
Etude structurale, pétrographique et géochimique de la zone de déformation au contact de la faille normale du fossé d'effondrement de Gondrecourt.

1. Introduction

La zone d'endommagement au voisinage des failles peut être plus ou moins étendue (du cm à la dizaine de m), avec une déstructuration de l'encaissant progressive ou localisée. Le régime tectonique, l'intensité du rejet ainsi que la nature de l'encaissant sont autant de paramètres contrôlant l'ampleur de l'endommagement d'une zone de faille. La présence de fluides a également une grande importance sur l'évolution tectonique du système. La surpression de fluides est connue pour entraîner la fracturation, même pour un faible régime de contrainte.

Dans ces zones faillées, des indices de l'évolution tectonique et géochimique s'enregistrent dans les minéralisations carbonatées (Boles et Grivetti, 2000; Labaume et al., 2004; Matsuda et al., 2004). Ces informations peuvent permettre de répondre à une question fondamentale qui est de savoir si ces failles fonctionnent comme des barrières ou comme des drains pour la circulation des fluides. Les failles non cimentées sont des zones perméables qui peuvent entraîner des connexions entre des réservoirs. Par ailleurs, d'un point de vue économique, ces zones sont également importantes car elles sont souvent associées à des minéralisations hydrothermales économiquement exploitables.

Dans ce chapitre, une étude structurale, géochimique et pétrographique d'une zone de déformation située à la terminaison Sud-Est du fossé d'effondrement de Gondrecourt (Est du bassin de Paris) est présentée. Elle correspond à la zone d'endommagement du mur de la faille normale bordière Est du fossé de Gondrecourt. Des travaux d'excavation ont permis de réaliser une tranchée perpendiculaire à la faille de 10 m de longueur et 2 m environ de largeur sans atteindre la faille elle-même.

La qualité et la fraîcheur de l'affleurement permettent d'observer deux zones de bréchification associées à des remplissages calcitiques filoniens et une troisième zone uniquement filonienne. Ces cimentations calcitiques ont été étudiées pétrographiquement et géochimiquement. Chaque phase de remplissage a pu être identifiée et replacée dans une succession paragénétique afin d'élaborer un modèle pétrogénétique de la zone de déformation étudiée.

2. Contexte général

Le Bassin de Paris est un bassin intracratonique bordé par les massifs cristallins des Ardennes au nord-est, du massif des Vosges à l'Est, par le Massif Central au sud, et par le massif armoricain à l'ouest (Figure II.1).

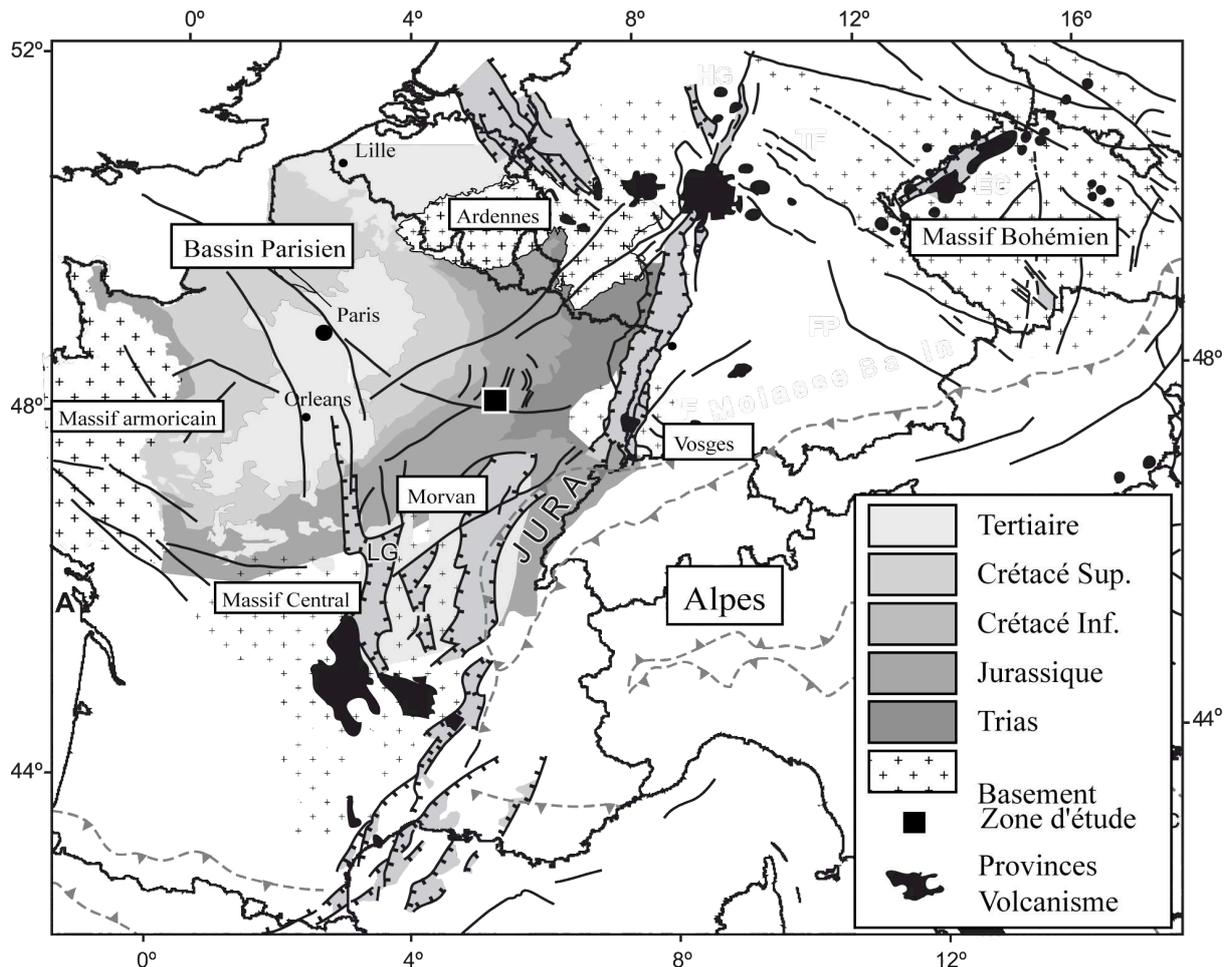


Figure II.1 : (A) Carte structurale de l'Europe de l'Ouest avec les principaux accidents tectoniques. Les zones noires représentent les provinces volcaniques et les zones grises représentent les principaux grabens (modifié de Dezès et al. 2005). Les formations du bassin de Paris sont présentées également.

Sur le secteur de Meuse/Haute Marne, la série sédimentaire du Trias au Kimmeridgien présente une structure monoclinale avec un faible pendage de 1 à 1,5° vers le nord-ouest. Cette structure est localement affectée par des déformations de grande longueur d'onde et par des failles régionales qui affectent toute la série secondaire. Le fossé de Gondrecourt, objet de cette étude, n'est pas lié à des failles enracinées dans le socle et a été initié par la phase de compression pyrénéenne puis s'est développé durant l'extension oligocène (Andra, 2005b, Landrein et al., 2012). Il se forme lors du système extensif généralisé qui a conduit à la formation des rifts ouest-européens tels que le fossés du Rhin, de la Bresse, du Morvan, (Villemin, 1986 ; Sissingh, 2003; Merle et Michon, 2001; Dezès et al., 2004) (Figure II.1)

La zone d'étude se situe dans les séries carbonatées jurassiques, du Kimmeridgien inférieur et supérieur (Figures II.2 et II.3). Cette zone correspond à la terminaison sud ouest du fossé d'effondrement de Gondrecourt, site AB7 en notation ANDRA, situé au sud est de Augeville en Haute Marne.

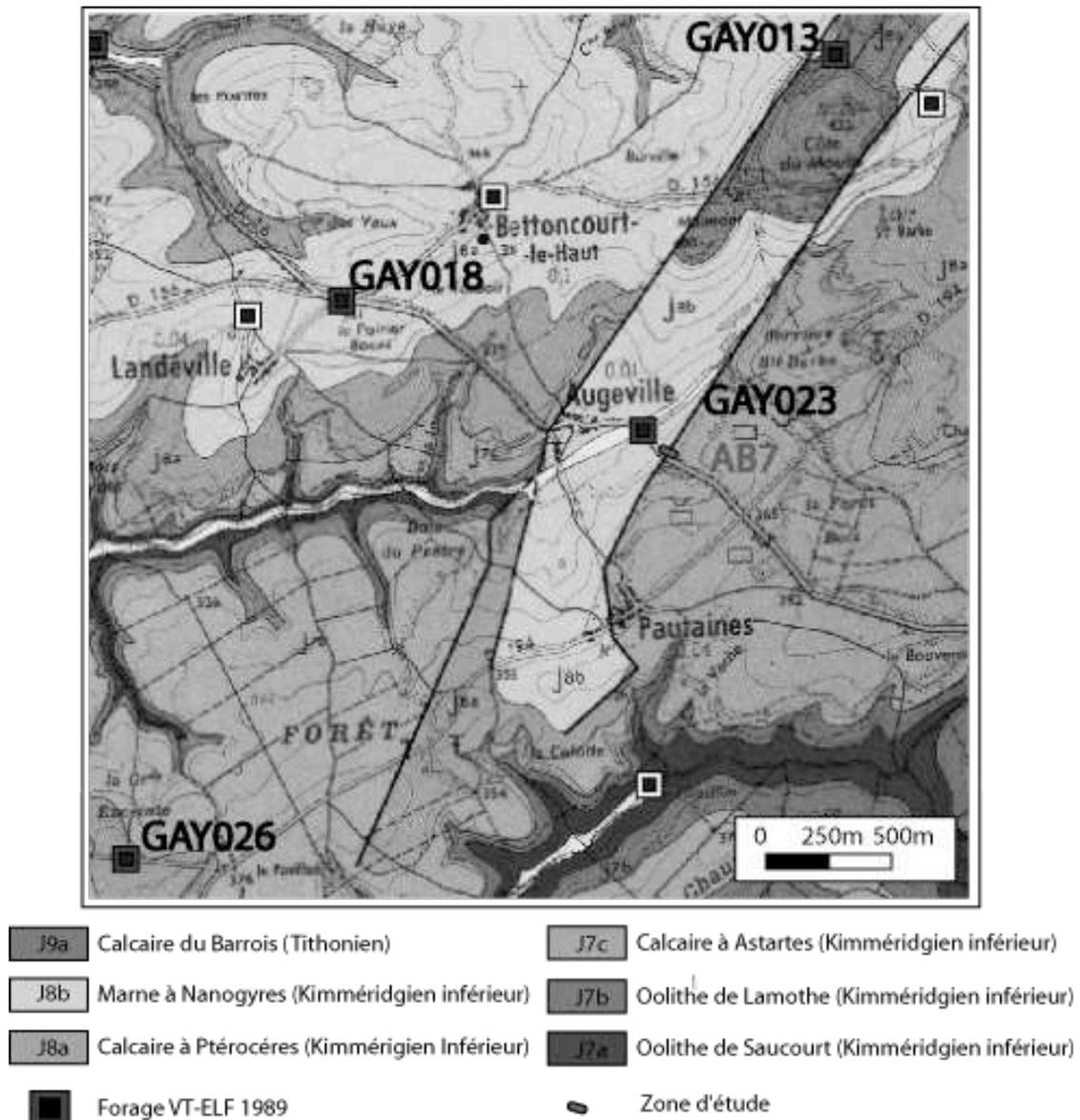


Figure II.2 : Carte géologique (1 :50 000) de la zone d'Augeville-Pautaine (Source BRGM). La tranchée (en rouge) est localisée à l'Est du fossé de Gondrecourt. Les forages VT-Elf 1989 sont indiqués par des carrés (InfoTerre du BRGM).

3. Matériels et méthodes d'échantillonnage

3.1 Echantillonnage sur le terrain

La zone AB7 (notation Andra), d'où proviennent les échantillons AB7#1 et AB7#3 (Deschamps et Hamelin, 2006) (chapitre V) correspond à l'affleurement en bord de route de l'extrémité sud de la faille Est du fossé d'effondrement de Gondrecourt (Figure II.2). Une tranchée a été réalisée, à cet endroit, en retrait, sur un chemin bordant la route. Les coordonnées, en Lambert 2 étendu de la zone, sont X=820,9 ; Y=2377,1 ; Z=330m. Cette zone de faille met en contact les formations lithologiques des marnes à Nanogyres (Kimméridgien inférieur à supérieur) avec les calcaires à Astartes (Kimméridgien inférieur).

Un log stratigraphique a été réalisé à partir de données de forages situés dans la zone d'étude (Figure II.3). Le rejet peut être estimé à plusieurs dizaines de mètres. Les directions générales des fentes de tension sont de N40 à pendages subverticaux.

