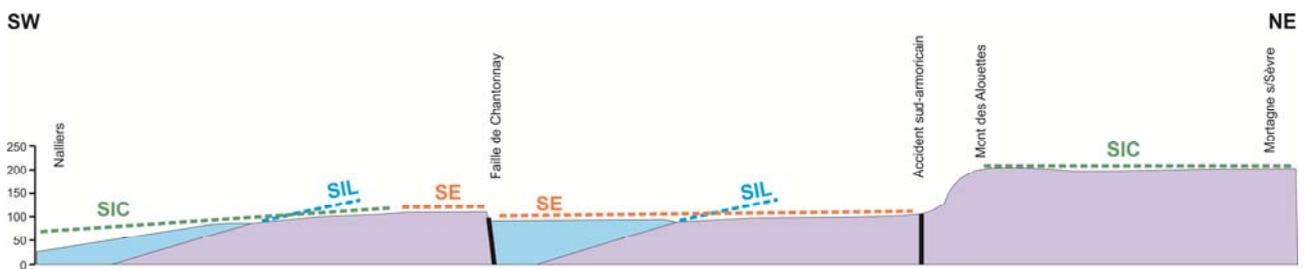


Figure 3 - Coupe géomorphologique schématisée de Mortagne sur Sèvre à Nalliers montrant la géométrie des surfaces d'aplatissement. SIL = Surface infra-liasique ; SIC = Surface infra-cénomanienne ; SE = Surface éocène ; en violet = socle hercynien ; en bleu = sédiments jurassiques

Les surfaces d'aplatissement décrites ci-dessus (surfaces pré-liasique, pré-cénomanienne et éocène) sont toutes affectées d'un profil latéritique bien reconnaissable sur le terrain. Sur le Jurassique, l'altération soustractive a provoqué la décarbonatation de la série sédimentaire : à Saint Martin des Fontaines, le Lias et le Dogger entièrement altérés (dont les fossiles sont silicifiés) présentent une épaisseur de 8 m pour une épaisseur initiale d'environ 80 m. Sur le socle métamorphique et plutonique, l'altération se manifeste différemment selon la lithologie : les roches contenant de la biotite (granites et gneiss) s'altèrent en créant un horizon fissuré qui constitue un aquifère, tandis que les schistes épimétamorphiques, les rhyolites et les amphibolites, peu altérables car dépourvus de minéraux gonflants, sont peu ou pas aquifères.

III. L'HORIZON FISSURE DES PROFILS LATÉRITIQUES, UN AQUIFERE STARTIFORME

III. 1 Contrôle géodynamique de l'altération

L'horizon fissuré se forme dans la partie profonde des profils d'altération soustractive sur roches métamorphiques ou plutoniques (profils latéritiques). A l'échelle d'un continent, l'altération est contrôlée par les conditions de drainage, donc par les déformations à grand rayon de courbure des lithosphères continentales (Figure 4).

Le mécanisme principal de l'altération soustractive est l'hydrolyse des minéraux primaires sous l'action de l'eau, mise en solution des cations et anions les plus solubles et leur évacuation vers l'aval, et précipitation de minéraux néoformés (principalement argiles, hydroxydes et oxydes) à partir des éléments chimiques restés sur place. Pour que l'hydrolyse des minéraux primaires soit possible, la composition chimique de l'eau doit être en permanence sous-saturée par rapport aux minéraux de la roche, ce qui implique que l'eau puisse s'écouler : on doit être à l'amont d'un gradient hydraulique local ou régional. Les altérations soustractives se développent donc sur des régions émergées et soulevées des lithosphères continentales (épaulements de rifts, flambage lithosphérique, passage d'une plaque sur un point chaud...), après une phase d'aplatissement permettant à l'eau de s'infiltrer lentement (une pente moyenne forte favorise le ruissellement et l'érosion mécanique). La durée de fonctionnement d'un profil d'altération est de plusieurs dizaines de millions d'années, et de nombreux profils sont polyphasés. Des études en cours montrent que des profils latéritiques avec horizon fissuré très épais existent dans beaucoup de chaînes de montagne (surfaces perchées pyrénéennes par exemple).

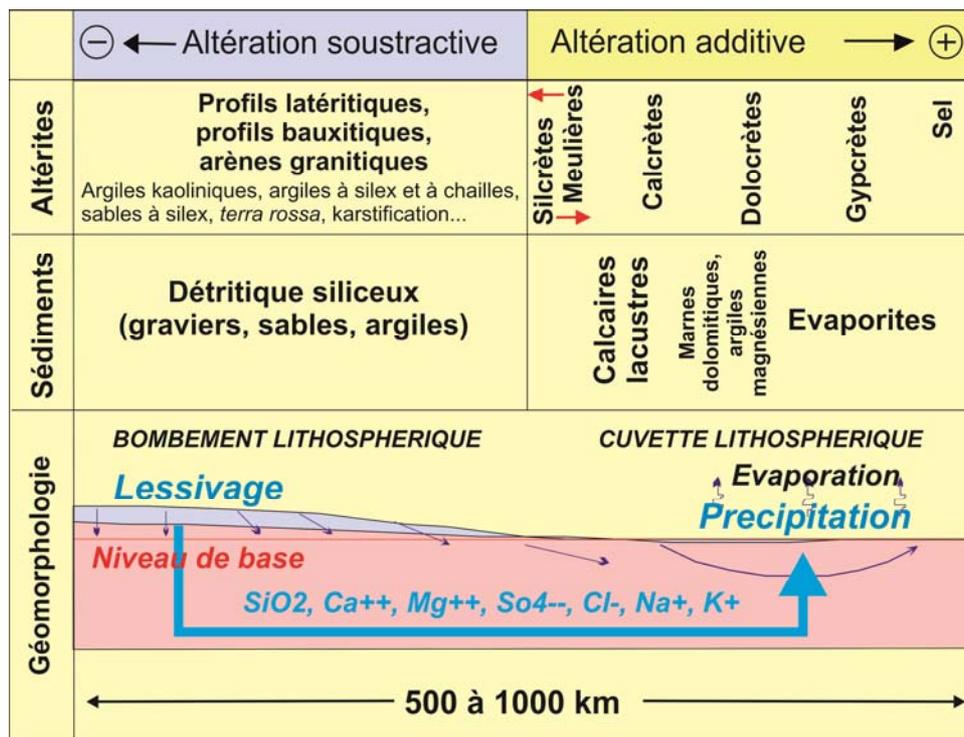


Figure 4 - Classification des altérations supergènes (modifié de Wyns 2002),

III. 2 Structure d'un profil latéritique

On réserve généralement le terme de profil latéritique aux profils d'altération soustractive développés sur roches cristallines (plutoniques, métamorphiques ou volcaniques). Seuls ces profils d'altération sont susceptibles de contenir un horizon fissuré dans leur partie profonde.

Un profil latéritique comprend généralement, de haut en bas (Figure 5) :

- Une *cuirasse* ferrallitique, épaisse de 1 à 10 m, résultant de la recristallisation en hématite massive (oxyde de fer), au sommet de profil et sous l'effet d'une saison sèche, des grains de goethite (hydroxyde de fer) issus de l'altération en zone saturée des minéraux ferro-magnésiens primaires. La cuirasse peut disparaître du sommet des profils latéritiques soit par érosion, soit le plus souvent par réhydratation lorsque le profil s'engorge par suite d'une subsidence lithosphérique : c'est généralement le cas pour les profils anciens.
- Des altérites meubles (*saprolite*) formées d'un mélange d'argiles, d'hydroxydes ou d'oxydes et de minéraux résiduels (quartz). On distingue généralement dans la partie inférieure, des *isaltérites* où la structure de la roche initiale est préservée (la matière évacuée est remplacée par de la porosité), et dans la partie supérieure des *allotérites*, où la structure de la roche initiale a disparu. Au sommet de la saprolite, les argiles tachetées, d'épaisseur métrique, constituent un horizon de transition avec la cuirasse. Dans les roches grenues (granitoïdes, gabbros), la partie inférieure de la saprolite prend un aspect feuilleté (*horizon feuilleté*), le feuilletage ou lamination résultant du resserrement des joints de l'horizon fissuré jusqu'à un espacement millimétrique.
- Un *horizon fissuré*, caractérisé par une forte densité de fractures dans une roche dure : la densité et la connectivité des fractures est maximale au sommet et décroît vers le bas. La roche primaire reste dure et peu altérée, sauf le long des fractures et des capillaires associés. Dans les roches grenues isotropes les fractures ont une géométrie plane caractéristique.
- La roche « saine » où seules existent d'éventuelles fractures résultant de l'histoire tectonique.

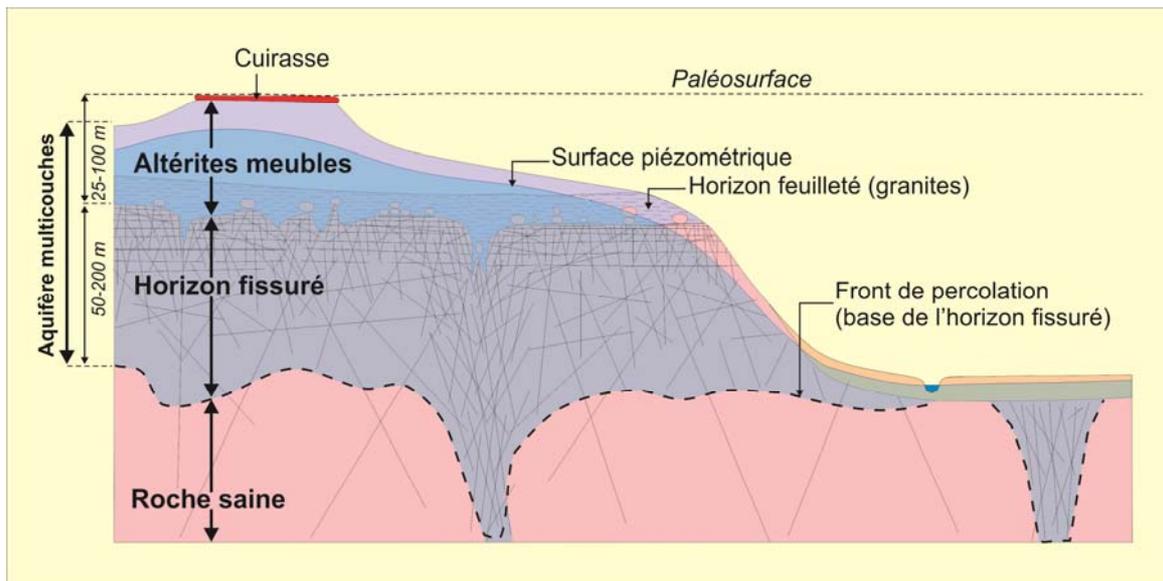


Figure 5 - Structure d'un profil latéritique recoupé par la topographie actuelle

L'épaisseur des altérites meuble (saprolite) est généralement de plusieurs dizaines de mètres et peut dépasser 100 m. L'horizon fissuré a généralement une épaisseur double de celle de la saprolite.

III. 3 Mécanisme de la fissuration

L'existence d'une zone fissurée au sommet du bed-rock sous les argiles d'altération des profils latéritiques était connue depuis longtemps, mais était interprétée tantôt comme résultant de la décompression par érosion (off-loading), tantôt comme résultant de la contraction thermique pour les roches plutoniques.

La création de fentes de tension par décompression nécessite que la diminution de l'une des composantes du tenseur de contraintes soit rapide, ce qui est le cas par exemple lors du creusement d'une galerie de mine. Dans la nature, la diminution de la contrainte verticale due à l'érosion est trop lente pour créer des fentes de tension, car les contraintes ont le temps de se réorganiser au niveau des joints de grains. La présence d'un horizon fissuré dans le granite à deux micas de Mortagne à Mallièvre (Figure 6) et son absence dans le microgranite de Thouars distant de 50 km alors que les deux massifs, recoupés par la même paléosurface, ont subi la même histoire érosive, montre que la décompression n'est pas à l'origine de l'horizon fissuré.

Par ailleurs, les joints horizontaux des granites ne peuvent être dus à la contraction thermique lors du refroidissement de la chambre magmatique, car ces joints horizontaux affectent aussi les orthogneiss et les migmatites à foliation verticale.

La compréhension du mécanisme de la fissuration des granites résulte de l'étude pétrographique de deux forages carottés dans des profils latéritiques sur granite. En profondeur, à plus de 50 m sous la base des arènes, les biotites sont généralement saines. Puis, au fur et à mesure que l'on monte vers le haut, une partie des biotites commence à se transformer soit en chlorite, soit en vermiculite, et l'on observe alors une déformation des clivages autour des zones en voie d'altération, qui traduisent un gonflement des feuillets (Figure 7a). Dans l'horizon feuilleté, à la base des arènes, toutes les biotites ont été altérées (Figure 7b) et on observe un intense réseau de microfissures.



Figure 6 - A gauche : l'horizon fissuré dans le granite à deux micas de Mallièvre ; à droite : absence d'horizon fissuré dans le microgranite de Thouars, distant de 50 km du précédent. Les deux massifs ont subi la même histoire érosive, l'absence de fissures dans le microgranite montre que la décompression par érosion n'est pas à l'origine des fissures horizontales du granite

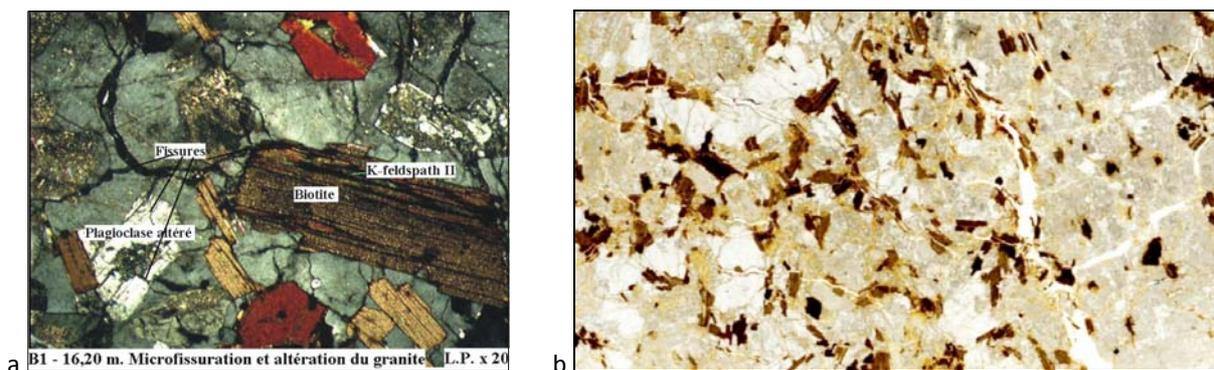


Figure 7 - a : Cristal de biotite en voie d'altération dans l'horizon fissuré (Granite de Langonnet, Morbihan, France). Noter la déformation des clivages de la biotite autour des zones altérées et l'apparition de microfissures ; b : Base des arènes (horizon feuilleté) : toutes les biotites ont été altérées (taches brunes soulignées par la goethite). Noter l'intense réseau de microfissures.

Ainsi, l'altération d'une biotite, en se transformant en chlorite ou en vermiculite, provoque une augmentation potentielle du volume du cristal d'environ 40 %. Cette transformation se fait au sein de l'horizon fissuré, à plusieurs dizaines de mètres de profondeur. Dans ces conditions, le gonflement est impossible (sauf à proximité des fissures préexistantes) car le milieu est rigide, et peut être considéré comme infini dans le plan horizontal : il en résulte une augmentation des contraintes horizontales. Dans le plan vertical, le gonflement ne sera possible que lorsque la contrainte verticale sera supérieure ou égale à la charge lithostatique.

Dans un granite, dès que la charge lithostatique est compensée, la contrainte verticale n'augmente plus et elle est remplacée par de la dilatation, alors que les contraintes horizontales continuent à augmenter ; les contraintes maximales (σ_1 et σ_2 du tenseur de contraintes) sont alors horizontales, tandis que la contrainte minimale (σ_3) est verticale. Lorsque la différence d'intensité entre contrainte maximale horizontale et contrainte verticale (le « déviateur de contraintes » au sens mécanique) dépasse la limite élastique de la roche, il y a apparition de fissures (fentes de tension), qui seront parallèles aux deux composantes maximales du tenseur de contraintes (c'est-à-dire horizontales dans le cas d'un granite).

Dans les roches isotropes comme les granites ou bien dans les roches à foliation verticale, les fissures créées seront principalement horizontales (*Figure 8a*). Dans les roches plissées (schistes et micaschistes), les

fissures sont orientées de manière aléatoire (*Figure 8b*). Lorsque la foliation est horizontale, il n'y a pas d'augmentation des contraintes horizontales, et la roche gonfle comme une éponge en se feuilletant.

Dans les roches silico-alumineuses (granites, schistes, micaschistes, gneiss), les minéraux capables de gonfler en s'altérant, donc de générer une fissuration, sont en premier lieu la biotite : ce minéral est très réactif en présence d'eau car les liaisons entre feuilletés, assurées par une couche d'atomes de potassium, sont assez peu énergiques. Les micas blancs (muscovite, séricite) gonflent également mais plus tardivement dans le processus d'altération, car les liaisons interfoliaires sont plus énergiques que dans le cas de la biotite. Le pouvoir de gonflement de ces minéraux est dû au fait que les phyllites à 14 Å néoformées se développent par épigénèse des phyllites à 10 Å préexistantes, en utilisant le même réseau cristallin. A *contrario*, il ne semble pas que l'altération des plagioclases, qui est aussi précoce que celle des biotites, se fasse avec augmentation de volume.

