

EQUIPE TRANSFERTS EN MILIEUX POREUX.

Structure et dynamique d'un glissement de terrain : exemple du site expérimental de Lodève.

Caractéristiques géologiques/hydrogéologiques associées à la semelle savon d'un glissement de terrain.

Giovannangeli Nicolas



Mémoire de stage Master GR2M (Géologie des Réservoirs) années 2012/2014

Maitre de stage : Directeur de recherche Philippe Pezard / Tutrice : Docteur Stéphanie Gautier /
Rapporteurs : Docteurs Cédric Champollion et Didier Loggia.

Table des matières :

Introduction générale.	0
La zone choisie pour cette étude se situe dans le département de l'Hérault en France, proche du village de Pégairolles-de-l'Escalette (arrondissement de Lodève), localisé à environ 50km au Nord-Ouest de Montpellier (figure 1). Ce site a été sélectionné pour sa facilité d'accès, ainsi que pour les nombreux recensements de glissements de terrain dans cette zone (figure 2).....	0
I. Présentation de la zone d'étude.	2
A. Contexte géologique régional et local.....	2
B. Morphologie et déclenchement des glissements de terrain.....	4
C. Présentation de la zone d'étude et des données acquises.	5
C.1. Les données géophysique.	5
1. Les données de login.	5
2. L'observatoire Imageau.....	6
C.2. Les données hydrogéologiques obtenues par Westbay.....	8
C.3. Les données géologiques.	8
D. Présentation de mon rôle dans ce stage, du travail effectué et de mes problématiques.....	9
II. Présentation de mes travaux.	10
A. Partie géologie.	10
A.1. Le log structural (rapport annexe).	10
A.2. Description des lithologies et des microstructures.	11
1. Le Trias évaporitique ou Norien (~228-208,5 Ma).....	11
2. Le Rhétien (~ 208,5-201,3 Ma).	14
3. Les roches de faille.	15
4. Microtectonique.....	20
A.3. Le log lithologique.....	22
B. Partie géophysique.....	26
B.1. Les électrofacès.....	26
B.2. Le Vshale.	27
B.3. Calcul géophysique.	28
1. Calcul de la porosité (Loi de Wyllie, 1956).	28
2. Calcul du facteur de formation (F) (loi d'Archie, 1942).	29
3. Calcul de la conductivité de l'eau (Cw) (<i>Waxman et Smits 1968</i>).....	29
4. Courbes obtenues/synthèse géophysique.	30
C. Synthèse, hypothèses sur les résultats obtenus et résolution des problématiques.	33
C.1. Corrélation log litho, diagraphies et log calculés.	33
C.2. Rôle du glissement de terrain sur les lithologies et circulations de fluides.....	35
C.3 Bloc 3D de la zone d'études indiquant les différents chemins de migration des fluides (schéma bilan).	37
C.4. Evolution des zones de circulation dans le temps.....	38
Conclusion sur le stage :	41
Source :	42

Table des illustrations :

Figure 1 : Localisation de la zone d'étude en France et dans l'Hérault (source : Google map).	0
Figure 2 : Glissements de terrain recensés dans la région (source : Infoterre).	1
Figure 3 : Figures illustrant le contexte géologique régional à différentes échelles.	3
Figure 4: Coupe schématique d'un glissement de terrain à proximité de Fontréboule (source : d'après M. LOPEZ, non publié).	4
Figure 5 : Carte de résistivité Imageau mettant en évidence l'évolution des anomalies de résistivité dans le temps (source : Imageau).	6
Figure 6 : Données de fibre optique Imageau, indiquant la date et la profondeur auxquelles se sont produites les contraintes mécaniques dans le puits de forage (source : Imageau).	7
Figure 7 : Pression en fonction du temps à 4 profondeurs différentes.	8
Figure 8: Argilite massive noire du Trias évaporitique.	11
Figure 9 : Argilite avec bancs d'anhydrite de taille variable.	11
Figure 11: Banc d'anhydrite massif avec intercalation de fins bancs d'argile.	12
Figure 10: Banc d'anhydrite massive.	12
Figure 12: Photos des multiples géométries trouvées sur les carottes des pustules d'anhydrite.	13
Figure 13 : Différentes couleurs des marnes rhétiennes dans le forage SC.1. Sur la dernière photo, nous observons des blocs effondrés de dolomudstone dans les marnes du Rhétien.	14
Figure 14: Dolomudstone du Rhétien.	14
Figure 15 : Pseudomorphose observable dans le dolomudstone.	14
Figure 16: Argilite noire incohésive.	15
Figure 17 : Classification des roches de faille (source : d'après Sibson (1977) et repris par Lin (2008)).	15
Figure 18: Roche de faille de type gouge.	16
Figure 21 : Protocataclasite avec clastes de taille pluri millimétrique à pluricentimétrique de nombreuses origines.	17
Figure 19 : Ultracataclasite avec des clastes de taille centimétrique d'évaporite.	17
Figure 20 : Cataclasite avec clastes de taille décimétrique d'argilite verte/anhydrite.	17
Figure 22 : brèche mécanique monogénique hétérométrique.	18
Figure 25: Brèche monogénique, hétérométrique avec clastes de dolomudstone et matrice marneuse.	19
Figure 24: Grès grossiers avec clastes allochtones de différentes origines.	19
Figure 23 Microbrèche polygénique hétérométrique composée de claste allochtone de plusieurs origines (argilite noire, verte, rouge, grès fin...)	19
Figure 27 : Fente de tension d'ouverture pluri cm avec un colmatage d'anhydrite. La fente de tension n'est pas exactement verticale, probablement à cause d'une rotation due au glissement de terrain.	20
Figure 26 : Fente de tension avec un colmatage de gypse fibreux et d'ouverture millimétrique.	20
Figure 29 : Fente horizontale avec un colmatage de gypse fibreux et une géométrie en relais connectés.	21
Figure 28 : Fentes diffuses à colmatage de gypse/anhydrite.	21
Figure 30 : Annotation de chaque anomalie observable grâce à l'observatoire de résistivité.	22
Figure 31 : Log lithologique/granulométrique/mécanique bilan (source : Giovannangeli Nicolas).	24
Figure 32: Log de Vshale obtenu grâce au logiciel Techloh.	27
Figure 33: Colonne lithologique.	
Figure 34: Courbe de Vshale calculé.	
Figure 35: Courbe porosité calculée + GR.	
Figure 36: Courbe facteur de formation calculé+ GR.	
Figure 37 : Courbe conductivité de l'eau calculée.	32
Figure 38 : Corrélations déformation mécanique, log litho, diagraphies et courbes calculées (source : Giovannangeli Nicolas).	34
Figure 39 : Blocs 3D hypothétiques de l'évolution/formation au cours du temps des lithologies et des zones de circulation de fluides dans la couche savon d'un glissement de terrain (explication ci-dessous) (source : Giovannangeli Nicolas).	35
Figure 40 : Chemins de migration prouvés ou supposés avec leurs lithologies associées (source : Giovannangeli Nicolas) + Log lithologique de la zone (source : d'après M. LOPEZ, non publié).	37
Figure 41 : Corrélations pluviométrie/pression dans les zones de circulation/anomalies de résistivité. (Source : Giovannangeli Nicolas).	38

Ce rapport de stage s'effectue dans le cadre de la finalisation du Master Géologie des Réservoirs ou GR2M (année 2012/2014). Ce stage s'est effectué au sein de l'équipe Transferts en Milieux Poreux (TMP) rattaché au Laboratoire Géosciences Montpellier.

Il s'est déroulé de début mars jusqu'à fin juillet sous la direction du directeur de recherche Philippe Pezard et du Docteur Stéphanie Gautier.

Introduction générale.

Ce stage s'intègre dans un projet de recherche qui a débuté en 2012 et qui porte sur l'étude de la dynamique et l'évolution spatio-temporelle d'un glissement de terrain.

La zone choisie pour cette étude se situe dans le département de l'Hérault en France, proche du village de Pégairolles-de-l'Escalette (arrondissement de Lodève), localisé à environ 50km au Nord-Ouest de Montpellier (voir figure 1). Ce site a été sélectionné pour sa facilité d'accès, ainsi que pour les nombreux recensements de glissements de terrain dans cette zone (voir figure 2).



Figure 1 : Localisation de la zone d'étude en France et dans l'Hérault (source : Google map).

La problématique très large de ce projet d'étude est d'essayer de caractériser le lien entre les épisodes cévenoles¹, l'infiltration des eaux météoriques, la semelle de glissement et le déclenchement des glissements de terrain.

Dans la région, un facteur primordial à l'amorçage de ces glissements de terrain se caractérise par une semelle de glissement ou semelle "savon" composée de roches évaporitiques et d'argilite datant du Trias. L'étude des caractéristiques géologiques de cette couche savon est un des enjeux majeurs dans la compréhension des glissements de terrain. C'est au niveau de l'analyse de cette semelle de glissement que se concentrera mon travail.

Ce rapport se construira de la façon suivante et en trois parties :

Dans un premier temps nous introduirons précisément la zone d'étude avec la présentation du contexte géologique de la région ainsi que la description du phénomène de glissement de terrain. Puis, la description de l'outillage mis en place sur site afin de récolter les données géophysiques/géochimiques/géologiques/hydrogéologiques. Les données acquises avant le début du déroulement de mon stage seront également présentées.

A la fin de cette partie, la contribution de mon stage, mon travail, ainsi que mes problématiques seront clairement énoncées.

Dans un second temps, nous étudierons mes travaux, séparés en une partie traitant de géologie, et une partie traitant de géophysique.

Dans un troisième et dernier temps, l'analyse, la mise en relation et la synthèse de mes résultats pluridisciplinaires seront effectués. Puis nous essaierons de répondre aux problématiques (les problématiques sont annoncées page 9).

Des modèles géologiques visant à expliquer l'évolution et les facteurs déclenchants du glissement de terrain seront alors proposés.

Nous terminerons par la mise en perspectives de ces résultats et une présentation des travaux futures à mener.

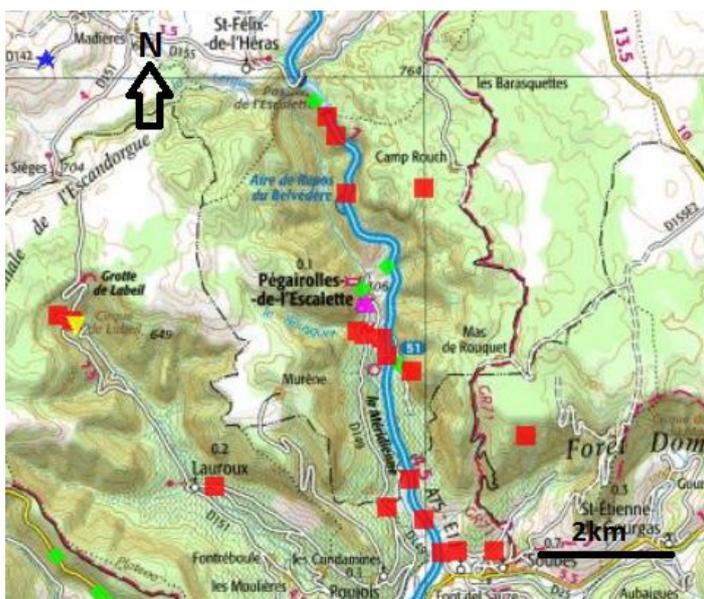


Figure 2 : Glissements de terrain recensés dans la région (source : Infoterre).

¹ Episodes cévenoles : Il s'agit d'orages très violents et fortement localisés, qui s'accompagnent de pluies diluviennes, entraînant dans la majeure partie des cas, des inondations et se déroulent en septembre, octobre et novembre.

I. Présentation de la zone d'étude.

Comme nous pouvons le constater dans la figure 2 ci-dessus, les glissements recensés dans la région sont nombreux, notamment aux abords de l'autoroute A75.

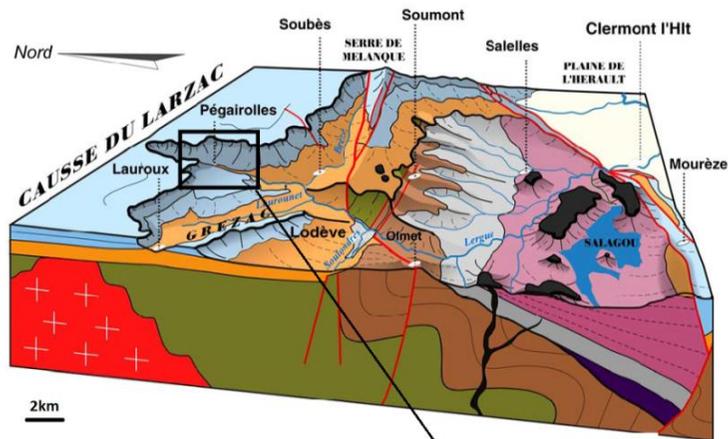
Dans cette partie nous présenterons de la façon la plus précise possible la zone d'étude en partant du général à grande échelle avec le contexte géologique de la région et, la morphologie du glissement de terrain. Puis, nous en arriverons à notre zone d'étude ou nous étudierons les données de logging recueillies par l'intermédiaire de forages.

A. Contexte géologique régional et local.

La zone d'étude se localise au Sud des Causses du Larzac, et au Nord du bassin de Lodève proche du village de Pégairolles-de-l'Escalette (voir figure 3, Bloc 3D de la région de Lodève). Les lithologies à proximité de la zone étudiée sont :

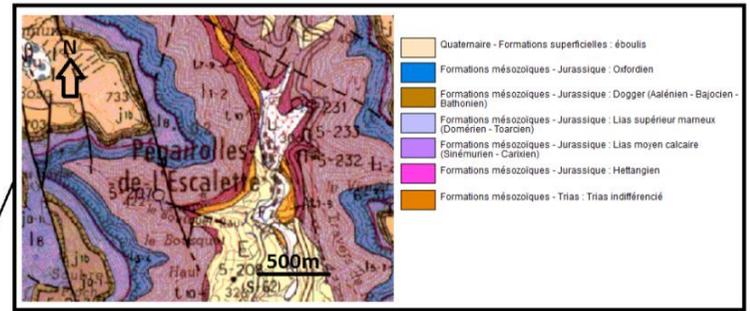
- Le Jurassique constituant Les Causses du Larzac. Ce sont des carbonates karstifiés², nivelés par l'érosion, allant du Lias (Jurassique inférieur composé de dolomies, calcaires, marnes) jusqu'au Dogger (Jurassique moyen, composé de dolomies massives) (voir Carte géologique et Bloc 3D des Causses du Larzac dans la figure 3). Ces carbonates proviennent de plateforme continentale.
- Sous les Causses, nous retrouvons le Trias composé de conglomérats, de grès et d'argiles évaporitiques (voir figure 3, Bloc 3D des Causses du Larzac et Log lithologique).
Le Trias affleure à certains endroits à proximité de notre zone d'étude comme en témoigne la carte géologique (figure 3). Les environnements de dépôts du Trias sont des environnements fluviaux de type plaines d'inondations, playas ou deltas.
- En discordance sur le Trias, le Permien rouge (Saxonien, composé de pélites, siltites et de grès rouges comportant un pendage d'environ 25-30° vers le Sud) et le Permien gris (Authunien composé de grès et d'argilites noires) (voir figure 3, Bloc 3D des Causses du Larzac et Log lithologique).
Les lithologies du Permien constituent le bassin de Lodève et sont des dépôts de type continentaux.
- Toujours en discordance avec le Trias mais plus au Nord, nous retrouvons les lithologies du Cambrien-Précambrien constituées de grès, dolomies, schistes et calcschistes (voir figure 3, Bloc 3D des Causses du Larzac et Log lithologique).

² Karst : en géomorphologie un karst est une structure formée par l'érosion hydrochimique et hydrolique dans des formations carbonatées.