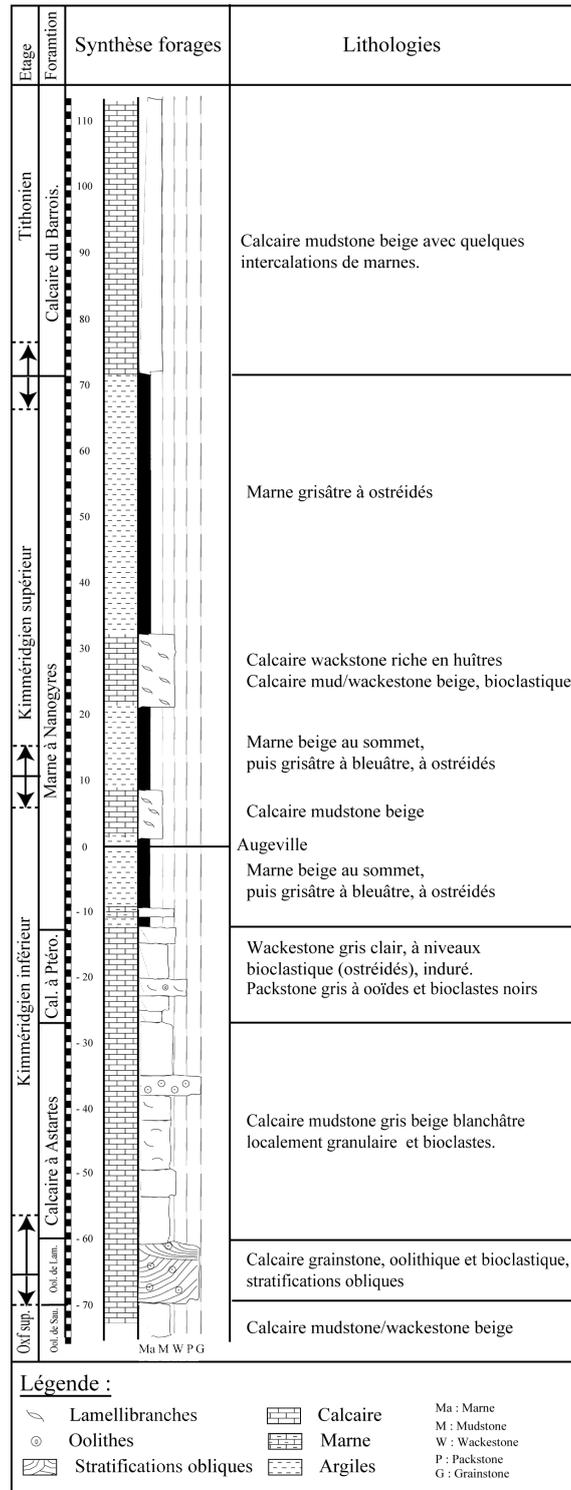


Figure II.3 : Log lithologique et stratigraphique reconstitué à partir des forages GAY013, GAY018, GAY023, GAY026. Le point 0 correspond au sommet du forage GAY023 d'Augeville (localisation des forages sur la Figure II.2).

Tableau II.1 : Tableau descriptif des échantillons étudiés sur la zone de déformation de Gondrecourt.

Echantillon	Description des échantillons
A2-a	Filonnet d'épaisseur millimétrique de calcite grise présentant des changements abrupts de direction suivant un réseau défini par des fractures antérieures, le tout dans un encaissant micritique.
A3-a	Filonnet de calcite grisâtre de 4mm d'épaisseur à cristaux demi-millimétriques avec des clastes de l'encaissant de calcaire micritique.
A9-a	Cristaux centimétriques jaunâtres, zonés recoupant des stylolithes.
A6A-a	Cristaux plurimillimétriques de remplissage d'une brèche dans un calcaire micritique. Une zone géodique est présente à 3 cm du prélèvement.
A7-a	Cristaux millimétriques de remplissage d'une brèche à proximité de zone géodique.
B4-a	Cristaux millimétriques de remplissage d'une brèche à proximité de zone géodique.
B6a(bis)	Cristaux, de couleur blanche, millimétriques de remplissage d'une brèche à proximité de zone géodique.
B7-a	Cristaux plurimillimétriques, blanchâtres de remplissage de brèche incluant des clastes mous.
B7-b	Cristaux centimétriques, grisâtres de remplissage de brèche avec des clastes de calcaire micritique.
B6c(bis)	Cristaux de calcite jaunâtres pluricentimétriques recoupant des cristaux de calcite de brèche.
B7c	Cristaux géodiques de calcite jaunâtre, plurimillimétrique dans une zone de brèche.
A1-a	Grands cristaux, très zonés, de calcite atteignant deux centimètres.
A6B-a	Filonnet de calcite blanche millimétrique dans un calcaire micritique situé à un demi-centimètre d'une zone de calcite grisâtre.
A6B-b	Cristaux centimétriques de calcite grise perpendiculaires aux parois.
B1B	Filonnet d'épaisseur centimétrique grisâtre avec des cristaux demi-centimétriques recoupant des petits filonnets de calcite grise dans un calcaire micritique.
B4b	Grands cristaux de calcite grise, très zonés, se développant perpendiculairement sur une zone de brèche.
B6b(bis)	Grands cristaux de calcite grise, très zonés, se développant perpendiculairement sur une zone de brèche.
B8b	Grands cristaux de calcite grise. La calcite est à croissance radiale entourant un claste de calcaire oolithique.
B8c	Grands cristaux de calcite grise. L'échantillon a été prélevé au contact d'une zone altérée.
C1b	Grands cristaux, très zonés de calcite grise atteignant six centimètres, provenant du centre d'un filon.
C3b2	Grands cristaux de calcite grise à zones de croissance très développées
A1-b	Grand cristaux centimétriques jaunâtres recouvrant les gros cristaux de calcite grisâtre.
B1Aa	Cristaux de calcite jaunâtres centimétriques se déposant sur des gros cristaux de calcite grise très zonés.
B1Ab	Cristaux de calcite jaunâtres centimétriques se déposant sur des gros cristaux de calcite grise.
C3d	Cristaux de calcite jaunâtres plurimillimétriques recouvrant la calcite filonienne.
C4	Grands cristaux de calcite jaunâtre.
A4-Enc(a)	Calcaire micritique.
A4-Enc(b)	Calcaire micritique.
A3-Enc(a)	Calcaire micritique. Le prélèvement est situé à quelques millimètres d'une microfracture.
B8-Enc(a)	Calcaire oolithique.
B8-Enc(b)	Calcaire oolithique.
C3-Enc(a)	Calcaire micritique présentant un litage.
C3-Enc(b)	Calcaire micritique présentant un litage.
C3-Enc(c)	Calcaire micritique présentant un litage.
C3-Enc(d)	Calcaire micritique présentant un litage.
D1-a	Marnes grises.
D1-b	Marnes rouges oxydés
D1-c	Fossiles de coquilles d'huitres dans marnes.
D1-d	Marnes grises.
D1-e	Calcite géodique blanche, millimétrique, avec traces d'oxydation rouges, cristallisé dans un fossile.

Cette campagne d'échantillonnage a été réalisée en 4 étapes successives de creusement par une pelle mécanique, dans le chemin, à une dizaine de mètres au nord de l'affleurement routier. La première étape a consisté à creuser les séries marneuses du Kimméridgien inférieur (Marnes à Nanogyres) sur une profondeur de 1m, à l'ouest. Cette partie, jugée sur le moment peu intéressante, a été abandonnée. Une deuxième excavation a donc été réalisée quelques mètres en retrait vers le Sud-Est afin de recouper les zones principales de déformation. Même si les Marnes à Nanogyres ont été observées lors de la 1^{ère} étape du creusement, il est à noter que le contact par faille entre les marnes et les calcaires n'a pas pu être correctement observé, car, à l'endroit du contact, l'excavation atteignait seulement 30cm de profondeur. Les dimensions finales de la tranchée sont de 10m de long sur 3m de large et de 3m de profondeur avec un maximum de 4m (sur 1m²) en son centre où des radicelles de végétaux ont tout de même été observées dans les fissures.

La position des échantillons est indiquée sur la coupe synthétique structurale (Figure II.4). Les échantillons (à l'exception des échantillons B4 à B8) ont été prélevés sur le front sud de la tranchée entre 50cm et 2m de profondeur. Ces échantillons sont répertoriés dans le tableau II.1. Les échantillons sont localisés par rapport à un point de référence 0 (Figure II.4) correspondant à l'est de la tranchée, sur son front sud (Figure II.4).

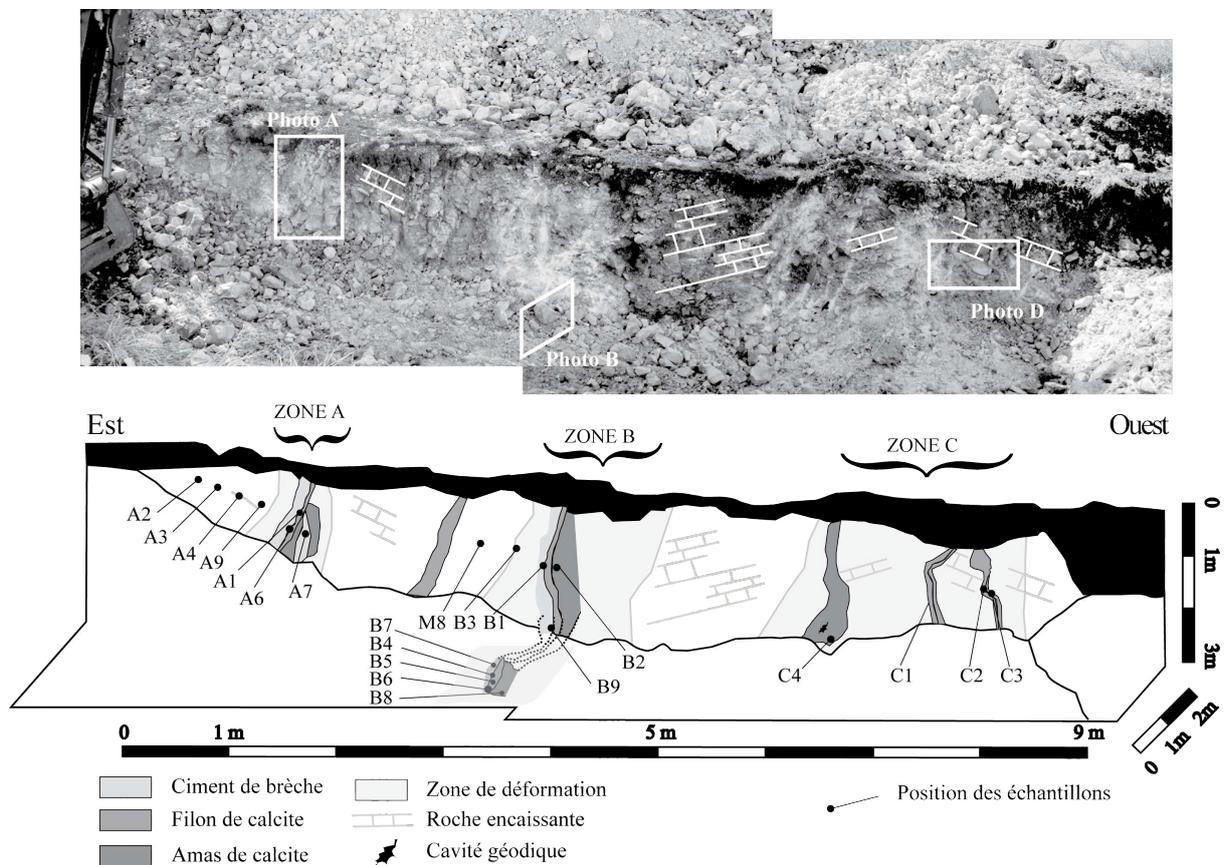


Figure II.4 : Photo de la tranchée d'Augeville avec le schéma synthétique des zones de déformation (brèches et filons). La localisation des échantillons et des photos est indiquée sur le schéma.

3.2 Description des zones de déformation A, B, C :

Dans cette tranchée, trois zones de minéralisation carbonatée ont été observées. La zone la plus à l'est est appelée zone A et correspond à une brèche recoupée par un filon. La zone intermédiaire, la zone B a sensiblement la même structure alors que la zone C la plus proche de la zone de faille à l'Ouest correspond à un système filonien. Entre ces zones de minéralisation, les litages du calcaire micritique sont inclinés dans différentes directions.

Dans la zone A, la roche encaissante est intensément fracturée. Une brèche d'effondrement caractérisée par une distribution en mosaïque des clastes déplacés les uns par rapport aux autres avec une composante rotative est observée (Figure II.5). Plus à l'ouest, la brèche est recoupée par un filon décimétrique de calcite grisâtre. Puis, une bréchification hydraulique est observable et se caractérise par un éclatement de la roche encaissante avec peu de déplacement entre les fragments. Pour finir entre le filon de calcite et la brèche hydraulique ainsi qu'à l'ouest de celle-ci se trouve une zone constituée d'amas de cristaux millimétriques à centimétriques associés à des dépôts d'argile rouges.