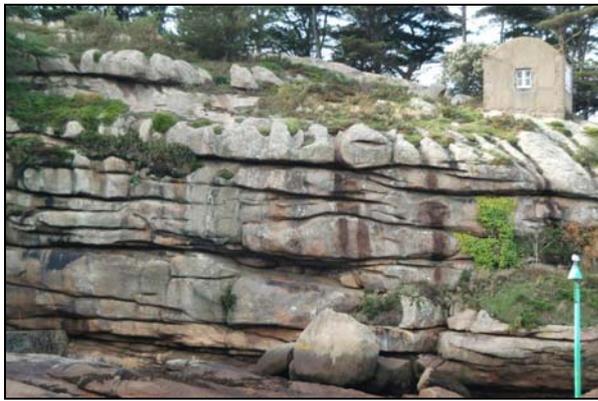


Figure 8 - a : Joints horizontaux dans le granite de Ploumanac'h (Bretagne, France) ; b : L'horizon fissuré dans des schistes gréseux (nord du Massif central)

Dans les roches basiques et ultrabasiques (dolérites, basaltes, gabbros, péridotites), l'existence d'un horizon fissuré est lié à la présence dans la roche initiale de pyroxènes et/ou d'olivine, qui semblent les seuls à avoir un caractère gonflant lors de l'altération : les amphiboles ne semblent pas gonfler et ne créent pas d'horizon fissuré développé. Les dolérites amphibolitisées lors de leur mise en place dans un milieu riche en eau, de même que les basaltes amphibolitisés par métamorphisme sont généralement peu altérés et peu aquifères. Les gabbros montrent les mêmes mécanismes de fissuration que les granites, avec des joints horizontaux. Les péridotites se fissurent avec des joints horizontaux ou anarchiques, puis évoluent par dissolution vers un comportement de karst sous couverture de saprolite. Les roches peu altérables telles que les filons de quartz ou de rhyolite peuvent se fissurer en réponse aux contraintes générées par l'altération de l'encaissant si celui-ci est altérable (*Figure 9*).

Ces filons où la fracturation intense reste ouverte permettent au profil d'altération de s'enfoncer plus rapidement car ils constituent alors des couloirs verticaux à forte perméabilité. Ces filons constituent également des drains à forte perméabilité qui peuvent constituer des cibles pour l'implantation de forages. La largeur des filons affectés par la fracturation résultant de l'altération de l'encaissant peut dépasser 200 m.



Figure 9 - Filons de quartz fracturés par les contraintes engendrées par l'altération du granite dans lesquels ils sont intrusifs (Inde)

III. 4 Organisation des fissures au sein de l'horizon fissuré d'un granite, et rôle des fissures dans l'interaction eau-roche

Dans les roches grenues (granitoïdes, gabbros), la géométrie habituelle des fractures générées par l'altération est plane, parallèle à la surface topographique contemporaine de l'altération, donc généralement horizontale.

En cas de déformations tectoniques postérieures à l'altération, les joints initialement horizontaux peuvent être basculés, comme on peut l'observer en bordure des grabens du Massif Central (Figure 10).



Figure 10 - L'horizon fissuré basculé tectoniquement en bordure de graben (sud de Thiers, Puy de Dôme)

L'espacement des fissures est minimal au sommet de l'horizon fissuré et augmente vers le bas, la limite inférieure de l'horizon fissuré pouvant être définie comme la surface où l'espacement entre joints tend vers l'infini.

L'interaction eau-roche se produit préférentiellement sur les parois des diaclases où l'eau peut pénétrer, de sorte que l'on peut calculer les superficies réactives par m^3 de roche en fonction de l'espacement des joints

(Figure 11) : les surfaces disponibles pour l'interaction eau-roche augmentent comme deux fois l'inverse de l'espacement entre les joints (il y a 2 parois sur une fissure).

Les observations de terrain aussi bien que les statistiques de forages (Courtois et al., 2010) et les données géophysiques (RMP, panneaux électriques) permettent de diviser l'horizon fissuré en une partie supérieure, plus aquifère (partie « utile » de l'aquifère), épaisse de 15 à 50 m selon l'épaisseur du profil et la lithologie, et une partie inférieure, moins aquifère : dans l'horizon fissuré supérieur, l'espacement des joints varie entre 5 et 50 cm environ. Le passage de la partie supérieure à la partie inférieure de l'horizon fissuré peut être marqué par une discontinuité sismique (doublement des vitesses) lorsqu'il est imagé par un profil sismique (Wyns et al., 2005).

L'horizon feuilleté constitue une zone de transition, de 10 à 20 m d'épaisseur en général, entre l'horizon fissuré supérieur et l'arène meuble. L'espacement des joints, ici peu ouverts, est millimétrique (1 à 5 mm, Figure 12). Avec un espacement millimétrique des joints, tous les minéraux sont en contact avec l'eau, et la roche commence à s'effriter facilement, bien que la roche soit encore assez cohérente pour permettre à des fronts de taille de résister à l'érosion.

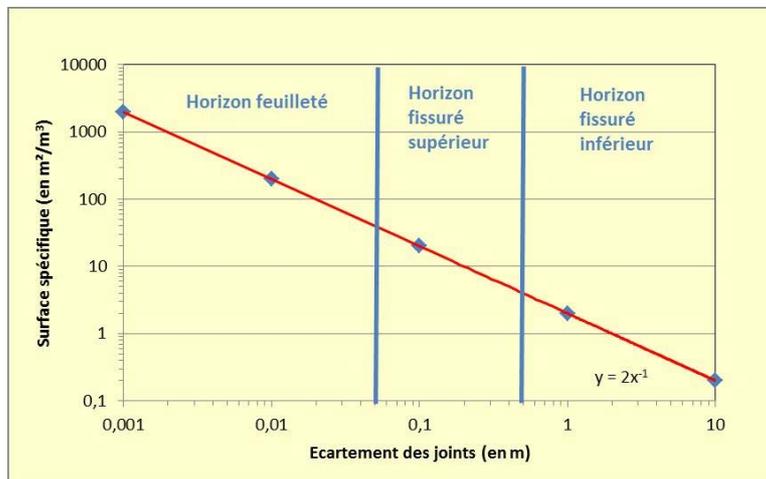


Figure 11 - Surfaces réactives disponibles pour l'interaction eau-roche, en fonction de l'espacement des joints dans l'horizon fissuré d'un granite, et gammes d'espacement des joints pour l'horizon feuilleté, l'horizon fissuré supérieur et l'horizon fissuré inférieur



Figure 12 - L'horizon feuilleté dans un granite (Inde)

L'interaction eau-roche ne se développe donc pas selon un front unique se propageant du haut vers le bas, mais selon une multitude de fronts liés à des diaclases dont la densité spatiale augmente au cours du temps.

III. 5 Contrôle minéralogique, textural et structural de la fissuration

Les facteurs principaux contrôlant le développement d'un horizon sont la minéralogie, la texture et la structure.

Minéralogie

Seules trois familles de minéraux ont été identifiées comme capables d'augmenter de volume en s'altérant, et donc de générer un horizon fissuré : la biotite, les pyroxènes et l'olivine. Les plagioclases s'altèrent de manière précoce (comme la biotite) mais ne semblent pas augmenter de volume. La muscovite et les feldspaths potassiques s'altèrent tardivement (car l'énergie d'activation nécessaire à leur hydrolyse est plus élevée que pour les minéraux précédents), cette altération intervient alors que la roche est déjà arénisée par l'altération des biotites. Les roches à amphibole et/ou chlorite s'altèrent difficilement et ne présentent pas d'horizon fissuré développé : ce sont de piètres aquifères. Les schistes épimétamorphiques (à séricite/chlorite) sont mal documentés.

Texture

Le premier critère textural est la taille des cristaux : les roches grenues s'altèrent beaucoup plus facilement que les roches à grain fin, et plus la taille des minéraux gonflants sera élevée, plus l'horizon fissuré pourra se développer facilement. Donc à composition équivalente, une roche plutonique se fissurera plus facilement qu'une roche hypovolcanique ou volcanique.

Dans les roches à texture lépidoblastique (gneiss, micaschistes, schistes), les micas sont orientés et l'on observe généralement, du moins pour les roches paradérivées, un litage de composition faisant alterner des niveaux riches en micas et des niveaux plus quartzo-feldspathiques. Il s'ensuit une anisotropie des plans de rupture préférentiels : les fractures générées par le gonflement des micas seront guidées par les surfaces de faiblesse de la roche.

Structure

Dans une roche où les minéraux gonflants ont une orientation aléatoire (cas des roches grenues non orientées), le potentiel de gonflement est isotrope. Le milieu étant infini dans la direction horizontale, les contraintes horizontales s'accumulent, tandis que la contrainte verticale, une fois la charge lithostatique compensée, n'augmente plus : au final on obtient des fentes de tension horizontales (Figure 13).

Pour les roches foliées mais non plissées (gneiss, orthogneiss), le pendage de la foliation joue un rôle important sur l'ouverture des fissures : lorsque la foliation est verticale, les feuillets des micas le sont généralement aussi, et le potentiel de gonflement s'exerce uniquement dans le plan horizontal : tout ce potentiel de gonflement est converti en contrainte horizontale, et l'on observe des fentes de tension horizontales fortement ouvertes (Figure 14). Des observations très intéressantes ont été réalisées en Corée du Sud sur un orthogneiss à biotite dont la foliation passe, en quelques kilomètres, d'une position verticale à une position horizontale : l'ouverture des fentes de tension diminue avec le pendage, et lorsque celui-ci est horizontal, on n'observe plus que des fentes à ouverture inframillimétrique donnant à la roche une texture feuilletée (Figure 15).

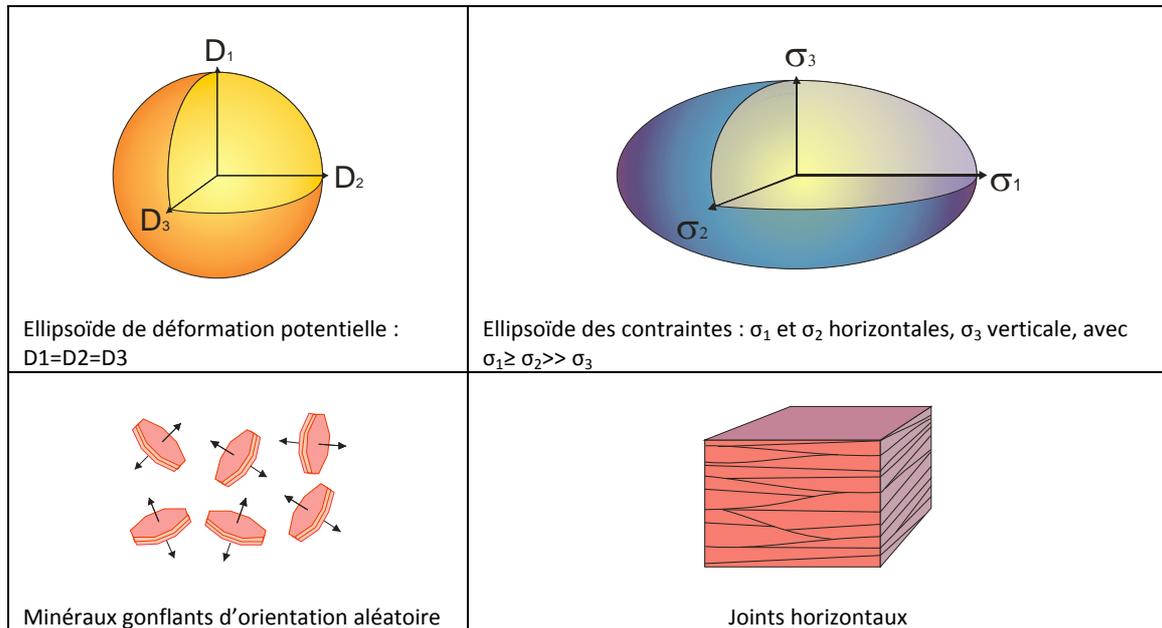


Figure 13 - Paramètres de déformation, de contraintes et de fissuration d'une roche isotrope (roches grenues : granitoïdes)

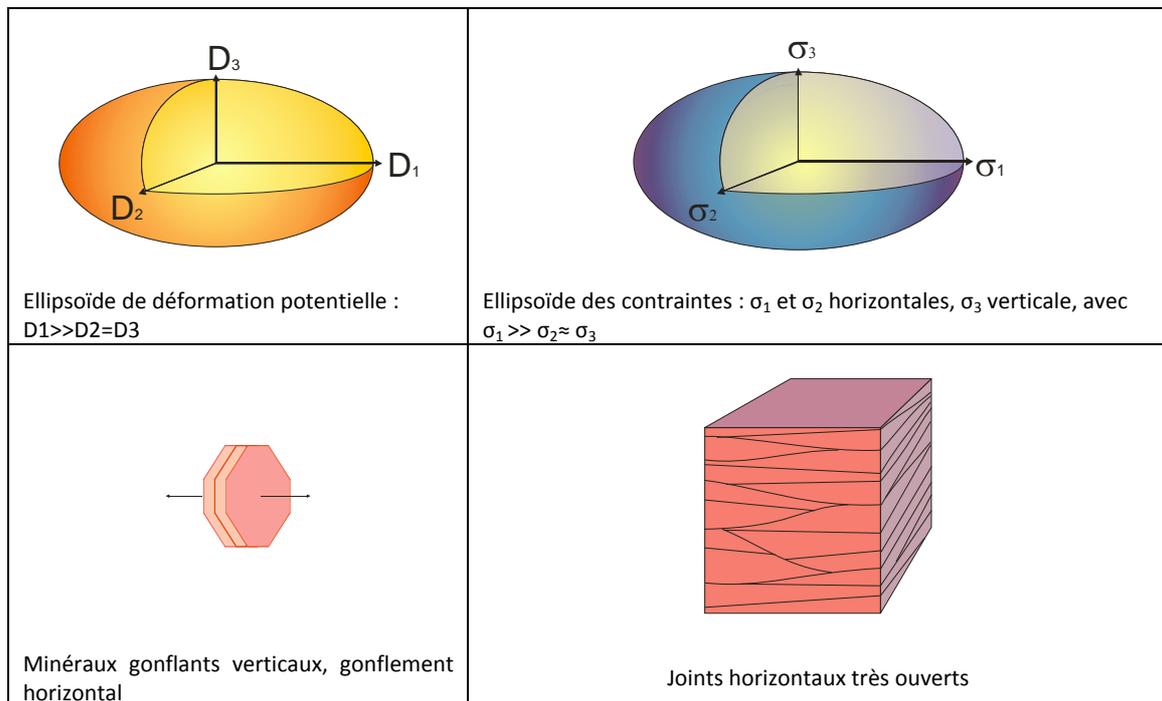


Figure 14 - Paramètres de déformation, de contraintes et de fissuration d'une roche à foliation verticale

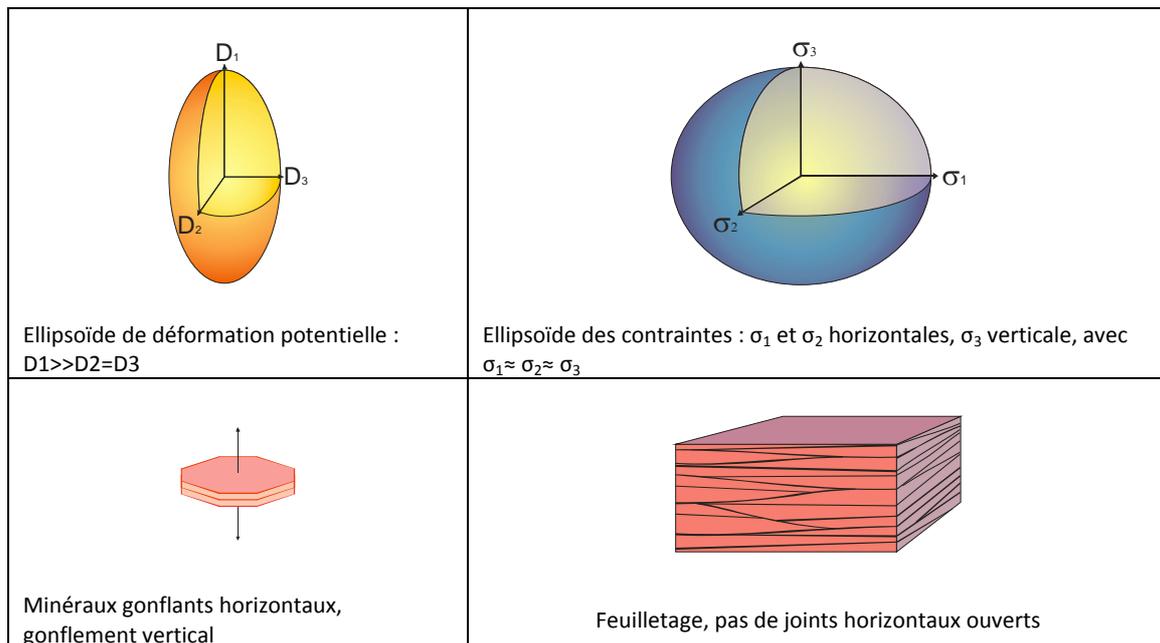


Figure 15 - Paramètres de déformation, de contraintes et de fissuration d'une roche à foliation horizontale

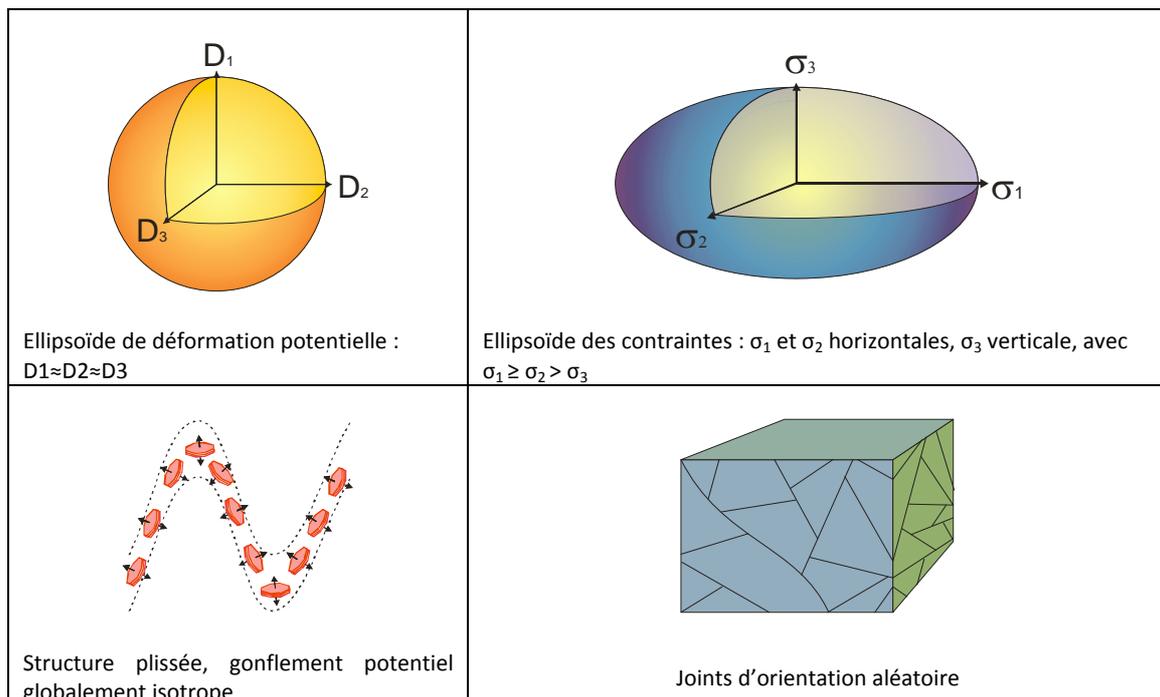


Figure 16 - Paramètres de déformation, de contraintes et de fissuration d'une roche plissée (schiste, micaschiste)

Dans une roche plissée (micaschiste, schiste), la présence de plis d'échelle métrique à hectométrique modifie latéralement d'une part la position du tenseur de contraintes, puisque le gonflement se fait perpendiculairement aux feuillet des micas, mais aussi l'orientation des plans de rupture préférentiels. Une roche plissée montre généralement une orientation aléatoire des fissures générées par l'altération (Figure 16).

