

---

# **Datation des cristaux de calcite issus de circulations de fluides dans les zones de déformation**

## **1. Introduction**

Ce chapitre traite du développement de la méthode (U-Th-Sm)/He comme possible nouvel outil chronométrique de datation de cristaux de calcite de remplissage de fractures, de brèches et de failles. Les caractéristiques des zones de Gondrecourt et de Tournemire sont les suivantes :

- (1) elles ont une histoire thermique simple ( $<30^{\circ}\text{C}$  depuis leur précipitation),
- (2) les phases de remplissage sont bien distinctes les unes des autres,
- (3) les remplissages se trouvent dans des structures tectoniques tertiaires,
- (4) les cristaux de calcite ont une taille pluri-millimétrique.

Les échantillons de Gondrecourt sont présentés plus en détail dans le chapitre II. A cela s'ajoute les échantillons (AB7), déjà datés en U-Pb et interprétés comme des âges centrés sur la période oligocène (Deschamps et Hamelin, 2006). Les échantillons de Tournemire sont des remplissages de calcite géodique dans des argilite du bassin des Causses (Peyaud et al., 2006).

## **2. Histoire thermique des zones étudiées et validité des cas d'étude**

La description de la zone de faille de Gondrecourt et de son histoire thermique est détaillée dans le chapitre II ; les échantillons n'ont pas connu de température supérieure à  $30^{\circ}\text{C}$  depuis leur formation. Le deuxième site d'étude à Tournemire est localisé dans le sud de la France, sur la bordure ouest du bassin des Causses. Les cristaux de calcite ont été prélevés sur une géode de calcite contenue dans des argilites. Celle-ci a été prélevée dans une zone de failles senestre dans la galerie Est du site de Tournemire. Dans les argilite du Toarcien (Lias) se trouvent deux générations de remplissages calcitiques. Les prélèvements ont été réalisés dans la seconde génération qui constitue l'essentiel du filon. D'après Peyaud et al. (2006), les remplissages calcitiques sont issus d'une circulation de fluides dans les fracturations associées à la phase tectonique pyrénéenne ( $\sim 50\text{-}60$  Ma). Le site de Tournemire a subi une érosion de l'ordre de 600 m, ainsi la température maximale que les échantillons ont pu enregistrer est de  $\sim 18^{\circ}\text{C}$  supérieure à la température actuelle de surface pour un gradient thermique de  $30^{\circ}\text{C}/\text{km}$ .

Ainsi, pour les deux cas d'étude, l'évolution de l'âge (U-Th-Sm)/He a été simulée pour un cristal de calcite ayant précipité entre 50 et 0 Ma, et est restée à une température

constante. (Figure V.1). Les coefficients de diffusion obtenus par Copeland et al. (2007) pour les carbonates ont été utilisés. La figure V.1 illustre l'évolution de l'âge He apparent en fonction des différentes températures. Dans le cas de Gondrecourt et de Tournemire, la température maximale ayant affecté les échantillons est de 30°C, et dans ce cas, l'âge He mesuré est très voisin à celui de précipitation (Figure. V.1).