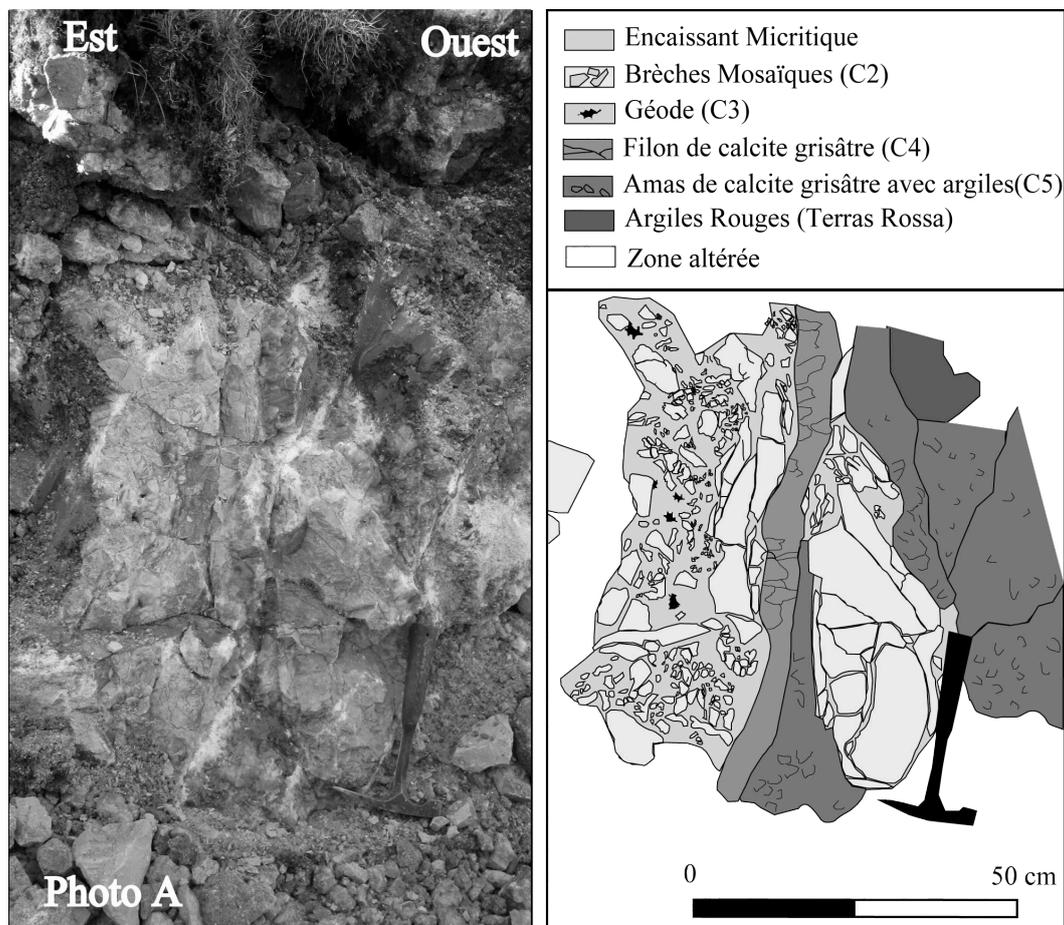


Figure II.5 : Photographie (A) et schéma de la zone de déformation A. De l'est vers l'ouest il y a 1- une formation de calcaire micritique basculé, 2- une brèche d'effondrement à remplissage calcitique, 3- un filon de calcite de couleur grisâtre, 4- la fracturation hydraulique de la roche encaissante, 5- des amas de cristaux de calcite millimétriques et centimétriques associés à de l'argile rouges de décalcification.

La zone de déformation B est similaire à la zone de déformation A. Dans cette zone, les brèches présentent clairement plusieurs épisodes successifs d'ouvertures formant des brèches d'effondrement associées aux brèches hydrauliques. Par endroit, à l'interface de ces zones d'ouverture se trouvent des géodes et des zones plus oxydées (Figure II.6). Il est également observable des filons de calcite ainsi que des amas de cristaux de calcite associés à des argiles rouges. Très localement, un claste oolithique a été retrouvé dans les amas de cristaux de calcite.

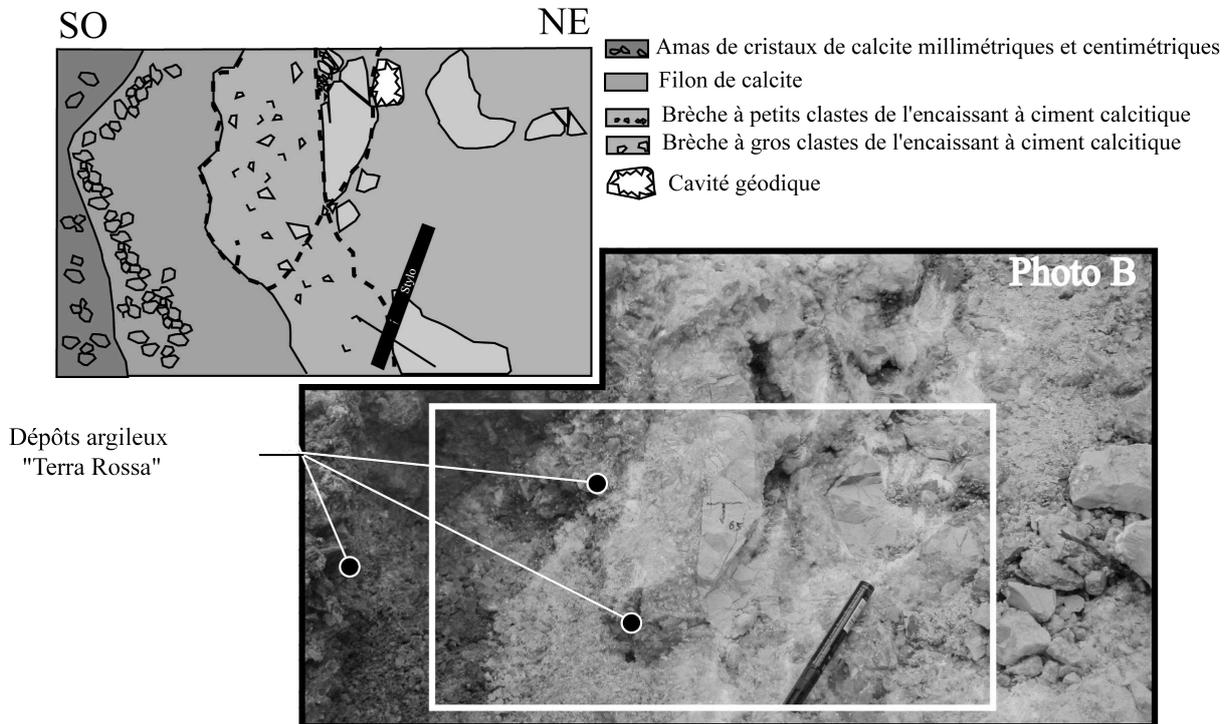


Figure II.6 : Photo de la zone bréchifiée B avec la représentation schématique des quatre grands types de lithologies présentes sur le site. Du fossé au sud ouest vers le NE, il y a : 1- des amas de cristaux de calcite millimétriques et centimétriques, 2- un filon de calcite, 3- une brèche d'effondrement, 4- un claste à fracturation hydraulique à petits clastes, 5- un remplissage calcitique de brèche d'effondrement.

Dans la zone C se trouvent trois filons décimétriques de calcite grisâtre (Figure II.7). Les filons C1 et C2 sont contigus alors que le filon C3 est situé à 1m vers l'ouest des deux premiers. Ces trois filons sont discontinus et sont associés à des amas de cristaux de calcite millimétriques à centimétriques dans la partie supérieure. Cette zone présente une roche encaissante très déstructurée où il est difficile de retrouver la stratigraphie originelle.

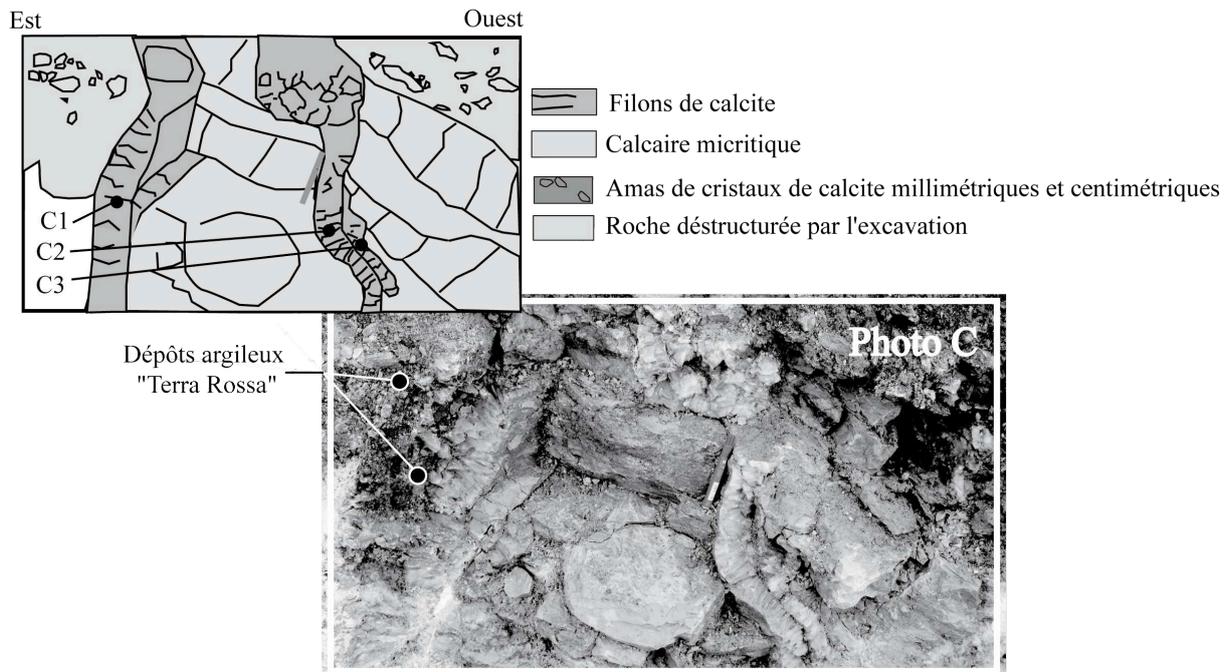


Figure II.7 : Photographie de filons de calcite et schéma d'interprétation. De l'est vers l'ouest il y a 1- des filons de calcite associés à des amas de cristaux de calcite, 2- du calcaire micritique déstructuré, 3- des filons de calcite associés à des amas de cristaux de calcite millimétriques et centimétriques, 4- des blocs de calcaire micritiques basculés et déstructuré par l'excavation.

4. Successions paragénetiques

48 lames polies ont été analysées par microscopie optique et cathodoluminescence et par microscopie électronique à balayage (MEB). Ces observations ont permis d'identifier les phases majeures de remplissage et de procéder à un échantillonnage de ces phases afin de réaliser des analyses géochimiques.

1. Microfracturation (C0) - Le calcaire micritique beige est recoupé par des joints stylolithiques et des microfractures. Cette roche encaissante est fortement luminescente en cathodoluminescence. L'espacement des joints stylolithiques est de quelques centimètres. Ils peuvent être localement connectés entre eux par des petites veines perpendiculaires aux joints et parallèles aux pics stylolithiques. L'organisation spatiale des joints stylolithiques et des microfractures suggère une contemporanéité de formation. Les joints stylolithiques parallèles à la stratification et les microfractures perpendiculaires sont formés par compaction due à la charge sédimentaire sus-jacente. (Figure II.8)

2. Calcite 1 (C1) - Cette calcite présente des cristaux de taille de plusieurs centaines de micromètres. Deux stades de cimentation sont décelés (C1a et C1b). C1a est caractérisé par une teinte cathodoluminescente orange assez sombre de type *sector zoning*. C1b se caractérise par une teinte sombre surlignée par des stades de croissance. C1 recoupe les stylolithes et les microfractures (C0) (Figure II.8).

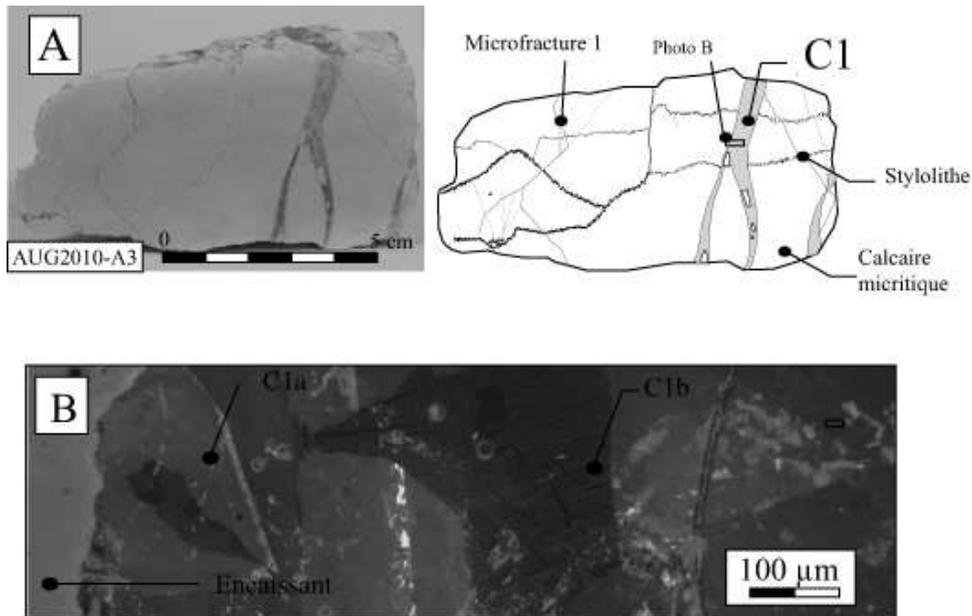


Figure II.8 : Planche photo sur les remplissages calcitiques (C1) dans les microfractures (A) Echantillon macroscopique avec un réseau de microfractures 1, des stylolithe, ainsi que des remplissages de microfractures par le ciment C1. (B) et (C) photographie d'observation en microscopie optique et catholuminescence de deux générations de calcite (C1) témoignant d'ouverture de la microfracture en plusieurs étapes.