III. 6 Conclusions

A partir des observations de terrain et des études pétrographiques rappelées ci-dessus, on peut établir une hiérarchie des roches en fonction de leur aptitude à développer un horizon fissuré lors de l'altération latéritique.

Roches extrêmement favorables : roches grenues riches en minéraux gonflants : granites à biotite, granodiorites, diorites, diorites quartziques, gabbros, péridotites

Roches très favorables : granites à deux micas, gneiss, micaschistes à biotites, migmatites riches en micas.

Roches favorables : gneiss leucocrates, micaschistes, basaltes, dolérites, andésites.

Roches peu favorables : amphibolites, leucogranites à muscovite seule, granites à grain fin, metabasaltes, schistes à séricite.

Roches défavorables : roches hypovolcaniques ou volcaniques acides, microgranites, quartzites, leptynites, roches sans micas.

IV. LES EFFETS THERMIQUES DE L'ALTERATION LATÉRIQUE

L'altération latéritique est dominée par des réactions d'oxydation et d'hydratation qui sont très exothermiques : l'altération totale d'1 m³ de granite libère environ 400 MJ sous forme de chaleur. Si la perméabilité du milieu le permet, la chaleur est évacuée en temps réel par convection thermique. En fonction des constantes de temps impliquées (vigueur de la convection, cinétique des réactions) la chaleur libérée sera dissipée ou non.

Toutefois, au voisinage du front de percolation (Figure 17) (base de l'horizon fissuré), la perméabilité très faible ($< 10^{-10}$ m/s) ne permet pas la circulation de l'eau, et une part importante de celle-ci est consommée par les réactions d'hydratation ; dans cette zone la chaleur produite est donc évacuée principalement par conduction. Dans les roches cristallines la conductivité thermique tend à diminuer lorsque la température augmente. Il y aura donc échauffement de la roche puisque la diffusivité thermique des roches ne permet pas le refroidissement rapide.

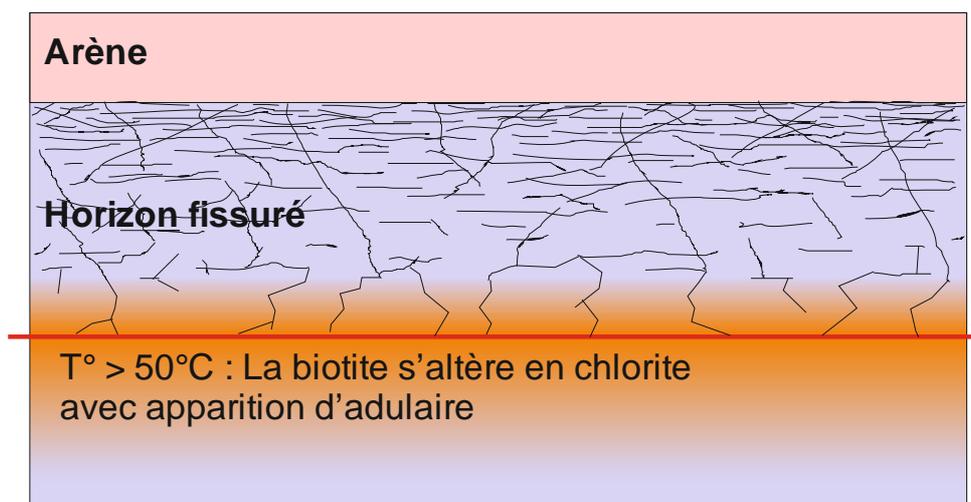


Figure 17 - Position de la zone d'échauffement (en orange) au front de percolation (base de l'horizon fissuré) dans un granite

La modélisation de l'échauffement au front de percolation dans un granite (Wyns et al., 2015) montre que l'on peut y atteindre une température de l'ordre de 100 °C au bout d'une dizaine de Ma de fonctionnement du profil.

V. PRESENTATION DU CAPTAGE AEP DU TAIL : LE PREMIER FORAGE EN VENDEE EN AQUIFERE DE SOCLE (COMMUNE DE POUZAUGES)

V.1. L'AEP dans les eaux souterraines en Vendée

L'alimentation en eau potable à partir des eaux souterraines représente moins de 10% du volume distribué dans le Département de la Vendée, l'essentiel des adductions étant basé sur les barrages réservoirs. La nappe du Dogger est exploitée par la Ville de Fontenay-le-Comte (captage du Gros Noyer), et par le Syndicat des Sources de l'Arkanson à Thouarsais-Bouildroux. Quant à la nappe du Lias inférieur, elle est captée par forage à Luçon (Sainte-Germaine), à Saint-Martin-des-Fontaines et à Lesson sur la commune de Benet.

Des forages et des puits exploitent les eaux du socle granitique à **Pouzauges**, la Pommeraie-sur-Sèvre, Saint-Michel-Mont-Mercure, Saint-Mars-la-Réorthe et Fondebert sur la commune de la Tardière (Figure 18).

Dans la partie Nord-ouest du département, deux captages AEP exploitent les nappes sédimentaires, les calcaires Eocènes pour le captage de Challans et un aquifère multicouche (Sables du sénonien, calcaires du Cénomaniens...) sur le captage de Villeneuve à Commequiers.

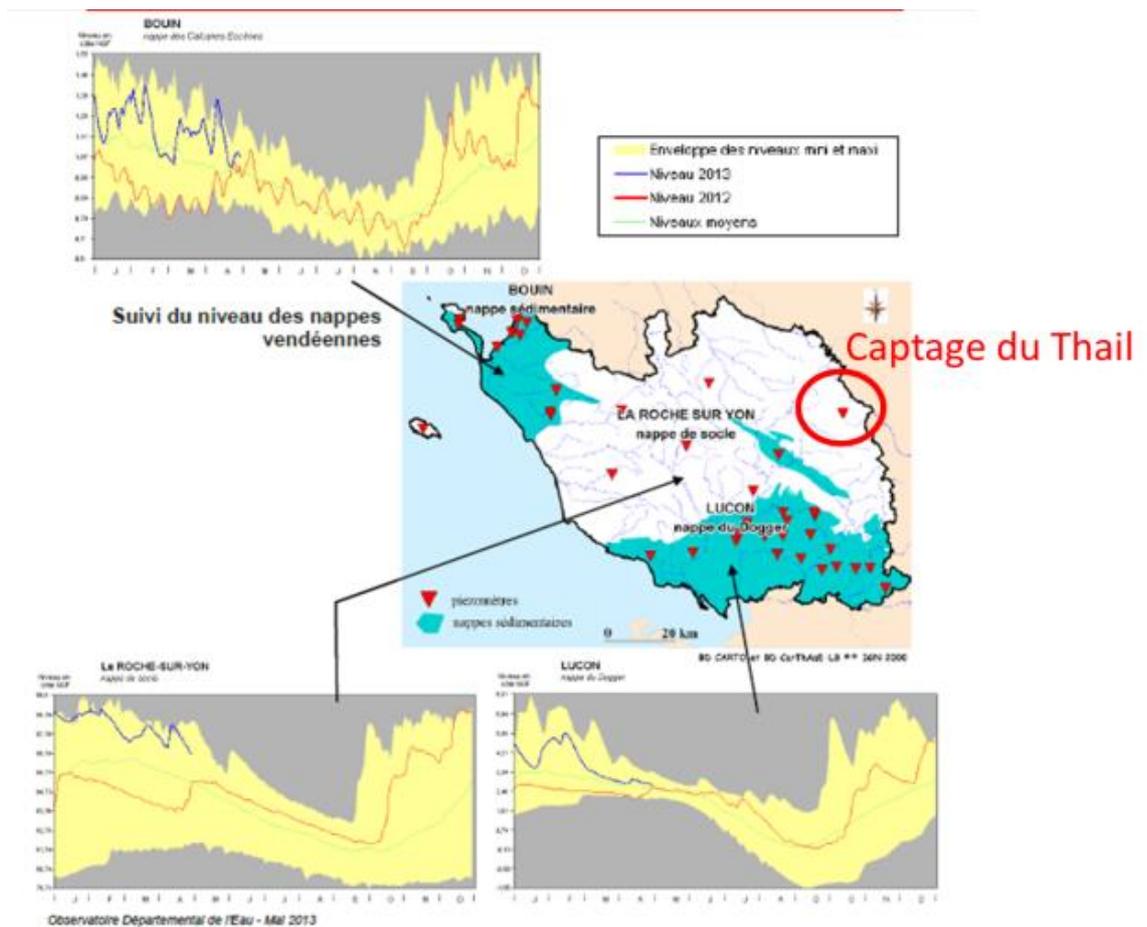


Figure 18 – Carte de situation des captages en Vendée

V.2. Le captage du Tail

Le captage du Tail à Pouzauges alimente en eau potable les communes de Pouzauges et de La Meilleraie-Tillay depuis 1957. Sa DUP l'autorisait à l'époque à prélever un débit instantané de 12 l/s et un maximum journalier de 1000 m³/j. Ce captage exploite un aquifère fissuré développé au contact du batholite du granite de Pouzauges avec l'encaissant constitué par des schistes briovériens. Une auréole de cornéennes et de schistes tachetés liée au métamorphisme de contact assure la transition entre le granite et les schistes. De nombreuses failles affectent cette auréole de contact. Le site du captage est établi au droit d'un couloir structural particulièrement fracturé orienté NW-SE.

Le captage du Tail est l'un des premiers captages de Vendée où a été conduite la recherche opérationnelle d'eau en milieu de socle à l'aide de la nouvelle technique du marteau fond de trou, sous l'impulsion de Gilles Bresson en 1976. C'est aussi l'un des tout premiers captages vendéens dont les périmètres de protection ont été mis en place à la suite de la loi sur l'eau de 1992, les études préalables ayant été réalisées dès 1995. Dans ce même élan induit par la loi sur l'eau, ce site a aussi été intégré dès 1995 au réseau patrimonial de suivi piézométrique et qualitatif des eaux souterraines, pour lequel le département de la Vendée a été précurseur sous l'impulsion de Claude Roy.

V. 3. Historique du captage

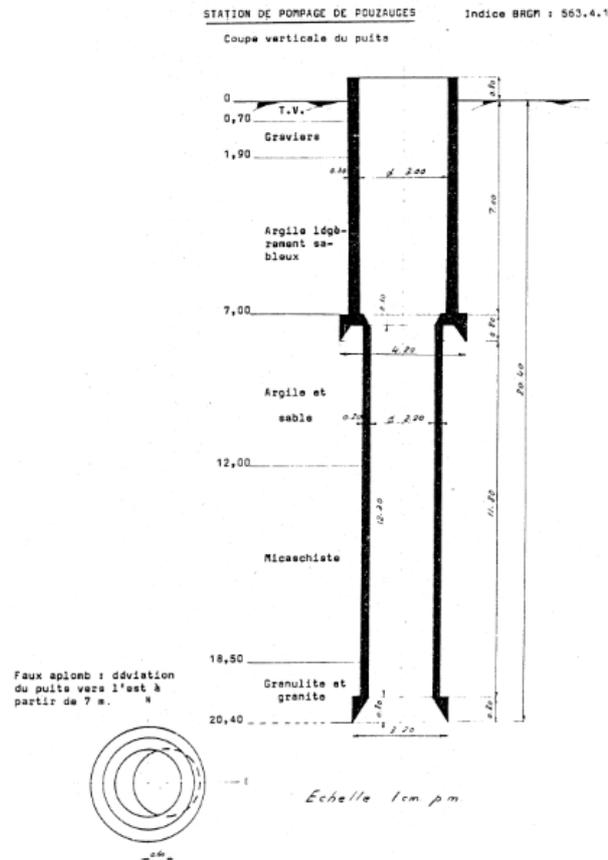
- Réalisation en **1953**, par G. Mathieu (Collaborateur principal du Service de la Carte Géologique de France), de 2 sondages de reconnaissance à 15 m de profondeur à proximité d'une zone sourceuse débouchant sur le création d'un puits de 3 m de diamètre et 20,40 m de profondeur captant l'aquifère des arènes granitiques rendu captif par 12 m d'alluvions essentiellement argileuses de fond de vallon, code 05634X0001/P (nommé PUIITS AEP) (*Figure 19*).

- Réalisation en **1976** d'une campagne géophysique VLF et de 5 piézomètres et d'un forage d'exploitation (F1) descendu à 54 m et ayant recoupé une zone fracturée productive à 52 m de profondeur. L'ouvrage a été testé à un débit moyen de 65 m³/h durant 33 h, avec un rabattement final de 30,6 m. Les paramètres hydrodynamiques déduits de l'essai donnent une transmissivité de $8,8 \cdot 10^{-4}$ m²/s et un coefficient d'emmagasinement de $3 \cdot 10^{-3}$.

- Réalisation à proximité de F1 en 1980 d'un nouveau forage d'exploitation plus profond de 10 m (forage F2) 05634X0012/F2 (*Figure 20*) pour placer la pompe en dessous de la fracture productive et autoriser ainsi des rabattements plus importants en étiage (équipement : PVC en Ø 250 mm crépiné). A cette occasion 3 autres sondages de reconnaissance sont réalisés.

- dans les années 1990, la production du site atteignait 200 à 250 000 m³/an et était assurée à 50 % par le puits d'origine et 50 % par le forage F2, F1 étant utilisé comme piézomètre pour assurer le suivi des niveaux.

- **en 1998**, un troisième forage (F3) 05634X0019/FORAGE (*Figure 21* et *Figure 22*) a été foré jusqu'à 160 m, à 20 m en amont des forages F1 et F2. Une cimentation a été faite en tête pour isoler les arènes granitiques déjà captées par les deux autres ouvrages de captage. F3 a recoupé une succession de lentilles de granite et de cornéennes et 3 principales arrivées d'eau à 54, 65 et 118 m de profondeur. Le débit final au soufflage était de 30 m³/h. Un pompage d'essai de 22 jours à un débit moyen de 24 m³/h a produit un rabattement final de 48,44 m sur F3 (*Figure 23*) et un rabattement additionnel sur les 2 ouvrages de captage maintenus en exploitation de 4 à 8 m sur le puits et de 12 à 13 m sur F2. Il en a été déduit qu'à l'étiage le forage F3 pouvait être exploité à un débit de 25 à 30 m³/h et F2 à 20 m³/h.



05634X0001/P

Log géologique numérisé

Nombre de niveaux : 9

Profondeur	Lithologie	Stratigraphie
De 0 à 1.4 m	ARGILE TOURBEUSE	QUATERNAIRE
De 1.4 à 1.6 m	GRAVIERS	QUATERNAIRE
De 1.6 à 7.5 m	ARGILE SABLEUSE	QUATERNAIRE
De 7.5 à 9.2 m	ARGILE PLUS GLAISEUSE	QUATERNAIRE
De 9.2 à 9.5 m	ARGILE SABLEUSE	QUATERNAIRE
De 9.5 à 13.75 m	LIMON ARGILO-SABLEUX	QUATERNAIRE
De 13.75 à 17.05 m	SCHISTE MICACE POURRI	PRIMAIRE
De 17.05 à 20 m	SCHISTE MICACE PLUS MASSIF	PRIMAIRE
De 20 à 20.4 m	GRANITE NON ALTÉRÉ (A BIOTITE)	PRIMAIRE

Figure 19 – Puits AEP (code BSS 05634X0001/P) :
coupe technique et log géologique

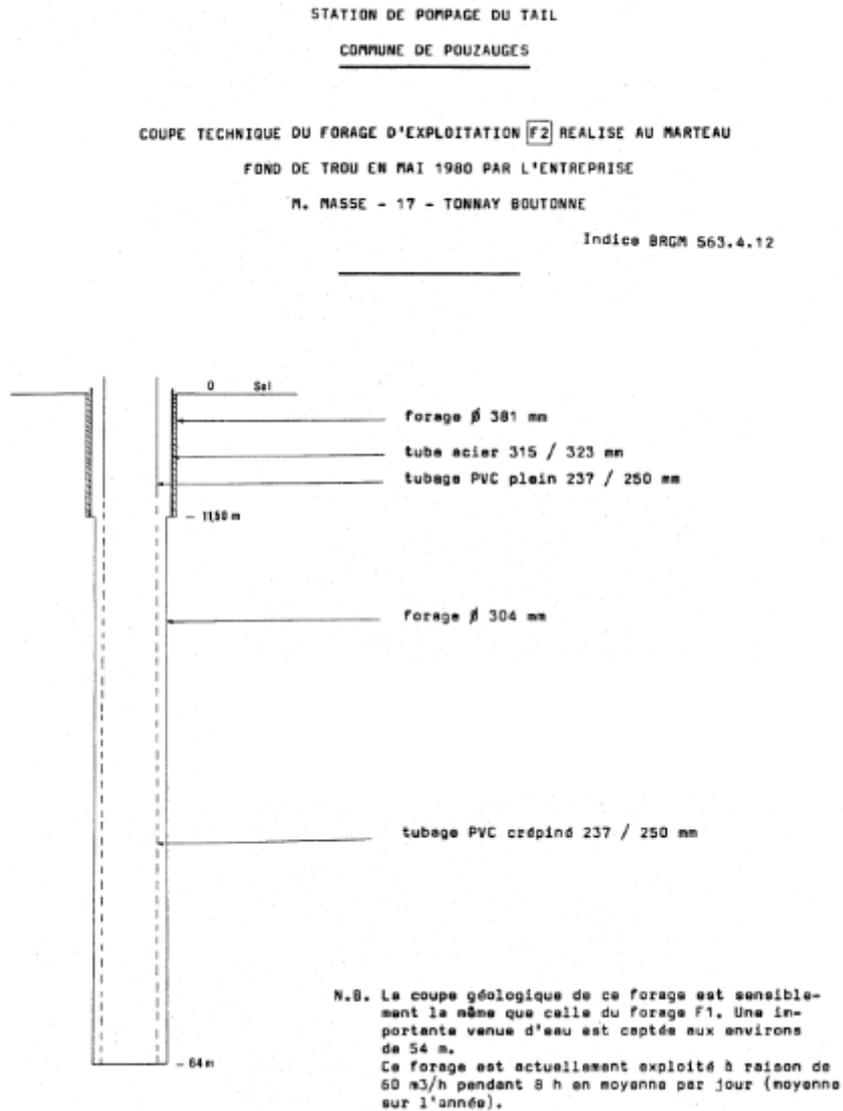


Figure 20 – Coupe technique du forage F2 (05634X0012/F2)