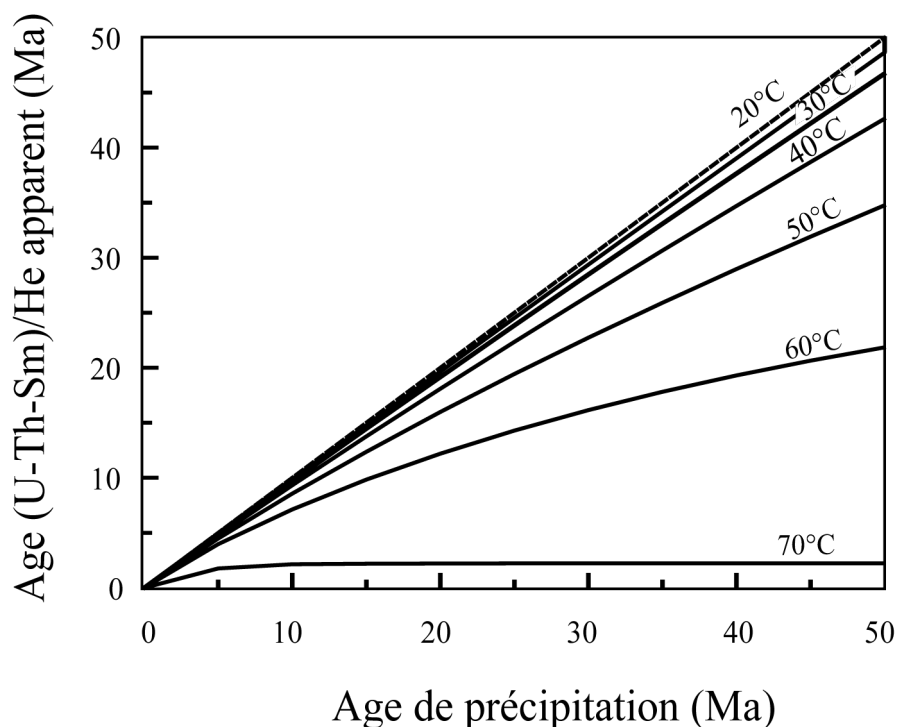


Figure V.1 : Age (U-Th-Sm)/He en fonction de l'âge de précipitation des cristaux de calcite. Les âges He ont été simulés pour un échantillon resté à température de 20, 30, 40, 50, 60 et 70°C depuis sa précipitation.

### 3. Sélection des échantillons et analyses

Les grains ont été prélevés soit par fragmentation à l'aide d'un tournevis et d'un marteau, soit simplement par prélèvement à la main. Par la suite les échantillons ont été fragmentés par pression avec un pilon dans un mortier en agate afin d'obtenir des grains de taille millimétrique. Les plus gros grains ont été fragmentés en plusieurs sous grains. L'ensemble des échantillons présente des formes rhomboédriques, pseudo rhomboédriques, ou irrégulières et, dans la plupart des cas, les cristaux sont translucides à l'exception des cristaux de calcite brèchiques.

Les cristaux analysés ont été sélectionnés sous une loupe binoculaire suivant plusieurs critères 1) de pureté minérale (sans traces visibles d'inclusions solides ou de traces d'oxydes en surface), 2) de forme et 3) de présence minimale de clivages visibles. Les cristaux ont été pesés puis emballés dans une feuille de platine ultra pure (0,01 mm, 99,95%). Le tableau V.1 présente les caractéristiques cristallographiques : taille, masse et présence de clivages des échantillons. Dans les tableaux V.1 et V.2, les masses et les caractéristiques morphologiques des échantillons sont répertoriées. Pour le site de Gondrecourt, plusieurs cristaux des échantillons AB7#1 et AB7#3 ont été séparés en plusieurs sous échantillons. Pour AB7#1, il s'agit de AB7#1(Pa), AB7#1(10). Les échantillons AB7#3 sont divisés en deux sous séries, AB7#3(Pa) et AB7#3(11). Des répliquats de chaque échantillon ont été réalisés et notés 1, 2,

3 pour les échantillons AB7 et a, b, c pour les échantillons provenant de la tranchée d'Augeville (tableaux II.1). Les échantillons de la tranchée correspondent à ceux présents dans le chapitre II. Concernant Tournemire, des cristaux de calcite de la géode GE2930 de trois zones différentes ont été prélevés To-1 (ou Tournemire-1), To-2 et To-3. Les échantillons To-2A, To-2B sont des sous-familles de la zone 2, To-3A et To-3C de la zone 3.

Les datations (U-Th-Sm)/He et les analyses chimiques ont été réalisées en suivant les différents protocoles présentés dans le chapitre I. Les résultats des âges He et des compositions chimiques pour certains éléments majeurs et la somme des éléments traces se trouvent dans les tableaux V.3 et V.4. Cependant les concentrations brutes de tous les éléments analysés se trouvent dans le chapitre II et en annexe.

*Tableau V.1 : Récapitulatif des caractéristiques des cristaux de calcite de Gondrecourt analysés.*