3. Calcite 2 et 3 (C2 et C3) - Cette deuxième phase de calcite est visible dans un faciès bréchique (Figure II.9) comprenant des clastes anguleux ou sub-anguleux, de taille variant de millimétrique à pluricentimétrique. Ces clastes sont essentiellement monogéniques, de calcaire micritique cohésif à dissous. Le faciès bréchique est composé de deux types de cristaux (Figure II.9) : (1) Une série de cristaux calcitiques grisâtres granulaires millimétriques (C2), bordant les clastes et très riches en inclusions de micrite très luminescente, semblable aux teintes de la roche encaissante micritique et (2) une seconde génération de cristaux de calcite blanchâtres millimétriques à terminaison par endroit géodiques (C3). Les inclusions micritiques dans les cristaux de C2 peuvent former des bandes parallèles aux lignes de croissance. En cathodoluminescence, les linéations de micrite présentent une luminescence vive, contrastant avec les zones sombres dépourvues d'inclusion. En microscopie il est observable que C2 enregistre une multitude de stades de cimentation/fracturation, à l'origine de multiples générations de remplissage pour C2 (Figure II.9). Ces multiples générations de fracturations/remplissages isolent des clastes en texture « mosaïque ». Les générations les plus tardives de C2 et la génération C3 sont moins luminescentes que les premières générations de C2.

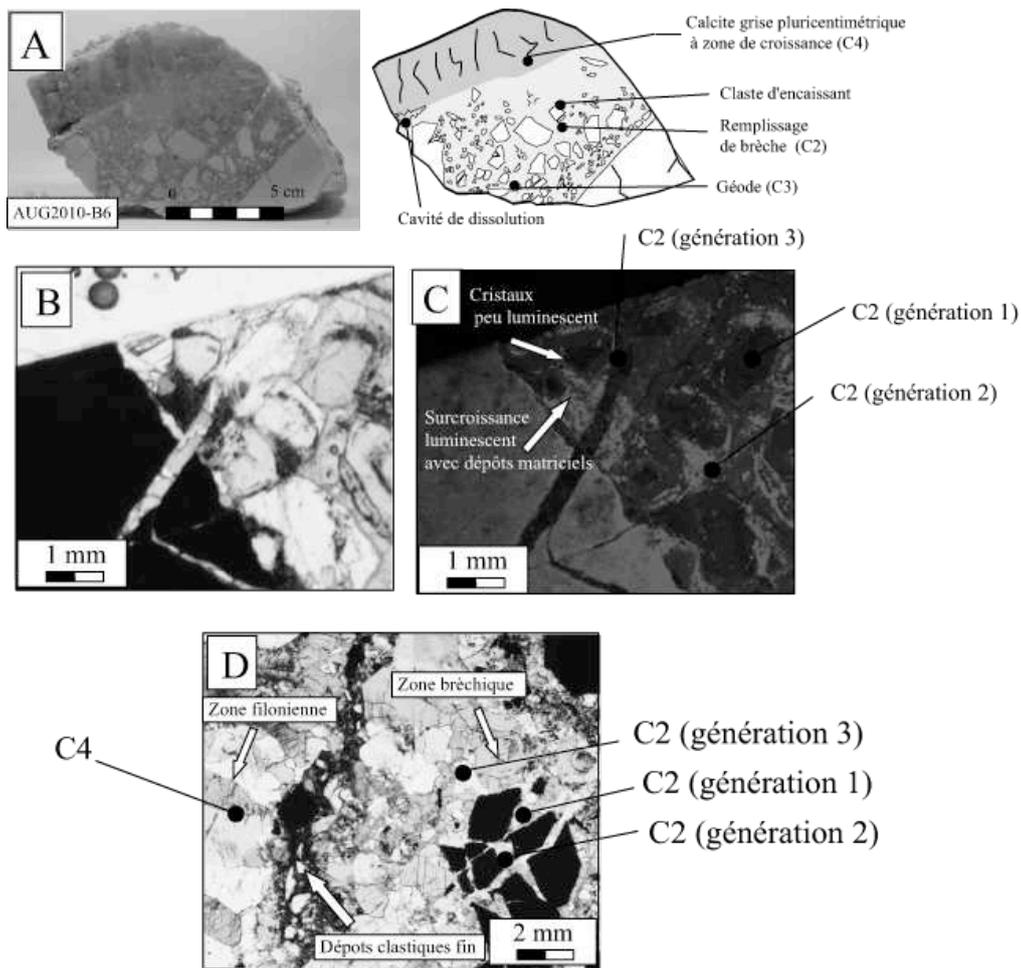


Figure II.9 : Planche photo sur les remplissages calcitiques de brèches C2. (A) Echantillon macroscopique d'une brèche d'effondrement avec un filon de calcite grisâtre à gauche. (B) et (C) photographie d'observations en microscopie optique et catholuminescence de différentes générations de remplissages dans les ciments bréchiques. (D) Plusieurs générations de calcite bréchique recoupant en plusieurs temps un claste de roche encaissante. Le contact entre le ciment calcitique bréchique et la zone filonienne est séparé par un liseré de dépôts matriciels.

4. Calcite 4 (C4) - C4 cristallise dans des fractures formant des filons décimétriques (Figure II.10). Les cristaux de C4 sont pluricentimétriques à zones de croissance bien marquées. En général, C4 correspond à un ensemble de cristaux de calcite radiaxiale fibreux présentant au moins deux sous-zones. Il peut s'agir d'un remplissage correspondant à une calcite grisâtre fortement zonée, à cristaux pluricentimétriques incluant de petits clastes d'encaissants micritiques de quelques millimètres ou bien de cristaux de calcite en amas pouvant inclure des cristaux de calcite de remplissage bréchique ou des remplissages filoniens ou bien des clastes d'oolithes ou de micrites (Figure II.10). Les stades de croissance sont parfois soulignés par des dépôts de matériels matriciels, montrant les multiples stades d'ouverture et cimentation. Cette calcite est faiblement luminescente dans son ensemble surtout dans les zones filoniennes. Dans les zones qui correspondent plus à des amas de calcite plusieurs générations sont observables. Les premières générations sont porteuses d'éléments détritiques et sont luminescentes, alors que les dernières phases sont faiblement luminescentes et dépourvues d'inclusions solides.

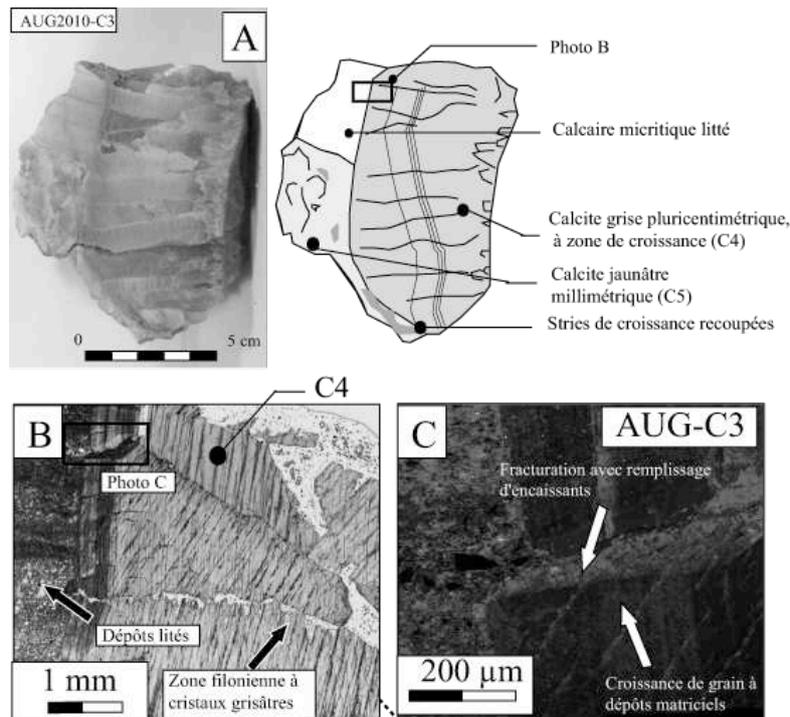


Figure II.10 : Planche photo sur les cristaux de calcite filonienne grisâtre C4. (A) Echantillon macroscopique d'un filon de calcite grisâtre. (B) et (C) photographie d'observation en microscopie optique et catholuminescence des remplissages calcitiques. Ces cristaux pluricentimétriques de calcite sont très clivés au contact de l'éponte et fracturés.

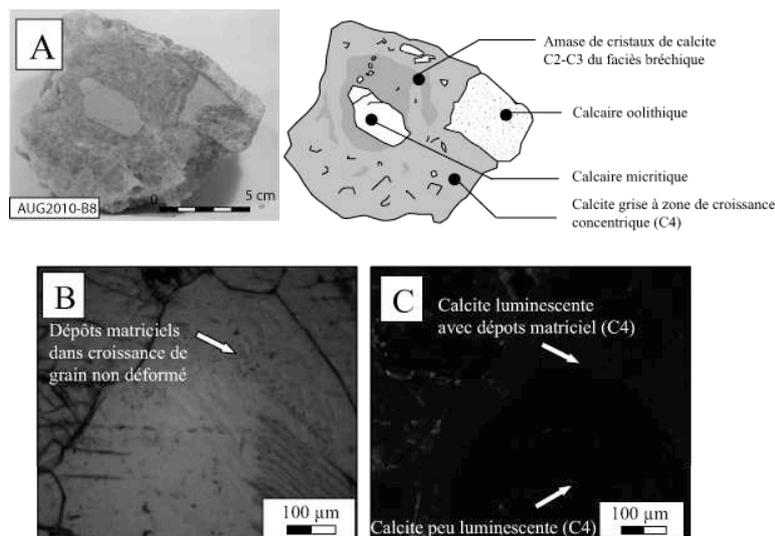


Figure II.11 : Planche photo des cristaux de calcite des amas de calcite C4. (A) Echantillon macroscopique d'un amas de cristaux de calcite incluant un encastant d'oolithe et de micrite. (B) et (C) photographie d'observation en microscopie optique et catholuminescence des remplissages calcitiques. Ces cristaux présentent deux générations. La première est peu luminescente avec des inclusions solides alors que la deuxième est luminescente avec des inclusions solides.

5. Calcite 5 (C5) - C5 est un remplissage calcitique de calcite jaunâtre qui se développe sur des cristaux de calcite grisâtre (Figure II.11). Ces cristaux présentent des inclusions solides.

6. Calcite 6 (C6) - C6 correspond à des cristaux de calcite géodiques inframillétriques qui se développent dans des cavités de dissolution observées à l'interface d'une zone de brèche et d'une zone filonienne. Cette phase de remplissage est très peu abondante. Ces cristaux sont présents sur l'échantillon de la figure II.9.

L'histoire paragenétique de la zone de déformation est synthétisée dans la figure II.12.

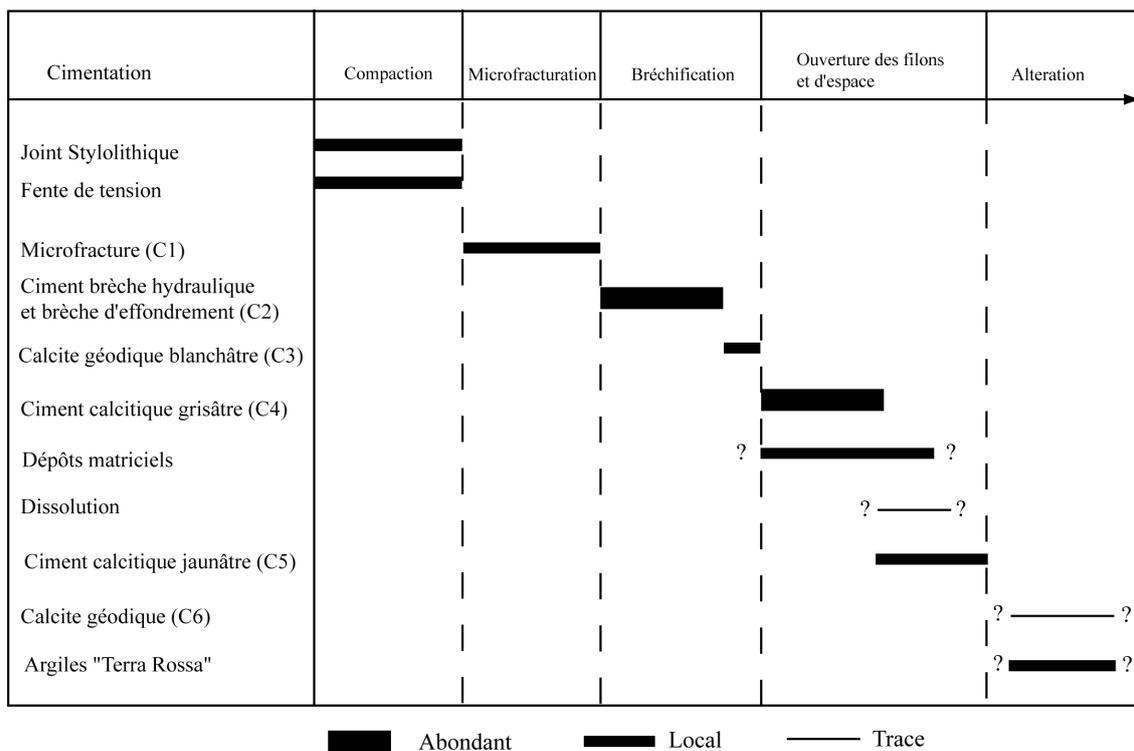


Figure II.12 : Séquence paragenétique des différents faciès pétrographiques observés dans la zone de déformation étudiée.