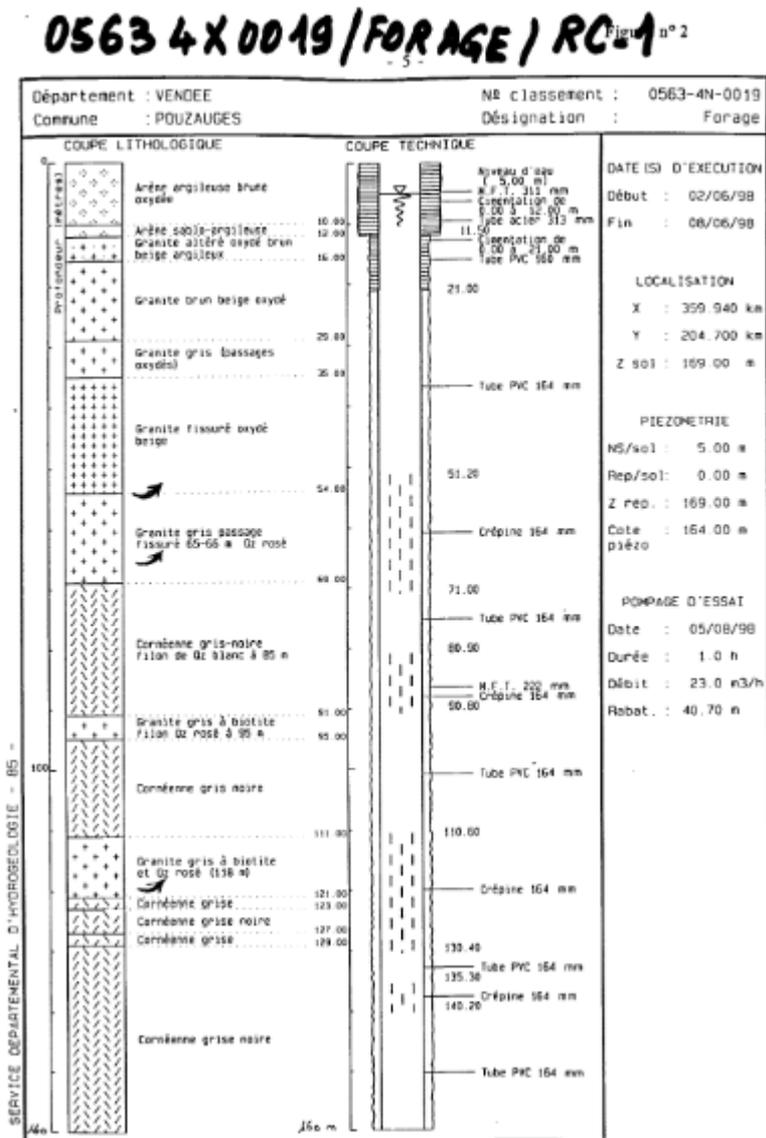
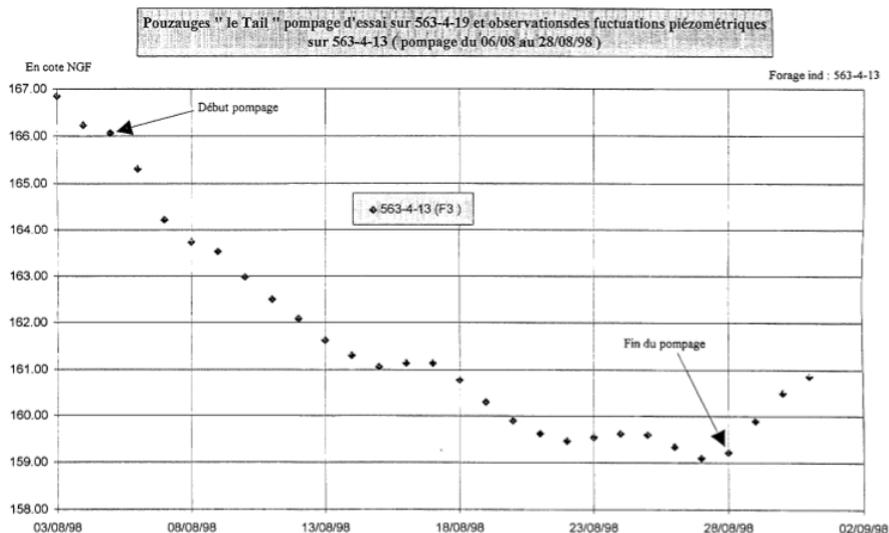


Figure 21 – Coupe technique du forage F3 (05634X0019/FORAGE)

Profondeur	Formation	Lithologie	Lithologie	Stratigraphie	Altitude
10.00	Altérites du Paléozoïque		Arène argileuse brune oxydée. Alluvions probables au sommet mélangés à des altérites du granite de Pouzauges	Quaternaire Paléogène à Quaternaire	159.00
12.00			Arène sablo-argileuse. Altérite du granite de Pouzauges à quartz, feldspath potassique perthitique, biotite riche en zircon radioactif, apatite, allanite, amphibole brune auréolée d'amphibole verte. Daté de l'Ordovicien inférieur.		157.00
16.00			Granite brun beige argileux, altéré et oxydé.		153.00
29.00	Massif de Pouzauges		Granite brun beige oxydé.	Ordovicien inférieur	140.00
35.00			Granite gris avec des passages oxydés.		134.00
54.00			Granite beige fissuré et oxydé.		115.00
65.00			Granite gris		104.00
66.00			Granite gris fissuré. Présence de quartz rosé		103.00
69.00	Formation du Haut-Bocage 3		Granite gris	Néoprotérozoïque III (Ediacarien)	100.00
91.00			Cornéenne gris noir. Filon de quartz à 85m. Métapélites et méta-grauwackes du Haut Bocage Précambrien, Briovérien), structurés au cadomien et métamorphisés par le granite monzonitique de Pouzauges (Ordovicien inférieur). En enclaves dans le granite		78.00
95.00	Massif de Pouzauges			Ordovicien	74.00
111.00	Formation du Haut-Bocage 3		Granite gris à biotite. Filon de quartz rosé à 95m.	Néoprotérozoïque III (Ediacarien)	58.00
121.00	Massif de Pouzauges		Cornéenne gris noir. Pélites et grauwackes précambriennes cornéifiées	Ordovicien inférieur	48.00
129.00	Formation du Haut-Bocage 3		Granite gris à biotite avec quartz rosé à 118m.	Néoprotérozoïque III (Ediacarien)	40.00
160.00			Cornéenne grise, gris-noir entre 123 et 127m. Cornéenne gris noir.		9.00

Figure 22 – Log validé du forage F3 (05634X0019/FORAGE)



0563 4X 0019 / FORAGE / P.2

Figure 23 – Pompage d'essais du forage F3 (05634X0019/FORAGE)

Aujourd'hui 3 ouvrages constituent l'alimentation AEP de la commune de Pouzauges (Figure 24 et Figure 25) :

Le puits 05634X0001/P

Le forage de 1980 05634X0012/F2

Le nouveau forage de 1998 05634X0019/FORAGE

L'exploitation de ces ouvrages a fait l'objet d'une DUP (22/10/2013) avec une limite d'exploitation fixée à 1000 m³/j. Le forage F1 sert de piezomètre de suivi des niveaux d'eau.

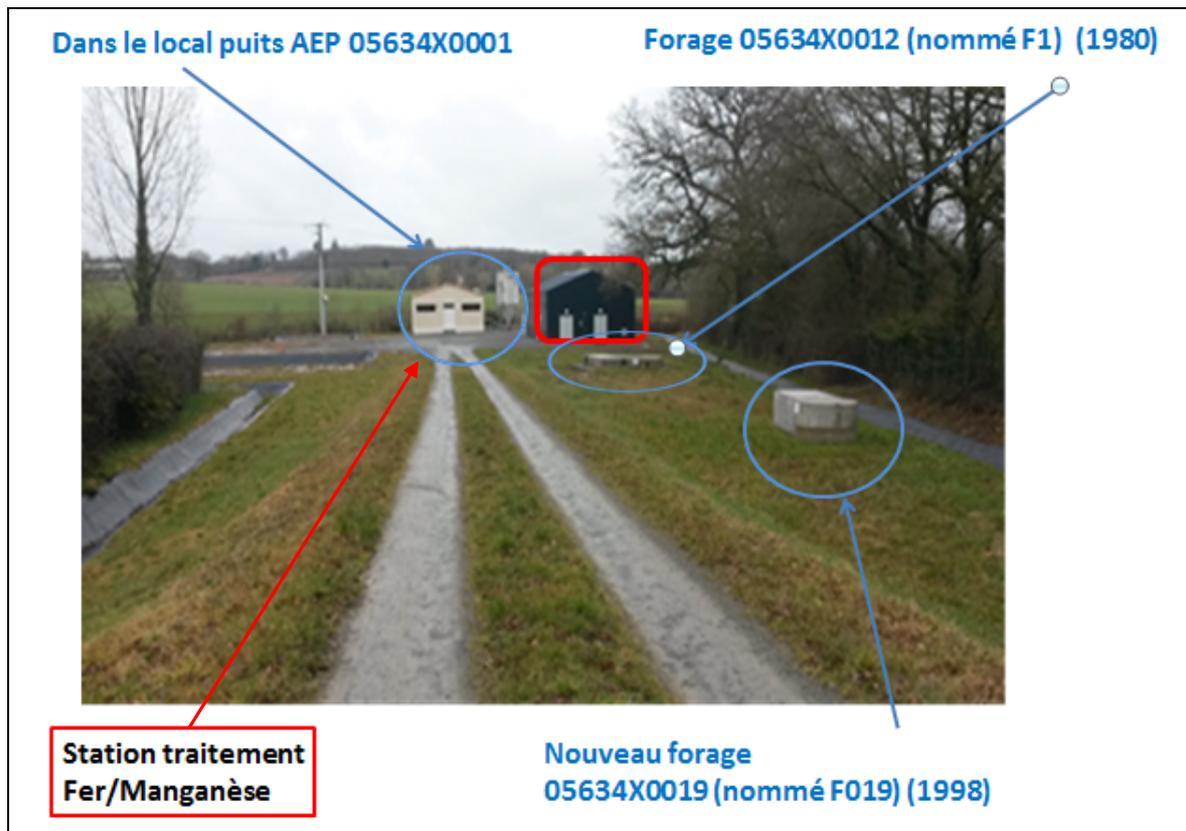
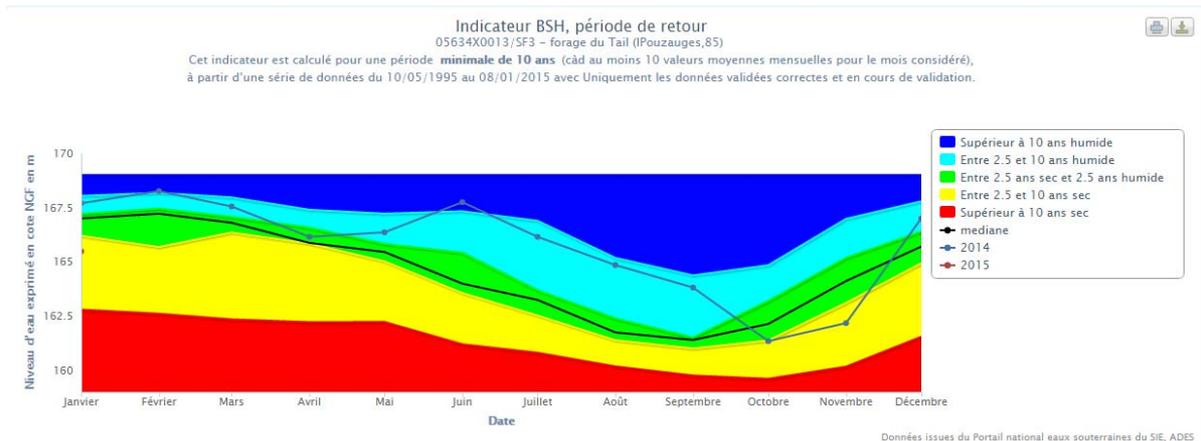


Figure 24 – Implantation des différents ouvrages du captage du Tail

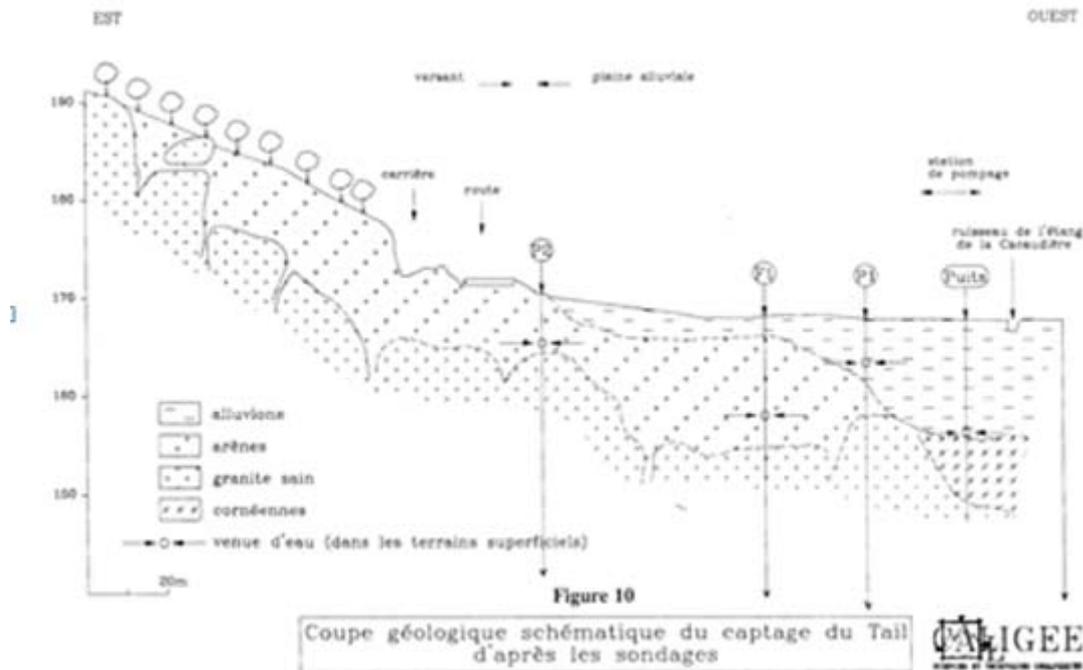


Figure 25 - Coupe géologique établie au droit du captage sur la base des données des forages

V.4. Qualité et traitement des eaux captées

A l'origine les eaux captées dans le puits ainsi que sur F2 subissaient un traitement à la chaux pour corriger le pH naturellement acide des eaux, ainsi qu'une désinfection avant mise en distribution.

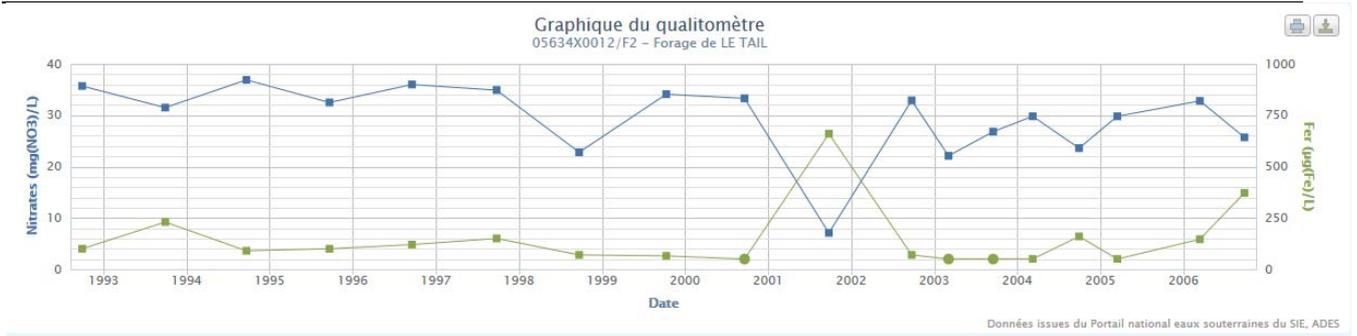
Le forage F3 05634X0019/FORAGE qui capte des horizons aquifères plus profonds, présente des eaux chargées en Fer et en Manganèse. Sa mise en exploitation récente a nécessité la mise en place d'une nouvelle station de traitement permettant une déferrisation et une démanganisation des eaux.

En ce qui concerne les nitrates, les teneurs restaient en dessous des 30 mg/l dans les années 1980. Par la suite dans les années 1990 celles-ci s'établissaient plutôt entre 35 et 40 mg/l.