Échantillon	Mass e (mg)	a (mm )	b (mm )	c (mm )	Volum e (mm <sup>3</sup> )	Forme	Commentaires
AB7#1-Pa							
AB7#1-Pa1	6,9	3	2	2	14,6	Rhomboédrique	Translucide
AB7#1-Pa3	1,3	3	2	1	6,8	Rhomboédrique	Translucide
AB7#1-Pa7	6,5	3	2	2	12,3	Rhomboédrique	Translucide
AB7#1-Pa9	2,4	2	2	1	5,9	Rhomboédrique	Translucide
AB7#1-Pa10	3,7	-	-	-	-	Rhomboédrique	Translucide
AB7#1-Pa11	4,3	-	-	-	-	Rhomboédrique	Translucide
AB7#1-10							
AB7#1-10-a	4,4	3	2	1	5,3	Rhomboédrique	Translucide
AB7#1-10-b	3,4	5	2	1	7,8	Rhomboédrique	Translucide
AB7#1-10-d	1,5	2	1	1	4,2	Rhomboédrique	Translucide
AB7#3-Pa							
AB7#3-Pa3	2,72	3	3	1	9,9	Rhomboédrique	Légèrement opaque
AB7#3-Pa4	5,28	3	3	1	8,2	Rhomboédrique	Translucide
AB7#3-Pa5	3,16	4	2	2	13,2	Rhomboédrique	Légèrement opaque
AB7#3-Pa6	5,23	4	3	2	21,4	Rhomboédrique	Légèrement opaque
AB7#3-Pa8	5,23	3	3	1	11,0	Rhomboédrique	Translucide
AB7#3-Pa9	1,07	2	1	1	4,2	Rhomboédrique	Translucide
AB7#3-11							
AB7#3-11-a	2,31	3	1	1	5,5	Rhomboédrique	Translucide
AB7#3-11-c	3,27	3	3	1	8,0	Rhomboédrique	Opaque en partie
AB7#3-11-d	2,44	3	3	2	19,7	Rhomboédrique	Légèrement opaque
AB7#3-11-f	3,17	3	2	2	15,8	Irrégulier	Opaque
Ciment calcitique de microfracture							
A3-2	2,0	2	2	1	3,0	Irrégulier	Opaque
A9-2	9,4	3	3	2	12,5	Irrégulier	Translucide
Ciment calcitique de brèche							
A6a-1	44,0	3	4	1	10,5	Irrégulier	Opaque
A6a-2	39,1	3	4	1	10,5	Irrégulier	Opaque
A6a-3	24,2	2	3	3	12,5	Irrégulier	Opaque
A7-1	5,9	2	2	2	8,0	Irrégulier	Opaque
A7-2	7,5	2	2	2	8,0	Irrégulier	Opaque
A7-3	7,8	3	3	3	15,6	Irrégulier	Opaque
B4a-1	6,5	2	1	1	2,9	Irrégulier	-

B4a-2	10,4	4	1	1	5,0	Irrégulier	-
B7a-1	4,3	1	2	1	1,8	Rhomboédrique	Opaque
B7a-2	4,7	1	2	1	1,8	Irrégulier	Opaque
B7a-3	7,0	2	2	2	4,5	Irrégulier	Opaque
B7b-1	3,3	2	1	1	2,0	Rhomboédrique	Translucide
B7b-2	4,2	3	1	1	2,5	Rhomboédrique	Opaque
B7b-3	1,6	1	1	2	0,8	Rhomboédrique	Opaque
B6a-1	3,1	2	2	1	2,3	Irrégulier	Translucide
B6a-2	8,7	3	3	2	12,5	Irrégulier	Translucide/Zone de croissance
Cristaux grisâtres de calcite filonienne							
A1a-2	8,2	4	1	1	4,0	Pseudo-Rhomboédrique	Translucide/Zone de croissance
A6Bb-1	9,8	3	2	2	6,8	Pseudo-Rhomboédrique	Translucide
A6Bb-2	7,5	2	1	1	2,0	Pseudo-Rhomboédrique	Translucide
A6Bb-3	7,1	2	2	2	5,4	Pseudo-Rhomboédrique	Translucide
C3b1-1	38,0	-	-	-	-	Rhomboédrique	Translucide
C3b1-2	20,6	2	2	2	5,8	Rhomboédrique	Translucide
C3b1-3	45,9	-	-	-	-	Rhomboédrique	Translucide
Cristaux jaunâtres de calcite							
A1b-2	4,9	3	3	2	15,0	Irrégulier	-
B1a-1	13,7	2	2	2	8,0	Pseudo-Rhomboédrique	-
B1a-2	5,7	2	2	2	6,0	Pseudo-Rhomboédrique	-
Calcite géodique							
B7c-1	6,1	2	1	1	2,0	Irrégulier	-
B7c-2	5,4	2	2	2	4,5	Pseudo-Rhomboédrique	-
B7c-3	15,1	2	2	2	8,0	Irrégulier	-

Tableau V.2 : Récapitulatif des caractéristiques des cristaux de calcite de Tournemire analysés.

Échantillon	Masse (mg)	a (mm)	b (mm)	c (mm)	Volume (mm <sup>3</sup> )	Forme	Commentaires
<i>Tournemire</i>							
To-1A-1	6,5	-	-	-	-	-	-
To-1A-2	4,8	2	2	1	7	Rhombôdre cassé	-
To-1A-4	3,7	3	2	2	16	Rhombôdrique	-
To-1A-5	1,9	2	2	2	5	Rhombôdrique	-
To-2A-1	31,3	7	5	5	169	Rhombôdrique	Opaque
To-2A-2	5,8	3	3	2	22	Rhombôdrique	Opaque
To-2B-1	6,0	4	3	2	22	Rhombôdre cassé	-
To-2B-2	9,8	6	3	2	33	Irrégulier	-
To-2B-3	9,9	7	4	2	75	Rhombôdrique	-
To-3A-1	23,4	5	4	3	54	Irrégulier	Opaque
To-3A-2	6,4	5	3	3	38	Rhombôdrique	Opaque
To-3A-3	21,0	5	4	4	87	Irrégulière	Opaque
To-3A-5	5,2	6	3	3	68	Rhombôdre cassé	Opaque
To-3A-7	2,8					Rhombôdrique	-
To-3C-1	6,4	-	-	-	-	Irrégulier	-
To-3C-2	53,0	6	5	3	92	Irrégulière	Opaque
To-3C-5	10,8	8	2	2	49	Irrégulière	Opaque
To-3C-6	9,9	3	3	3	33	Rhombôdrique	Opaque
To-3C-7	9,2	4	2	2	19	Irrégulière	Opaque