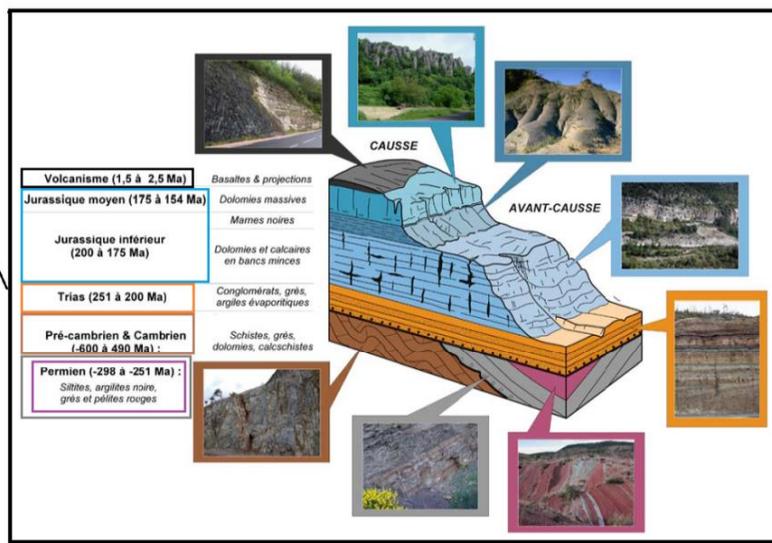


- Failles
- Quaternaire, formations superficielles, éboulis
- Plio-Quaternaire, basalts
- Jurassique, plate forme carbonatée
- Trias, conglomérats, grès, argiles évaporitiques
- Permien "rouge", pélites et grès
- Permien "gris", argiles noires, grès
- Crétacé supérieur, grès et charbon
- Cambrien jusqu'à Dévonien, schists, carbonates et grès
- Granite du Mendic
- Précambrien, schists et grès

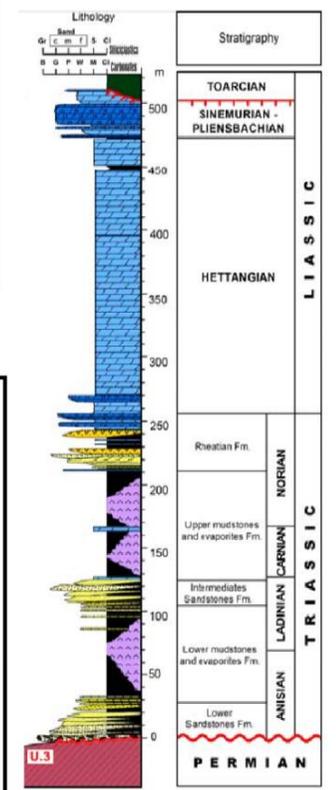
Bloc 3D de la région de Lodève



Carte géologique des environs de Pégairolle de l'Escalette



Bloc 3D des Causses du Larzac



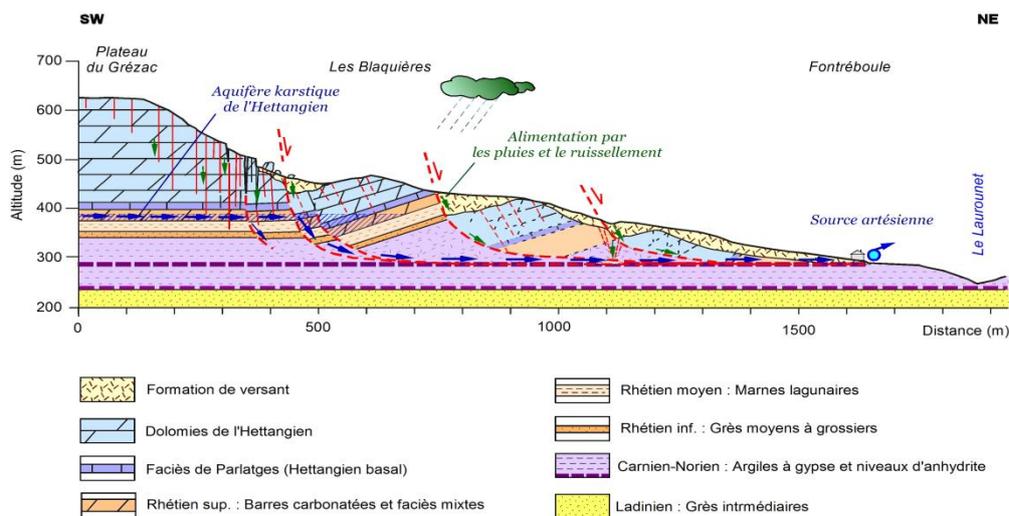
Log lithologique des environs de Pégairolle de l'Escalette

Figure 3 : Figures illustrant le contexte géologique régional à différentes échelles.

(Sources : bloc 3D Lodève : source inconnue/Carte géol : site infoterre/Bloc 3D Causses + Log litho : d'après M. LOPEZ, non publié.)

B. Morphologie et déclenchement des glissements de terrain.

Le but de cette partie est de comprendre à grande échelle la géométrie des glissements de terrain ainsi que les lithologies affectées.



La coupe ci-dessus a été réalisée à quelques kilomètres de Pégairolles-de-l'Escalette. Nous pouvons admettre que les lithologies sont identiques et les phénomènes à l'origine des glissements de terrain restent inchangés par rapport à notre zone d'étude. Comme observé sur la coupe, le glissement de terrain se manifeste par le décrochement des calcaires des Causses et du sommet du Trias supérieur (Rhétien) par le biais de failles normales prenant racine dans le Trias datant du Carnien-Norien. Les lithologies du Carnien-Norien sont constituées d'argiles comprenant des niveaux évaporitiques. Ces lithologies feraient office de semelle de glissement. La circulation de fluides en profondeur, serait avec la semelle de glissement, les conditions sine qua non du déclenchement des glissements de terrain. Les failles normales et la fracturation des karsts des Causses constituent de très bons chemins de migration pour la circulation des fluides. Ces derniers peuvent provenir des eaux météoriques ou des nombreux aquifères présents dans la région (notamment dans les carbonates du Jurassique). La condition étant que ces chemins de circulation permettent la migration des fluides jusqu'à la semelle de glissement Triasique. Le rôle des fluides dans la semelle de glissement serait alors le suivant : les couches d'évaporites présentes dans les argiles du Carnien-Norien seraient initialement des anhydrites de formule chimique CaSO_4 . Si de l'eau est mise en contact avec l'anhydrite, elle s'hydrate et devient du gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Le gypse est une roche très friable³, plus que l'anhydrite.

Cette transformation minérale associée aux phénomènes suivants peut entraîner une déstabilisation des versants (Source : Société SI (société d'ingénierie eau et environnements), juillet 2008.) :

³ Sur l'échelle de Mohs le gypse est à 2 contre 3,5 pour l'anhydrite. L'échelle de dureté de Mohs permet de mesurer la dureté relative ou la résistance des différents minéraux. Elle est graduée de 1 à 10 avec 10 pour les minéraux les plus résistants.

- La pluviométrie (période de pluie intense).
- La pesanteur (poids des lithologies lié à leur épaisseur et reposant sur des argiles ou marnes).
- La morphologie du versant (pente).
- L'affaiblissement des Causses du Larzac due à la karstification et l'érosion facilitant leur déstabilisation.
- La circulation de fluides en profondeur (les fluides peuvent contribuer à abaisser le seuil de rupture des roches en plus des transformations minérales).

C. Présentation de la zone d'étude et des données acquises.

Cette partie traite des données recueillies par l'équipe Transferts en Milieux Poreux (TMP) avant le début de mon stage. Ces données sont souvent brutes et non analysées.

Pour caractériser au mieux la zone, une approche multi-échelles et pluridisciplinaire mêlant des méthodes géologiques/géophysiques/géochimiques ont déjà été réalisées ou sont en cours de réalisation. Un autre enjeu de ce projet sera d'assurer la corrélation de ces données ainsi que leur interprétation.

Trois forages ont été réalisés dans notre zone d'étude. Peg1, Peg2 et Peg3. Deux d'entre eux ont été carottés (Peg1 et Peg2), cependant la lithologie du Trias n'a pas été atteinte avec Peg1.

C.1. Les données géophysique.

1. Les données de login.

Lors de la mise en place de ce forage en 2012, de nombreuses diagraphies ont été réalisées dans le forage Peg2/Peg3.

Nous avons ainsi à notre disposition les données de logging suivantes :

- Données de gamma ray (GR) : permet de mesurer la radioactivité naturelle du milieu. La sonde "compte" les rayonnements gamma émis lors de la désintégration des éléments Uranium, Thorium et Potassium propres à chaque lithologie. La somme de ces trois courbes nous donne la courbe de gamma ray total.
Un avantage notable, en plus de la mise en évidence des différentes lithologies, est que le gamma ray n'est pas sensible aux fluides traversés dans les formations géologiques. Nous pourrons ainsi en sortir des informations sur le squelette de la roche.
- Données de résistivité : l'injection de courant dans les différentes formations géologiques nous permet d'obtenir leurs résistivités. Cette méthode prend en considération la nature du fluide présent traversant les formations.

(Notons que la réponse diagraphique des évaporites présentes dans la couche savon semble être un faible GR et une forte résistivité).

- Le sonique est une méthode de diagraphie permettant de mesurer la vitesse de propagation des ondes sismiques (onde P) dans les lithologies grâce à un système émetteur-récepteur.
- Données sur la conductivité des fluides au sein du forage : information sur la composition des fluides en présence, notamment sur leurs salinités.

2. L'observatoire Imageau.

Dans le forage Peg2, un observatoire géophysique développé par l'entreprise Imageau a été mis en place.

Il permet la mesure quotidienne et automatique de la résistivité électrique à une échelle métrique. Ces mesures permettent la construction d'une carte de résistivité, mettant en avant la variation de cette dernière dans le temps (voir figure 5 ci-dessous). Ces données montrent par exemple l'évolution et la composition des fluides traversant les lithologies. Elle est souvent mise à jour afin de suivre l'évolution dans le temps de ces fluides.

Une circulation de fluide sera observable sur la carte Imageau par une anomalie de couleur rouge ou bleue ponctuelle et non continue.

Une anomalie de résistivité rouge, représente une forte résistivité donc des eaux plutôt douces. A l'inverse une anomalie bleue représente une faible résistivité, correspondant à des eaux plus salines provenant sûrement de la dissolution des évaporites.

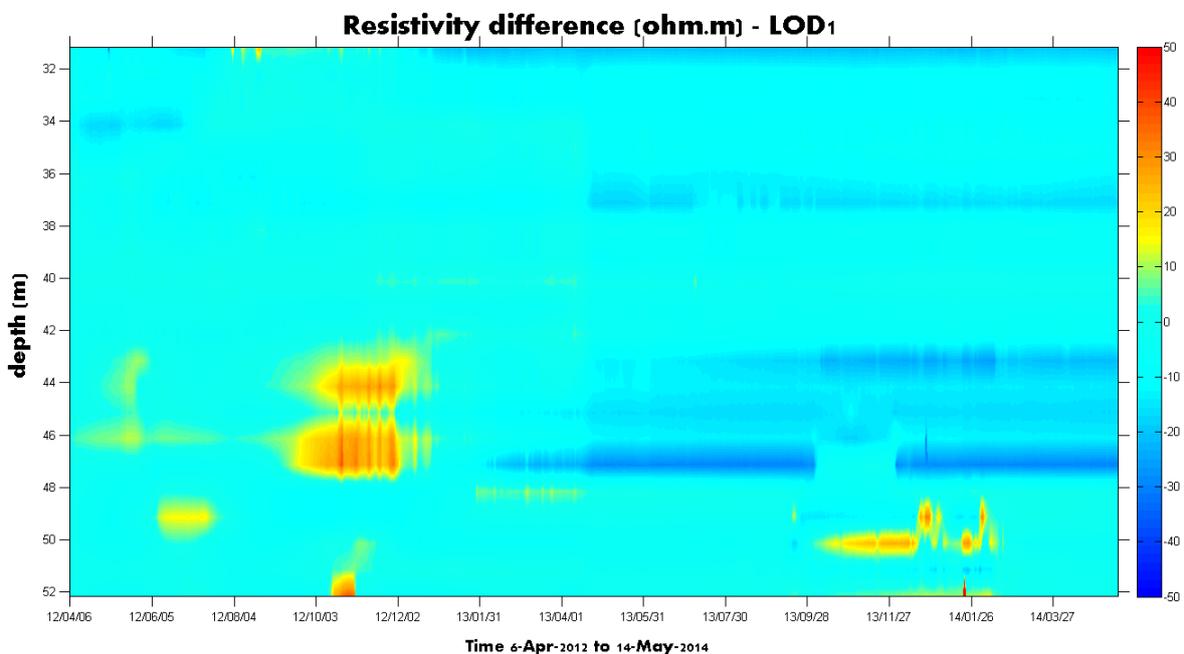


Figure 5 : Carte de résistivité Imageau mettant en évidence l'évolution des anomalies de résistivité dans le temps (source : Imageau).

L'échelle ne représente pas des valeurs absolues de la résistivité des fluides mais un différentiel basé sur une valeur de résistivité de référence (0 représenté en bleu clair) qui constitue la valeur de départ au moment de l'installation.

Il sera de mon travail de déterminer quelles lithologies sont associées à ces anomalies de résistivités.

Dans ce même forage (Peg2), une fibre optique à une échelle métrique permet de visualiser les contraintes appliquées sur le forage mettant ainsi en avant l'évolution spatio-temporelle de la déformation du glissement de terrain.

FO Strain (evolution from march 2012)

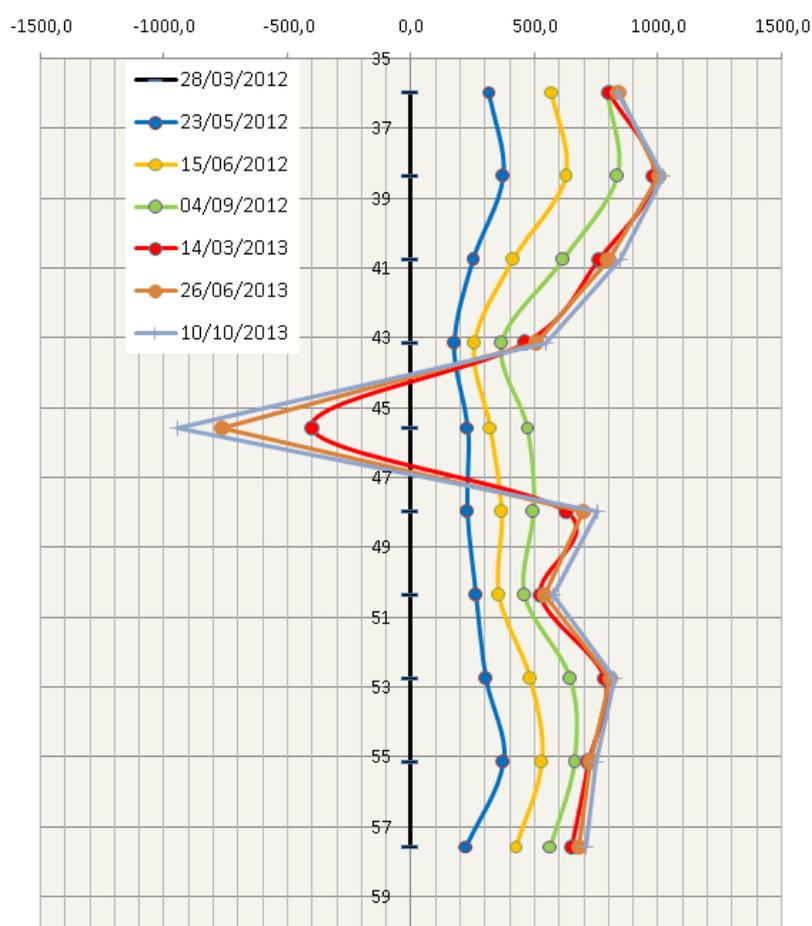


Figure 6 : Données de fibre optique Imageau, indiquant la date et la profondeur auxquelles se sont produites les contraintes mécaniques dans le puits de forage (source : Imageau).

Comme l'indique la fibre optique dans la figure 6, une contrainte mécanique a déformée le puits à 45m du 14/03/13 au 10/10/13. Il sera de mon travail de déterminer quelle lithologie est affectée par la déformation mécanique.

C.2. Les données hydrogéologiques/géochimiques obtenues par Westbay.

Dans le forage Peg3, quatre ports Westbay ont été installés (34m, 45m, 48m, 56m). Ils servent de port à une sonde (sonde MOSDAX) permettant de prélever et d'analyser mensuellement la qualité de l'eau traversant les formations à ces quatre profondeurs distinctes. Nous obtenons ainsi de nombreuses données hydrogéologiques et géochimiques (évolution au cours du temps des éléments chimiques contenus dans l'eau, la conductivité, le Ph, la température et la pression).

L'information qui nous intéresse est l'évolution de la pression des fluides au cours du temps (figure 7 ci-dessous). Nous remarquons que sur les 4 tracés, il y a une corrélation des courbes deux à deux qui se suivent parfaitement (56m avec 48m et 45m avec 34m).