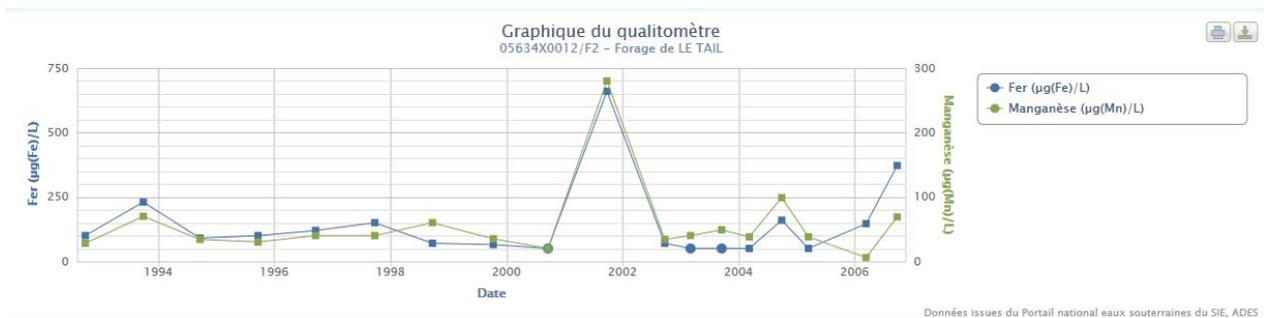
Le forage F2 05634X0012/F2 est suivi dans le cadre du réseau qualité du département de la Vendée par le Conseil Départemental de Vendée.

Le suivi de la qualité des eaux de ce forage présente les évolutions suivantes :

- Une relative stabilité des concentrations en nitrate entre 1993 et 2006 avec des teneurs entre 25 et 38 mg/l, qui témoignent des activités de polyculture et d'élevage présentes sur le bassin versant.



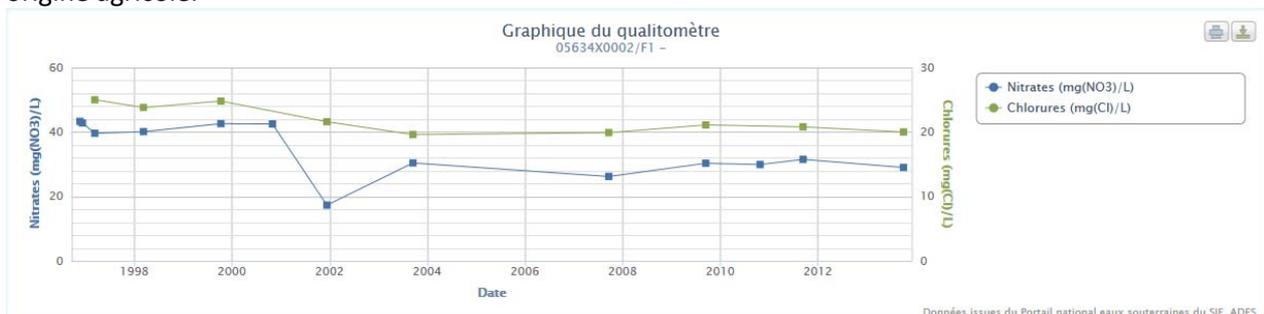
- Des concentrations en fer et manganèse corrélées avec des teneurs souvent supérieures aux limites de référence de qualité pour l'eau potable, respectivement 200 µg/l et 50 µg/l.



Le forage 05634X0002/F1 est suivi par l'ARS dans le cadre du contrôle sanitaire pour l'alimentation en eau potable.

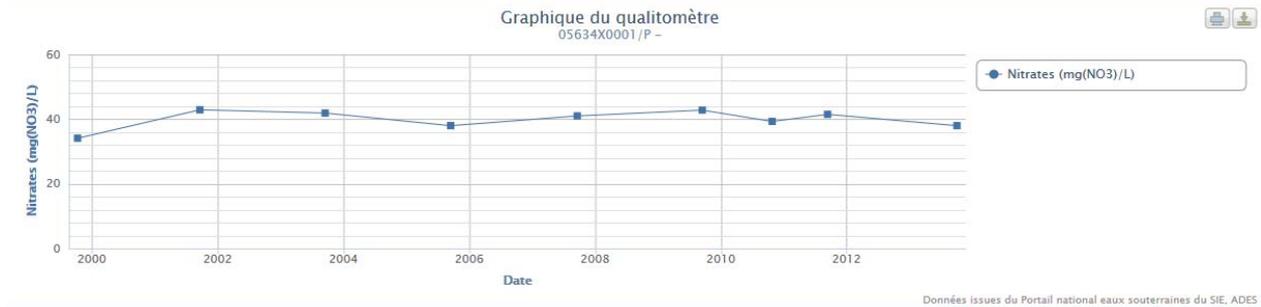


Les données en nitrate sont globalement corrélées à celles en chlorure, et témoignent toutes deux d'une origine agricole.



Le puits 05634X0001/P est également suivi dans le cadre du contrôle sanitaire.

Les concentrations en nitrates dans l'eau du puits sont stables et voisines de 40 mg/l.



V.5. Périmètres de Protection

Ceux-ci ont été déterminés en 1996 après des études préalables complètes ayant consisté en une cartographie détaillée des terrains géologique, pédologique et d'occupation des sols, associée à une enquête détaillée auprès des agriculteurs. Ces investigations ont porté sur le bassin versant topographique du captage d'une superficie de 6,5 km², dont les altitudes varient entre 281 m et 168 m.

Les relevés géologiques et hydrogéologiques de terrain (Figure 26) ont conduit à définir un bassin d'alimentation restreint à 4,2 km² (Figure 27) pour les raisons suivantes :

- la partie amont du bassin versant ne participe pas à l'alimentation du captage dans la mesure où elle est drainée par de nombreuses sources qui donnent naissance à de petits ruisseaux. Certaines alimentent même des retenues collinaires utilisées pour l'irrigation. Malgré leur position topographique haute et donc les faibles surfaces susceptibles de les alimenter par gravité, il convient de signaler que ces sources qui alimentent les retenues ne semblent pas tarir en étiage selon les dires des agriculteurs qui les exploitent.
- une zone a été ajoutée au bassin d'alimentation en aval du captage pour tenir compte de l'extension du couloir de fracturation au sein duquel est implanté le captage.

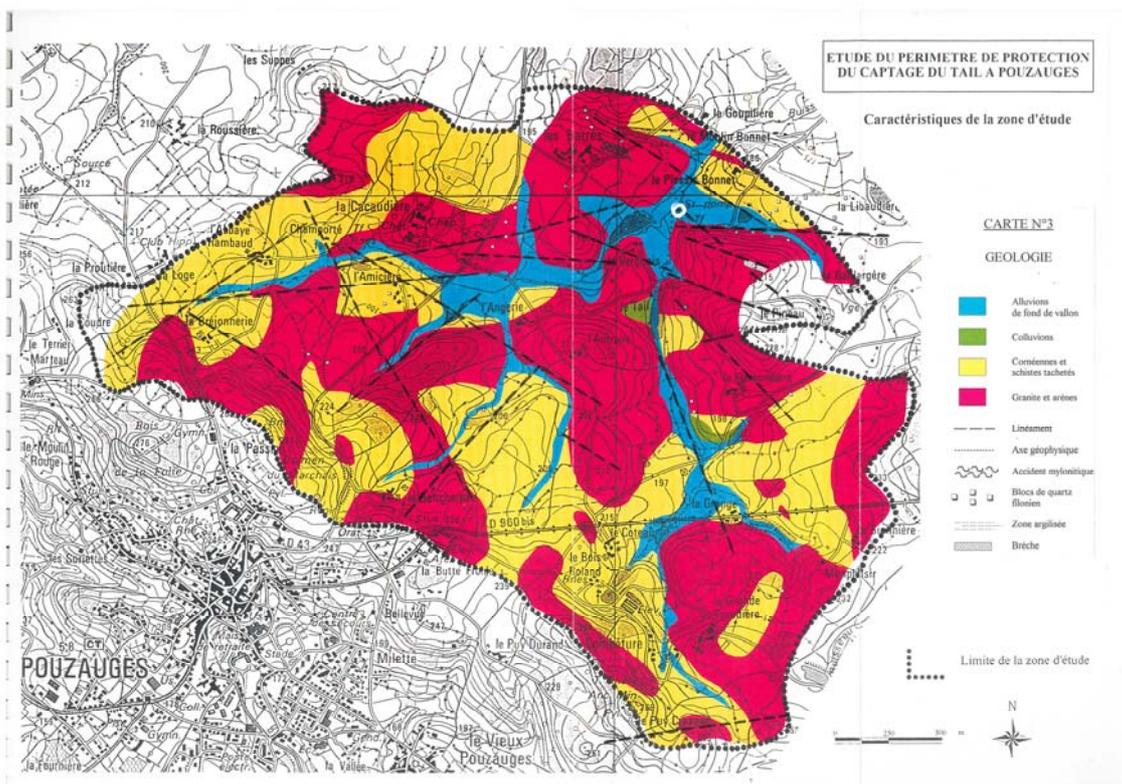


Figure 26 – Carte géologique des terrains de la zone d'alimentation des captages

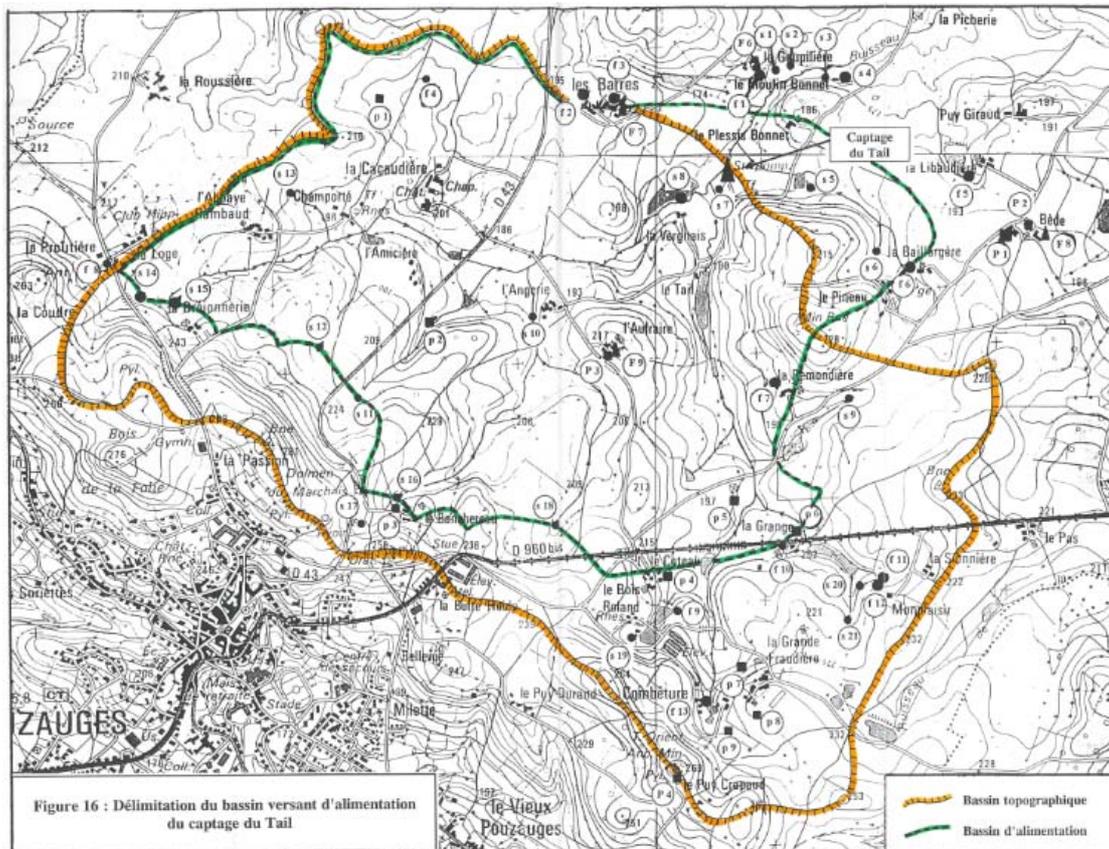


Figure 27 – Bassin d'alimentation des captages du Tail

VI. LES EAUX THERMOMINÉRALES DU MASSIF GRANITIQUE D'AVRILLE

VI.1. Historique du site et des usages envisagés de l'eau souterraine

La Vendée et son substratum de socle hercynien n'est pas particulièrement réputée pour sa richesse en eau souterraine et encore moins pour son activité géothermale. Or, il se trouve à Moutiers-Les-Mauxfaits, la présence d'une source qui suscite bien des interrogations.

L'histoire commence au début des années 1960 avec Lucien Poiroux, jeune agriculteur qui s'installe au lieu-dit « Moulin Neau » pour faire de la cressiculture. « A ce moment-là, la source était abandonnée », se souvient-il. « Cette source servait autrefois à alimenter une réserve d'eau qui permettait elle-même, grâce à un système de vannes, de faire tourner une roue pour alimenter un moulin. Mais il y a longtemps que ça ne fonctionnait plus. La présence permanente d'eau courante lui permet de se lancer dans la culture du cresson, unique producteur dans le département.

En devenant propriétaire du site en 1967, Lucien Poiroux constate à son grand étonnement que l'eau était tempérée... « une découverte faite par hasard ; c'était en plein été : on travaillait à proximité de la source, j'ai voulu y mettre une caisse de bières au frais. Imbuvable, cette bière....elle était à 23°C ! »

Dès lors, la source lui a permis d'accélérer la croissance de son cresson et de le mettre hors gel à l'intérieur des serres. Durant toute son activité, tel fut l'usage de cette source de qualité et de débit exceptionnels.

Mais curieux et dynamique, Lucien Poiroux ambitionne un autre avenir pour cette source unique de Vendée. C'est ainsi que successivement sont étudiées les alternatives d'exploitation suivantes : création d'un jardin botanique exotique, implantation d'une station de cures thermales par la Chaîne Thermale du Soleil, création d'un centre de thalassothérapie ou de remise en forme associé à un site d'éco-tourisme, implantation d'un centre d'aquaculture en eau douce, d'un élevage de crocodiles, de poissons exotiques...et enfin création d'une site de production d'énergie par géothermie profonde. De quoi laisser planer le mystère.....sur cette source !

Parallèlement dans les années 80, le Service départemental d'Hydrogéologie lance une série d'études et de travaux pour approfondir la connaissance du site et de son environnement hydrogéologique.

VI.2. Historique des investigations

Contrairement à toute recherche hydrogéologique classique qui se développe du général pour aller vers le local, le cas du site privé de « Moulin Neau » sur la commune de Moutiers-les-Mauxfaits a fait l'objet d'une démarche inverse.

Les spécificités (température et conductivité de l'eau, débit de l'artésianisme) du point de résurgence étant unique au regard de toutes les eaux souterraines du socle vendéen, les études se sont en priorité focalisées sur le site pour s'étendre par la suite vers une meilleure connaissance du massif granitique et de son encaissant.

De 1988 à 2014, la chronologie des principales études sous maîtrise d'ouvrage départementale a été la suivante :

Juin 1988	FORALO	Réalisation d'un forage de 101 m de profondeur à l'aplomb de la zone de source située dans le talweg.
Octobre 1994	GEOTHERMA	Etude de la ressource thermique de Moutiers-les-Mauxfaits (état des lieux, pompages par paliers, diagraphies).
Décembre 1994	FRONTY	Esquisse paysagère du site avec aménagement de la source.
Janvier 1995	ATOS	Définition d'un contexte morphologique et tectonique comme indice possible des sources d'eau chaude.
Août 1995	FORALO	Pompage d'essai longue durée.
Septembre 1995	Université (Bordeaux II)	Analyses chimiques complètes.
Novembre 1995	GEOTHERMA	Etude de faisabilité de valorisation des eaux thermales de Moutiers-les-Mauxfaits.
Juillet 1996	Université Bordeaux II	. Action de l'eau sur la diurèse du rat ; . Etude du passage transcutané des éléments de l'eau chez l'homme (étude in vitro).
Octobre 2007	Electricité de Strasbourg	Eléments vers une reconnaissance de possibles ressources géothermiques profondes exploitables dans le département de la Vendée.
Janvier 2009	BRGM	Reconnaissance de ressources géothermiques potentielles dans le secteur du massif granitique d'Avrillé.
Avril 2010	CNRS/EOST	Campagne de mesures magnétotelluriques du massif granitique d'Avrillé.
Mars 2015	IUEM Brest-Iroise	Observation sismologique en Vendée (sur 3 années).

L'intérêt premier du site s'est porté sur la faisabilité de valoriser les eaux thermales du forage de Moutiers-les-Mauxfaits. En effet, les caractéristiques de la ressource et la proximité du littoral laissaient augurer un gisement exceptionnel vers une utilisation thérapeutique [1].

Les principales caractéristiques de l'eau captée se résument ainsi :

- une température constante de 22°C, supérieure de 10° par rapport à la moyenne des eaux souterraines vendéennes ;
- un forage produisant un artésianisme constant d'environ 20 m³/h ;
- une productivité de l'ouvrage en pompage remarquable pour une formation aquifère granitique, avec un débit d'exploitation possible de 100 m³/h ;
- une physico-chimie particulière avec des eaux chlorurées (1200 mg/l) sodiques (500 mg/l) et calciques (260 mg/l) ne pouvant s'expliquer que par une circulation profonde et lente des eaux au sein du socle granitique ; des éléments tels que le strontium ou le lithium intéressants pour des pathologies ostéo-articulaires.

Cependant, au fil des études, force a été de constater que la poursuite du projet n'était pas compatible avec l'extrême exigence, mais légitime, de la Direction Générale de la Santé au regard de la vulnérabilité du site au risque de pollution ; le contexte du captage ne permettant pas de s'affranchir des eaux parasites superficielles contenues dans les arènes granitiques.

Les investigations se sont alors orientées vers les ressources géothermiques du massif granitique d'Avrillé dont appartient le site de Moulin Neau. Alors que l'environnement géologique vendéen n'est pas a priori favorable à la géothermie, qu'elle soit moyenne ou basse énergie, l'indice de la température supérieure à la normale sur plusieurs sources du pourtour du massif incitait à des travaux de reconnaissance plus approfondis. Il convenait d'évaluer les potentialités, l'origine de l'eau thermo-minérale, l'extension et la géométrie du réservoir [2].

VI.3. Contexte hydrogéologique

Le massif granitique de Moutiers-les-Mauxfaits est un batholite déca-kilométrique situé non loin du contact des premiers sédiments jurassiques du Bassin aquitain. Il présente des structures géologiques Nord-ouest – Sud-est caractéristiques du Massif armoricain. Ancré au sein d'un contour attribué à son socle métamorphique, le massif comporte plusieurs sources hydrothermales, uniques pour la région (Figure 1).