## 4. Résultats

### 4.1 Datation (U-Th-Sm)/He

#### - Calcite de Gondrecourt

Les âges (U-Th-Sm)/He des échantillons de Gondrecourt varient de  $0,4 \pm 0,2$  Ma à  $205 \pm 27$  Ma et ne présentent pas de corrélation avec la concentration d'uranium effectif ( $eU = U + 0,24 \times Th$ ) comme illustré dans la figure V.2. De plus, au sein d'un même échantillon, les répliquats montrent de fortes dispersions des âges autant que des concentrations en eU (Tableau V.3).

Les concentrations d'hélium pour l'ensemble des échantillons varient de 0,32 pmol/g à 64,3 pmol/g avec une valeur plus élevée à 143,7 pmol/g. Les concentrations en uranium varient de 8 à 2917 ppb pour l'ensemble des échantillons. Il ressort que les échantillons de remplissage bréchique et de microfutures présentent de façon générale des concentrations en uranium plus élevées que les autres phases calcitiques, avec des valeurs qui peuvent être comprises entre 1000 et 2000 ppb. Les cristaux de calcite filonienne grisâtre ou jaunâtre ainsi que les cristaux de calcite géodique présentent des concentrations inférieures à 1000 ppb. Les concentrations en thorium sont, pour la plupart des échantillons, très faibles, inférieures à 50 ppb, exceptés pour l'échantillon AB7#1(Pa) qui présente des valeurs élevées atteignant 1148 ppb.

Tableau V.3. : Résultat (U-Th-Sm)/He et les compositions chimiques associées pour des éléments sélectionnés pour les échantillons de Gondrecourt (AB#7 et Augeville).

Échantillon	Mg (ppm)	Mn (ppm)	Sr (ppm)	(Ce) <sub>N</sub>	(La/Yb) <sub>N</sub>	ΣREE (ppb)	U (ppb)	Th (ppb)	Sm (ppb)	P (pmol/g)	P(Th)/P (%)	<sup>4</sup> He (pmol/g)	Ages (Ma)	σ
AB7#1-Pa														
AB7#1-Pa1	1218	16	407	0,5	0,5	656	106	27	27	0,61	5,7	0,34	0,6	0,1
AB7#1-Pa3	1146	17	421	0,4	0,6	1102	122	17	39	0,68	3,2	0,91	1,3	0,2
AB7#1-Pa7	1450	18	402	0,4	0,8	1745	40	318	64	0,62	65,1	1,43	2,3	0,4
AB7#1-Pa9	1616	20	402	0,6	0,4	923	264	1148	46	2,89	50,6	1,06	0,4	0,2
AB7#1-Pa10	1561	17	437	0,6	0,6	1277	26	437	60	0,70	79,6	0,32	0,5	0,4
AB7#1-Pa11	1605	19	327	0,5	0,4	758	90	159	32	0,69	29,5	1,21	1,7	0,5
AB7#1-10														
AB7#1-10-a	1214	22	475	0,5	0,9	2704	21	7	94	0,12	7,6	4,21	35,1	2,0
AB7#1-10-b	1041	18	506	0,4	1,2	5033	8	22	137	0,07	38,3	0,94	12,9	4,8
AB7#1-10-d	-	-	-	-	-	-	114	6	122	0,63	1,2	9,33	14,8	1,4
AB7#3-Pa														
AB7#3-Pa3	1309	21	787	0,5	0,6	5317	227	27	208	1,27	2,7	33,84	26,6	2,6
AB7#3-Pa4	1169	18	817	0,4	1,0	9290	178	7	275	0,98	0,9	28,15	28,7	1,2
AB7#3-Pa5	1389	19	792	0,4	0,8	7887	238	8	276	1,30	0,7	23,72	18,2	0,9
AB7#3-Pa6	2062	25	454	0,4	0,7	4213	396	10	170	2,16	0,6	22,54	10,4	1,0
AB7#3-Pa8	2321	16	404	0,3	0,7	1424	47	2	63	0,26	1,1	5,01	19,3	1,2
AB7#3-Pa9	-	-	-	-	-	-	25	15	117	0,16	12,0	23,88	151,2	7,2
AB7#3-11														
AB7#3-11-a	1441	18	730	0,4	0,9	7718	152	16	243	0,84	2,4	15,76	18,8	1,7
AB7#3-11-c	1570	19	685	0,4	0,7	7465	120	39	297	0,70	7,0	9,99	14,2	0,7
AB7#3-11-d	1663	19	670	0,4	0,7	6177	244	27	271	1,36	2,5	26,10	19,2	0,8