5. Données géochimiques

L'ensemble des données des analyses des concentrations des éléments mineurs (Mg, Mn) et des éléments des terres rares est présentée dans les tableaux II.2, II.3. Le tableau II.2 présentent les valeurs d'analyses obtenues pour l'étude pétrographique, le tableau II.3 correspond aux échantillons étudiés pour la datation (U-Th-Sm)/He et dans le cadre des expériences de diffusion. Le diagramme de la figure II.13 illustre l'évolution des concentrations en magnésium en fonction des concentrations en manganèse. Les diagrammes des figures II.14, II.15 et II.16 illustrent les résultats concernant les éléments des terres rares de ces échantillons. La figure II.17 présente les résultats concernant les isotopes stables ($\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^{13}\text{C}$).

Tableau II.2 : Tableau de données des analyses chimiques élémentaires et des isotopes stables sur les échantillons étudiés dans le cadre de l'étude pétrographique de la zone de déformation de Augeville.

Ech.	Type	$\delta^{13}\text{C}$ ‰	$\delta^{18}\text{O}$ ‰	$\delta^{18}\text{O}$ ‰	Mg	Mn	Sr	(La/Yb) _N	ΣREE	CeA
		(V-PDB)	(V-PDB)	(V-SMOW)	(ppm)	(ppm)	(ppm)		(ppm)	
A2	Microfracture	0,9	-9,2	21,3	1936	15	198	0,3	81	0,8
A3	Microfracture	2,6	-8,5	22,1	2386	23	791	0,2	805	0,4
A9	Microfracture	2,9	-8,3	22,3	3376	29	972	0,9	6174	0,4
A6-A	Ciment de Brèche	2,8	-8,50	22,1	2854	27	361	0,3	610	0,3
A7-a	Ciment de Brèche	2,9	-8,30	22,3	2829	26	333	1,2	2316	0,3
B4-a	Ciment de Brèche	2,8	-8,50	22,1	2623	23	555	0,3	1128	0,3
B6-a	Ciment de Brèche	2,7	-8,37	22,2	2617	27	341	0,7	505	0,4
B7-a	Ciment de Brèche	2,9	-8,27	22,3	3076	27	521	0,5	2020	0,4
B7-b	Ciment de Brèche	2,6	-8,79	21,8	2428	22	1299	0,7	5260	0,4
B6-c	Géode	2,8	-8,5	22,1	2173	22	379	0,3	331	0,5
B7-c	Géode	2,3	-8,8	21,8	1230	16	153	0,4	306	0,8
B9-a	Géode	2,4	-8,8	-	-	-	-	-	-	-
A1-a	Filon grisâtre	2,1	-9,1	21,5	1591	17	872	0,8	4780	0,3
A6-B-a	Filon grisâtre	2,0	-9,7	20,9	1480	16	889	0,5	5107	0,3
A6-B-b	Filon grisâtre	2,0	-9,1	21,5	1962	20	607	1,4	8754	0,3
B1-B	Filon grisâtre	2,6	-8,6	22,0	2291	23	685	0,1	355	0,3
B4-b	Filon grisâtre	2,2	-9,1	21,5	1893	20	636	1,3	7811	0,3
B6-b	Filon grisâtre	2,3	-8,6	22,0	2148	23	934	0,9	6219	0,4
B8-b	Filon grisâtre	2,0	-9,3	21,2	1474	16	827	0,7	6215	0,3
B8-c	Filon grisâtre	2,1	-9,0	21,5	2259	23	389	0,4	1823	0,7
C1-b	Filon grisâtre	1,7	-9,2	21,4	1158	19	325	0,8	3055	0,5
C3-b1	Filon grisâtre	1,0	-9,9	20,7	1358	19	742	0,6	5032	0,6
C1-a1	Première Eponte Fil.	1,5	-9,5	21,0	-	-	-	-	-	-
C1-a2	Centre Filon	2,2	-9,0	21,6	-	-	-	-	-	-
C1-a3	Deuxième Eponte	1,7	-9,2	21,3	-	-	-	-	-	-

C3-b1	Première Eponte Fil.	1,0	-9,9	20,6	-	-	-	-	-	-
C3-b2	Centre Filon	1,8	-9,1	21,4	-	-	-	-	-	-
C3-b3	Deuxième Eponte	2,6	-8,9	21,6	-	-	-	-	-	-
C3a-2	~ 1 cm éponte	1,5	-9,4	-	-	-	-	-	-	-
C3a-3	~ 2 cm de l'éponte	1,9	-9,1	-	-	-	-	-	-	-
C3a-4	~ 3 cm éponte	2,1	-8,7	-	-	-	-	-	-	-
A1-b	Calcite Jaunâtre	2,2	-9,2	21,4	1577	18	584	0,6	3916	0,3
B1-A-a	Calcite Jaunâtre	2,0	-9,2	21,4	1814	17	739	0,2	1559	0,3
B1-A-b	Calcite Jaunâtre	2,4	-8,8	21,8	1349	17	772	0,6	5053	0,4
C3d	Calcite Jaunâtre	1,8	-8,8	21,8	1103	22	401	0,2	1110	0,5
C4	Calcite Jaunâtre	2,2	-9,0	21,6	1639	16	836	0,7	5518	0,3
A4-Enc(b)	Enc. micritique	2,4	-5,4	25,3	2704	17	285	-	-	-
A4-Enc(a)	Enc. micritique	-	-	-	2631	18	284	-	-	-
A3-Enc(a)	Enc. micritique	2,7	-5,2	25,5	2867	22	306	-	-	-
B8-Enc(b)	Enc. oolithique	3,1	-3,7	27,1	3561	47	353	-	-	-
B8-Enc(a)	Enc. oolithique	-	-	-	3682	62	402	-	-	-
C3-Enc(a)	Enc. Mic. litté	-	-	-	1643	109	442	-	-	-
C3-Enc(b)	Enc. Mic. litté	-	-	-	1743	193	419	-	-	-
C3-Enc(c)	Enc. Mic. litté	0,5	-9,1	21,5	-	-	-	-	-	-
C3-Enc(d)	Enc. Mic. litté	0,1	-9,4	21,2	-	-	-	-	-	-
D1-a	Marnes grises	1,5	-2,9	27,9	-	-	-	-	-	-
D1-b	Marnes grises ox.	0,7	-4,4	26,3	-	-	-	-	-	-
D1-c	Fossiles d'huitres	2,6	-2,2	28,6	-	-	-	-	-	-
D1-d	Marnes grises	1,4	-2,0	28,8	-	-	-	-	-	-
D1-e	Calcite dans fossiles	1,0	-7,2	23,4	-	-	-	-	-	-

Tableau II.3 : Tableau de données des analyses chimiques élémentaires des échantillons étudiés dans le cadre de l'étude des mécanismes de diffusion de la zone de déformation d'Augeville.

Echantillon	Masse (mg)	Mg (ppm)	Mn (ppm)	Sr (ppm)	(Ce*) _N	(La/Yb) _N	ΣREE (ppb)
Expérience de datation (U-Th-Sm)/He							
Ciment calcitique de microfracture							
A3-2	2,0	2194	26	257	0,96	0,58	621,18
A9-2	9,4	3037	28	430	0,48	0,68	2692,74
Ciment calcitique de brèche							
A6a-1	44,0	2385	24	385	0,80	0,27	308,41
A6a-2	39,1	2372	23	451	0,39	0,69	1312,16
A6a-3	24,2	2086	20	337	1,33	0,29	286,89
A7-1	5,9	1918	18	636	0,71	0,30	1023,25
A7-2	7,5	2534	25	413	0,97	0,36	697,91
A7-3	7,8	1863	21	758			
B4a-1	6,5	1987	21	904	0,64	0,21	1509,41
B4a-2	10,4	2363	23	405	0,64	0,59	1289,42
B7a-1	4,3	1816	22	422	1,15	0,41	616,72
B7a-2	4,7	2340	24	874	0,43	1,07	5425,62
B7a-3	7,0	1888	22	464	0,78	0,53	1025,49
B7b-1	3,3	2371	31	1092	0,41	0,68	4824,03
B7b-2	4,2	2123	22	896	0,41	0,96	5295,08
B7b-3	1,6	2470	24	848	0,49	1,01	5968,59
B6a-1	3,1						
B6a-2	8,7	2230	22	240	0,97	0,61	594,73
Cristaux grisâtre de calcite filonienne							
A1a-2	8,2	1687	19	566	0,42	0,86	3932,15
A6Bb-1	9,8	1836	20	485	0,40	0,78	4458,91
A6Bb-2	7,5	1345	16	662	0,38	0,91	6609,33
A6Bb-3	7,1	1598	18	654	0,40	0,62	4420,63
C3b1-1	38,0	1402	17	789	0,36	0,72	5028,71
C3b1-2	20,6	1285	13	819	0,38	0,63	4065,42
C3b1-3	45,9				-	-	-
Cristaux jaunâtre de calcite							
A1b-2	4,9	1430	18	797	0,69	0,11	811,47
B1a-1	13,7				-	-	-
B1a-2	5,7	2371	22	189	1,32	0,15	533,27
Calcite géodique							
B7c-1	6,1	2617	25	457	4,19	0,17	239,28
B7c-2	5,4	2041	22	383	2,79	0,52	471,02
B7c-3	15,1	774	14	190	2,01	0,51	811,92
Expérience de diffusion							
Ciment calcitique de microfracture							
A2-2	-	1958	14	336	1,36	0,66	577,35
A2-4	-	2018	16	340	0,72	1,35	561,15
A2-5	-	1702	12	352	1,76	0,28	765,54
Ciment calcitique de brèche							
B4a-8	-	2271	22	1073	0,52	0,32	1538,62
B4a-9	-	1979	19	484	0,96	0,36	753,27
B4a-10	-	1872	19	227	1,39	0,45	345,15
B4a-11	-	2332	21	538	0,61	0,45	1133,88
Cristaux grisâtre de calcite filonienne							
C1b-12	-	1443	24	370	0,58	0,76	2869,03
C1b-13	-	1659	26	329	0,63	0,64	2761,47

5.1 Concentrations des éléments mineurs

Les concentrations en magnésium de l'ensemble des échantillons de calcite varient de 774 à 3376 ppm, les concentrations en manganèse de 12 à 31 ppm et en strontium de 156 à 1092 ppm. Les concentrations maximales de manganèse et de magnésium se retrouvent dans des cristaux de calcite C1 puis dans les cristaux de calcite de brèches (C2). Les cristaux ayant les concentrations les plus faibles sont les cristaux de calcite filonienne ou en amas (C4) et les cristaux de calcite jaunâtre (C5). Une corrélation positive existe entre les concentrations en magnésium et en manganèse pour l'ensemble des phases majeures de remplissage des brèches (C2) aux cristaux de calcite jaunâtre (C5).