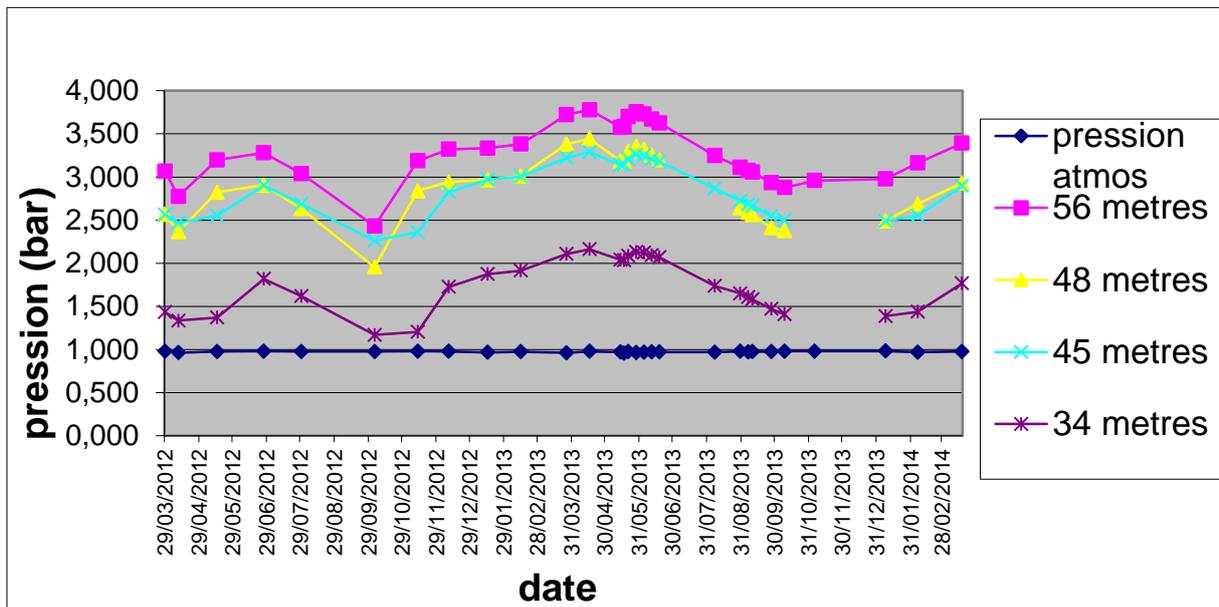


Figure 7 : Pression en fonction du temps à 4 profondeurs différentes.

Cette corrélation des variations identiques deux à deux des pressions des fluides au cours du temps semble indiquer deux systèmes d'aquifères distincts ou du moins deux zones de circulation de fluides séparées par une potentielle barrière imperméable située entre 45 et 48m.

C.3. Les données géologiques.

Lors du début de mon stage, les données géologiques sur la zone de terrain n'avaient pas été développées.

Comme dit précédemment le forage Peg2 a été carotté sur 33m, mais n'avait pas été analysé.

D. Présentation de mon rôle dans ce stage, du travail effectué et de mes problématiques.

Jusqu'à présent, toute la partie préliminaire de mon rapport de stage se basait sur un travail bibliographique ou sur la présentation des données déjà acquises.

Cette partie introduit les problématiques de mon stage ainsi que mon rôle et mes travaux dans ce projet sur les glissements de terrain. Comme dit précédemment, le forage Peg2 a été carotté. Une importante partie de mon stage a été d'étudier ces carottes pour pouvoir monter dans un premier temps un log structural extrêmement détaillé des lithologies et de la micro tectonique, puis, construire dans un second temps un log granulométrique, lithologique et mécanique simplifié. Ce log sera la base de ma réflexion, et une grande partie de mon travail s'articulera autour. Il permettra la mise en évidence des lithologies traversées par les fluides observables grâce aux anomalies de résistivité Imageau.

Les différents aspects de mes travaux durant le stage ont été les suivants :

- Un travail bibliographique et sur les données déjà acquises pour cerner au mieux le sujet de stage.
- Mission au CEREGE (Centre de Recherche et d'Enseignement de Géosciences) à Aix en Provence pour découper le PVC protégeant les carottes.
- Analyser les carottes pour monter un log structural détaillé.
- Prendre en photo les carottes pour les sauvegarder de leur usure par le temps et les rabouter grâce au logiciel Photoshop (pour que la qualité des photos soit la plus nette possible, plusieurs photos de chaque fragment des carottes ont été réalisées).
- Monter un log lithologique simplifié résumant les informations tectoniques, lithologiques et mécaniques les plus importantes.
- Réaliser des fiches détaillées sur les lithologies ainsi que sur les figures tectoniques rencontrées sur les carottes et introduire la notion de roche de faille. Etablir les électrofaciès des lithologies dominantes.
- A partir des données acquises par logging calculer le facteur de formation (F), la porosité (ϕ), la conductivité de surface (Cs) et la conductivité de l'eau (Cw).
- Mettre en commun les logs acquis (gamma ray, résistivité, conductivité...) et les logs calculés (F, ϕ , Cw).
- Construire plusieurs modèles géologiques contraignant au mieux la zone d'étude.

Comme nous l'avons dit dans l'introduction, la problématique très large de ce projet d'étude est d'essayer de caractériser le lien entre les épisodes cévenols, l'infiltration des eaux météoriques, la semelle de glissement et le déclenchement de glissements de terrain.

Ma contribution à ce projet sera de mettre en avant les spécificités géologiques entourant les glissements de terrain en basant mon analyse sur les caractéristiques des lithologies en présence et aux fluides les traversant.

Les problématiques que j'ai essayé de résoudre durant mon stage sont les suivantes :

- Quelle est l'action des glissements de terrain sur les lithologies ainsi que sur la circulation des fluides en profondeur ? Quelles sont les lithologies affectées par le glissement de terrain ?
- Comment peut-on expliquer les variations de la composition des fluides marquées par les anomalies de résistivité Imageau?

II. Présentation de mes travaux.

Cette seconde partie traite des résultats obtenus et de la présentation de mes travaux. Elle se développera en 3 parties : géologie, géophysique, synthèse des résultats.

A. Partie géologie.

La partie géologie de mon travail a consisté à décrire les carottes du forage SC.1 du puits Peg2 carotté sur 33m. Il a été carotté à partir de 32m jusqu'à 65m de profondeur avec 28 carottes de tailles variables entre 38 et 158cm avec un diamètre d'environ 10 à 12cm.

Les lithologies carottées correspondent au Trias supérieur (du Norien jusqu'au Rhétien ~ 228 à 201,3 Ma).

Ce forage traverse la semelle de glissement et met en avant les lithologies allochtones, transportées, remobilisées et broyées par le glissement de terrain, ainsi que les lithologies en place autochtones.

La partie géologie présentera : le log structural (voir rapport annexe), la description tectonique et lithologique des lithologies étudiées, et le log lithologique/mécanique/granulométrique.

A.1. Le log structural (rapport annexe).

Le résultat de la description détaillée au centimètre des 33m de carotte est consultable sur le rapport annexe à mon mémoire.

Le log structural à l'échelle ~1/10 est constitué de 15 pages décrivant avec précision les lithologies, leurs caractéristiques ainsi que les structures tectoniques les affectants. Les caractéristiques lithologiques sont décrites avec une écriture noire, l'écriture rouge concerne toutes les descriptions ayant un rapport avec la tectonique (veines, micro-plissement, fentes de tension...).

Des photos zoomées sur les zones remarquables des carottes sont répertoriées sur le log structural et consultable en fin du rapport annexe ainsi que les photos des 28 carottes entières.

La description commence à 65m de profondeur dans le Norien (ou Trias évaporitique) et se termine à 32m dans les lithologies du Rhétien.

A.2. Description des lithologies et des microstructures.

1. Le Trias évaporitique ou Norien (~228-208,5 Ma).

Le Norien est la seconde partie du Trias supérieur qui est séparée en trois parties (Carnien, Norien, Réthien). Le Trias évaporitique constitue la base du forage jusqu'à environ 43m. Ces lithologies sont dans la partie basse du forage en place et non affectées par les cisaillements causés par le glissement de terrain (de 65 à 52m), ou affectées par le cisaillement et remobilisées en roches de faille (de 52m à environ 43m). Les roches de faille seront décrites page 15.



a. Les argilites massives.

Argilites massives de couleur variant de noir au gris/noir. C'est la lithologie dominante du Norien observable sur les carottes du forage SC.1.

Figure 8: Argilite massive noire du Trias évaporitique.

b. Les argilites massives avec intercalation de bancs d'anhydrite/gypse.



Figure 9 : Argilite avec bancs d'anhydrite de taille variable.

Intercalation de bancs d'argilite/gypse dans les argilites massive. La taille de ces bancs est très variable pouvant aller du millimètre à plusieurs centimètres. Leur couleur varie de blanc laiteux à blanc très clair.

Les bancs d'anhydrite restent majoritaires par rapport aux bancs de gypse. Notons que les bancs proches des zones de déformation sont cependant plus souvent des bancs de gypse. Le gypse peut donc dans le cas des glissements de terrain être un marqueur de déformation plus intense.

Il est parfois possible d'observer un léger plissement des bancs évaporitiques comme à 43cm sur la photo ci-contre.

c. Les bancs massifs d'anhydrite avec intercalation de fins bancs d'argilite.



Figure 11: Banc d'anhydrite massive.

Bancs d'anhydrite massive de couleur blanchâtre à marron blanchâtre. Intercalation fréquente de bancs très fins (<1 mm) d'argilite (voir figure 11 aux 2 extrémités : alternance banc très fin argilite/anhydrite) et quelques bancs de taille centimétrique. Ce type de lithologie n'a été observé qu'une seule fois sur le forage SC.1.

Certains des bancs fins d'argilite sont complètement irréguliers et plissés (voir figure 11). Ces plissements des micros bancs d'argilite peuvent potentiellement être dus à une surcharge verticale causée par les bancs denses d'anhydrite lorsque l'argilite n'était pas encore consolidée peu après leur dépôt.



Figure 10: Banc d'anhydrite massif avec intercalation de fins bancs d'argile.

d. Les pustules d'anhydrite/gypse.

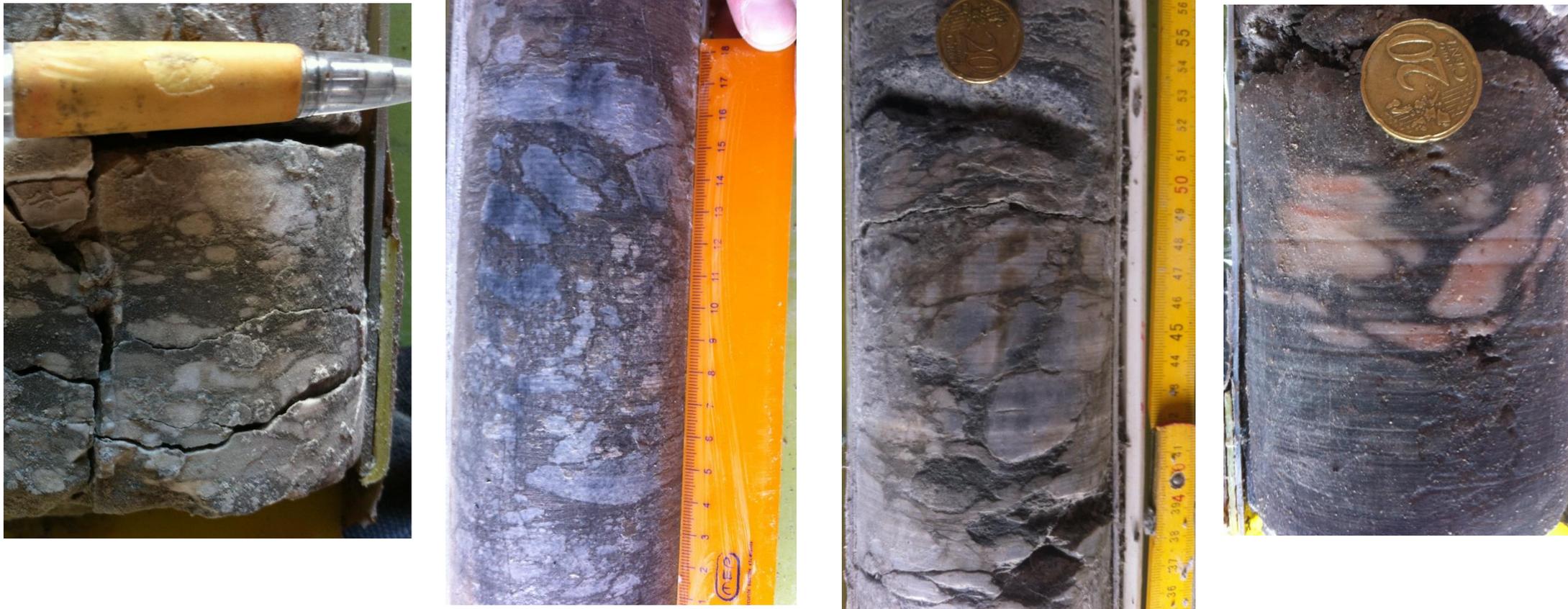


Figure 12: Photos des multiples géométries trouvées sur les carottes des pustules d'anhydrite.

Les pustules de gypse sont localisées à proximité des zones de cisaillement. Leur taille est très variable (pluri millimétrique à pluri centimétrique voir parfois décimétrique) ainsi que leur pourcentage de distribution par rapport à l'argilite ($\approx 20\%$ jusqu'à $\approx 95\%$). Leur organisation géométrique est le plus souvent observable est en chicken wire (photo 3 en partant de la gauche). Il est possible de les trouver sous la forme de brèches sédimentaires d'anhydrite (photo 2 en partant de la gauche) ou sous forme plus éparse (photo 1 et 4).

2. Le Rhétien (~ 208,5-201,3 Ma).

Le Rhétien est le dernier étage géologique du Trias supérieur. Les lithologies du Rhétien semblent apparaître aux alentours de 43m sur le forage et vont jusqu'à son sommet à 32m. Ces lithologies sont affectées de façon plus ou moins importante par les cisaillements provoqués par les glissements de terrain.

a. Les marnes

Le Rhétien est facilement identifiable grâce à ces marnes/argiles bariolées prenant de nombreuses teintes de couleurs différentes (rouge, kaki clair à foncé, violet, vert clair, vert foncé, vert gris, noir, ou un mélange de ces couleurs).

Il est parfois possible de trouver dans ces marnes des veinules de couleur noire ou transparentes et d'ouverture inférieure au millimètre.



Figure 13 : Différentes couleurs des marnes rhétiennes dans le forage SC.1. Sur la dernière photo, nous observons des blocs effondrés de dolomudstone dans les marnes du Rhétien.

b. Le dolomudstone.

Nous rencontrons aussi des dolomudstones au sommet du forage en général de couleur beige ou gris. Ces dolomudstones peuvent comporter des pseudomorphoses de gypse ou d'anhydrite.



Figure 14: Dolomudstone du Rhétien.



Figure 15 : Pseudomorphose observable dans le dolomudstone.

c. Les argilites noires foncées.



Dans les carottes, elles apparaissent sous forme de clastes incohésifs de taille pluri centimétrique. Il n'est pas facile de dire si cette incohésion est due au forage ou si nous sommes en présence d'une roche légèrement affectée par le cisaillement (brèche de faille incohésive (voir notion de brèche de faille page 18).

Figure 16: Argilite noire incohésive.

3. Les roches de faille.

Les roches de faille sont des lithologies remaniées/broyées lors des cisaillements, provoqués dans notre cas par le glissement de terrain. Ce remaniement/broyage s'appelle la cataclase. Les roches de faille sont répertoriées en une charte (voir figure 17, partie Domaine fragile) qui classe les roches en fonction de leur % de matrice par rapport aux fragments de roche en présence (fragments provenant des anciennes lithologies broyées). Plus la déformation est

importante et plus le % de matrice par rapport aux fragments sera important. Lorsque nous trouvons de la gouge (100% de matrice, non représenté dans le tableau), la déformation est très élevée.

Ainsi, le type de roches de faille en présence nous donne une indication sur l'intensité de la déformation, et donc directement sur la proximité de la roche par rapport au cisaillement.

	Domaine fragile		Domaine ductile			
Réduction de taille de grain domine la croissance par recristallisation	Brèche (fragments < 0,5 cm)					0-10%
	Brèche fine (0,1 cm < fragments < 0,5 cm)					
	Microbrèche (fragments 0,1 cm)					
	Série cataclastique	Procataclasite	Série mylonitique	Protomylonite		10-50%
Cataclasite		Mylonite		50-90%		
	Ultracataclasite		Ultramylonite	Phyllonite	90-100%	
Croissance de grain prononcé	?	Blastomylonite				

Figure 17 : Classification des roches de faille (source : d'après Sibson (1977) et repris par Lin (2008)).

Sur les carottes étudiées, les cisaillements transformant les lithologies en roches de faille semblent affecter le Norien et le Rhétien. La transition sur les carottes entre ces roches de faille engendrées par le glissement de terrain et les lithologies en place semble apparaître à 52m.

Dans la description de ces roches, nous allons aller des roches les plus broyées aux moins broyées.

a. Les gouges.



Les gouges sont des roches où le gradient de déformation a été le plus intense. Le pourcentage de matrice est proche de 100% et aucune structure de la roche avant broyage n'est visible.