## Chapitre V. (U-Th-Sm)/He sur cristaux de calcite

AB7#3-11-f	1280	17	811	0,4	0,8	7128	78	8	244	0,43	2,2	14,24	33,1	2,2
Ciment calcitique de microfracture														
A3-2	2194	26	257	1,0	0,6	621	2144	28	26	11,22	0,32	11,21	1,0	0,01
A9-2	3037	28	430	0,5	0,7	2693	946	19	130	4,96	0,48	28,64	5,8	0,1
Ciment calcitique de brèche														
A6a-1	2385	24	385	0,8	0,3	308	281	5	15	1,47	0,39	3,46	2,3	0,2
A6a-2	2372	23	451	0,4	0,7	1312	611	3	59	3,19	0,13	11,17	3,5	0,2
A6a-3	2086	20	337	1,3	0,3	287	408	15	11	2,15	0,92	6,90	3,2	0,2
A7-1	1918	18	636	0,7	0,3	1023	1109	25	45	5,82	0,55	7,51	1,3	0,1
A7-2	2534	25	413	1,0	0,4	698	1091	13	31	5,70	0,30	19,02	3,3	1,7
A7-3	-	-	-	-	-	-	303	14	37	1,60	1,12	3,92	2,4	0,1
B4a-1	1987	21	904	0,6	0,2	1509	123	9	80	0,66	1,72	3,15	4,8	0,3
B4a-2	2363	23	405	0,6	0,6	1289	1142	22	53	5,99	0,47	16,66	2,8	0,2
B7a-1	1816	22	422	1,1	0,4	617	1458	21	25	7,63	0,36	9,90	1,3	0,1
B7a-2	2340	24	874	0,4	1,1	5426	627	10	210	3,29	0,37	63,40	19,3	1,3
B7a-3	1888	22	464	0,8	0,5	1025	2365	19	45	12,35	0,20	10,63	0,9	0,1
B7b-1	2371	31	1092	0,4	0,7	4824	189	23	220	1,02	2,89	15,86	15,6	1,1
B7b-2	2123	22	896	0,4	1,0	5295	577	20	211	3,04	0,83	64,34	21,2	1,3
B7b-3	2470	24	848	0,5	1,0	5969	1243	38	235	6,54	0,73	143,69	22,0	1,7
B6a-1							2917	25	-	15,24	0,21	36,62	2,4	0,1
B6a-2	2230	22	240	1,0	0,6	595	1952	12	23	10,19	0,15	50,46	5,0	0,2
Cristaux grisâtres de calcite filonienne														
A1a-2	1687	19	566	0,4	0,9	3932	583	30	169	3,08	1,23	46,74	15,2	0,4
A6Bb-1	1836	20	485	0,4	0,8	4459	211	12	178	1,12	1,42	7,82	7,0	0,2
A6Bb-2	1345	16	662	0,4	0,9	6609	153	19	217	0,83	3,01	8,63	10,5	0,3
A6Bb-3	1598	18	654	0,4	0,6	4421	129	20	189	0,70	3,64	3,58	5,1	0,2
C3b1-1	1402	17	789	0,4	0,7	5029	69	8	208	0,37	2,63	11,83	31,7	1,8
C3b1-2	1285	13	819	0,4	0,6	4065	47	4	184	0,25	2,28	7,99	31,7	2,0
C3b1-3	-	-	-	-	-	-	124	6	-	0,65	1,09	17,10	26,2	1,7
Cristaux jaunâtres de calcite														
A1b-2	1430	18	797	0,7	0,1	811	28	12	55	0,17	9,57	33,96	204,5	27,3
B1a-1				-	-	-	206	9	-	1,09	1,11	8,16	7,5	0,2
B1a-2	2371	22	189	1,3	0,2	533	209	19	30	1,12	2,14	3,79	3,4	0,4
Calcite géodique														
B7c-1	2617	25	457	4,2	0,2	239	428	15	6	2,26	0,85	7,50	3,3	0,2
B7c-2	2041	22	383	2,8	0,5	471	497	24	11	2,63	1,15	5,52	2,1	0,1
B7c-3	774	14	190	2,0	0,5	812	112	30	26	0,63	6,09	2,19	3,5	0,2

*L'erreur sur les âges He est donnée à 1 sigma.*

Tableau V.4. : Résultats (U-Th-Sm)/He et leurs compositions chimiques associées pour des éléments sélectionnés d'échantillons de Tournemire.