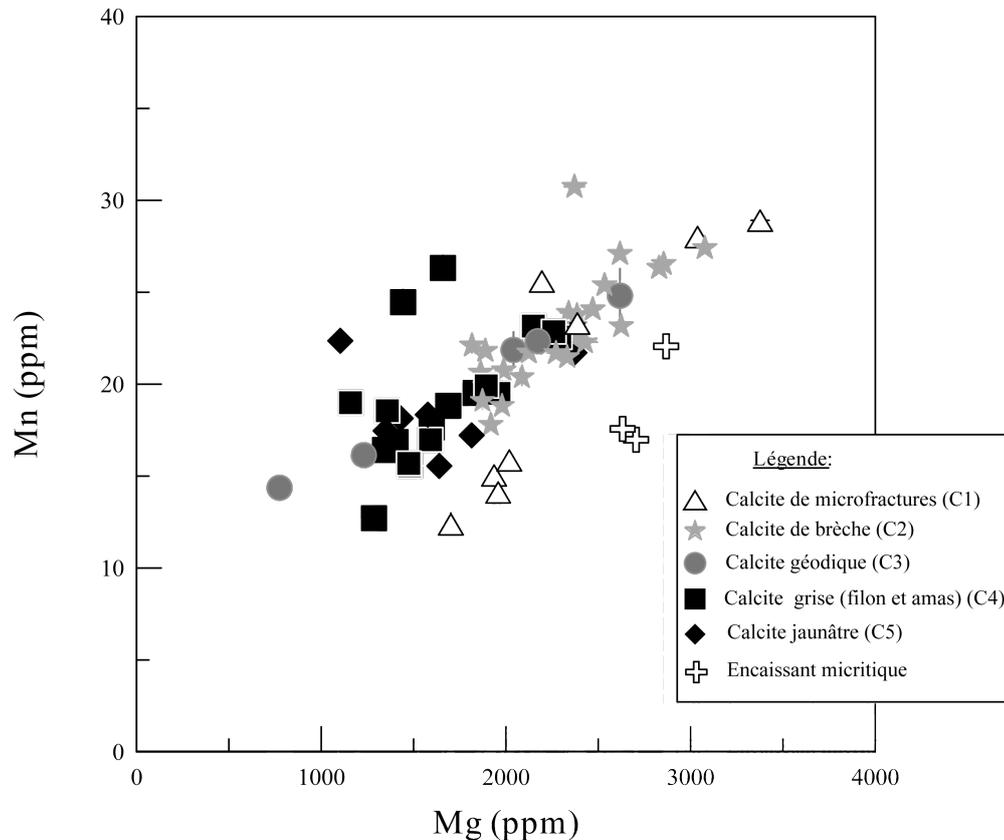


Figure II.13 : Diagramme des concentrations en manganèse en fonction des concentrations en magnésium en fonction du type de calcite.

5.2 Eléments des terres rares

Les concentrations en éléments des terres rares s'individualisent de la même façon que les éléments mineurs pour l'ensemble des échantillons entre les phases majeures de remplissage. Les cristaux de calcite bréchique (C2) ont des concentrations en éléments des terres rares les plus faibles de 308 à 2854 ppm avec trois échantillons pouvant atteindre des valeurs supérieures à 3000 ppm face aux cristaux de calcite en amas ou filonienne (C4) qui présentent des concentrations en éléments des terres rares souvent supérieures à 3000 ppb. Les cristaux de calcite géodique (C3) ont des concentrations faibles en éléments des terres rares. Les cristaux de calcite des microfractures varient entre les concentrations faibles des cristaux de calcite de brèches et les concentrations élevées de cristaux de calcite filonienne.

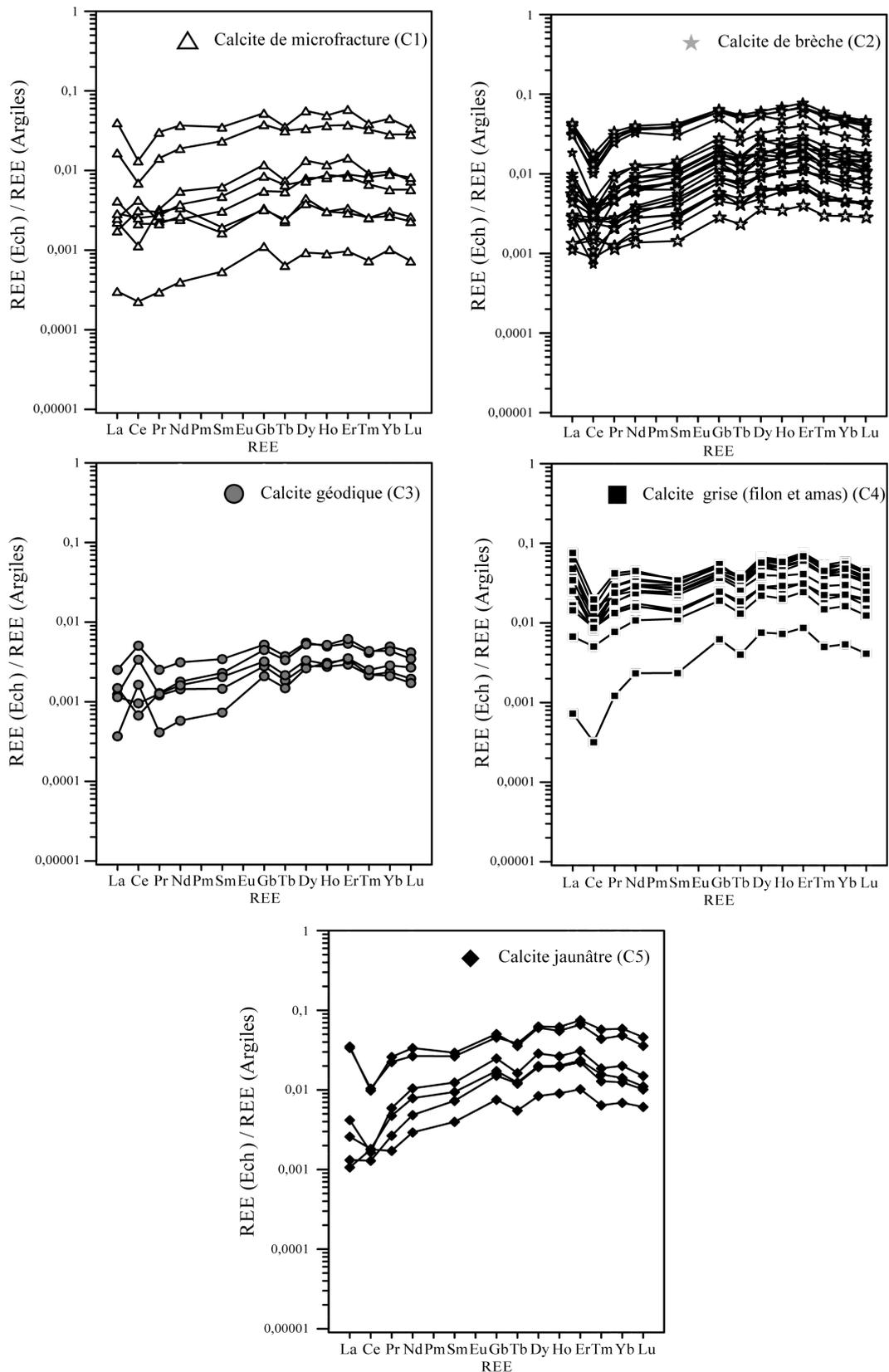


Figure II.14 : Diagramme des spectres des éléments des terres rares sur les différents faciès pétrographiques étudiés normalisé aux argiles (Sholkovitz et al., 1999).

De la même façon les spectres des éléments des terres rares présentent des tendances communes au sein des grandes phases de remplissages. Il ressort que plus les cristaux de calcite sont enrichis en terre rares plus ils présentent des spectres de terres rares plats avec une anomalie négative en cérium prononcée. C'est le cas pour des cristaux de calcite grisâtre (C4). A l'inverse, plus les concentrations sont basses plus les spectres s'illustrent par un appauvrissement en terres rares légères et une anomalie en cérium légèrement inférieure à 1 voire positive comme pour les cristaux de calcite géodique (C3) ou certains cristaux de calcite jaunâtre (C5) ou de brèches (C2). Les cristaux de calcite des microfractures se démarquent par des signatures géochimiques variables qui s'apparentent à la fois à des cristaux de calcite de brèches ou de filon.

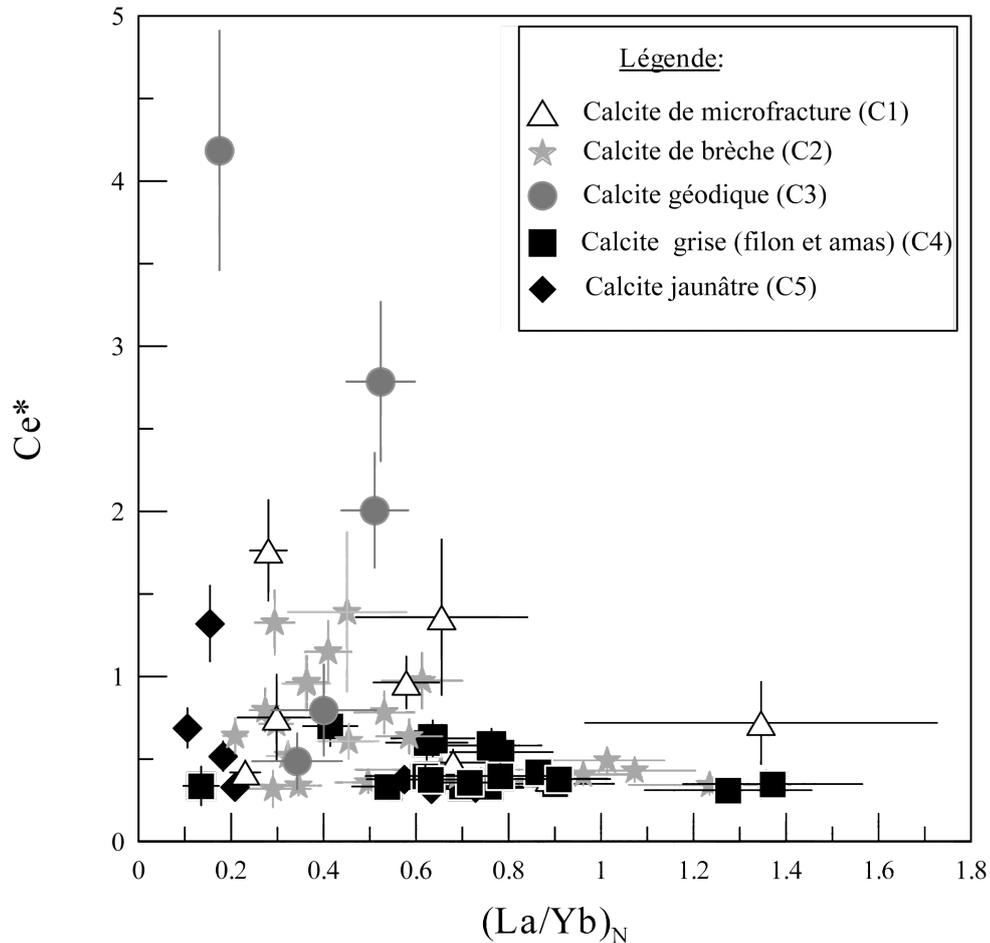


Figure II.15 : Diagramme du rapport $(La/Yb)_N$ en fonction de l'anomalie en cérium (noté Ce^*) sur les cristaux de calcite étudiés de la zone de déformation d'Augeville.

Une relation entre l'anomalie en Ce et les concentrations en Sr a été mise en évidence (Figure II.14) avec pour les teneurs les plus élevées en Sr, une anomalie en Ce marquée. Pour les teneurs en Sr les plus faibles, on observe une dispersion de l'anomalie en Ce avec, en particulier, des valeurs positives pour les géodes et les cristaux de calcite.

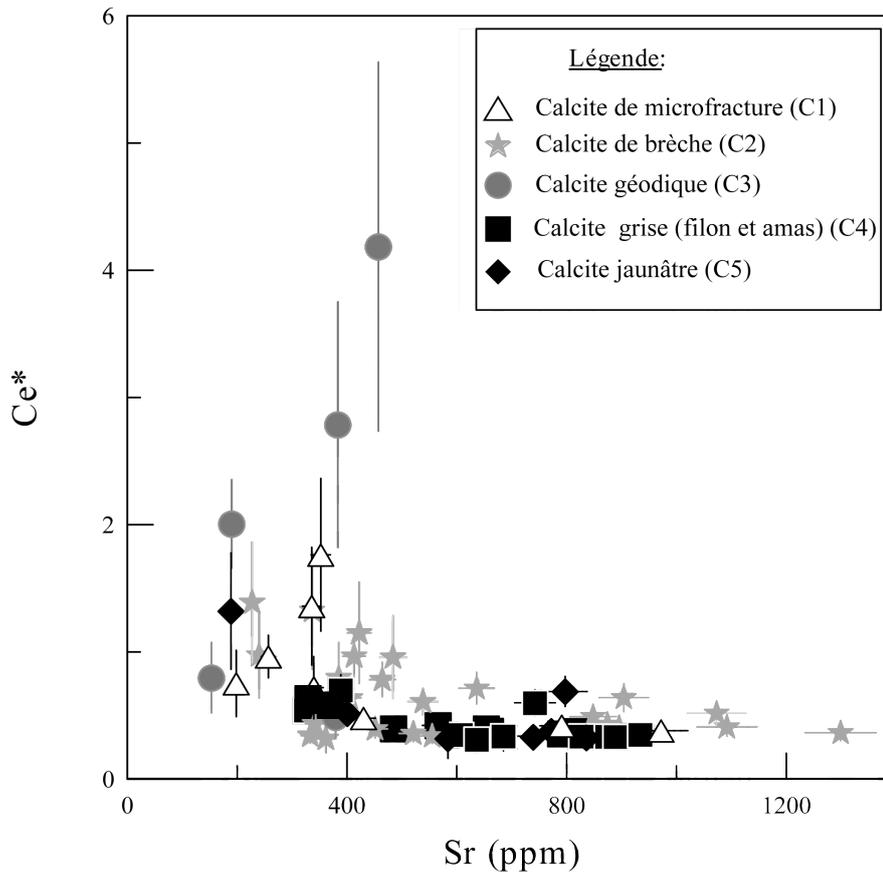


Figure II.16 : Diagramme de l'anomalie en cérium en fonction des concentrations en Sr sur les cristaux de calcite étudiés de la zone de déformation d'Augeville.