Une campagne de mesures magnétotelluriques a permis d'obtenir une cartographie schématique de la conductivité électrique du sous-sol, avec la mise en évidence d'une couche conductrice dont la profondeur variable est de l'ordre de 800 à 2000 mètres. Mais les incertitudes nombreuses sur les résultats des sondages n'ont pas facilité la compréhension de l'origine hydrothermale [3].

Parallèlement à ces études fondamentales, l'idée que l'activité sismique naturelle notable du territoire vendéen puisse être à l'origine d'une forte densité de fractures avec une extension en profondeur permettant des capacités hydrauliques amplifiées a fait l'objet d'une expertise. Les émergences thermales plus ou moins salées et tièdes connues en alignement sur des fractures proches de l'affleurement du batholite granitique sont porteuses d'indices de surface pouvant émaner d'un possible réservoir géothermique sous-jacent. Dès lors, il importait de reconnaître avec une précision adéquate les localisations et les mécanismes d'événements sismiques en nombre suffisant.

Un réseau sismologique temporaire de 10 points de mesures a été installé pour caractériser une éventuelle micro-séismicité dans le massif granitique en relation avec des circulations de fluides hydrothermaux [5]. Après un an et demi d'observation, les enregistrements témoignent d'aucune activité micro-sismique particulière dans ce secteur. L'idée d'affiner la localisation du réservoir géothermique par ce dispositif n'était donc pas adaptée.

En revanche, le réseau a permis d'identifier à l'échelle départementale trois essaïms de sismicité sur lesquels nous devons focaliser notre attention. Le réseau a donc été redéployé pour entourer au mieux ces secteurs. Ils font l'objet actuellement de nouvelles acquisitions de données, et d'ores et déjà il est possible d'affirmer l'importance de la sismicité littorale. Elle s'exprime de manière récurrente par des tremblements de terre de magnitude parfois élevée (pouvant atteindre 5), mais aussi par une sismicité diffuse en relation avec des failles actives qu'il sera nécessaire de mieux localiser. A titre d'exemple, sur l'année 2013, une quinzaine de séismes a été enregistrée avec des magnitudes variant de 1,4 à 2,5.

La présence d'émergences thermales (17° à 28°C) connus dans le secteur a permis au BRGM de proposer un programme technique comprenant un volet géochimie des eaux complété d'un volet géochimie des gaz dans le sol [4].

VI.4. Etude hydrochimique

L'étude de la chimie des eaux montre que les eaux thermo-minérales résultent du mélange d'eaux profondes et d'eaux météoriques (superficielles) actuelles ou fossiles.

La

Figure 28 présente le contexte géologique et la localisation des sources échantillonnées pour la réalisation d'analyses chimiques et isotopiques.

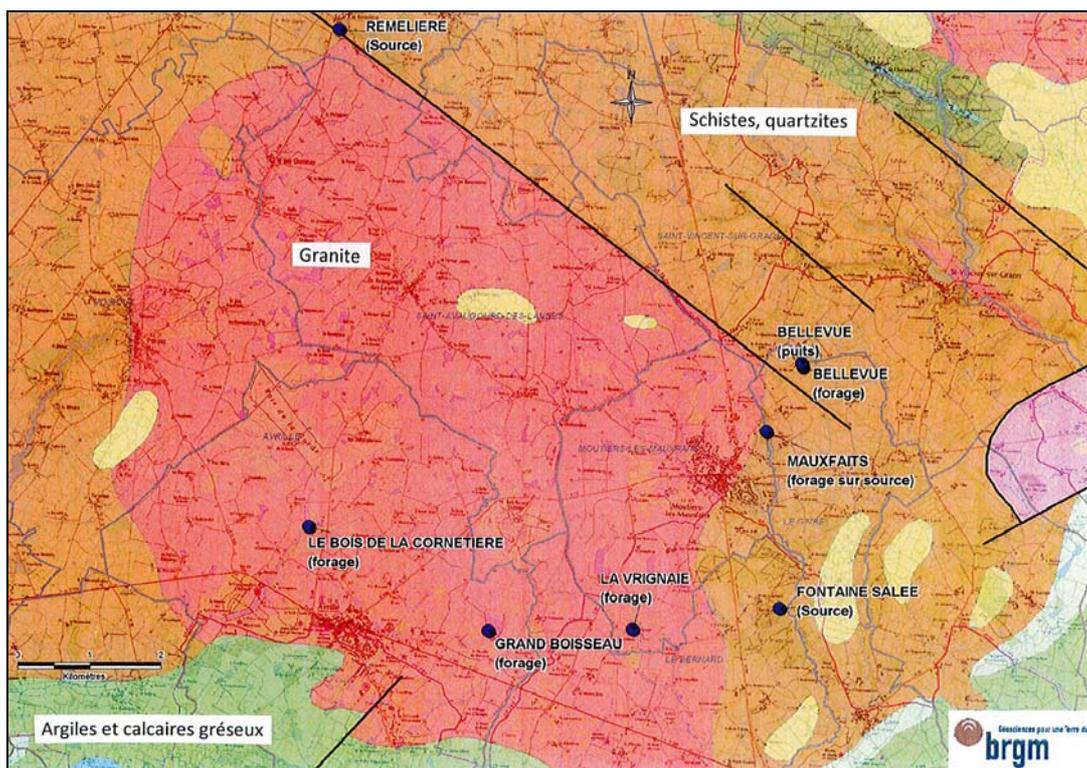


Figure 28 - Contexte géologique et localisation des sources géothermiques (source BRGM [1]).

Faciès hydrochimiques et paramètres in situ

Le diagramme de Piper (Figure 29) permet d'identifier une composition chimique des eaux avec un caractère chloruré sodique très marqué pour certaines sources : Fontaine Salée, Moutiers les Mauxfaits, Bellevue. L'eau de la source du Grand Boisseau conserve un caractère bicarbonaté calcique, classique des eaux dans les aquifères de socle. Les pH compris entre 5,9 et 7,5, témoignant du caractère acide de ces eaux.

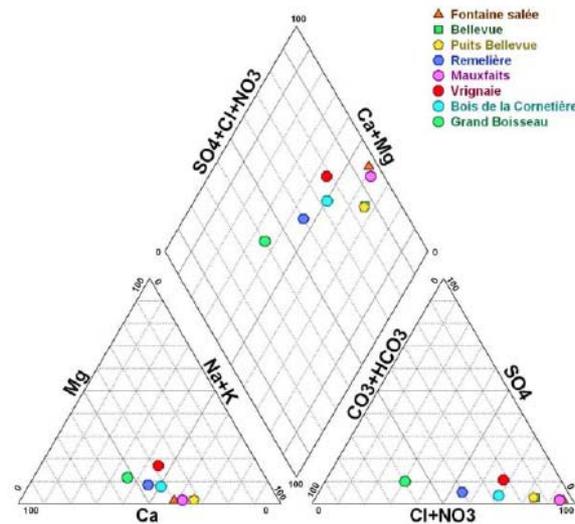


Figure 29 - Diagramme de Piper présentant les faciès hydrochimiques des sources échantillonnées.

La conductivité électrique des eaux indique des salinités très variables, de 520 $\mu\text{S}/\text{cm}$ à 10 mS/cm . Salinité et température ne sont pas corrélées : la source de Fontaine salée apparaît comme la plus la plus minéralisée, mais pas la plus chaude. Les eaux des forages de la Vrignaie et de Grand Boisseau sont les moins minéralisées.

En première interprétation (Figure 30), on peut identifier :

- des eaux peu minéralisées : la Vrignaie et Grand Boisseau avec des faciès bicarbonatés calciques pouvant montrer une légère évolution vers un faciès chloruré sodique, avec des températures faibles
- des eaux plus minéralisées Fontaine Salée, Moutiers les Mauxfaits avec un faciès chloruré sodique et des températures plus élevées
- Le forage de Bellevue est celui qui présente la température la plus élevée mais avec une faible minéralisation.

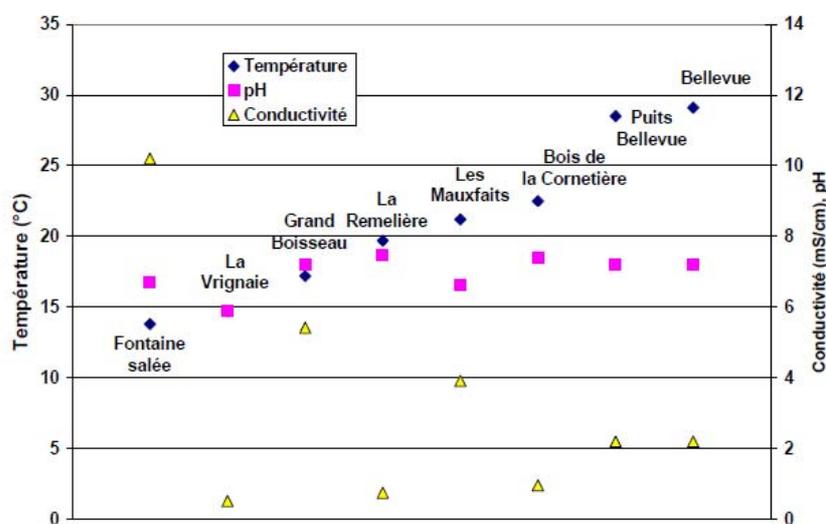


Figure 30 - Présentation des paramètres mesurés in situ (pH, conductivité, température)

Gaz dans les sols

Une vingtaine de profils de gaz ont été réalisés (CO_2 , radon, hélium) et positionnés pour traverser les deux principales failles de contact entre le granite et les schistes. Ces profils montrent des anomalies en CO_2 ,

localisées dans l'axe des failles. De nombreuses anomalies en radon ont également été observées le long de ces failles (Figure 31).

Les rapports isotopiques du carbone 13 (-24,6 ‰) indiquent que l'origine du CO₂ mesuré dans les sols dans le secteur est principalement d'origine superficielle (activité biologique dans le sol).

Les gaz remontent à la surface à l'aide de fractures locales ouvertes. Les anomalies en radon proviennent de la chaîne de désintégration de l'uranium 238 et du thorium 232, abondants dans les granites. L'observation des anomalies au sein des schistes (à proximité de Fontaine Salée) permet de conclure que les fractures sont associées au granite sous-jacent.

Les anomalies en hélium proviennent du granite. Les fortes anomalies observées à Mauxfaits apparaissent intermittentes.

Les émissions de gaz ont apporté des informations nouvelles sur l'orientation de la fracturation, ainsi que le lien avec le granite de certaines fractures rencontrées dans les schistes.

La faille Nord est confirmée, sur la bordure Est du massif granitique les profils de gaz ont permis de réinterpréter la fracturation. Le contact Est entre granite et schistes serait marqué par des failles orientées NNE-SSW recoupées par des failles WNW ESE (Figure 32).

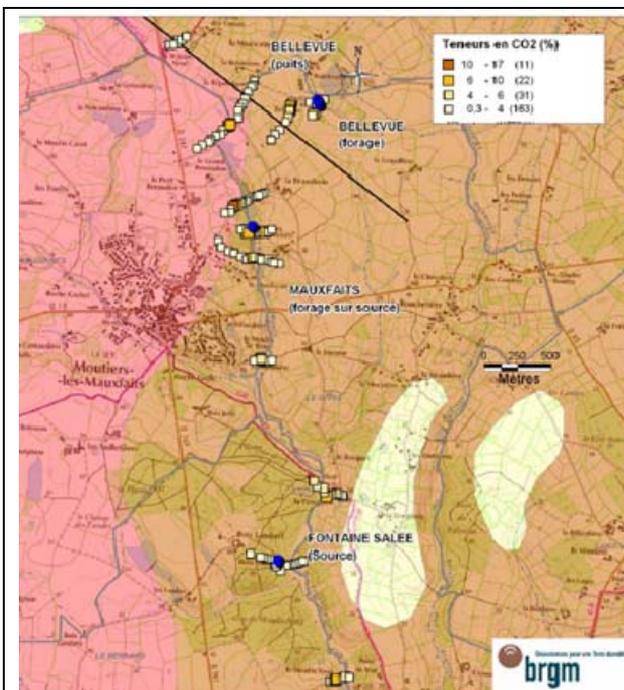


Figure 31 - Carte des teneurs en CO₂ dans les gaz du sol (campagne septembre 2008)

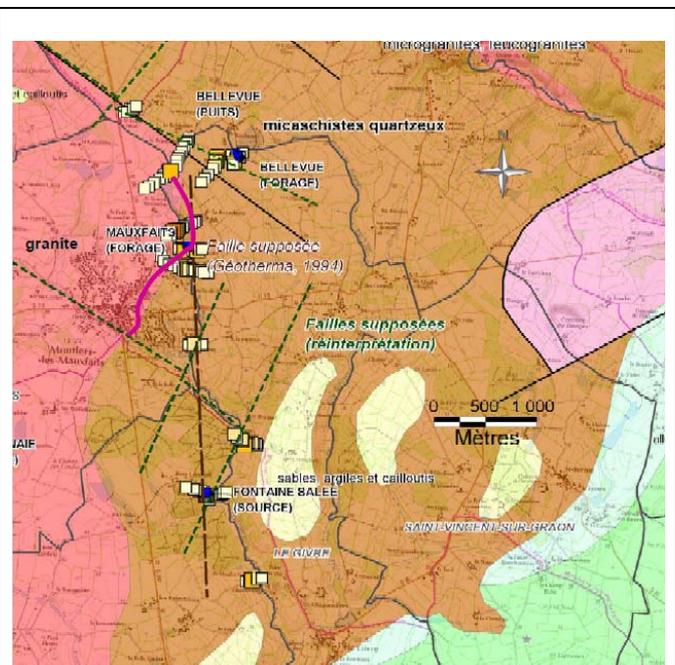


Figure 32 - Réinterprétation du contact granite d'Avrillé - schistes et de la fracturation à partir de nouveaux levés de terrain et des profils de gaz (Bechennec, 2008)

Ces apports sont importants en vue d'une compréhension de la structure du sous-sol, notamment par rapport aux arrivées d'eau en surface. Les sources thermo-minérales semblent bien liées à des fissures, permettant de supposer un lien avec la profondeur. En revanche, seule une origine superficielle des gaz a pu être mise en évidence. Une origine profonde, partielle, est probable, mais elle n'a pu être démontrée.

Géochimie et isotopes pour identifier l'origine des eaux

Les résultats des analyses chimiques et isotopiques sont présentés dans le tableau 1.

La comparaison des compositions chimiques a permis d'identifier l'origine des eaux échantillonnées. D'après le diagramme de Giggenbach (1988) (Figure 33) qui corrèle les anions Cl, SO₄, et HCO₃, 3 échantillons présentent une origine profonde : Fontaine Salée, Mauxfaits, Bellevue. Ces eaux plus minéralisées ainsi que celles du forage du Bois de la Cornetière et de Remelière suivent un alignement du

pôle le plus minéralisé (Fontaine Salée) vers un pôle moins minéralisé (Remelière). Les échantillons de Grand Boisseau et de Vrignaie sortent de cet alignement.

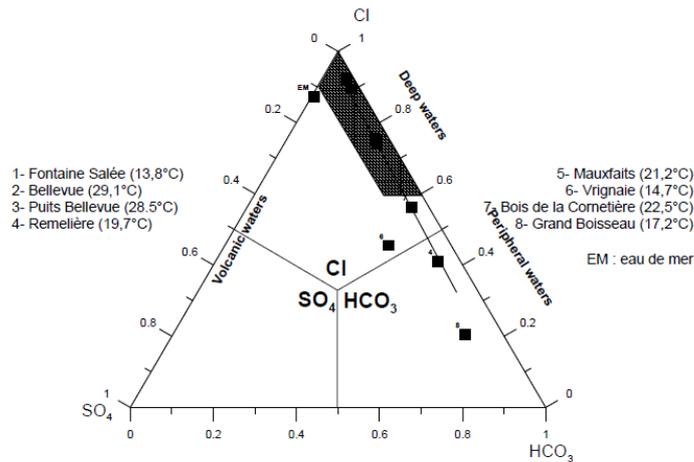


Figure 33 – Diagramme de Giggenschbach. Concentrations relatives en Cl, SO4 et HCO3 dans les eaux échantillonnées.