Sur la carotte étudiée environ 90% de la gouge était de la gouge marneuse (par opposition à la gouge argileuse) traduisant une portion de carbonate.

Les carbonates peuvent avoir deux origines :

- Les roches avant leur remaniement comportaient déjà une fraction carbonatée.
- Des fluides riches en carbonate ont circulé après ou pendant le cisaillement.

Figure 18: Roche de faille de type gouge.

b. Les séries cataclasites.

Nous pouvons séparer les cataclasites en trois types en fonction de leur pourcentage de matrice par rapport aux clastes provenant de la roche avant son broyage. Le symbole pour représenter ce phénomène de cataclase sur le log lithologique (voir page 24) est le suivant :



Type de roche de faille	Pourcentage matrice
Ultracataclasite	90-100%
Cataclasite	50-90%
Protocataclasite	10-50%

La taille des clastes en présence est très variable, allant de plusieurs mm à la taille décimétrique avec tous les intermédiaires. Au niveau de leur forme ils sont anguleux à subanguleux.

L'origine des clastes est très locale, car ce sont des morceaux de roche hérités des lithologies avant leur broyage, on peut ici parler de claste autochtone. Les lithologies des clastes retrouvés sont :

- Argile/marne verte.
- Argilite verte.
- Argilite verte + anhydrite.
- Argilite noire.
- Gypse.
- Anhydrite.
- Argilite rouge.
- Grès fin.

Figure 20 : Ultracataclasite avec des clastes de taille centimétrique d'évaporite.



Figure 21 : Cataclasite avec clastes de taille décimétrique d'argilite verte/anhydrite.



Figure 19 : Protocataclasite avec clastes de taille pluri millimétrique à pluricentimétrique de nombreuses origines.



c. Les brèches mécaniques (ou brèches cataclastiques).



Ce sont les roches affectées par le cisaillement où le gradient de déformation est censé être le moins important.

La lithologie de la roche affectée reste clairement visible mais est débitée en clastes anguleux de la même origine (pas de remobilisation) de taille pluri centimétrique. Ils sont plus ou moins cohésifs et pas toujours soutenus par une matrice.

Nous trouvons plusieurs sortes de brèches variant en fonction de la taille et l'origine des clastes. La plupart du temps les brèches sont monogéniques et les clastes sont de type marneux, argileux, ou dolomudstone.

Notons que les brèches peuvent être confondues avec une "bréchification" des lithologies due aux effets de forage. Nous pouvons cependant supposer que les roches qui sont affectées par le forage possédaient déjà des zones de fragilité préférentielles engendrées par le cisaillement.

Les brèches mécaniques mises en place pendant le cisaillement semblent cependant avoir une certaine cohésion et des plans de clivages préférentiels.

A l'inverse les effets de bréchification dus au forage semblent être identifiables par une absence de matrice et des clastes très peu voire pas du tout cohésifs (comme par exemple les argilites du Rhétien page 15).

Sur le log lithologique (voir page 24) ces brèches mécaniques engendrées par cisaillement sont représentées par ce symbole :



Figure 22 : brèche mécanique monogénique hétérométrique.

d. Les zones de drainage.



Figure 25 Microbrèche polygénique hétérométrique composée de claste allochtone de plusieurs origines (argilite noire, verte, rouge, grès fin...)

Une particularité que nous retrouvons dans les roches de faille est l'observation sur les carottes de lithologies de type grès grossier/brèche avec des constituants arrondis mis en place par le drainage de clastes par la circulation de fluides. Ce sont donc des clastes que nous pouvons qualifier d'allochtones avec des origines lithologiques différentes. L'épaisseur de ces lithologies varie d'environ 1 cm à pluridécimétrique. La granulométrie des clastes les constituant varie de la taille millimétrique à centimétrique. Ils n'atteignent que très rarement la taille pluri centimétrique. Un trait récurrent de ces clastes est qu'ils sont arrondis et souvent polygéniques, caractère permettant de les différencier des brèches mises en place mécaniquement (clastes monogéniques et anguleux).

Souvent les brèches mécaniques offrant des zones de circulation de fluides préférentielles (à cause de leur forte porosité intergranulaire) sont associées à ces clastes allochtones. Ainsi certaines brèches sur les carottes semblent avoir des clastes d'origine mécanique autochtones ainsi que des clastes allochtones transportés par les fluides.



Figure 24: Grès grossiers avec clastes allochtones de différentes origines.



Figure 23: Brèche monogénique, hétérométrique avec clastes de dolomudstone et matrice marneuse.

Ces zones de circulation de fluides peuvent être attribuées à d'anciennes couches d'anhydrite qui par hydratation sont devenues du gypse. Le gypse moins compétent a été lessivé par la circulation de fluides, augmentant progressivement la porosité jusqu'à la disparition totale du gypse qui sera remplacé par les clastes allochtones. La présence de ces clastes allochtones est un bon indicateur de zones de circulation ou paléo zones de circulation de fluides.

Sur le log lithologique (voir page 24) ces brèches/grès engendrées par le transport par fluides de clastes allochtones sont représentées par ce symbole :



4. Microtectonique.

Les figures tectoniques présentées ci-dessous sont toutes observables dans le Trias évaporitique autochtone en place et non affecté par le glissement de terrain.

a. Veinules.

Elles sont présentes uniquement dans les argilites massives du Trias évaporitique.

Veinules d'ouverture ≤ 1 mm et de longueur allant de la taille pluri mm à décimétrique pour les plus longues.

Leurs orientations sont très variables, elles sont observables sous toutes les géométries suivantes : verticales, subverticales, horizontales, subhorizontales, diffuses.

Elles sont colmatées par du gypse ou de l'anhydrite. Le type d'évaporite présent dans ces veinules est relativement difficile à déterminer à cause de leur très faible ouverture.

b. Les fentes de tension.

Les fentes de tension sont des fentes de géométrie verticale et associées à des contextes extensifs.

Ces microstructures sont observables dans les argilites du Trias évaporitique. Leurs ouvertures varient de la taille millimétrique à centimétrique et de longueur pluri centimétrique. Leur colmatage est de type gypse ou anhydrite.

Ce genre de structures est souvent associé à des stylolithes qui leur sont perpendiculaires. Cependant sur nos carottes, aucun stylolithe n'est associé aux fentes de tension.

Elles peuvent être observables avec des géométries en échelon.



Figure 27 : Fente de tension avec un colmatage de gypse fibreux et d'ouverture millimétrique.



Figure 26 : Fente de tension d'ouverture pluri cm avec un colmatage d'anhydrite. La fente de tension n'est pas exactement verticale, probablement à cause d'une rotation due au glissement de terrain.

c. Les fentes.

Présentes dans les argilites du Trias évaporitique, ces fentes sont d'ouverture $\geq 1\text{mm}$ et de longueur pluri centimétrique. Elles sont majoritairement observables avec une géométrie horizontale et parfois diffuse avec un colmatage de gypse fibreux ou d'anhydrite. Il est possible de les observer sous forme de relais, relais connectés ou en échelons.



Figure 29 : Fentes diffuses à colmatage de gypse/anhydrite.



Figure 28 : Fente horizontale avec un colmatage de gypse fibreux et une géométrie en relais connectés.

Il y a donc eu des circulations de fluides dans le Trias évaporitique permettant de reconcentrer les évaporites dans les figures tectoniques décrites ci-dessus.

Il n'est pas rare de voir sur les carottes ces structures tectoniques avec différentes orientations se recoupant (comme sur les figures 28 et 29) formant des réseaux de circulation. Ces réseaux de circulation interconnectés permettent la circulation de fluides dans les argilites/évaporites du Norien. Il n'est pas impossible que ces circulations dans les microstructures soient à l'origine de l'hydratation de l'anhydrite en gypse comme expliqué précédemment. Cette transformation minérale dans la couche savon serait l'une des raisons du déclenchement des glissements de terrain.

A.3. Le log lithologique.

Le log lithologique est un bilan sur la partie géologique de mon travail.

Remarques d'ordre général sur le log :

- Le log met en avant les lithologies correspondant aux zones de circulation des anomalies de résistivité observables sur la carte de résistivité Imageo. Les anomalies sont annotées sur le log (page 24, tout à droite) A, B, C, D, E (voir figure 30) en rouge pour les plus fortes résistivités, et en bleu pour les plus faibles.

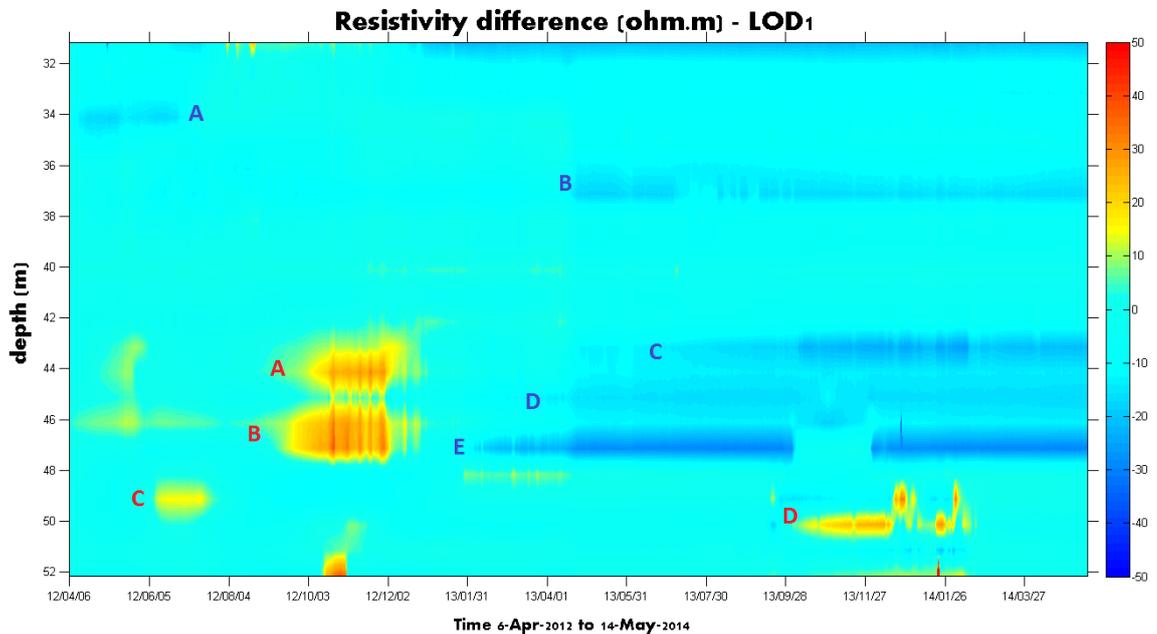


Figure 30 : Annotation de chaque anomalie observable grâce à l'observatoire de résistivité.

- Trois classifications de roches sont notables sur le log (observable sur le haut du log):
 - **[ma/a s f m gr g b]** : Classification silicoclastique classant les lithologies selon la granulométrie des grains les constituant. (Du plus fin au plus grossier: argile/marne, silt, grès (fin moyen grossier), grave, bloc).
 - **[M W P G F R]** : La classification de Dunham est un système pour les roches carbonatées, les classant par l'abondance de clastes et la présence d'une matrice ou d'un ciment. Les seuls carbonates de cette charte présents sur les carottes sont les Mudstone (M).
 - **[Roche non affectée par le cisaillement/Brèche cata/Protocata/Cata/Ultracata/Gouge]** : Classification des roches de faille, information mécanique sur l'intensité de la déformation. Roche de la moins affectée à la plus affectée par le cisaillement : Roche non affectée (ou très peu) par le cisaillement, Brèche cataclastique, Protocataclasite, Cataclasite, Ultracataclasite, Gouge.

- Revenons sur les marnes/argiles datant du Rhétien :
Un point notable qui semble compliqué à définir en l'absence de marqueurs de cataclase visibles (comme par exemple des grains anguleux dans une matrice marneuse ou argileuse) est le suivant : dans quelle proportion les marnes rhétiennes ont été affectées par le cisaillement. En effet, que les marnes du rhétien soient fortement ou peu affectées par le cisaillement elles seront toujours semblables à une gouge marneuse de faille. Il est donc abusif de qualifier des marnes du Rhétien présentes dans les zones de cisaillement de gouges (les gouges sont des roches extrêmement broyées, et on ne peut pas savoir dans quelle proportion ces marnes ont été broyées). C'est pour cette raison que sur le log, la classification des roches de faille représentées de cette façon : "----" peut parfois varier de couleur : "----". Les pointillés verts indiquent que les marnes du rhétien ont été classées dans les gouges, mais qu'on ne peut en fait pas vraiment savoir dans quelle proportion elles ont été affectées par le cisaillement.
Une hypothèse vraisemblable serait que les cisaillements pourraient remobiliser et mélanger les marnes rhétiennes de différentes couleurs. Dans ce cas de figure si les marnes abordent des couleurs bariolées (voir photo page 14), il est possible de penser que la déformation a été relativement intense.
- Les zones de circulation de fluides sont observables uniquement dans les roches de faille. L'explication la plus probable est que le glissement de terrain à l'origine des cisaillements (donc de la transformation des lithologies du Norien-Rhétien en roches de faille) a tendance à créer de la porosité générant des zones préférentielles pour la circulation des fluides.
- Les lithologies correspondant le plus souvent aux zones de circulation sont les brèches/grès constitués de clastes allochtones mis en place par drainage.
Les zones de drainage notables par ces lithologies et relevé sur carotte correspondent aux zones de circulation notables par les anomalies sur la carte de résistivité Imageau. Le recoupement des données géologiques/géophysiques semblent donc bien coïncider.
- En dessous de 52m, les lithologies sont des Argilites massives/bancs évaporitiques datant du Norien et qui ne sont pas affectées pas le cisaillement (à l'exception de la lithologie entre 56 et 56m70 où l'on retrouve de la roche de faille (ultracataclasite/gouge)). La cataclase plus ou moins marquée semble se manifester à 52m de profondeur jusqu'en haut du log (32m). Cette zone correspond aux lithologies les plus affectées par le glissement de terrain.
- Le log structural est à l'échelle l'échelle ~1/90.
- Pour visualiser les détails du log ou les photos des carottes voir le rapport annexe.

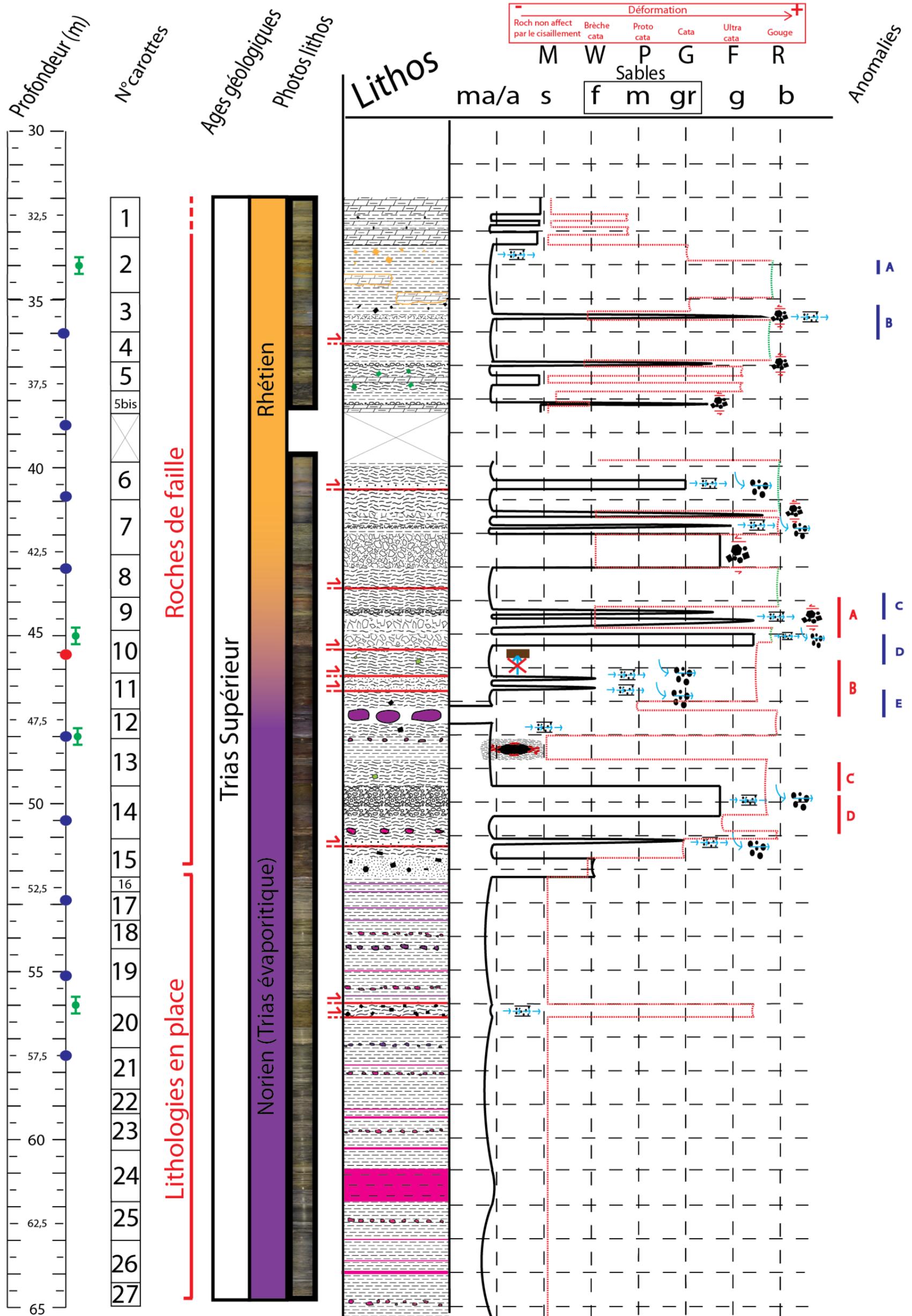
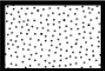
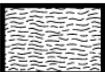
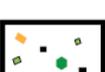
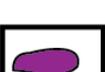
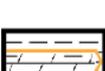


Figure 31 : Log lithologique/granulométrique/mécanique bilan (source : Giovannangeli Nicolas).