5.3 Isotopes stables

Les compositions isotopiques en $\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^{13}\text{C}$ des cristaux de calcite de microfractures, de ciment de brèches d'effondrement, de brèche hydraulique, des cristaux de calcite grisâtre en filon ou en amas ainsi que les cristaux de calcite jaunâtre ont été déterminées. Les compositions isotopiques sont très proches avec toutefois des regroupements en fonction des faciès. Les cristaux de brèches présentent des valeurs relativement homogènes variant de 2,9 à 2,6 ‰ pour le carbone et de -8,3 à -8,9 ‰ pour l'oxygène. Ces valeurs forment une population bien distincte des cristaux de calcite grisâtres (C4) et des cristaux de calcite jaunâtre qui présentent des variations des valeurs plus faibles inférieures à 2,6 ‰ pour le $\delta^{13}\text{C}$ et inférieure à -8,6 ‰ pour le $\delta^{18}\text{O}$. Ces valeurs sont comparables à celles qui ont été obtenues par André et al., 2010 (Figure II.17). Les cristaux de calcite géodique ont des valeurs intermédiaires entre ces deux populations avec des valeurs voisines de 2,5 ‰ pour le $\delta^{13}\text{C}$ et -8,6 ‰ pour le $\delta^{18}\text{O}$.

Les valeurs pour les encaissements micritiques sont plus proches des cristaux de calcites de brèches (de collapse ou brèches hydrauliques) pour le $\delta^{13}\text{C}$ avec des valeurs de 2,4 à 2,7 ‰ alors que le $\delta^{18}\text{O}$ est nettement plus élevé de -5,2 à 5,4 ‰. Ces valeurs sont comparables à celles qui ont été obtenues par André et al., (2010). Le claste de calcaire oolithique reste dans cette gamme de valeur avec une valeur de 3,1 pour le $\delta^{13}\text{C}$. Un encaissement micritique lité présentant un fort degré diagénetique (forte luminescence en cathodoluminescence) s'illustre

par des valeurs plus faibles que les autres roches encaissantes de 0,5 ‰ pour le $\delta^{13}\text{C}$ et de l'ordre de -9,1 ‰ pour le $\delta^{18}\text{O}$.

La formation marneuse a des valeurs de l'ordre de 1 ‰ pour le $\delta^{13}\text{C}$ et comprises entre -2 ‰ et -4,4 ‰ pour le $\delta^{18}\text{O}$. Dans les marnes, un remplissage calcitique dans un bivalve présente une valeur de 1 pour le $\delta^{13}\text{C}$ et de -7,2 pour l'oxygène.

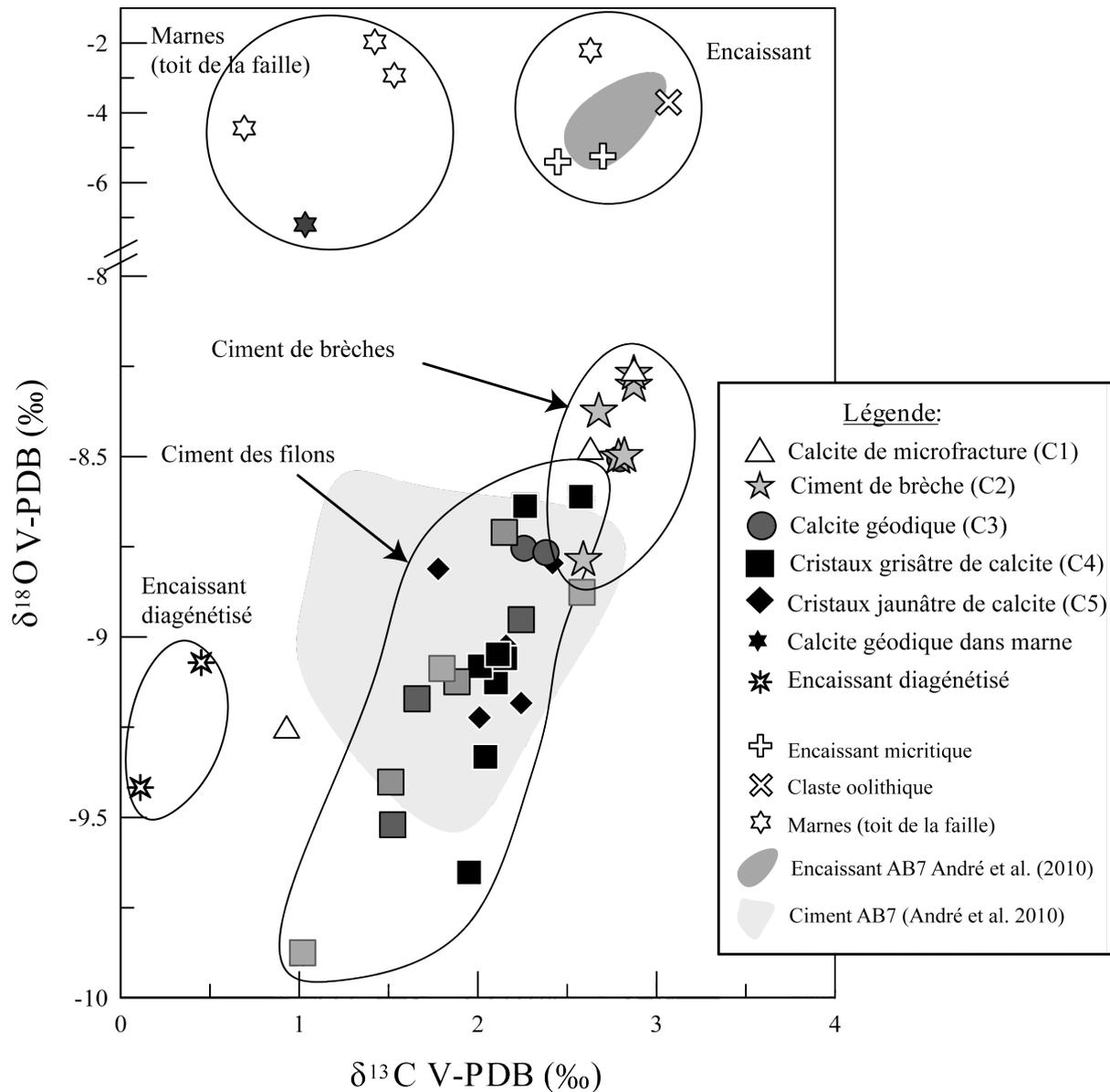


Figure II.17 : Diagramme des compositions isotopiques en oxygène 18 en fonction de la composition isotopique en $\delta^{13}\text{C}$. Les données grisées correspondent aux champs de valeurs obtenues par André et al. (2010), en gris foncé les valeurs des roches encaissantes, en gris clair les valeurs des remplissages calcitiques.

6. Discussion et conclusion

Les épisodes diagénétiques observés dans les calcaires du bassin de Paris sont le résultat de trois grandes étapes de cimentation (Vincent et al. 2007 ; Brigaud et al. 2009). Les deux épisodes majeurs de cimentation correspondent à la mise en place de deux générations de calcite de blocage associées à des circulations de fluides météoritiques depuis le Massif Londres-Brabant émergé au début et à la fin du Crétacé inférieur (Vincent et al., 2007, Brigaud et al. 2009). Ces deux stades sont à l'origine de la majeure partie de la cimentation des calcaires Jurassiques. Le troisième épisode de cimentation se déroule durant l'extension fini-Eocène - Oligocène, où les circulations de fluides *via* des fractures génèrent une calcite de blocage dans la porosité matricielle et fissurale (Bc3 dans Brigaud et al., 2009). La valeur moyenne du $\delta^{18}\text{O}$ est de 9,9 ‰ et de 2,1 ‰ pour le $\delta^{13}\text{C}$ dans les calcaires du Dogger. Les valeurs moyennes dans les calcaires de l'Oxfordien sont de 9,1 ‰ en $\delta^{18}\text{O}$ et 1,9 ‰ en $\delta^{13}\text{C}$ (Buschaert et al., 2004). Les résultats obtenus dans cette étude se placent dans ce contexte avec des circulations de fluides générées par des zones de déformations au contact de zones de failles normales en régime extensif. Les valeurs sont comparables avec celles de Brigaud et al. 2009 et d'Andre et al. (2010) (Figure II.18). Ceci montre que ces processus tertiaires sont d'ampleur régionale.

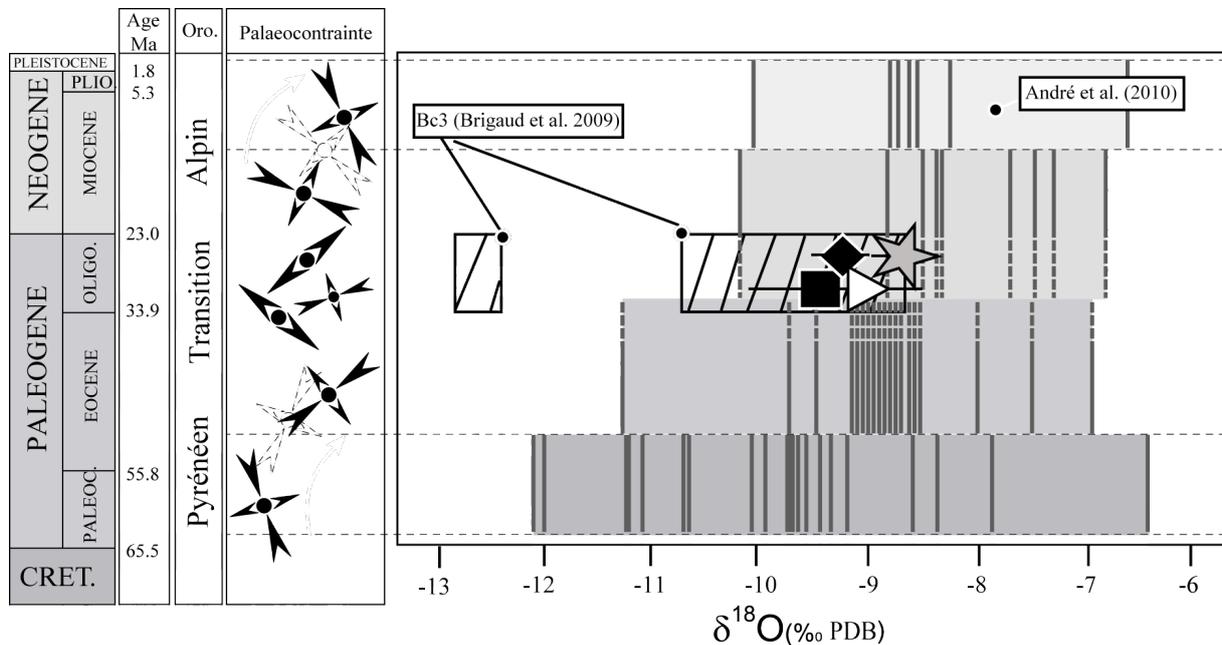


Figure II.18 : Evolution du $\delta^{18}\text{O}$ des cristaux de calcite de remplissage en fonction du calendrier tectonique du Crétacé à l'actuel dans l'est du bassin de Paris. Les données grisées sont celles obtenues par André et al. (2010). Les données encadrées rayées sont celles obtenues par Brigaud et al. (2009) (Figure modifié de André et al., 2010).

6.1 Profondeur de mise en place des brèches et des filons

L'un des moyens d'évaluer la profondeur de mise en place des brèches et des filons est de déterminer les températures de formation des minéralisations. Les inclusions fluides aqueuses étant monophasées, elles ne peuvent pas donner de renseignements sur la température de piégeage.

Il est possible de déterminer la température d'un fluide minéralisateur si l'on connaît la composition isotopique en $\delta^{18}\text{O}$ du fluide, ce qui n'est pas le cas directement dans cet exemple. Par contre, Dublyansky (2005) a déterminé le δD des inclusions fluides sur le site AB7. Il a trouvé un δD de $-49,5\text{‰}$. Des données de Buschaert (2001) sont équivalentes entre -50 à -60‰ . Si l'on admet maintenant que le fluide est d'origine météorique, il est possible de calculer son $\delta^{18}\text{O}$ à partir de l'équation de Craig (1961) :

$$\delta^{18}\text{O} = \frac{(\delta^2\text{H} - 10)}{8} \quad (1)$$

La valeur de $\delta^{18}\text{O}$ du fluide est de $-7,4\text{‰}$ pour δD de $-49,5\text{‰}$ et de 22°C à 18°C pour un δD entre -50 et -60‰ .