Elément	Al (Aluminium)	As (Arsenic)	B (Bore)	Ba (Baryum)	Br- (Bromures)	CID (Carbone Inorganique Dissous)	COD (C. org. dissous)	Ca (Calcium)	Cl (Chlorures)	Co (Cobalt)	Cr (Chrome)	Cs (Césium)		
Limite de quantification (LQ)	2	0,05	10	2	0,1	0,5	0,5	0,5	0,5	0,2	1	5		
N°	Point d'eau	Date prélèvement	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	mg/l	mg/l	mg/l	µg/l	µg/l	µg/l		
1	Fontaine salée	09/09/2008	< LQ	3,78	772	177	12,9	50,6	0,9	876	3647	3,5	16	129
2	Bellevue	09/09/2008	< LQ	0,56	164	219	2	11,7	< LQ	133	633	< LQ	23	52
3	Puits Bellevue	09/09/2008	< LQ	1,02	174	209	4,9	12,8	0,7	131	609	< LQ	18	56
4	La Remelière	09/09/2008	< LQ	2,09	53	254	7,7	13,3	< LQ	72,5	150	< LQ	28	13
5	Mauxfaits	10/09/2008	< LQ	0,96	322	208	17,1	9,7	< LQ	282	1315	< LQ	16	31
6	La Vrignaie	22/09/2008	29	0,28	28	136	0,31	15,8	1	37,9	78,7	1,8	< LQ	< LQ
7	Bois de la Cornetière	23/09/2008	23	1,6	62	194	0,87	31	1	77,3	215,4	< LQ	< LQ	6,4
8	Grand Boisseau	10/09/2008	2	8,32	18,1	177	0,24	36,5	1,7	53,5	55,7	0,9	< 0,2	2,4

Elément	Cu (Cuivre)	F (Fluorures)	Fe (Fer)	Ge (Germanium)	K (Potassium)	Li (Lithium)	Mg (Magnésium)	Mn (Manganèse)	NH4 (Ammonium exprimé en NH4)	NO2 (Nitrites exprimés en NO2)	NO3 (Nitrates exprimés en NO3)	Na (Sodium)		
Limite de quantification (LQ)	0,3	0,1	0,02	5	0,5	2	0,5	5	0,1	0,01	0,5	0,5		
N°	Point d'eau	Date prélèvement	µg/l	mg/l	µg/l	mg/l	µg/l	mg/l	µg/l	mg/l	mg/l	mg/l		
1	Fontaine salée	09/09/2008	< LQ	1,8	0,52	< LQ	36	1971	20,6	1723	0,2	< LQ	< LQ	1458
2	Bellevue	09/09/2008	0,3	2,3	0,05	< LQ	11,1	411	3,9	< LQ	< LQ	5,3	303,1	
3	Puits Bellevue	09/09/2008	0,3	2,4	< LQ	< LQ	11,6	411	3,9	24	< LQ	< LQ	4,9	299,4
4	La Remelière	09/09/2008	6,8	2,5	< LQ	< LQ	3,7	73	8,1	11	< LQ	0,02	7,7	79,5
5	Mauxfaits	10/09/2008	0,5	1	< LQ	< LQ	14,2	712	7,7	< LQ	< LQ	17,1	534,9	
6	La Vrignaie	22/09/2008	2,8	0,6	< LQ	< LQ	2,5	57	10,2	842	< LQ	< LQ	76,2	49,6
7	Bois de la Cornetière	23/09/2008	1,6	2	< LQ	< LQ	3,1	128	8,6	< LQ	< LQ	20,5	105,6	
8	Grand Boisseau	10/09/2008	3	2,2	0,1	< 0,2	1,6	30,6	7,2	422	< LQ	< LQ	0,9	40,8

Elément	Nd (Néodyme)	Ni (Nickel)	PO4 (Ortho-Phosphates en PO4)	Pb (Plomb)	Rb (Rubidium)	SO4 (Sulfates)	SiO2 (Silice)	Sr (Strontium)	Th (Thorium)	U (Uranium)	V (Vanadium)	Zn (Zinc)		
Limite de quantification (LQ)	0,1	0,5	0,1	0,1	5	0,5	0,5	2	0,5	0,1	0,4	2		
N°	Point d'eau	Date prélèvement	µg/l	µg/l	mg/l	µg/l	mg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l		
1	Fontaine salée	09/09/2008	< LQ	6,5	< LQ	6,3	290	78	18,5	20337	< LQ	2	< LQ	42
2	Bellevue	09/09/2008	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	108	27,8	27,4	2736	< LQ	3	< LQ	< LQ
3	Puits Bellevue	09/09/2008	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	116	28,5	27	2775	< LQ	3,5	0,6	< LQ
4	La Remelière	09/09/2008	< LQ	< LQ	< LQ	5,5	25	20,1	23,7	554	< LQ	13	< LQ	805
5	Mauxfaits	10/09/2008	< LQ	< LQ	< LQ	< LQ	118	30,5	33,9	6221	< LQ	4	0,5	19
6	La Vrignaie	22/09/2008		3,6	0,1	0,7	8	26	35	134	< 5	2	< LQ	8
7	Bois de la Cornetière	23/09/2008		< LQ	< LQ	0,1	17	15,7	34,5	958	< 5	13	0,5	3
8	Grand Boisseau	10/09/2008		1,9	< 0,1	31	7,1	24,8	20,8	147	< 0,1	4,7	< 0,2	364

N°	Localisation	Date	δD	$\delta^{18}O$	$\delta^{13}C$	14C	$\delta^{13}C$	87Sr/86Sr	$\delta^{18}O SO_4$
	Point d'eau prélevé		$^{2}D/^{1}H_2O$ vs SMOW	$^{18}O/^{16}O$ vs SMOW	$^{13}C/^{12}C$ vs PDB	Activité (%)	fioule 14C		$^{18}O/^{16}O$ vs SMOW
1	Fontaine Salée	09/09/2008	-32,5	-5,6	-15,0	69,5	-14,8	0,71433	12,4
2	Bellevue	09/09/2008	-34,8	-5,8	-17,0	56,1	-19,3	0,714373	8,4
3	Puits Bellevue	09/09/2008	-34,1	-5,8	-16,9				8,5
4	La Remelière	09/09/2008	-34,1	-5,8	-15,9			0,714022	7,8
5	Les Mauxfaits	10/09/2008	-34,1	-5,8	-17,3			0,714381	12,7
6	La Vrignaie	22/09/2008	-33	-5,6	-17,3			0,712155	4,9
7	Le Bois de la Cometière	23/09/2008	-34,3	-5,8					8,2
8	Grand Boisseau	10/09/2008	-20,4	-3,0				0,71251	7,1

Tableau 1 - Résultats des analyses chimiques et isotopiques

Ces tendances se retrouvent dans le diagramme de Piper (cf fig. 26) mais aussi dans un diagramme δ^2H -Chlorure et $\delta^{18}O$ - Chlorure (Figure 34). Les eaux sont issues d'un mélange entre un pôle salé (Fontaine Salée plus profond, sans nitrates et une faible teneur en oxygène dissous et une eau douce d'origine météorique avec une signature plus appauvrie que celle des eaux de pluie actuelles (station de Dax) (Figure 35). L'eau du forage de la Vrignaie a une signature proche de celle des pluies actuelles.

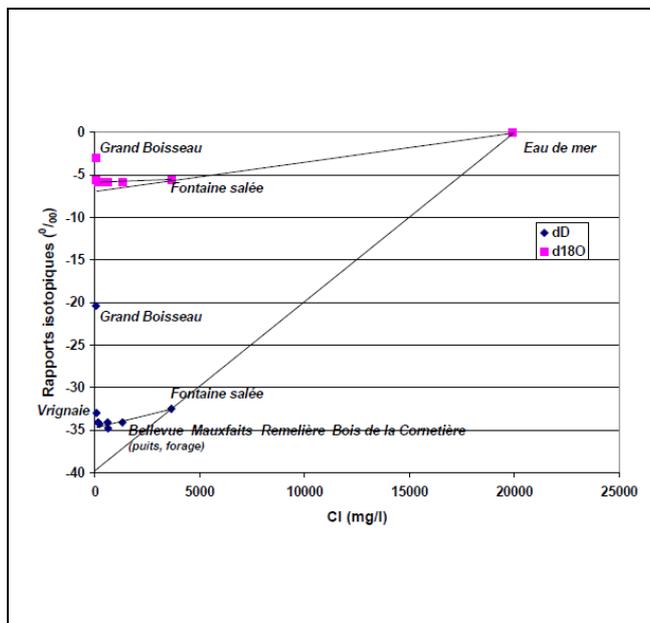


Figure 34 – Comparaison entre les compositions isotopiques et les concentrations en chlorure pour les différentes eaux échantillonnées.

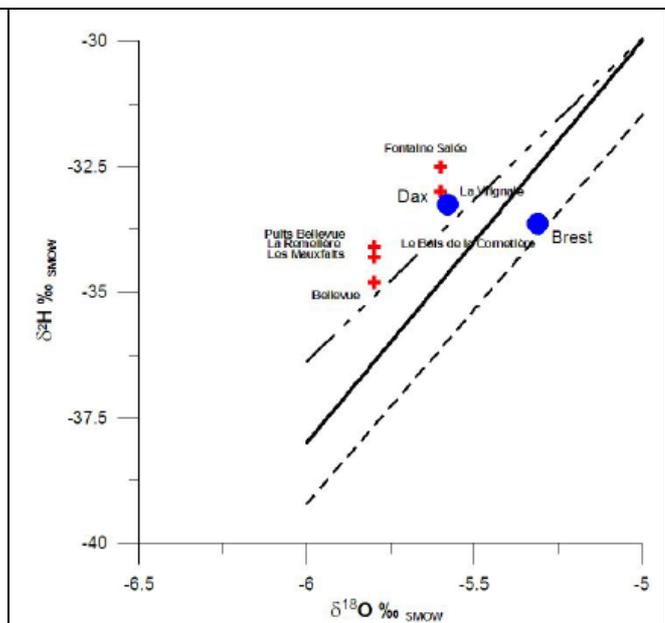


Figure 35 - Relation δ^2H versus $\delta^{18}O$ et comparaison avec les droites météoriques mondiales (Craig et Dax)

Le décalage de certains points (Bellevue, Remelière, Mauxfaits) pourrait témoigner d'une recharge plus ancienne. Fontaine Salée présente une origine de recharge différente.

La présence d'eaux proche des eaux de surface est confirmée (Bellevue, Grand Boisseau). Les débits dans ces ouvrages augmentent lors d'épisodes de fortes pluies. La signature différente pour Grand Boisseau n'est pas expliquée à ce jour.

Les eaux échantillonnées ne montrent pas un échange isotopique à haute température avec les silicates des roches (enrichissement en oxygène-18 qui se traduit par un décalage sur la droite dans le graphique δ^2H versus $\delta^{18}O$). Le graphique montre plus un décalage des points vers la gauche (appauvrissement en oxygène-18), témoin d'une interaction possible avec le CO_2 des sols

L'eau de la Fontaine Salée semble constituée d'une contribution marine (environ 20%) et d'eau douce provenant d'une recharge plus ancienne, renforcée par un rapport Cl/Br proche de celui de l'eau de mer. Cette contribution marine pourrait être reliée aux épisodes d'immersion marine qui se sont produits au cours de l'histoire géologique du secteur (placages de sables rouges marins du Pliocène et de calcaires argileux roux du Lias sur le granite d'Avrillé).

Les eaux de surface sont marquées par la présence de nitrates (76 mg/l de NO_3 dans le forage de le Vrignaie) et un rapport Mg/Cl élevé témoin également d'apport d'eau de surface.

Age des eaux

Des essais de datation ont été réalisés dans les eaux de Mauxfaits (Moulin de Neau). Ces eaux sont dépourvues de tritium (Géotherma, 1994). Une analyse ^{14}C a été réalisée indiquant un âge moyen des eaux compris entre 1000 et 5000 ans. Un âge comparable voir plus récent est estimé pour le forage de Fontaine Salée. Sur le forage de Bellevue, la datation donne des âges entre 4000 et 7000 ans. Etant donné que toutes ces eaux témoignent de mélanges, il est difficile d'identifier l'âge de chacun des pôles qui constituent ce mélange.

L'âge de ces eaux est confirmé par leur composition chimique. Les eaux les plus minéralisées présentent des enrichissements en Ca, Sr, HCO_3 , SiO_2 , Fe, F et des appauvrissements en Na, K, Mg, SO_4 . Cela témoigne d'une interaction avec la roche encaissante au sein de laquelle ces eaux circulent (dissolution d'alumino silicates tels les plagioclases et précipitation de phases magnésiennes et sulfatées).

Les calculs d'équilibre montrent un équilibre avec la calcite et la fluorite, une sursaturation par rapport au quartz et à la calcédoine, une sous saturation par rapport à la dolomite et au gypse.

Géothermomètres

Le diagramme de Giggenbach (Figure 36) basé sur des réactions à l'équilibre thermodynamique à une température donnée permet d'estimer rapidement le degré d'interaction eau-roche et la température maximale atteinte.

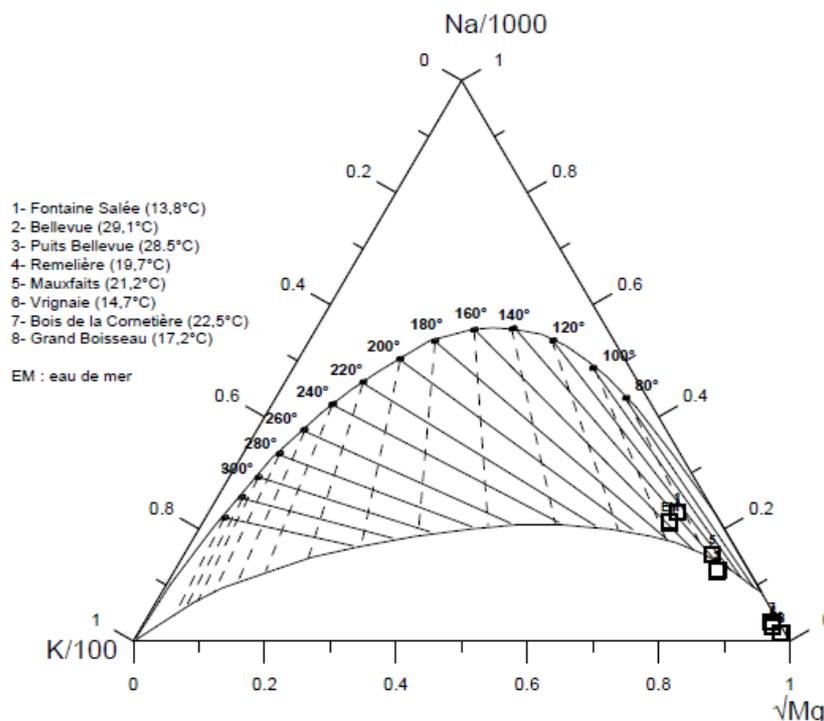


Figure 36 - Diagramme de Giggenbach. Interprétation de la température de l'eau en profondeur à partir des teneurs en Na, K, Mg des eaux prélevées.

Ce diagramme montre que les eaux de Fontaine Salée, Mauxfaits, et Bellevue présentent les degrés d'interaction avec les roches les plus forts. Les températures estimées sont comprises entre 80 et 120 °C (avec une légère surestimation). Les autres points d'eau sont plus proches du pôle magnésie, et témoignent du caractère d'eaux plus superficielles.

L'application de différents géothermomètres, chimiques et isotopiques (tableau 2), permet d'estimer que l'eau en profondeur a été portée à une température maximale de 70-90°C. Cette température apparaît convergente pour les différentes eaux thermo-minérales, et en cohérence avec les interprétations faites avec leur composition chimique

VI.5. Conclusions et perspectives

L'histoire de la reconnaissance hydrogéologique du massif de Moutiers-les-Mauxfaits est longue et certes inachevée. Les qualités physico-chimiques et thermales des émergences témoignent d'une anomalie hydrogéologique au regard du contexte des aquifères de socle vendéen. Quelle est la réelle origine de ces eaux géothermales mises en évidence tant dans les schistes que dans les granites, mais toujours proches du contact fracturé du batholite ? Quelle est l'extension du réservoir en profondeur ? Autant de questions qui nécessiteront des investigations complémentaires.

Inexploitable pour l'eau potable ou pour l'irrigation, la ressource de Moutiers-les-Mauxfaits reste à ce jour inutilisée, malgré tout l'intérêt qu'elle pourrait apporter tant pour la santé que pour la géothermie basse température. Les conditions locales n'ont pas été propices pour une valorisation et un développement de cette ressource.

Point de prélèvement	Date	T _{emerg.} °C	T _{Oz} °C	T _{Calced.} °C	T _{Na/K} °C	T _{Na/K/Ca (β=4/3)} °C	T _{Ca/K} °C
1- Fontaine salée	09/09/2008	13,8	61	40	85	87	120
2- Bellevue	09/09/2008	29,1	76	55	111	73	109
3- Puits Bellevue	09/09/2008	28,5	75	54	114	74	112
4- La Remelière	09/09/2008	19,7	70	49	128	40	78
5- Mauxfaits	10/09/2008	21,2	85	63	89	71	104
6- La Vrignaie	22/09/2008	14,7	86	64	134	37	75
7- Bois de la Cornetière	23/09/2008	22,5	85	64	96	37	70
8- Grand Boisseau	10/09/2008	17,2	65	44	115	20	54

Point de prélèvement	Date	T _{K/Mg} °C	T _{Na/Li} °C	T _{Mg/Li} °C	T _{K/Sr} °C	T _{Na/Rb} °C	T _{Na/Cs} °C	T _{FK} °C	T _{Fe/K} °C	T _{Mn/K} °C	T _{D18O-H2O-804} °C	T _{estimée} °C
1- Fontaine salée	09/09/2008	88	93	104	83	91	85	139	111	40	88	60-90
2- Bellevue	09/09/2008	80	93	84	76	109	99	109	110	n.d.	124	70-90
3- Puits Bellevue	09/09/2008	81	94	84	77	112	101	112	n.d.	72	122	70-90
4- La Remelière	09/09/2008	47	72	38	63	106	98	82	n.d.	48	130	60-90
5- Mauxfaits	10/09/2008	77	92	90	68	94	76	93	n.d.	n.d.	84	70-90
6- La Vrignaie	22/09/2008	37	84	32	76	85	n.d.	41	n.d.	-16	171	?
7- Bois de la Cornetière	23/09/2008	43	87	49	46	85	77	72	n.d.	n.d.	126	70-90
8- Grand Boisseau	10/09/2008	32	62	24	57	87	76	59	19	-18	177	?

n.d. : non déterminé

T_{Oz} : Fournier and Rowe (1966) ; T_{Calced.} : Helgeson et al. (1978) ; T_{Na/K} : Michard (1979).

T_{Na/K/Ca} : Fournier and Truesdell (1973). T_{K/Mg} : Giggenbach (1988).

T_{Ca/K}, T_{K/Sr}, T_{Na/Rb}, T_{Na/Cs}, T_{FK}, T_{Fe/K} and T_{Mn/K} : Michard (1990).

T_{Na/Li} : Fouillac et Michard (1981). T_{D18O-H2O-804} : Mizutani and Rafter (1969).