Légende du log lithologique:

	Grès		Zone de cisaillement
	Marne		Zone de circulation/Paléo zone de circulation de fluide
	Bancs de gypse		
	Pustules de gypse		Barrière verticale imperméable séparant les deux aquifères
	Bancs d'anhydrite		
	Pustules d'anhydrite		Lentille allochtone peu cisailée transportée lors du glissement
	Argilite massive/argile		Position Westbay (±50cm)
	Microbrèche		Fibre optique
	Brèche		Fibre optique contraint par la deformation mécanique.
	Dolomudstone		Brèche d'origine mécanique
	Clastes anguleux d'origine mécanique (cataclase)		Brèche sédimentaire/grès, mis en place par drainage de clastes allochtones lors de la circulation de fluide
	Banc d'anhydrite massive avec de fines intercallations de banc d'argilite		
	Bloc de gypse (sans matrice)		Anomalies rouges
	Bloc de dolomudstone dans des argiles du Rhétien		Anomalies bleues
			Classification granulométrique (silicoclastique) et de Dunham (carbonate)
			Classification roches de faille
			Doute sur gouge/marne (voir explication ci-dessus)

B. Partie géophysique.

B.1. Les électrofaciès.

Les électrofaciès des lithologies dominantes des carottes ont été réalisés. Ils permettent de mettre en avant des fourchettes de valeurs d'uranium (U), thorium (Th), potassium (K), et du gamma ray total (GR) qui est la somme de U, Th et K.

Ces fourchettes de valeurs nous donnent la signature de la radioactivité naturelle de chaque lithologie. Le fait d'utiliser le gamma ray pour les électrofaciès nous permet de caractériser le "squelette" des lithologies en faisant abstraction des fluides les traversant.

Cette caractérisation pouvant servir de référence dans le cadre de futurs travaux.

Les unités sont : GR -> cps et U, Th et K -> Bq/kg.

Les argilites massives du Trias évaporitique (les bancs ou pustules d'évaporite présentes dans les argilites peuvent avoir tendance à abaisser les valeurs).	
	GR : 64-230
	U : 11,3-40,2
	Th : 6,3-27,7
	K : 70-360

Anhydrite massive du Trias évaporitique.	
	GR : 34,1-70,0
	U : 3,3-12,9
	Th : 2,4-6,5
	K : 57,4-100,4

Roches de faille au sens large (gouge/ultra cataclasite/cataclasite/proto cataclasite/brèche mécanique).	
	GR : 109,4 - 422,3
	U : 16,7-46,6
	Th : 7,7-44,3
	K : 134,6-655,0

Dolomudstone du Rhétien.	
	GR : 103,4-385,3
	U : 12,5-61,8
	Th : 10,9-29,7
	K : 242,15-739,1

B.2. Le Vshale.

Le Vshale est un log de valeurs qui représente la fraction du volume d'argile calculé, mesuré ou déduit à partir de propriétés des formations géologiques.

Grace au log de gamma ray, il est possible d'obtenir avec le logiciel Schlumberger Techlog le log de Vshale. Il nous servira par la suite lors de la corrélation des données et la mise en évidence des caractéristiques de pétrophysique des roches et notamment des zones de circulation.

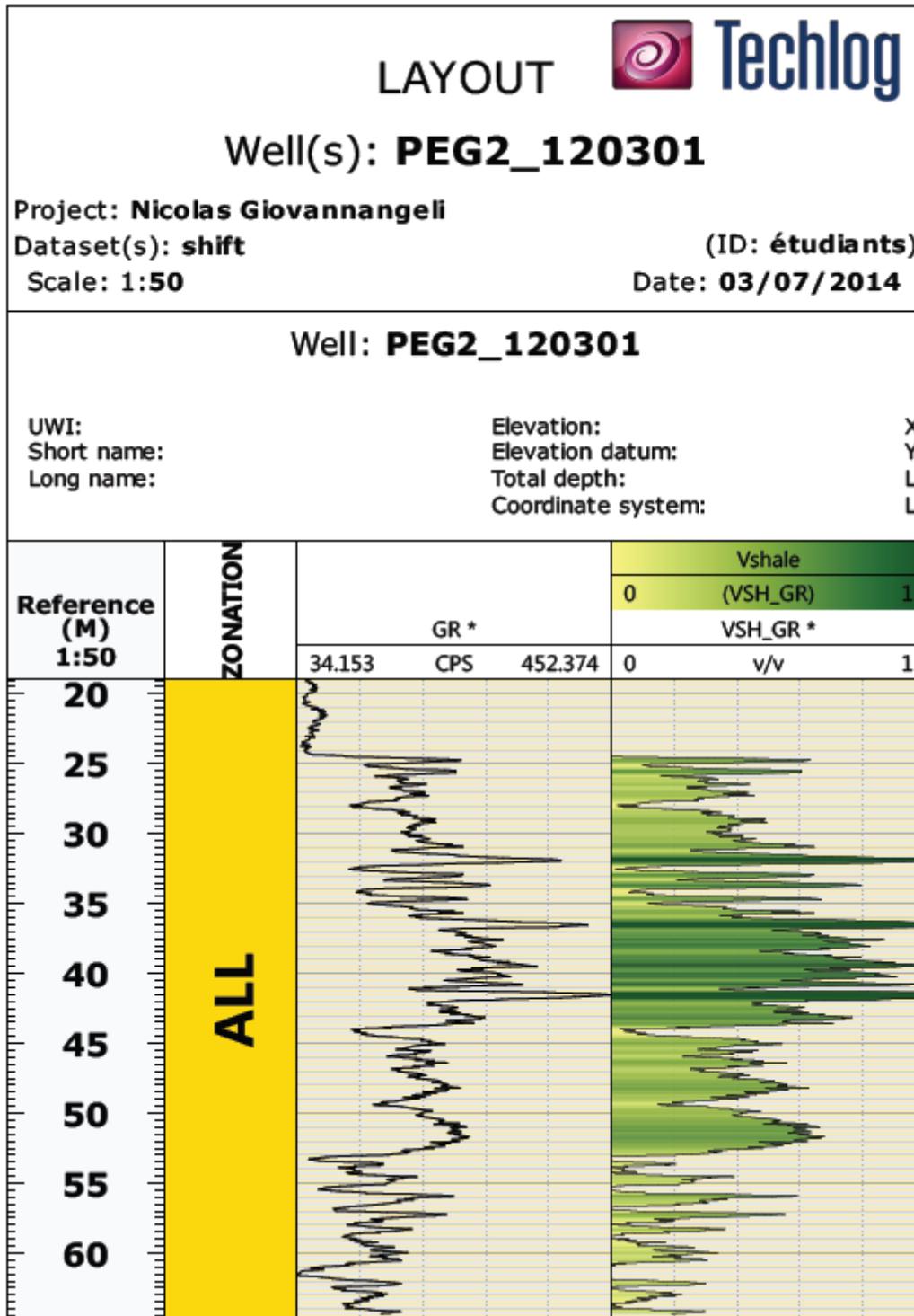


Figure 32: Log de Vshale obtenu grâce au logiciel Techlog.

B.3. Calcul géophysique.

Grâce à ces calculs, il est possible d'obtenir des informations supplémentaires sur nos lithologies (porosité, facteur de formation, Conductivité de l'eau).

Toutes les courbes obtenues par calcul sont consultables page 32.

1. Calcul de la porosité (Loi de Wyllie, 1956).

Le log sonique est une méthode de diagraphie permettant de mesurer la vitesse de propagation des ondes sismiques (onde P) dans les lithologies grâce à un système émetteur-récepteur.

Grâce aux vitesses obtenues par le sonique, il est possible de calculer la porosité (ϕ) en utilisant la loi de Wyllie :

$$\Phi = \frac{Lp - Lma}{Lf - Lma}$$

- Lp (lenteur des ondes P) est obtenu à partir du Vp mesuré par le sonique avec un pas d'échantillonnage de 5 cm. Sachant que la lenteur est l'inverse de la vitesse, il suffit d'appliquer la formule $L = \frac{1}{Vp}$ pour obtenir Lp .
- Lma correspond aux lenteurs de la matrice. Pour que les calculs collent le plus possible au modèle géologique nous prendrons deux lenteurs de matrices différentes. Une pour les argilites massives du Trias évaporitique et une autre pour la gouge. Ces deux lithologies représentant la majeure partie des lithologies observées dans les carottes. Les valeurs choisis sont les suivantes :

	Gouge (de 32 à 52m)	Argilite (de 52 à 65m)
$Vpma$ (km/s)	2,80	4,00
Lma ($\mu s/m$)	357	250

- Lf représente la lenteur des fluides en présence. La valeur d'une eau légèrement salée serait d'environ 666,00 $\mu s/m$ (source : Schlumberger, 1997).

Ainsi, en prenant en compte tout ce qui a été décrit précédemment nous obtenons (z étant la profondeur) :

$$\Phi (\text{Argilite}) = \frac{Lp(z) - 250}{666 - 250} = \frac{Lp(z) - 250}{416}$$
$$\Phi (\text{Gouge}) = \frac{Lp(z) - 357}{666 - 357} = \frac{Lp(z) - 357}{309}$$

2. Calcul du facteur de formation (F) (loi d'Archie, 1942).

Le facteur de formation définit la géométrie de la connectivité du réseau poreux (tortuosité et topologie).

$$F = \Phi^{-m}$$

m est le facteur de cimentation. Il varie entre 1,3 et 2,2. La valeur 2 est une bonne valeur moyenne, c'est la valeur que nous utiliserons pour nos calculs (source : Louis Briqueu, novembre 2013).

Φ est la porosité calculée juste avant à partir des données de sonique.

Plus le facteur de formation est grand, et plus la connectivité entre les pores est faible. Le facteur de formation nous renseigne directement sur la localisation des barrières (faible connexion porale).

3. Calcul de la conductivité de l'eau (Cw) (Waxman et Smits 1968).

L'équation de Waxman et Smits nous donne :

$$C_0 = \frac{C_w}{F} + C_s$$

$C_0(z)$: conductivité de référence en (mS.m^{-1}) est l'inverse de la résistivité mesurée en logging en mars 2012 ($C_0 = \frac{1}{\text{Resistivité LLD}}$).

C_w : conductivité du fluide poral (mS.m^{-1}).

F : facteur de formation déterminé ci-dessus.

C_s : en présence d'argile, il faut prendre en compte la conductivité de surface (mS.m^{-1}) provenant de l'eau liée⁴.

Méthode de calcul pour déterminer les inconnues et calculer C_w :

Détermination de C_s :

Il est prouvé qu'il existe une relation linéaire entre C_s et le GR (gamma ray). Il est ainsi possible de poser une fonction linéaire de type $y=ax+b$ ou $C_s=aGR+b$.

Dans les argiles la connectivité entre les pores est faible, ce qui nous donne un facteur de formation élevé. Ainsi F sera supérieur devant C_w , nous obtiendrons alors $\frac{C_w}{F} \sim 0$ et $C_0 \sim C_s$.

Dans ce cas de figure : $C_0 \sim C_s \sim \frac{1}{\text{Resistivité LLD}} = 31 \text{ S.m}^{-1}$.

Une valeur moyenne du gamma ray obtenu dans les argiles est de 450 cps.

Dans les anhydrites dépourvues d'argile (pas d'eau liée) $C_s=0$.

Une valeur moyenne du gamma ray obtenu dans l'anhydrite est de 62 cps.

⁴ L'eau liée est une couche extrêmement fine d'eau qui entoure les surfaces minérales.

Avec tous les paramètres énoncés ci-dessus il nous est possible de poser une équation à 2 inconnues :

$$\begin{aligned}0 &= a * 62 + b \\31 &= a * 450 + b\end{aligned}$$

Après résolution de cette équation à deux inconnues nous obtenons $a=0,08$ et $b=-5$.
Il nous est maintenant possible de calculer la conductivité de surface (C_s) tous au long de notre puits selon la formule (le GR étant obtenu par login.) :

$$C_s = 0,08GR - 5$$

Détermination de C_w :

Pour déterminer C_w il suffit d'appliquer la formule Waxman et Smits :

$$C_0 = \frac{C_w}{F} + C_s$$

$$C_w = F(C_0 - C_s)$$

4. Courbes obtenues/synthèse géophysique.

Remarques d'ordre général sur les courbes (observables page 32) :

La page 32 nous présente les courbes obtenues par calcul de la porosité, du facteur de formation et de la conductivité de l'eau. Elles sont toutes trois toujours associées à la courbe du gamma ray qui sert de référence. Les courbes sont associées au log lithologique et au log de V_{shale} pour compléter l'information.

- Comme nous l'avons vu lorsque nous avons développé les calculs, beaucoup de paramètres sont estimés ou issus de bibliographies, donc ne collant pas à 100% à notre réalité géologique, cela pouvant impacter le résultat final. De ce fait pour apprécier la marge d'erreur, il est préférable d'analyser les courbes qualitativement en observant par exemple les maxima, minima et les intermédiaires plutôt que quantitativement (par exemple la courbe de porosité atteint à 44m des valeurs de plus de 80% ce qui est incohérent géologiquement parlant. Il faut juste considérer qu'à cette profondeur la porosité est plus importante que le reste de notre modèle).
- Les chemins de migration des fluides indiqués par les flèches comportent tous les mêmes caractéristiques pétrophysiques : une forte porosité, un faible facteur de formation (indiquant une porosité bien connectée), ainsi qu'une faible proportion d'argile (indiqué par le log de V_{clay}).

Comme indiqué précédemment, les lithologies correspondantes sont toujours des roches de faille et souvent de type brèche avec clastes drainés par les fluides.

- Sur le log lithologique, la barrière de perméabilité séparant les deux zones de circulation de fluides avait été placée à environ 46m de profondeur. Si nous regardons les paramètres pétrophysiques à cette même profondeur sur les courbes calculées, nous observons une porosité très faible ainsi qu'un très fort facteur de formation (pores non connectés), ce qui va dans le sens des caractères géologiques/pétrophysiques d'une barrière imperméable aux fluides. Nous avons donc une bonne corrélation des calculs géophysiques et du log géologique. Un autre point notable est qu'au niveau de la barrière de perméabilité nous observons un pic avec de fortes valeurs de la conductivité de l'eau (CW). L'explication la plus probable étant que la barrière est constituée d'argiles/marnes, lithologies ayant tendance à piéger l'eau.
- La limite roche de faille/argilite massive apparaît vers 52m sur le log lithologique. En comparaison, la porosité est beaucoup plus faible et les facteurs de formation beaucoup plus élevés dans les argilites massives les rendant imperméables aux fluides (sans prendre en compte la microtectonique décrites pages 20/ 21 pouvant servir de chemin de migration). Cette observation se confirme vers 56m où au milieu des argilites massives apparaît un banc d'épaisseur de moins d'un mètre de roches de faille. A cette profondeur la tendance des courbes de porosité et du facteur de formation s'inversent par rapport aux argilites massives, et redeviennent cohérentes avec la tendance générale des roches de faille (forte porosité et faible facteur de formation).
- Grâce aux Westbays, il est possible de mesurer la conductivité des eaux traversant les formations (valeurs représentées par les points violets sur la courbe calculée représentant la conductivité de l'eau). Il nous est donc possible de comparer nos valeurs calculées et mesurées. Nous remarquons que les valeurs de conductivité mesurées ne tombent pas sur la courbe de conductivité calculée. Nos valeurs de conductivité calculée semblent être plus basses que la conductivité relevée dans le forage. Notre modèle est sous-estimé. Comme dit précédemment, cette sous-estimation de notre modèle est sûrement due aux choix de nos paramètres de départ.
- Attention ! les valeurs en abscisse de la porosité, du facteur de formation ainsi que de la concentration en eau sont croissantes de la droite vers la gauche, ceci est fait pour éviter que les courbes ne se recroisent trop avec celles du gamma ray, permettant une meilleure lecture.