Échantillon	Mg (ppm)	Mn (ppm)	Sr (ppm)	(Ce) <sub>N</sub>	(La/Yb) <sub>N</sub>	ΣREE (ppb)	U (ppb)	Th (ppb)	Sm (ppb)	P (pmol/g)	P(Th)/P (%)	<sup>4</sup> He (pmol/g)	Ages (Ma)	σ
To-1A-1	936	1003	230	1,0	0,5	879	43	6	28	0,23	3,27	4,69	20,2	0,2
To-1A-2	1315	635	505	1,0	0,5	606	87	16	20	0,48	4,19	0,61	1,3	0,2
To-1A-4	575	1288	167	1,1	0,4	736	124	14	24	0,67	2,69	0,65	1,0	0,3
To-1A-5	987	835	305	1,0	0,4	980	121	23	32	0,66	4,39	1,23	1,9	0,6
To-2A-1	1717	1224	340	1,0	0,3	2789	23	15	117	0,14	13,67	1,87	13,0	1,2
To-2A-2	776	1072	239	-	-	1024	27	6	30	0,15	4,69	0,40	2,7	0,4
To-2B-1	873	925	260	1,0	0,3	805	38	10	28	0,21	5,76	0,61	2,9	0,3
To-2B-2	1477	1136	384	1,0	0,3	3889	102	22	166	0,56	4,87	0,72	1,3	0,1
To-2B-3	720	1188	222	1,0	0,2	897	57	7	38	0,31	2,91	0,18	0,6	0,1
To-3A-1	1229	853	336	0,9	0,4	634	47	4	23	0,25	1,83	0,68	2,7	0,3
To-3A-2	1957	897	568	1,0	0,5	917	80	19	37	0,45	5,46	0,40	0,9	0,2
To-3A-3	984	575	414	0,9	0,4	514	11	2	20	0,06	5,27	1,11	18,8	0,8
To-3A-5	1589	365	596	-	-	163	39	8	4	0,22	4,49	0,65	3,0	0,5
To-3A-7	1816	1228	287	1,0	0,6	1559	121	13	50	0,65	2,59	6,01	9,2	0,6
To-3C-1	605	1091	213	0,9	0,3	943	380	15	40	2,00	0,93	0,71	0,4	0,0
To-3C-2	1215	725	319	0,9	0,4	563	5	1	22	0,03	3,62	0,16	6,1	1,3
To-3C-5	1350	331	589	0,9	0,4	531	19	5	20	0,11	6,60	0,32	3,0	0,0
To-3C-6	816	958	284	1,0	0,2	729	25	4	33	0,14	3,63	0,24	1,8	0,4
To-3C-7	1114	1011	244	1,0	0,3	692	16	4	24	0,09	5,66	0,26	2,9	0,7

L'erreur sur les âges He est donnée à 1sigma.

Pour l'ensemble des échantillons, excepté AB7#1, il n'y a pas de corrélation entre la concentration en thorium et les âges (Figure V.3). AB7#1 présente optiquement des traces de lichens et d'oxydation. Il n'est pas à exclure que, sur cet échantillon des dépôts d'oxyde sur les surfaces ou dans les clivages se soient produits. Pour l'ensemble des échantillons, les rapports Th/U sont inférieurs à 1, sauf pour les échantillons AB7#1 où les rapports sont compris entre 1 et 20 (Figure V.3). Une corrélation positive est notable avec les âges (U-Th-Sm)/He avec le rapport Th/U. Cette corrélation est liée au fait que les âges les plus vieux sont ceux associés aux faibles concentrations d'uranium.

Les deux datations qui présentent des âges élevés, de  $204,5 \pm 27,3$  Ma et de  $151,2 \pm 7,2$  Ma, sont des âges incohérents avec des structures géologiques d'âge tertiaire. Ces deux âges ne seront pas considérés dans la discussion. L'hypothèse la plus probable est une contamination en U et Th sur les surfaces ou les clivages. Dans ce cas, l'hélium s'implante lors de la décroissance radioactive.