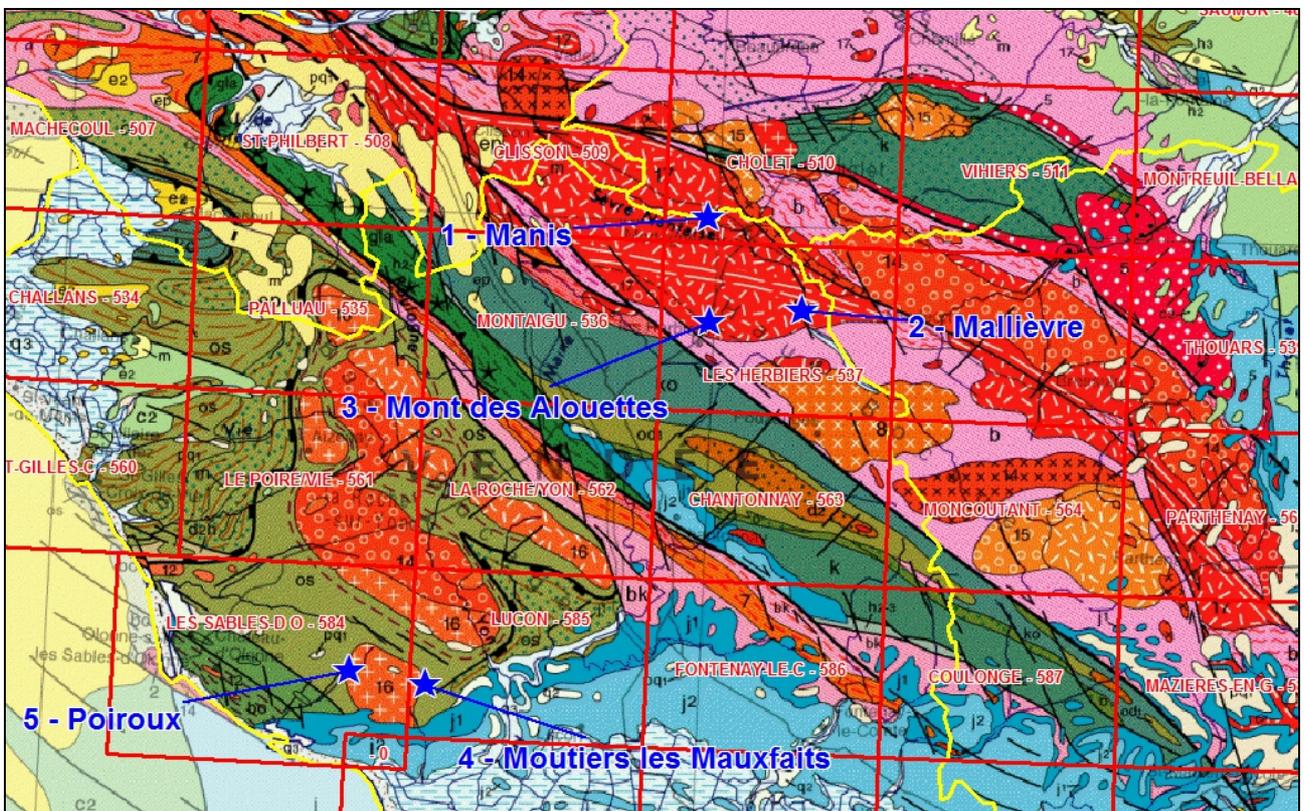
Tableau 2 - Résultats des estimations des températures des réservoirs profonds par les géothermomètres chimiques et isotopiques appliqués aux eaux échantillonnées

Cependant, les différentes études menées sur site ont permis d'identifier des éléments importants du potentiel géothermique. Les eaux thermales étudiées résultent d'un mélange d'eaux profondes minéralisées (1000 à 2000 mètres et portées à environ 90°C) et d'eaux froides plus superficielles. Une étude plus fine de la fracturation du massif avec l'implantation de forages pour l'exploration des gradients thermiques permettrait bien sûr de lever les incertitudes actuelles.

Références bibliographiques :

- [1] Grière O. (1994) – Etude de la ressource thermique de Moutiers-les-Mauxfaits – Géotherma SA.
- [2] Gérard A., Graff J.J. (2007) – Eléments vers une reconnaissance de possibles ressources géothermiques profondes exploitables dans le département de la Vendée – Electricité de Strasbourg.
- [3] Wawrzyniak P., Sailhac P. (2009) – Campagne de mesures magnétotelluriques du massif granitique d'Avrillé – Equipe de Géophysique Expérimentale, IPG Strasbourg, UMR 7516.
- [4] Le Guern C., Conil P., Négrel P. avec la collaboration de Sanjuan B., Jouin F., Brach M., Loislard M., Fléhoc C. et Béchennec F. (2009) – Reconnaissance de ressources géothermiques potentielles dans le secteur du massif granitique d'Avrillé (Vendée) – Phase 1 : Géochimie. Rapport BRGM/RP-57000-FR, 86 p.
- [5] Perrot J., Geoffroy L. (2015) – Observation sismologique en Vendée – IUEM, UMR 6538, Technopôle Brest-Iroise, Plouzané.

DESCRIPTION DES AFFLEUREMENTS



NOTES

ARRET 1 : ROCHERS DU MANIS



Carte géologique 1/50.000 : Cholet (510)

Massif granitique de Mortagne, faciès leucogranite sodique à deux micas

Horizon fissuré, partie moyenne

Le site des rochers de Manis, situé en rive droite de la Sèvre Nantaise, est un site d'escalade montrant des falaises d'une trentaine de mètres de haut.

Géologie

Le leucogranite à deux micas du Longeron forme une intrusion tardive au sein du granite de Mortagne daté à 313 ± 15 Ma. C'est un granite à grain moyen, comprenant des porphyroblastes de microcline, des prismes automorphes d'albite (5 à 7 mm), des petits cristaux trapus d'oligoclase partiellement séricitisés, du quartz globuleux subautomorphe, des muscovites abondantes en larges tablettes primaires ou en plages dentelées et poecilites secondaires. La biotite est moins abondante que la muscovite et présente deux habitus : des cristaux tabulaires très allongés et des tablettes trapues. Les minéraux accessoires comprennent de l'apatite et des zircons.

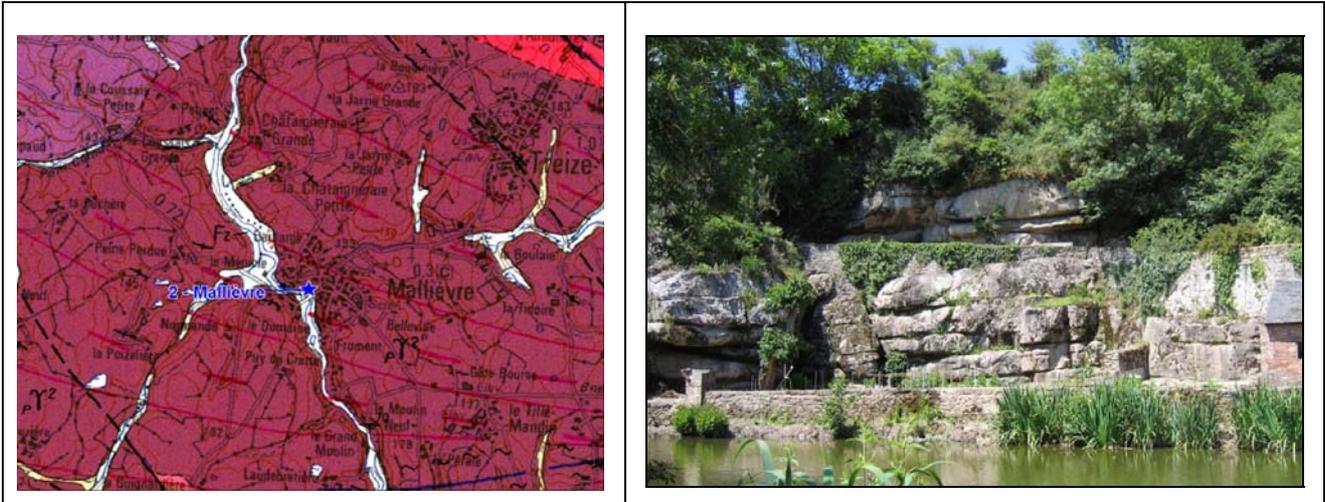
Altération

Les falaises sont parcourues par des joints horizontaux spectaculaires résultant des contraintes générées par l'altération des biotites. Les biotites montrent fréquemment une chloritisation caractéristique à la périphérie des cristaux, avec décoloration de la biotite et ouverture des feuillettes, et sont dans ce cas entourées d'une auréole ocre constituée de grains de goethite provenant de l'exsolution du fer au cours de la chloritisation des biotites.

L'espacement moyen des joints est de 0,5 à 1,5 m. La base des arènes est située vers + 120 à + 130 m, le pied de la falaise étant situé vers + 70 m : on se situe dans la partie moyenne de l'horizon fissuré, 40 à 50 m sous la base des arènes.

NOTES

ARRET 2 : FALAISE DE MALLIEVRE



Carte géologique 1/50.000 : Les Herbiers (537)

Massif granitique de Mortagne, faciès leucomonzogranite porphyroïde à deux micas (313 ± 15 Ma).

Horizon fissuré, partie moyenne

La falaise de Mallievre est située en bordure de la Sèvre Nantaise ; un sentier permet d'observer le granite et les joints horizontaux de l'horizon fissuré.

Géologie

Le granite présente une texture grenue porphyroïde avec de grands feldspaths potassiques soulignant la foliation magmatique subverticale. Le grain est moyen à grossier (3 à 5 mm). La biotite domine sur la muscovite

Altération

La falaise est parcourue de joints horizontaux dont l'espacement est compris entre 1 et 2 m. La base des arènes est située vers + 190 à + 200 m, l'affleurement vers + 135 m : on se trouve à environ 60 m sous la base des arènes, dans la partie moyenne de l'horizon fissuré. Le sentier permet d'observer de près l'affleurement : de part et d'autres des grands joints horizontaux, le granite présente un faciès feuilleté résultant de la multiplication des microfentes de tension au contact de l'eau ayant circulé dans les joints macroscopiques. Ces microfissures sont espacées de quelques millimètres et découpent sans les cisailer les phénocristaux de feldspath potassique.



NOTES

ARRET 3 : MONT DES ALOUETTES



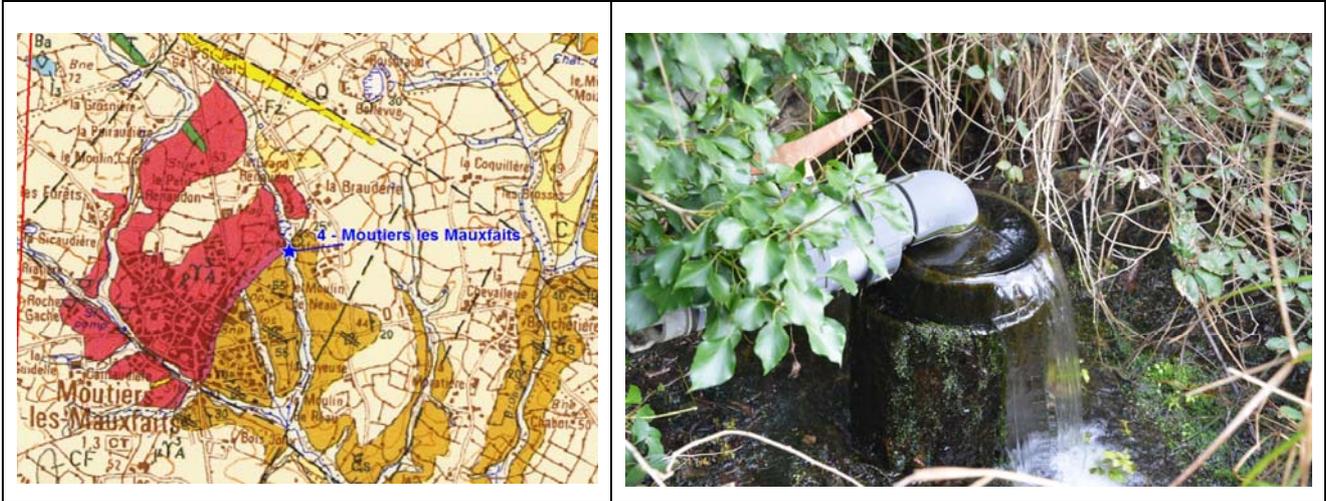
Carte géologique 1/50.000 : Les Herbiers (537)

Massif granitique de Mortagne, faciès leucomonzogranite porphyroïde à deux micas (313 ± 15 Ma).

Le Mont des Alouettes, situé à + 227 m, se trouve en bordure sud du plateau correspondant à la surface d'aplanissement pré-cénomaniennne. Il offre un panorama vers le sud, permettant d'observer, au pied de l'escarpement de l'accident sud-armoricain, la surface d'aplanissement éocène (altitude voisine de +100 à + 110 m), et à l'horizon, l'escarpement de la faille de Chantonay, décalant la surface éocène d'une quinzaine de mètres

NOTES

ARRET 4 : MOUTIERS LES MAUXFAITS - SOURCE THERMALE DU MOULIN DE NEAU



Carte géologique 1/50.000 : Luçon (585)

La source du Moulin de Neau alimentait autrefois un moulin à eau. Elle fut aménagée au cours des années 1960 pour alimenter une cressonnière. Un forage de 101 m de profondeur y a été réalisé en 1988 : il produit un débit artésien de 20 m³/h. La température de l'eau est de 22 °C, sa conductivité de 2960 µS/cm et son pH de 7,37. Les eaux sont chlorurées (1200 mg/l) sodiques (500 mg/l) et calciques (260 mg/l).

Une étude de faisabilité en vue de la création d'un établissement thermal a conclu à une impossibilité du fait de l'absence de protection suffisante de la ressource (contamination potentielle des eaux de surface).

Le forage a rencontré du granite à biotite altéré avec de nombreuses fissures productives jusqu'à 71 m, puis une alternance entre granite à grain moyen et granite à grain fin jusqu'au fond. Les pompages d'essai indiquent une transmissivité de 4 m²/h et un débit d'exploitation possible de 100 m³/h.

Cette source fait partie d'une dizaine de points d'eau répartis sur et autour du granite d'Avrillé, et qui présentent tous, à des degrés divers, des caractéristiques d'eaux thermominérales, avec des températures s'échelonnant de 17 à 31 °C, la température normale des eaux souterraines dans ce secteur étant de l'ordre de 12 °C. Les géothermomètres chimiques et isotopiques indiquent pour ces eaux un mélange entre une eau de surface et une eau ayant été portée aux environs de 90 °C. L'âge moyen de ces eaux, déterminé par la méthode ¹⁴C, est compris entre 1000 et 4000 à 7000 ans.

Plusieurs hypothèses sont proposées pour expliquer la présence de ces eaux thermominérales :

1. Circulation profonde

Pour un gradient géothermique normal (33 °C/km), la fraction « chaude » de l'eau (90 °C) serait descendue aux environs de 2.500 m, avant de remonter dans une boucle hydrothermale classique. Toutefois cette interprétation se heurte au faible gradient hydraulique local, qui paraît insuffisant pour permettre d'initier par advection des circulations à cette profondeur : la dénivellation entre les plateaux et les vallées dans ce secteur est de l'ordre de 15 à 20 m, et la charge hydraulique ne permet pas de compenser les pertes de charges résultant des frottements de l'eau sur les conduits.

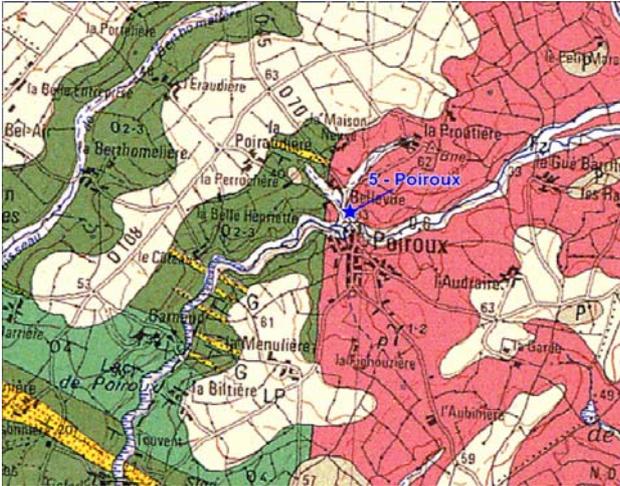
2. Volcanisme

Il n'y a pas de manifestation volcanique dans la région qui permettrait d'expliquer un gradient géothermique anormal.

3. Front d'altération exothermique à faible profondeur

L'étude pétrographique des granites réalisée en vue de comprendre le mécanisme conduisant à l'apparition d'un réseau de fissures a montré que lorsque les biotites s'altèrent en chlorite, elles montrent fréquemment dans leurs clivages la présence de cristaux d'adulaire néoformés (l'adulaire est un feldspath potassique de basse température). L'étude des isotopes de l'oxygène des adulaires et des chlorites sur le profil d'altération de deux granites bretons indique des températures de cristallisation de l'ordre de 70 à 80 °C. La modélisation de l'échauffement de la roche due aux réactions exothermiques (oxydation et hydratation) liées à l'altération de la roche au voisinage du front de percolation (base de l'horizon fissuré) montre que pour une hypothèse de puissance thermique d'une dizaine de mW/m^3 on peut atteindre une température voisine de 100 °C au bout d'une dizaine de millions d'années de fonctionnement du profil d'altération (Wyns et al., 2015). Les eaux thermominérales du granite d'Avrillé pourraient dans cette hypothèse représenter la trace en surface d'un front d'altération exothermique actif si tué à faible profondeur (200 à 300 m).

ARRET 5 : POIROUX - GRANITE D'AVRILLE



Carte géologique 1/50.000 : Les Sables d'Olonne (584)

Monzogranite à biotite d'Avrillé (313 ± 3 Ma sur monazites, 293 ± 3 Ma sur zircons)

Transition horizon fissuré-horizon feuilleté

L'affleurement est situé au bord de la route, à la sortie nord du village de Poiroux.

Géologie

Le monzogranite d'Avrillé présente une texture porphyroïde avec de grands feldspaths potassiques soulignant la foliation magmatique. Il est riche en biotites de grande taille et contient des tablettes de plagioclase ainsi que du quartz.

Altération

Le granite visible sur l'affleurement est très altéré : les biotites sont chloritisées et montrent une auréole ocre d'hydroxydes de fer (goethite) à leur périphérie. Des reliques de joints horizontaux résultant de l'altération sont bien visibles ; la roche est tantôt indurée (sommets de l'horizon fissuré), tantôt feuilletée ou arénisée : on se trouve dans la zone de transition entre l'horizon fissuré et l'horizon feuilleté.

L'altération n'est pas datée : il est probable que le profil d'altération soit polyphasé, avec une première phase d'altération au Crétacé inférieur, suivi d'une reprise au début du Tertiaire (Paléocène à fin de l'Eocène moyen) et d'une nouvelle reprise à partir du Miocène supérieur. Ce polyphasage expliquerait la forte épaisseur de l'horizon feuilleté (Dewandel et al., 2006 ; Lachassagne et al., 2011).

La richesse particulière de ce monzogranite en biotite de grande taille explique sa forte altérabilité. Elle est à relier à la présence d'eaux thermominérales associées géographiquement à ce massif granitique.

Patrimoine géologique vendéen

HAVRE ET POINTE DU PAYRÉ

JARD-SUR-MER



Vue aérienne de l'estuaire du Payré depuis le sud-est. Les falaises de la Pointe du Payré sont visibles au premier plan, tandis que la forêt du Veillon apparaît en rive gauche de l'estuaire. L'intérêt du site ne réside pas seulement dans sa beauté, mais aussi dans sa richesse géologique exceptionnelle.