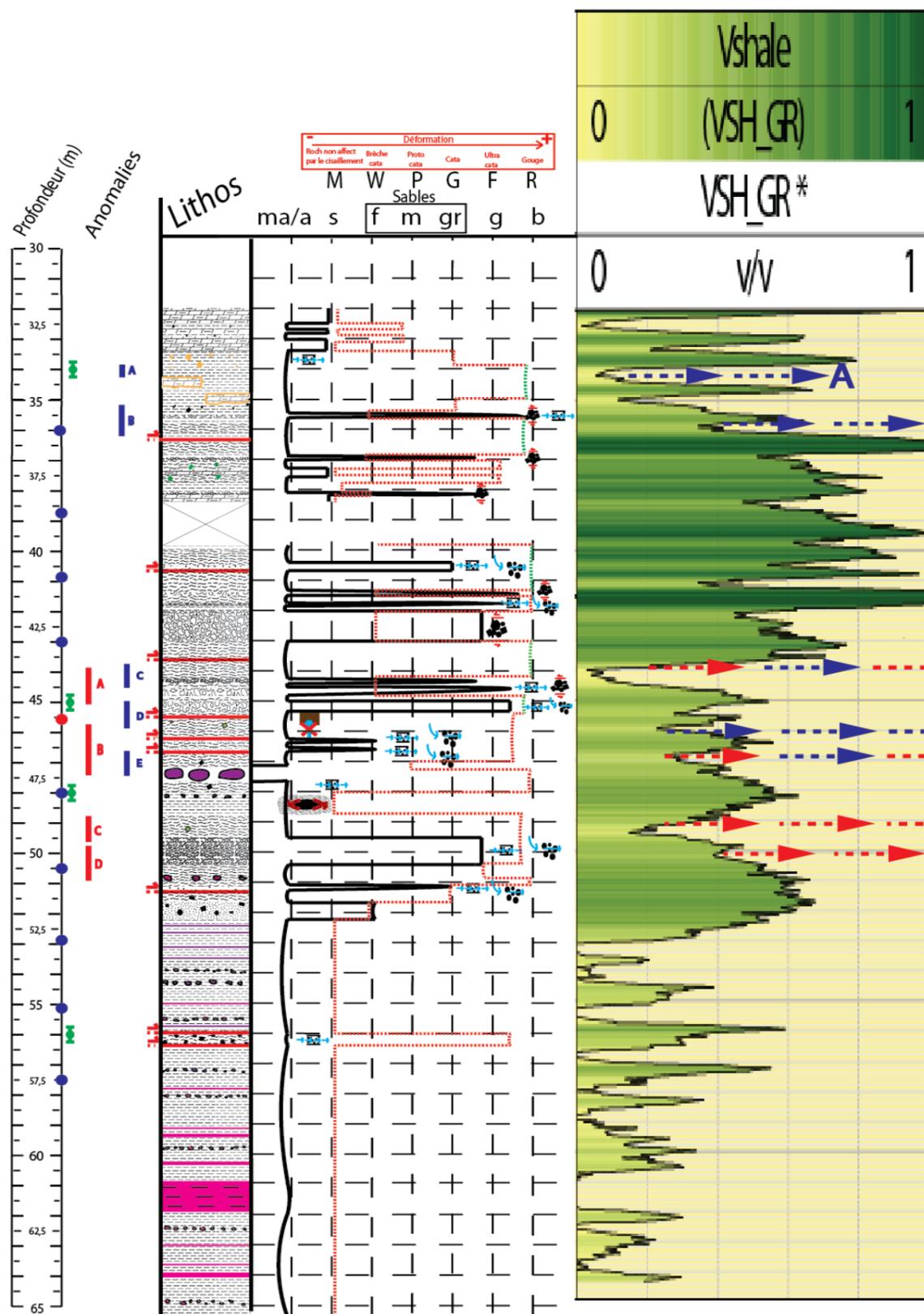


Figure 33: Colonne lithologique.

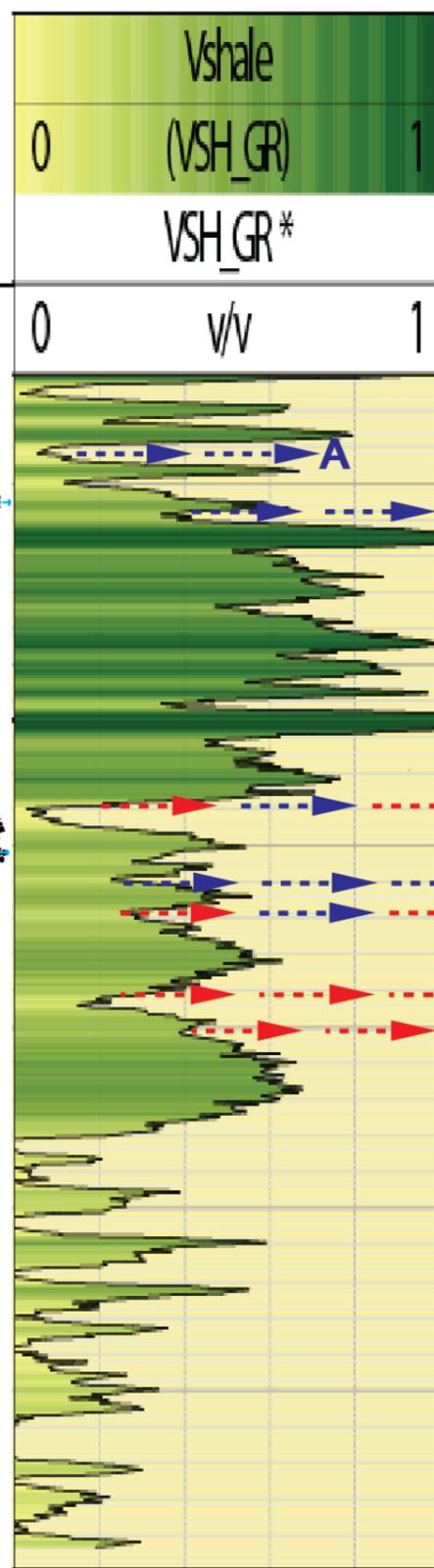


Figure 34: Courbe de Vshale calculé.

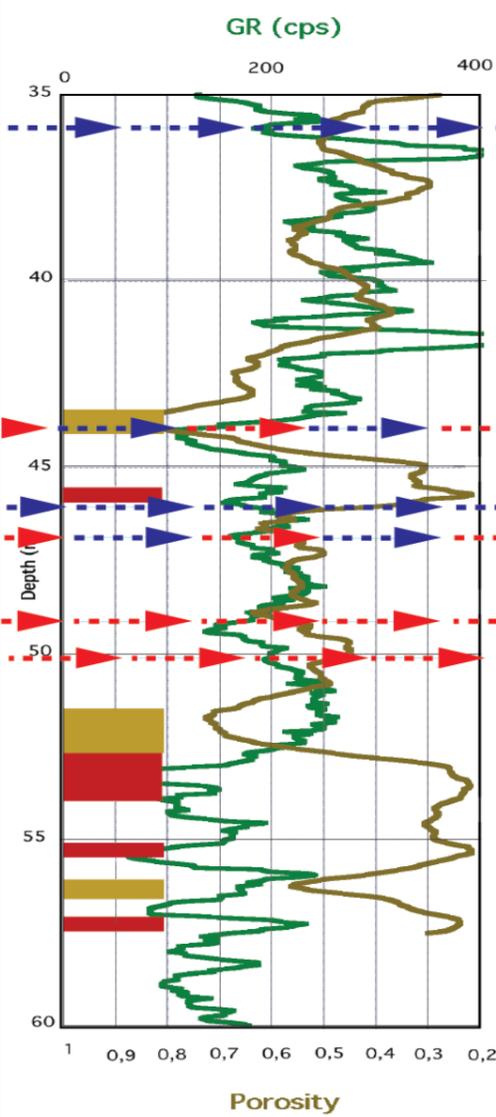


Figure 35: Courbe porosité calculée + GR.

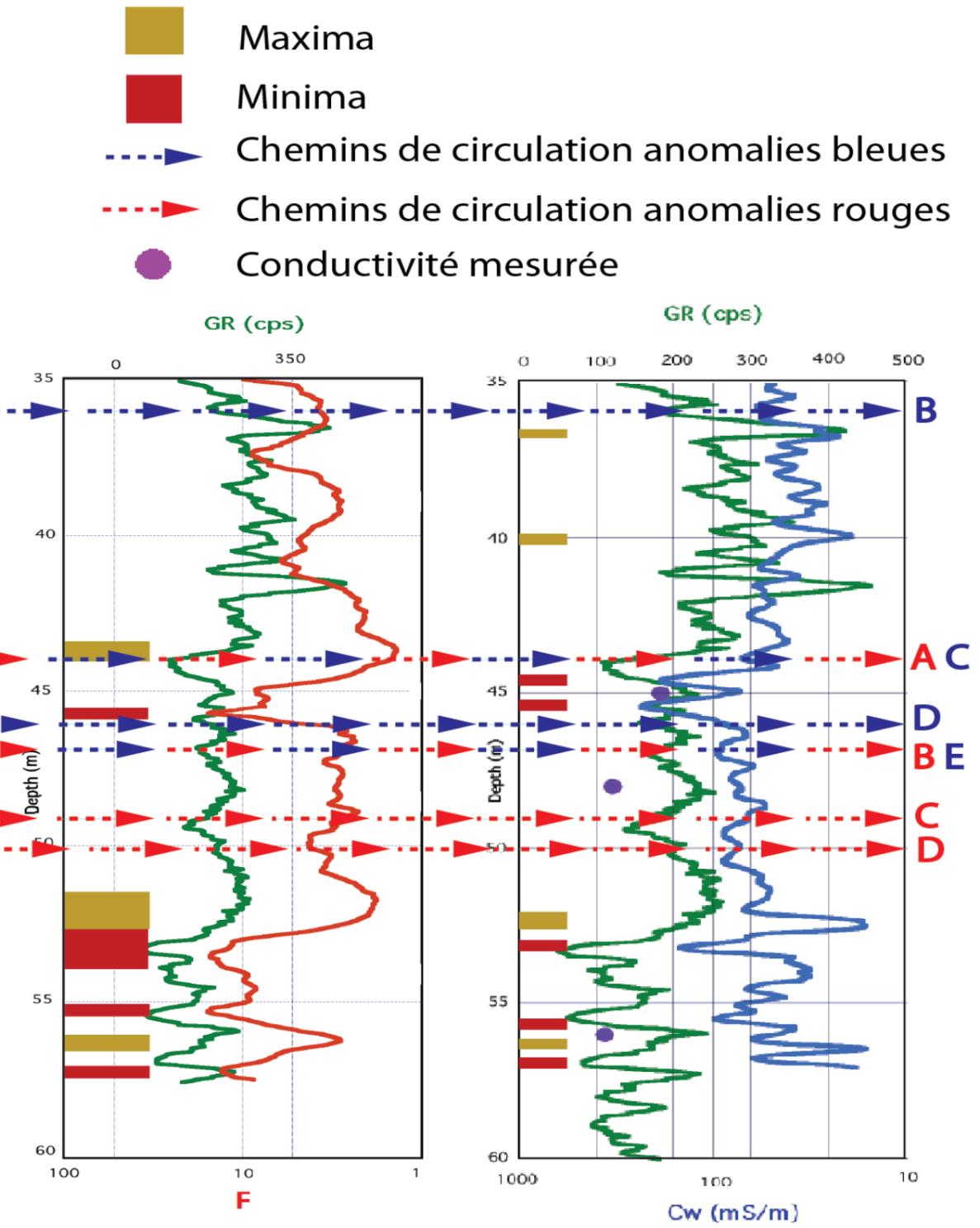


Figure 36: Courbe facteur de formation calculé + GR.

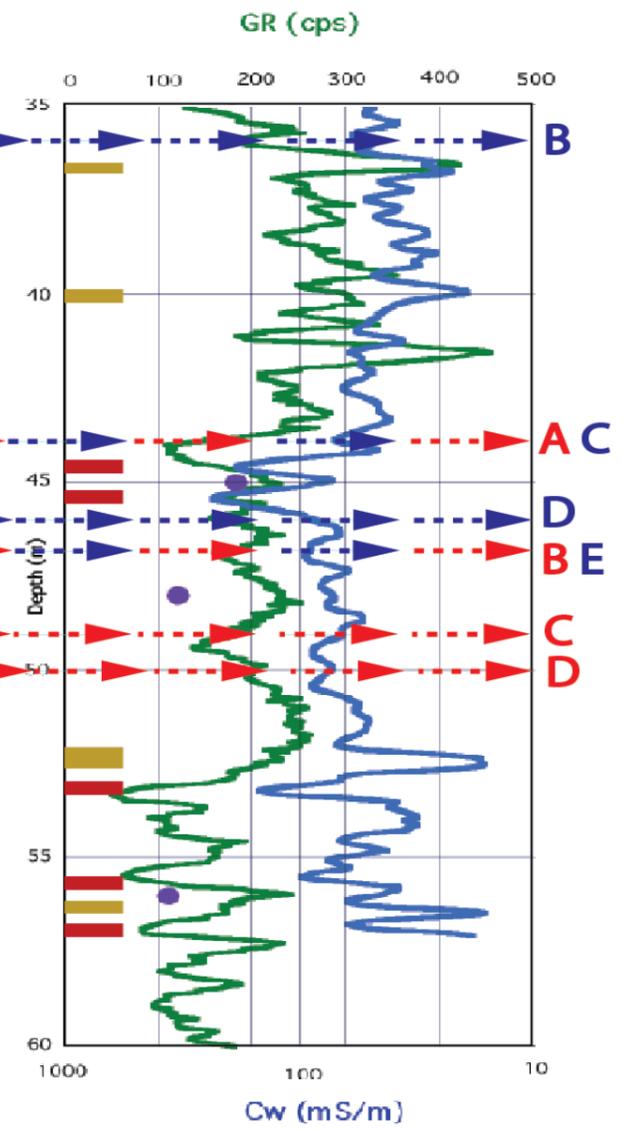


Figure 37: Courbe conductivité de l'eau calculée.

- Maxima
- Minima
- Chemins de circulation anomalies bleues
- Chemins de circulation anomalies rouges
- Conductivité mesurée

C. Synthèse, hypothèses sur les résultats obtenus et résolution des problématiques.

Cette partie consiste à mettre en commun les résultats pluridisciplinaires obtenus au cours de mon stage, et de répondre aux problématiques posées au début du rapport avant de conclure sur ces cinq mois de stage.

Rappelons les problématiques de mon stage :

- Quelle est l'action des glissements de terrain sur les lithologies ainsi que sur la circulation des fluides en profondeur ? Quelles sont les lithologies affectées par le glissement de terrain ?
- Comment peut-on expliquer les variations de la composition des fluides marquées par les anomalies de résistivité Imageau?

Pour répondre aux problématiques nous développerons cette dernière partie de la façon suivante :

-Les données issues des diagraphies et les courbes des paramètres physiques calculés ont été exportées et mises en commun avec le logiciel Wellcad.

-Les résultats obtenus ont permis la construction de deux modèles géologiques à différentes échelles de la zone d'étude. Le premier modèle met en avant l'action des glissements de terrain sur l'évolution temporelle des lithologies et des circulations de fluides en présence.

-Le second modèle, beaucoup plus généraliste et à plus grande échelle met en avant la morphologie probable du glissement de terrain ainsi que les chemins de circulation des fluides prouvés ou supposés.

-Une figure reliant la pluviométrie/la pression dans les aquifères et les anomalies de résistivité.

C.1. Corrélation log litho, diagraphies et log calculés.

Remarques d'ordre général sur les logs (page suivante) :

- La déformation mécanique se produit à environ 45m50. La lithologie correspondant à cette profondeur est de la roche de faille de type gouge.
- Légèrement au-dessus et en dessous de 45m nous observons deux pics de résistivité. Les lithologies correspondantes à ces pics sont des brèches avec des clastes de dolomudstone séparés par de la gouge (pour plus de précision sur le log, voir le rapport annexe).
Ces brèches à clastes de dolomudstone entourées de roches de faille de type gouges ont tendances à augmenter la résistivité, expliquant ainsi ces deux pics.
- A 52,5m, nous observons une forte augmentation de la résistivité. Elle est due à la transition roche de faille/Argilite massive. A environ 56m dans ces argilites massives, nous retrouvons de la gouge sur quelques 10èmes de centimètre. Sur cet intervalle la courbe de résistivité diminue.
- A environ 44m, la conductivité des fluides et la température mesurées augmentent. Cette variation est explicable par une circulation de fluides à cette profondeur.
- Les courbes calculées ont déjà été décrites dans la partie géophysique.