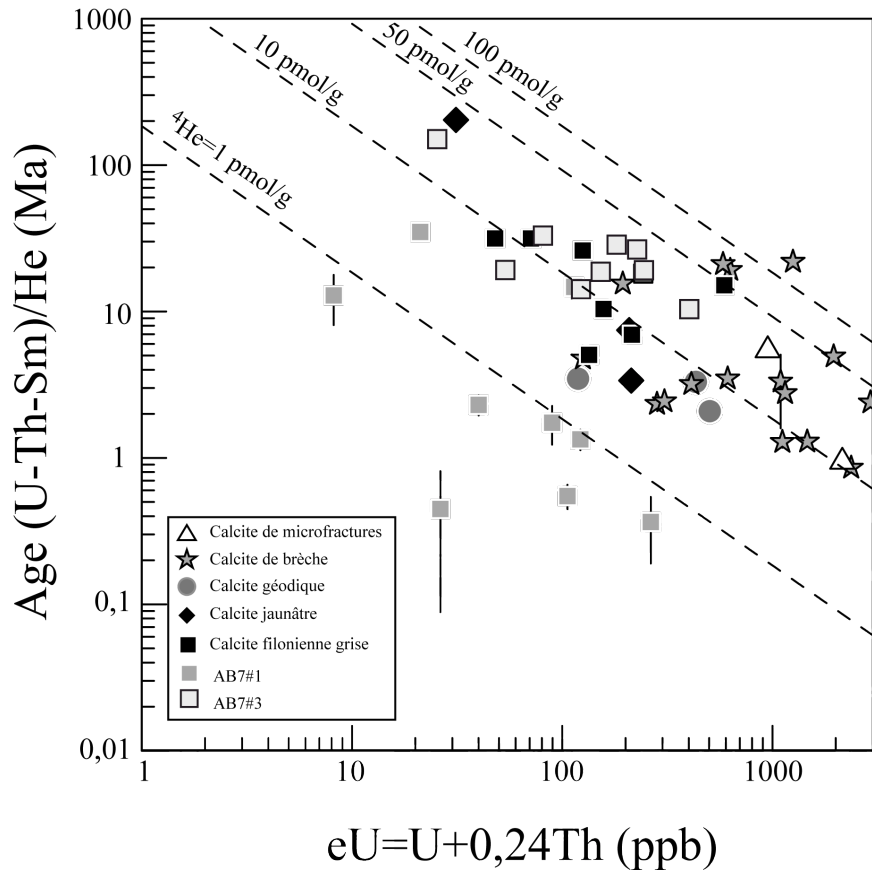


Figure V.2 : Age (U-Th-Sm)/He en fonction de la concentration d'uranium effectif des échantillons d'Augeville. Les droites de concentration d'He de 1, 10, 50 et 100 pmol/g figurent en pointillés

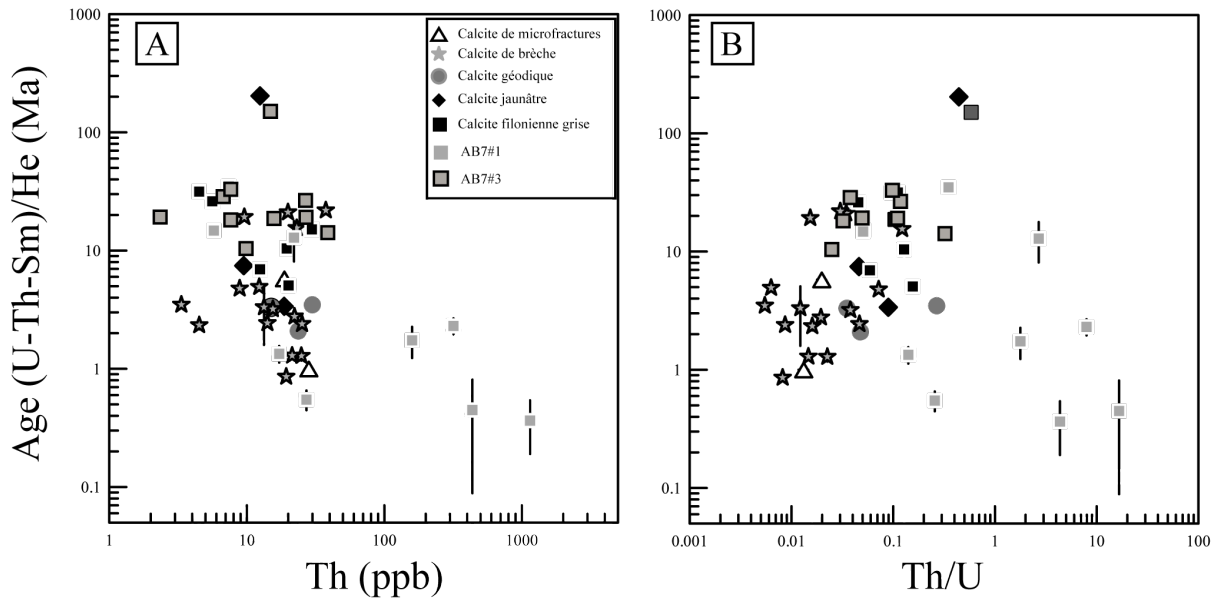


Figure V.3 : Diagrammes du rapport Th/U (A) et des concentrations en thorium (B) en fonction des âges (U-Th-Sm)/He pour les échantillons d'Augeville.