A partir de l'équation d'Urey (1947) il est possible de déterminer la température de formation des cristaux de calcite :

$$T(^{\circ}\text{C}) = 16,9 - 4,2 \cdot \Delta_{\text{cal-H}_2\text{O}} + 0,13 \cdot \Delta_{\text{cal-H}_2\text{O}}^2 \quad (2)$$

La température de minéralisation était comprise entre 18 et 22°C . Cette température implique que la calcite a précipité à partir d'un fluide dans des conditions très proches de la surface. Le gradient géothermique de la région étant de $30^\circ\text{C}/\text{km}$ (Landrein et al., 2012) et la température de surface de 12°C , la profondeur maximale est de 300 mètres. Toutefois elle devait être plus faible car à la fin Eocène – Oligocène, l'est du bassin de Paris se trouvait en position tropicale.

6.2 Evolution de la zone de déformation

L'évolution de l'état de contrainte tectonique, à l'échelle régionale, au cours des temps géologiques, induit des évolutions structurales des formations géologiques. Le rééquilibrage se fait par relâchement des contraintes par des processus de déformation ou de fracturation. Lors de ces événements, des circulations fluides sont initiées (Figure II.19). Dans l'est du bassin parisien, plusieurs états de contrainte se sont succédés au cours des temps géologiques (André et al., 2010).

L'épisode extensif ayant formé le fossé d'effondrement de Gondrecourt est associé à l'extension fin Eocène - début Oligocène. Le scénario de la zone de déformation peut se décomposer de la façon suivante :

(1) Des stades précoces se marquent par la formation de microfractures antérieures à la bréchification comme le montre la présence de microfractures dans les clastes de brèches hydrauliques.

(2) On peut penser que le processus de fracturation est plus marqué dans l'encaissant micritique, plus cohésif que dans la formation marneuse bien qu'aucune observation n'ait été réalisée sur cette dernière formation. La fracturation augmente la perméabilité ce qui entraîne une accumulation des fluides dans la zone fragilisée.

(3) La faille majeure se développe et met en contact les formations marneuses à l'ouest avec les calcaires micritiques à l'est.

(4) Le piège structural imperméable formé par la série marneuse latéralement et au dessus du calcaire micritique produit localement une augmentation de la pression fluide. Ce système entraîne une fracturation hydraulique. La notion de fracturation hydraulique fait référence à la diminution globale des contraintes par injection d'un fluide (loi de Terzaghi). Le concept est décrit depuis Philips (1972) et dans l'article de Jébrak (1997). Il impose une montée de la pression de fluide, donc une perméabilité limitée au dessus du site au moment de la fragmentation. Le fluide prend sur lui une partie de la pression isotrope. C'est un processus extensif en mode I, ou la contrainte en traction est normale au plan de fissure. La bréchification hydraulique est à peu près le seul moyen de faire des brèches disjointes et sans mouvement. L'extension se poursuit avec la formation de la zone de faille et de brèches chaotiques ou brèches d'effondrement associées à des vides.

(5) Après l'hydrofracturation, la pression fluide revient à des pressions probablement proches de la pression hydrostatique puisque l'on est dans des conditions proches de la surface. Après cet épisode d'hydrofracturation, la roche est plus perméable, et moins cohésive et, dans certains endroits, aboutit à des brèches d'effondrement. Dans le même temps, des fractures verticales se développent avec des minéralisations de calcite filonienne.

(6) De façon synchrone ou postérieure à la formation des événements en ouvertures filoniens se produit un effondrement de toute évidence tectonique et forme de nouveaux faciès d'effondrement tel la formation des amas de calcite à dépôts matriciels importants et à précipitation de cristaux en cocarde autour des clastes effondrés. Dans ces faciès peuvent se retrouver des fragments de filons, de brèches hydrauliques, chaotiques, ainsi que des clastes exotiques (oolithes). A cet épisode est associée une fracturation éparse recoupant la plupart des structures probablement associées à un épisode de minéralisation géodique.

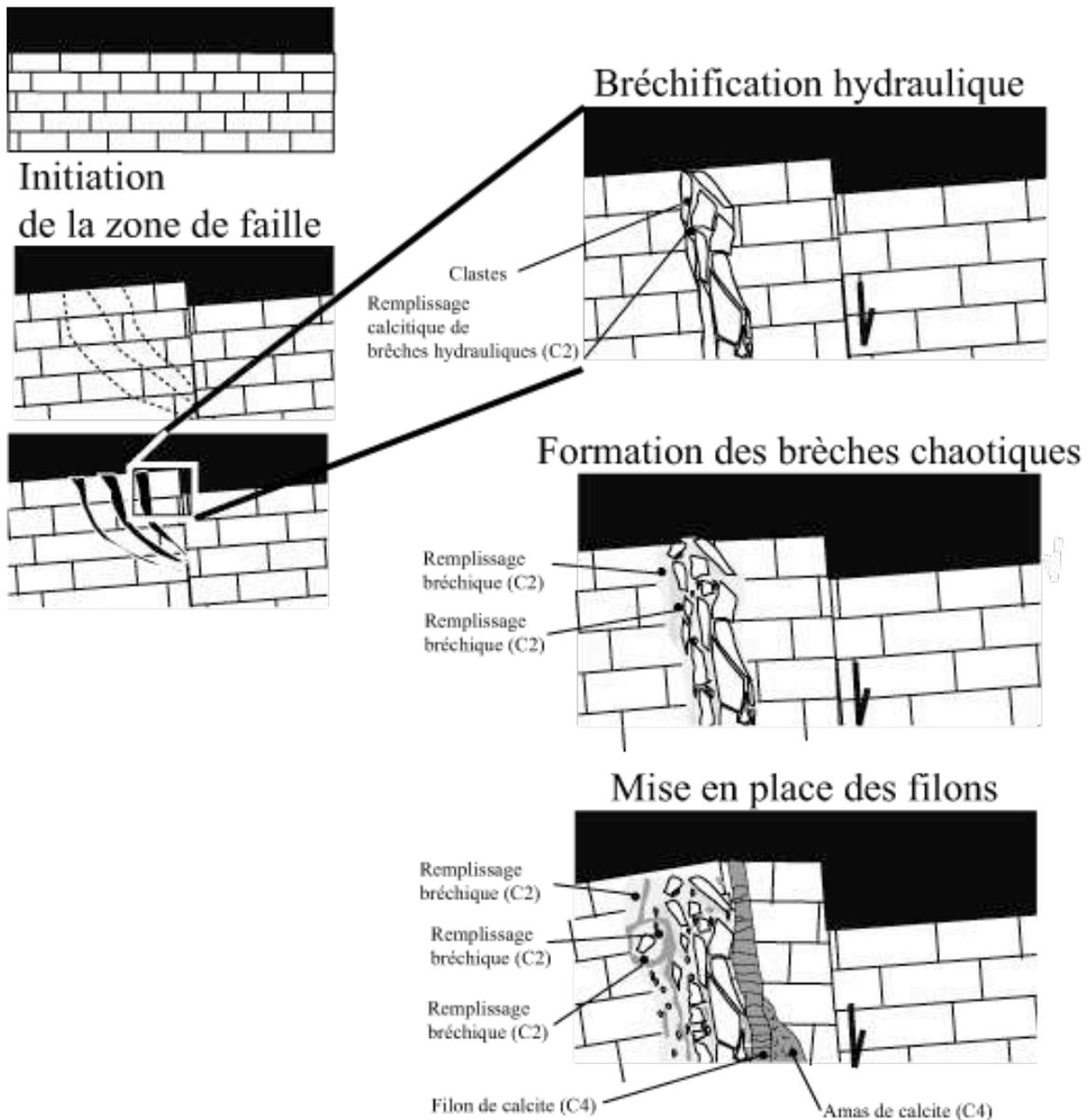


Figure II.19 : Schéma conceptuel de l'évolution de la zone de faille associée à la zone de déformation étudiée dans le fossé d'effondrement de Gondrecourt.

6.3 Interaction des fluides minéralisateurs avec la roche encaissante

Les diagrammes Mg en fonction de Mn et de Sr en fonction de l'anomalie en Ce permettent de proposer que lors du stade bréchiq initial, les fluides se sont enrichis en Mg, Mn par dissolution de la calcite des roches carbonatées. Cette hypothèse est en bon accord avec les anomalies négatives en cérium. En effet, en milieu marin les calcaires présentent une anomalie négative en cérium. Dans l'eau de mer oxydante, le cérium est oxydé à la valence 4 alors que les autres ETR restent à la valence III. Or le Ce (IV) est peu soluble dans l'eau, et il précipite au fond des océans. L'eau de mer présente alors une anomalie négative en Ce (de Baars). Ce fort équilibre se marque également par un enrichissement important en Sr des calcite géodique.

Les cristaux de calcites filoniennes présentent des teneurs variables en Mg, Mn et Sr et ceci peut s'expliquer par la circulation de fluide météorique avec un rapport eau/roche élevé et des vitesses de circulation plus importantes que dans l'épisode bréchiq.ue.

Les anomalies positives en cérium, présentes dans les cristaux de calcite bréchiq.ue et géodique, résultent de la circulation de fluide plus oxydant. Les cristaux associés à ces anomalies présentent également un appauvrissement relatif en éléments des terres légères et une plus faible concentration en éléments des terres rares.

Les compositions isotopiques en $\delta^{13}\text{C}$ sont également fonction de l'équilibration du fluide avec la roche encaissante (Figure II.20). Les cristaux de calcite bréchiq.ue présentent des compositions isotopiques de 2,8 ‰ V-PDB similaires aux roches encaissantes de 2,7 ‰ V-PDB. Tandis que les cristaux de calcite des filons ont des $\delta^{13}\text{C}$ plus faibles. Les compositions isotopiques des cristaux de calcite grisâtre ou jaunâtre correspondent aux valeurs régionales déjà enregistrées dans les circulations de fluide oligocène par Brigaud et al. (2009).

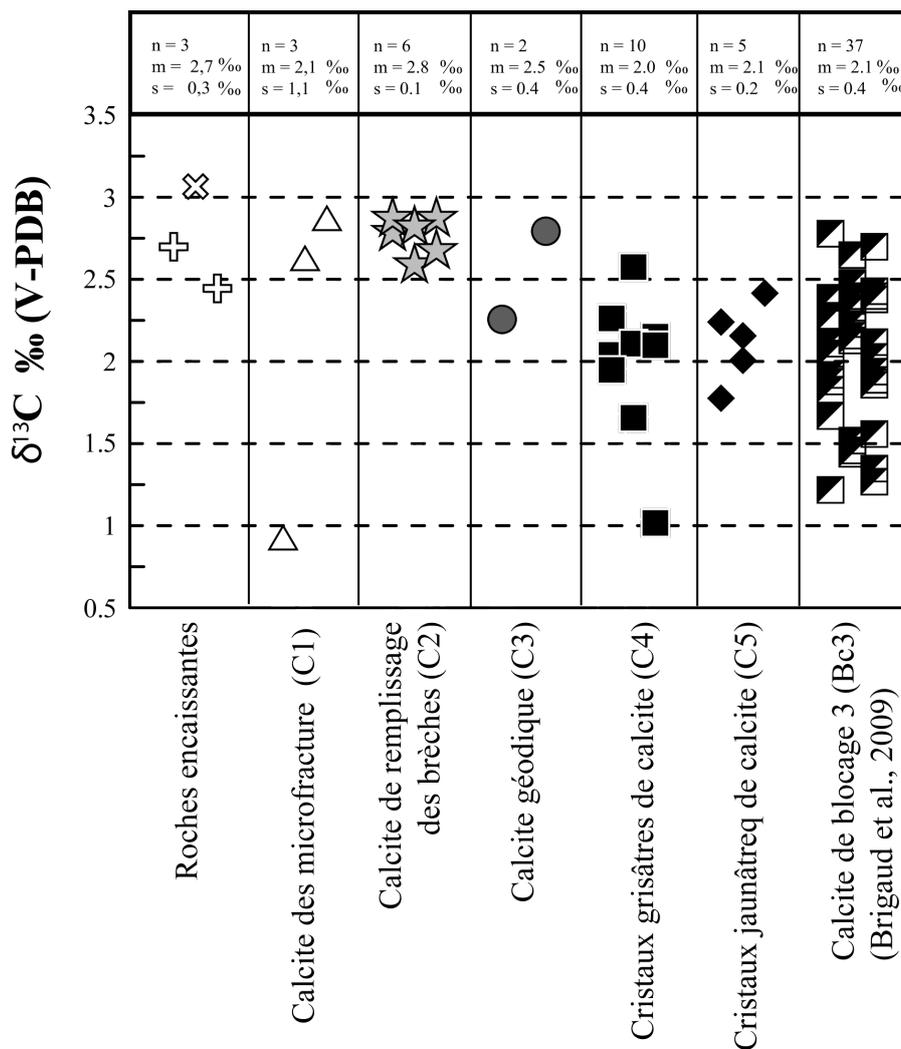


Figure II.20 : Diagramme des compositions isotopiques en $\delta^{13}\text{C}$ des cristaux de calcite de remplissage de la zone de déformation d'Augeville ainsi que les compositions isotopiques des roches encaissantes de la zone. Les résultats obtenus par Brigaud et al. (2009) concernant la calcite de blocage 3 associée à l'épisode de circulation de fluide Oligocène sont également présentés.