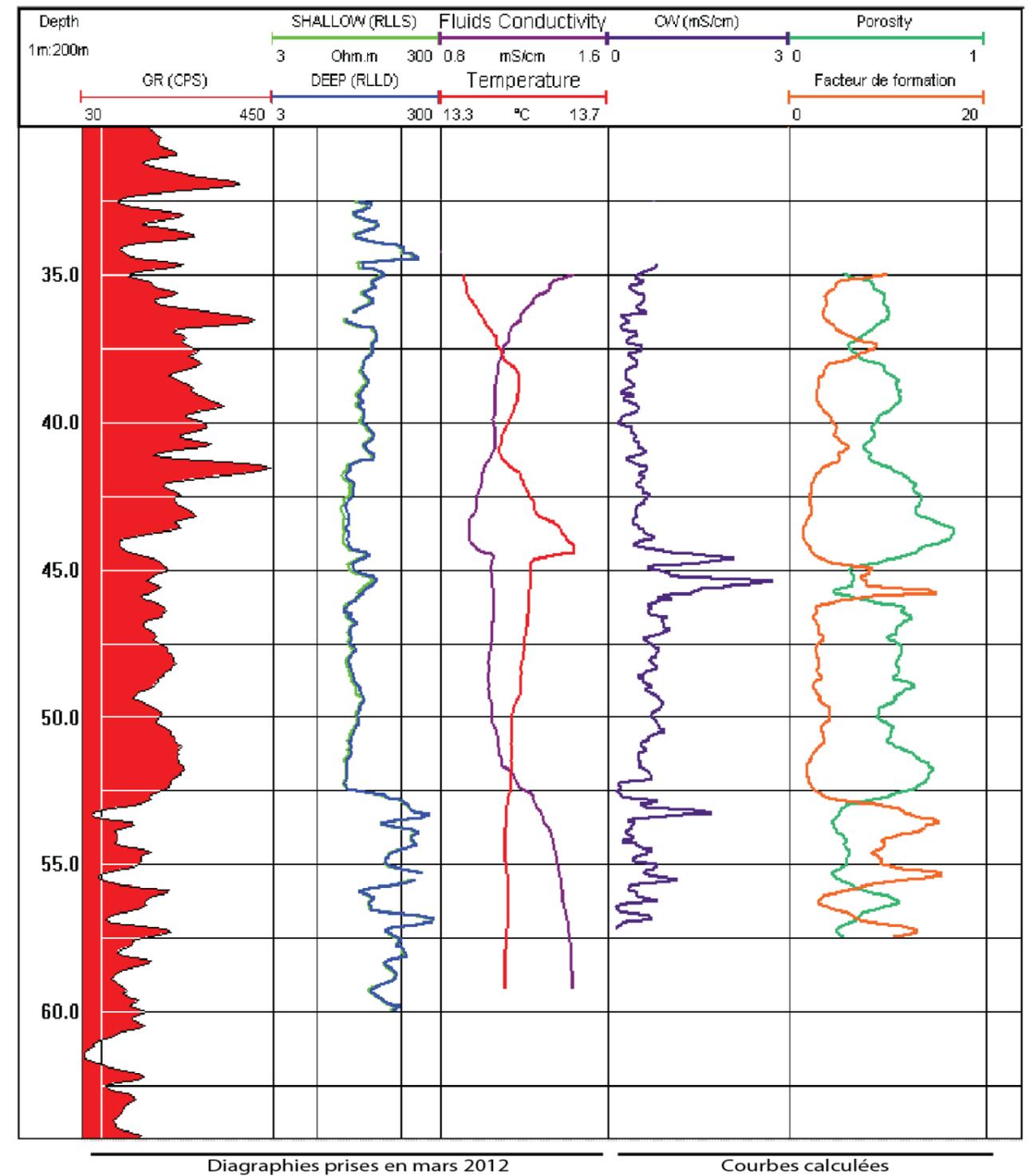
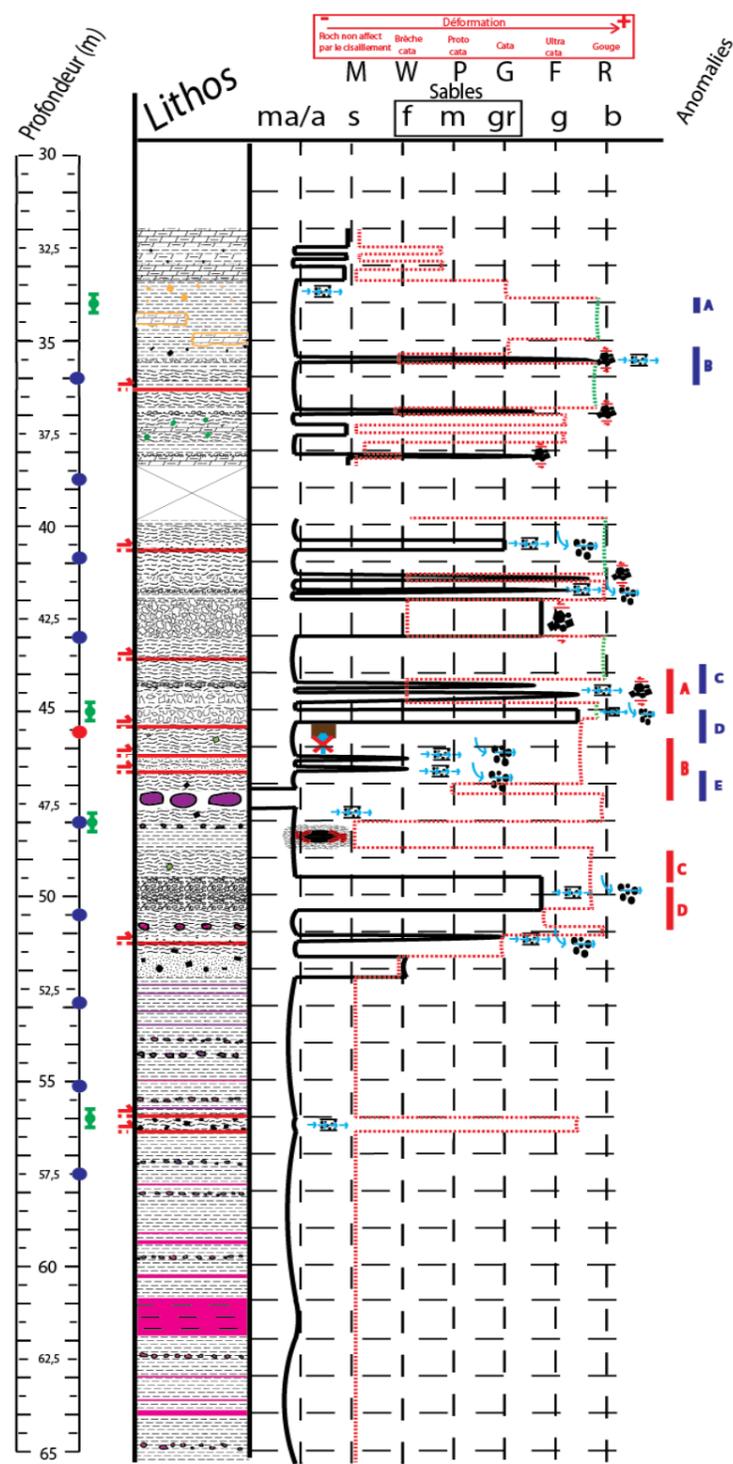
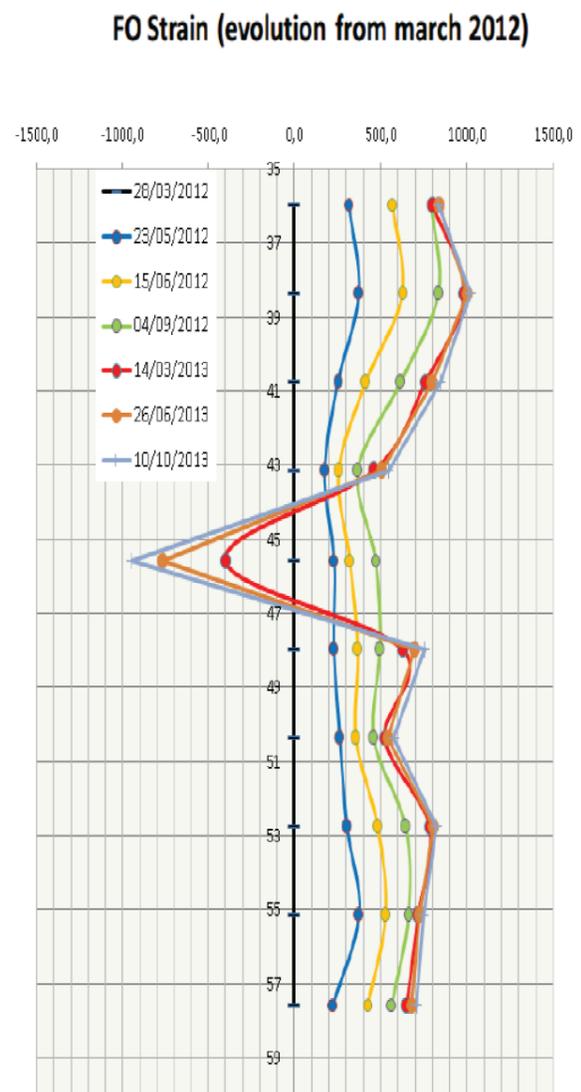


Figure 38 : Corrélation déformation mécanique, log litho, diagraphies et courbes calculées (source : Giovannangeli Nicolas).

C.2. Rôle du glissement de terrain sur les lithologies et circulations de fluides.

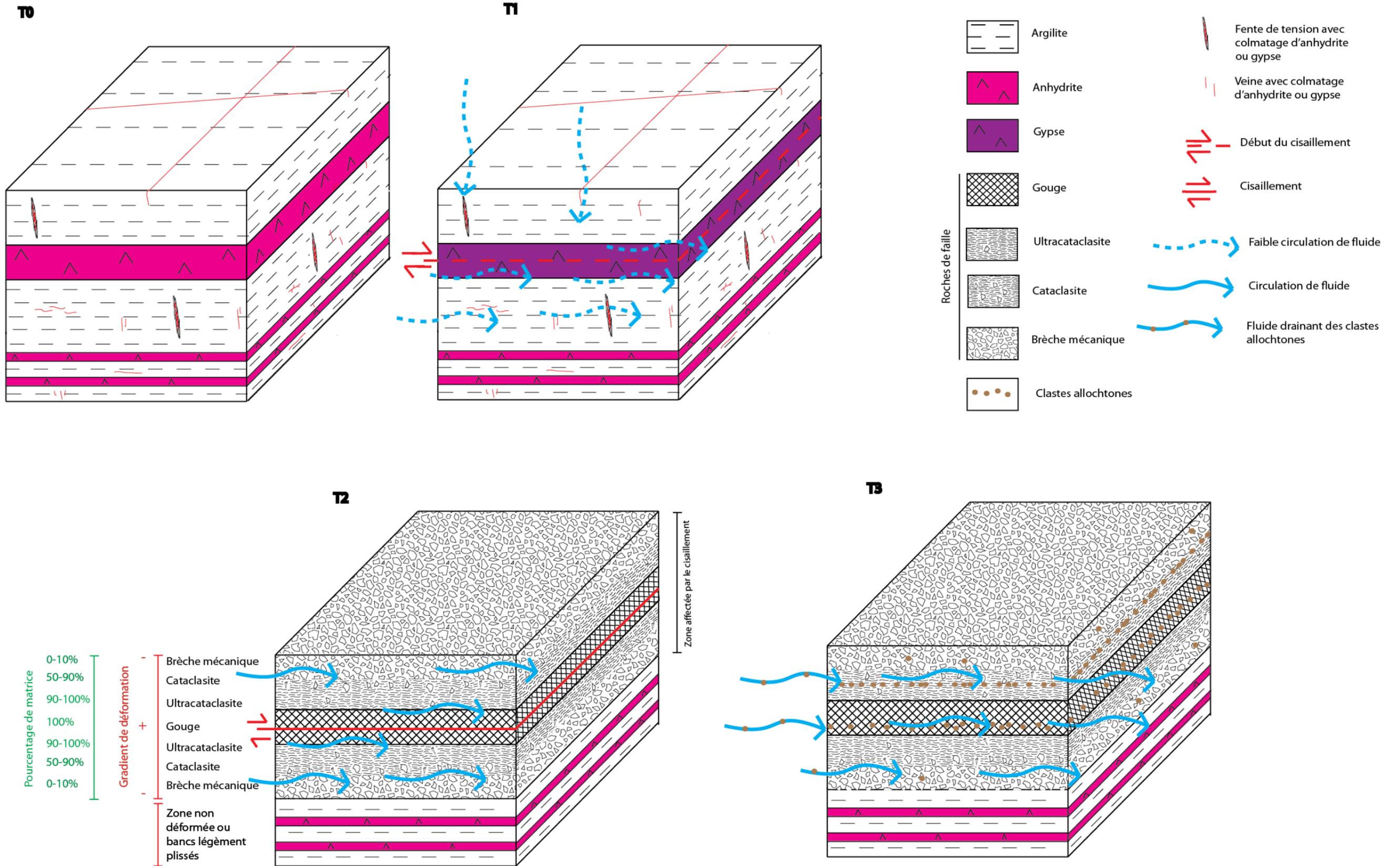


Figure 39 : Blocs 3D hypothétiques de l'évolution/formation au cours du temps des lithologies et des zones de circulation de fluides dans la couche savon d'un glissement de terrain (explication ci-dessous) (source : Giovannangeli Nicolas).

Quelle est l'action des glissements de terrain sur les lithologies ainsi que sur la circulation des fluides en profondeur ? Quelles sont les lithologies affectées par le glissement de terrain ?

Explication T0, T1, T2, T3 blocs 3D :

T0 : Etat initial, les lithologies ne sont affectées par aucune déformation. Ces lithologies constituant la semelle de glissement sont les argilites massives + bancs d'anhydrite datant du Norien.

T1 : Circulation verticale/horizontale des eaux météoriques ou présente dans les aquifères de la région par le réseau de fracture des lithologies du Norien. La circulation d'eau dans l'anhydrite permet une hydratation de cette dernière provoquant sa transformation en gypse. Le gypse plus facilement altérable et peu compétent va engendrer des zones préférentielles pour la mise en place de cisaillements. Cette transformation minérale engendre le glissement de terrain. De plus la circulation des eaux aura tendance à abaisser le seuil de rupture des roches, facteur supplémentaire pour la mise en place du cisaillement.

T2 : Le cisaillement a provoqué une réorganisation des lithologies anciennement présentes transformant par broyage les argilites massives/évaporites en roches de faille.

La nature des roches de faille varie en fonction de la proximité du cisaillement. Plus celles-ci sont proches de ce dernier et plus la proportion de matrice par rapport aux clastes composés des lithologies pré-cisaillement sera élevée.

Aux abords du cisaillement où le matériel est le plus broyé, la proportion de matrice est proche de 100%. Ce sont les gouges.

Lorsque nous nous éloignons du cisaillement, le gradient de déformation diminue et la proportion de clastes dans la matrice augmente. Nous passons des gouges, aux ultracataclasites, cataclasites et enfin protocataclasites.

Lorsque nous sommes graduellement le plus éloigné du cisaillement nous retrouvons des brèches mécaniques composées de claste anguleux des anciennes lithologies.

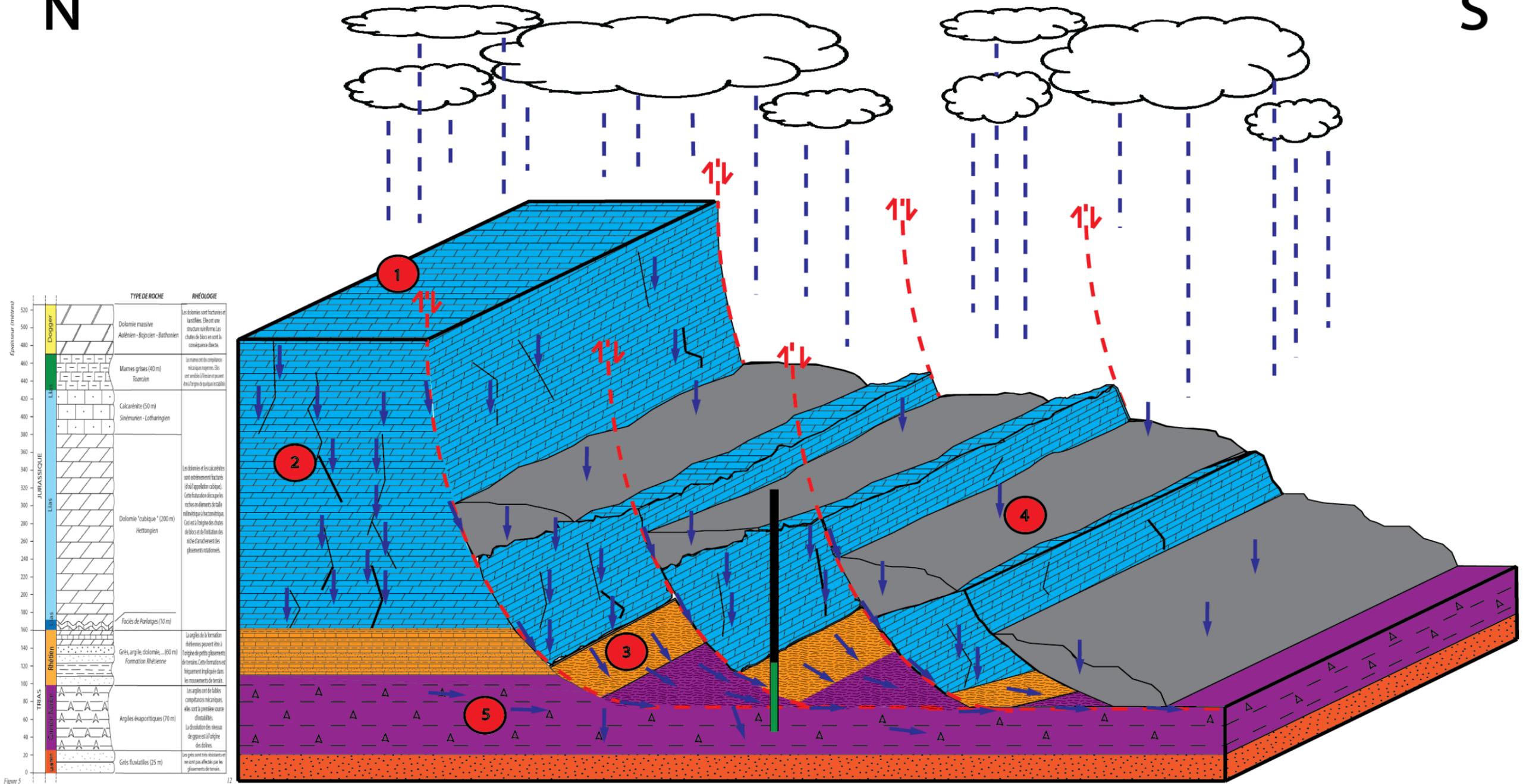
La déformation va engendrer l'augmentation ainsi que la connexion de la porosité permettant une circulation de fluides plus importante dans les roches de failles.

T3 : La circulation de fluides dans les roches de faille va permettre par drainage la mise en place de clastes allochtones provenant d'autres lithologies. Il n'est pas rare de trouver dans les roches de faille des couches de grès grossiers/brèches avec des clastes arrondis mettant en avant des zones de drainage où les fluides circulent ou ont circulé.

C.3 Bloc 3D de la zone d'études indiquant les différents chemins de migration des fluides (schéma bilan).

N

S



Chemins de migration des fluides prouvés ou supposés :

- 1
- 2
- 3

Failles normales
Réseau karstique du Jurassique
Roches de faille

- 4
- 5

Éboulis
Microtectonique du Norien (veines, veinules, fentes...)

Roches de faille Rhétien/Norien



Forage Peg2 (en vert partie du forage carottée)

Figure 40 : Chemins de migration prouvés ou supposés avec leurs lithologies associées (source : Giovannangeli Nicolas) + Log lithologique de la zone (source : d'après M. LOPEZ, non publié).

C.4. Evolution des zones de circulation dans le temps.

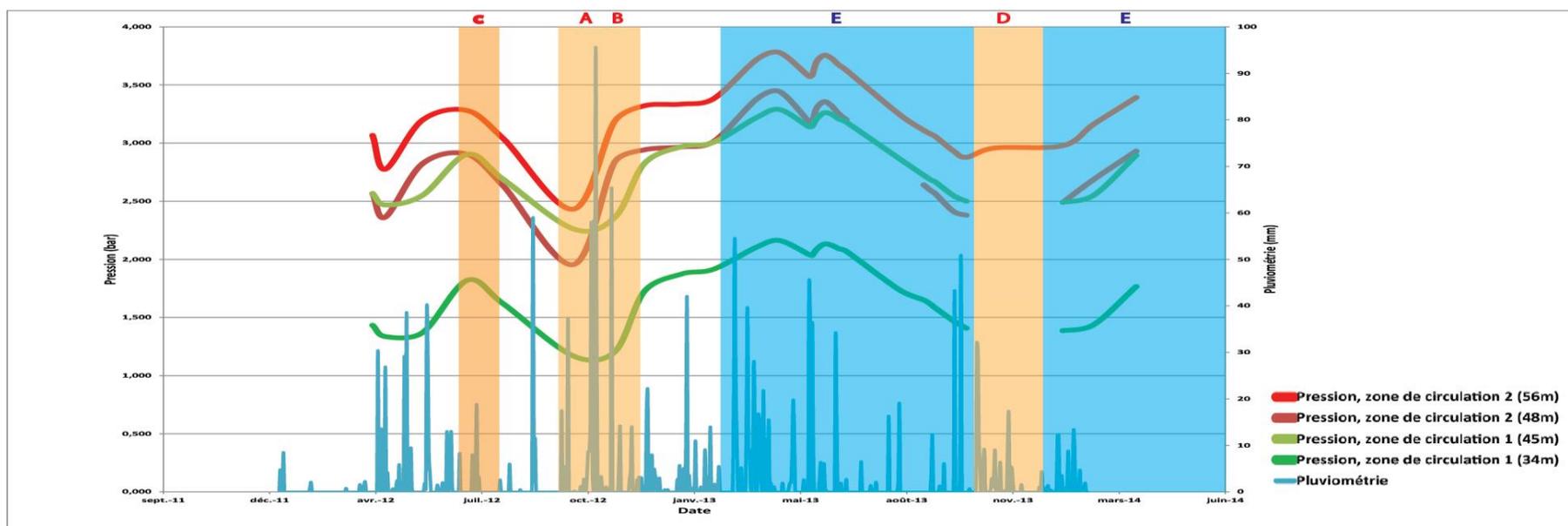
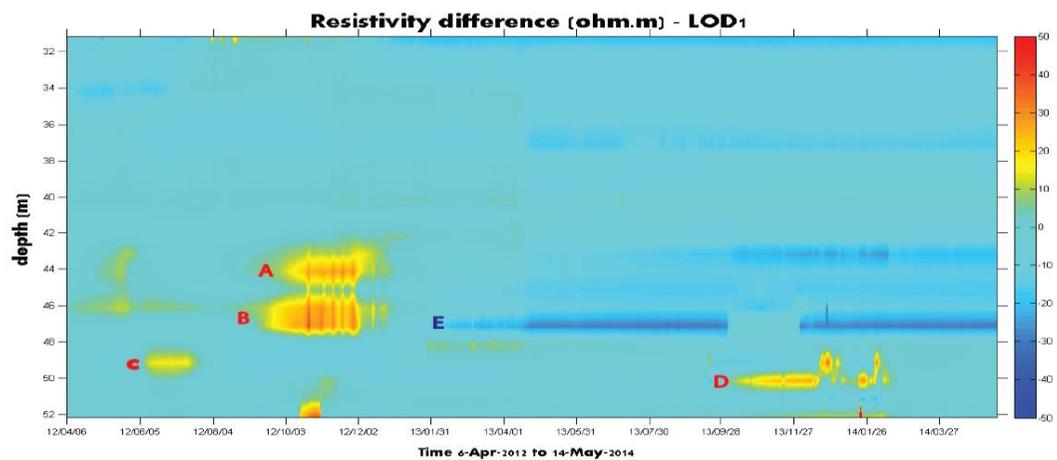


Figure 41 : Corrélation pluviométrie/pression dans les zones de circulation/anomalies de résistivité. (Source : Giovannangeli Nicolas).

Remarques d'ordre général et description de la figure ci-dessus :

- Les anomalies prises en compte dans ce modèle sont les anomalies les plus marquées. Nous faisons abstraction des anomalies les plus faibles.
- Rappelons que dans les roches de faille étudiées, il y a deux aquifères (ou zone de circulation) distincts séparés par une barrière imperméable à environ 46m : un aquifère est représenté par les courbes rouges et violettes, et l'autre par les courbes vertes. Ces aquifères sont appelés sur la figure zone de circulation 1 (aquifère au-dessus de 46m), et zone de circulation 2 (aquifère en dessous de 46m)
- Concentrons-nous sur le lien entre la pluviométrie et l'évolution de la pression dans les aquifères. Nous remarquons qu'après une période de forte pluie (événement cévenol) la pression dans les aquifères augmente après un certain laps de temps qui diffère selon l'aquifère 1 ou 2. Cette augmentation de la pression traduit le temps de recharge des aquifères, donc le temps de migration des eaux météoriques depuis les événements cévenols jusqu'à leur arrivée dans les aquifères, augmentant ainsi la pression. La réponse pluviométrie/augmentation de la pression n'est pas la même dans les deux aquifères. L'aquifère 2 semble se recharger plus rapidement que l'aquifère 1.
-Si nous prenons l'exemple d'une période de fortes pluies (avril/mai 2012) commençant en avril 2012, la réponse de l'augmentation de la pression sera très rapide pour l'aquifère 2 (quelques semaines tout au plus). A l'inverse, il faudra attendre le mois de mai/juin 2012, pour que l'augmentation de pression débute dans l'aquifère 1. Le temps de migration des eaux météoriques varie donc de quelques semaines pour l'aquifère 2 à un à deux mois pour l'aquifère 1. Nous pouvons alors supposer que les chemins de migration permettant la recharge des aquifères ne sont pas les mêmes pour les deux.

-Pendant la période d'août à septembre 2012, il n'y a pas d'épisode de pluie important et durable à l'exception d'un épisode ponctuel vers août, mais qui ne semble pas affecter la recharge des aquifères (après cet épisode, la pression dans les deux aquifères continue de diminuer). Cela semble prouver que pour qu'il y ait une réponse d'augmentation de la pression aux épisodes cévenols, il faut une certaine quantité d'eau pendant une période durable (caractéristique des événements cévenols).

Comme nous le disons, la période d'août à septembre 2012 ne comporte pas d'épisode de type cévenol, cela se traduisant par une diminution progressive de la pression dans les aquifères. L'aquifère 2 semble se décharger plus vite que l'aquifère 1.

Notons que dès lors que les épisodes cévenols cessent (par exemple en juin 2012), le début de la diminution de pression dans les deux aquifères est quasi immédiat.

-A partir de novembre 2012, les épisodes de fortes pluies semblent reprendre, les temps de recharge des aquifères restent toujours plus rapides dans l'aquifère 2 que dans le 1. Notons qu'il n'est pas vraiment possible de quantifier un temps de recharge identique pour chaque épisode cévenol distinct, car ce temps de recharge dépend des caractéristiques de chaque épisode de pluie (durée, pluviométrie) qui est variable d'un épisode à l'autre.

-De novembre 2012 jusqu'en juillet 2013, les pluies sont à peu près constantes, la pression dans les aquifères restera relativement haute avec quelques fluctuations cependant.

-En juillet 2013, les pluies se font plus rares, la pression diminue dans les aquifère 1 et 2 mais de façon moins soudaine et simultanée que durant la période août/septembre 2012.

Après cette première analyse, nous pouvons conclure que le type de réponse de la pression dans les aquifère sera dépendante des caractéristiques comme la durée ou la quantité d'eau tombée pendant les événements cévenols influençant aussi le temps de trajet des eaux météoriques jusqu'aux aquifères.

Liens entre les épisodes cévenols et les anomalies de résistivité.

Comment peut-on expliquer les variations de la composition des fluides marquées par les anomalies de résistivité Imageau?

Les anomalies bleues (moins résistive), circulent dans les aquifères quand la pression est haute, autrement dit quand un épisode de forte pluie est survenu antérieurement. Trois hypothèses peuvent expliquer la diminution de résistivité dans les fluides (donc l'augmentation de conductivité) :

-L'augmentation de la quantité d'eau dans les lithologies pourrait avoir tendance à abaisser la résistivité.

-Lors des épisodes cévenols, Les cations (calcium, magnésium, potassium, sodium) présents dans les calcaires (CaCO_3)/dolomies ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) et autres roches des Causses du Larzac, sont facilement altérables, mis en solution et drainés par les épisodes de fortes pluies. Ces cations s'infiltrent avec les eaux météoriques jusqu'aux aquifères. Les cations augmentent la conductivité de l'eau (donc diminuent la résistivité), expliquant bien les anomalies de résistivité bleue.

- La dissolution et la mise en solution des cations des évaporites (gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) et anhydrite (CaSO_4)) lors de la circulation des eaux météorique en profondeur aura aussi tendance à diminuer la résistivité de l'eau dans les aquifères.

A l'inverse, les anomalies rouges (plus résistive) semblent circuler dans les aquifères (mis à part l'anomalie C) lorsque la pression est au plus bas (période d'étiage), donc quand les épisodes de fortes pluies ont tendance à se calmer. Comme la quantité d'eau diminue, la proportion de cations mis en solution diminue aussi. Cette diminution de la quantité d'eau ainsi que la plus faible proportion de cations en présences dans l'eau explique bien l'augmentation de la résistivité traduite par les anomalies rouges.

Conclusion sur le stage :

L'observatoire Imageau permet de visualiser l'évolution de la composition/circulation des fluides dans les zones de glissement. Durant le stage, ces informations sur la variation de la résistivité des fluides circulant dans les parties profondes du glissement de terrain ont été couplées avec les informations suivantes :

- Les diagraphies.
- Les courbes calculées grâce aux méthodes géophysiques.
- La pluviométrie de la région.
- L'analyse des carottes prélevées dans la zone d'étude.

Grace à cette approche pluridisciplinaire mêlant géologie et géophysique deux points essentiels en sont ressortis :

- Les caractéristiques lithologiques et de circulation des fluides dans la couche savon du glissement de terrain on put être contraint, permettant la mise en évidence de scénarios possibles décrivant l'évolution dans le temps des parties motrice du glissement de terrain.
- Le lien entre l'évolution et la variation des fluides circulant dans les deux aquifères présents dans les roches de faille et les épisodes cévenols.

Pour aller plus loin dans la compression de ces circulations de fluides dans les glissements de terrain, les caractéristiques pétrophysiques (porosité hélium, triple pesée...) des aquifères devraient être effectuées sur les carottes permettant ainsi une quantification plus réaliste que nos modèles géophysiques calculés. L'analyse des constituants chimiques présents dans l'eau des aquifères pourrait corroborer ou non l'hypothèse des variations des valeurs de résistivité en fonction de la variation de la quantité de cation mis en solution.

Source :

- Archie G.E. 1942. *The Electrical Resistivity Log as an Aid in Determining some reservoir characteristics*. Trans. AIMME. 146. Pages 54, 62.
- Louis Briquet, *Géophysique de puits – diagraphies*, novembre 2013, site web : <http://mon.univ-montp2.fr/>. Page 9.
- *PLAN de PREVENTION DES RISQUES MOUVEMENTS DE TERRAIN*, fait par la société SI (société d'ingénierie eau et environnements) année de publication, juillet 2008. Page 27.
- Schlumberger, *Log Interpretation Chart*, 1997.
- Waxman M.H. and Smits L.J.M., 1968, "Electrical conduction in oil-bearing sands," *Society of Petroleum Engineers Journal*, 8. Page 107.
- Wyllie M.R.J., Gregory, A.R., and Gardner, L.W., 1956, *Elastic wave velocities in heterogeneous and porous media: Geophysics*, 21. Pages 40, 41, 70.

Calendrier de suivi avec les périodes et les actions menées de début Mars à fin Août 2014 :

MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JUILLET	Août
<p>-Travail bibliographique.</p> <p>-Analyse des données préexistantes du site de Pégairolles-de-l'Escalette.</p>	<p>-Mission au Cerege (Centre de Recherche et d'Enseignement de Géosciences) Aix en Provence pour découper le PVC entourant les carottes.</p> <p>-Analyse des carottes + prise en photo pour établir le log structural.</p>	<p>-Analyse des carottes + prise en photo pour établir le log structural.</p> <p>-Raboutage des photos des carottes.</p> <p>-Mise au propre du Log structural.</p>	<p>-Construction du log lithologique/mécanique+ Corrélation avec les diagraphies.</p> <p>-Construction modèles géologique.</p>	<p>-Calcul géophysique.</p> <p>-Corrélation données géologiques/géophysiques.</p>	<p>-Rédaction du mémoire.</p>