### - Calcite de Tournemire

Les concentrations en hélium des cristaux de calcite de Tournemire sont, pour la plupart, inférieures à 1,29 pmol/g d'hélium avec deux valeurs plus élevées à 4,7 pmol/g et 6 pmol/g. Les âges (U-Th-Sm)/He résultant sont, pour la plupart, très jeunes et peu reproductibles (Figure V.4). Sur les dix-neuf âges obtenus, 15 sont inférieurs à 5 Ma et quatre sont compris entre 9 et 20 Ma. Les deux âges les plus élevés sont  $18,8 \pm 0,8$  Ma et  $20,2 \pm 0,2$  Ma. Les quatre âges les plus vieux proviennent du groupe d'échantillons qui présente les plus fortes concentrations d'hélium, de 1,1 à 6 pmol/g. Il n'y a pas de corrélation entre les âges et les concentrations en U et Th de ces échantillons.

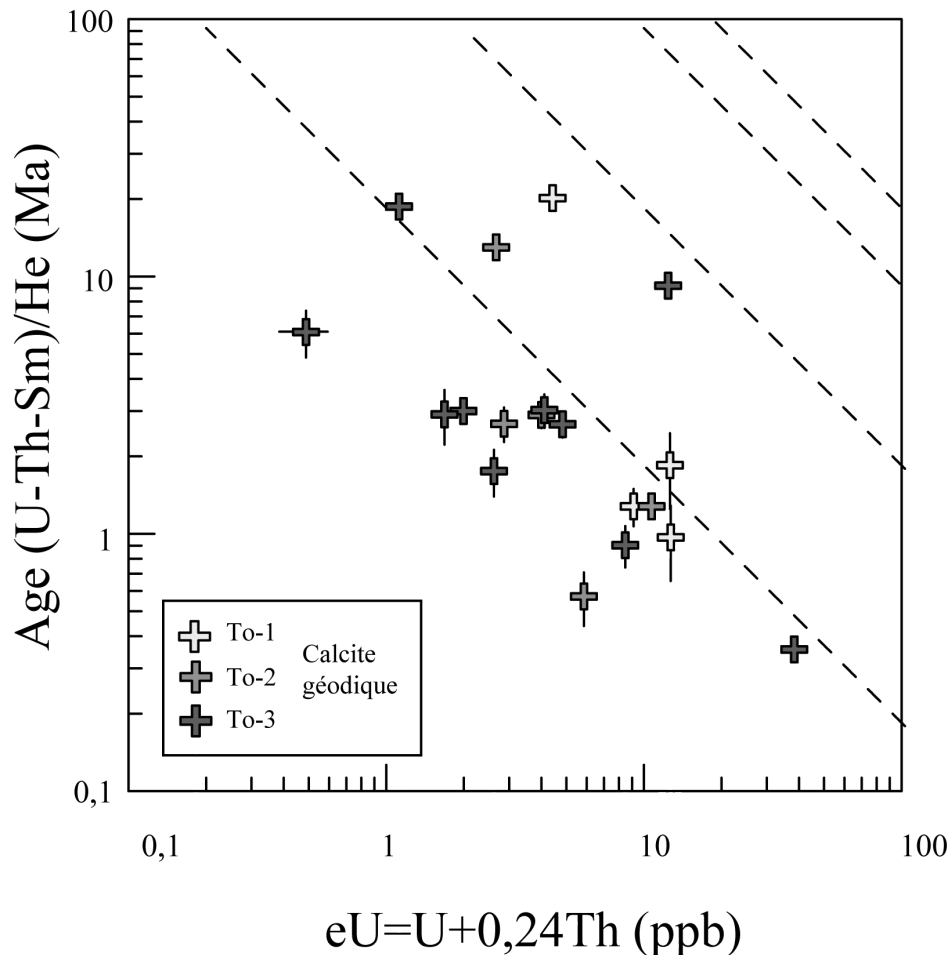


Figure V.4 : Diagramme des âges (U-Th-Sm)/He en fonction des concentrations d'uranium effectif (eU) pour l'ensemble des échantillons de Tournemire.

Les concentrations en thorium sont très faibles, comprises entre 1 et 23 ppb et sont très peu variables (Figure V.5). Les variations du rapport Th/U dépendent donc de la variabilité des concentrations en uranium.

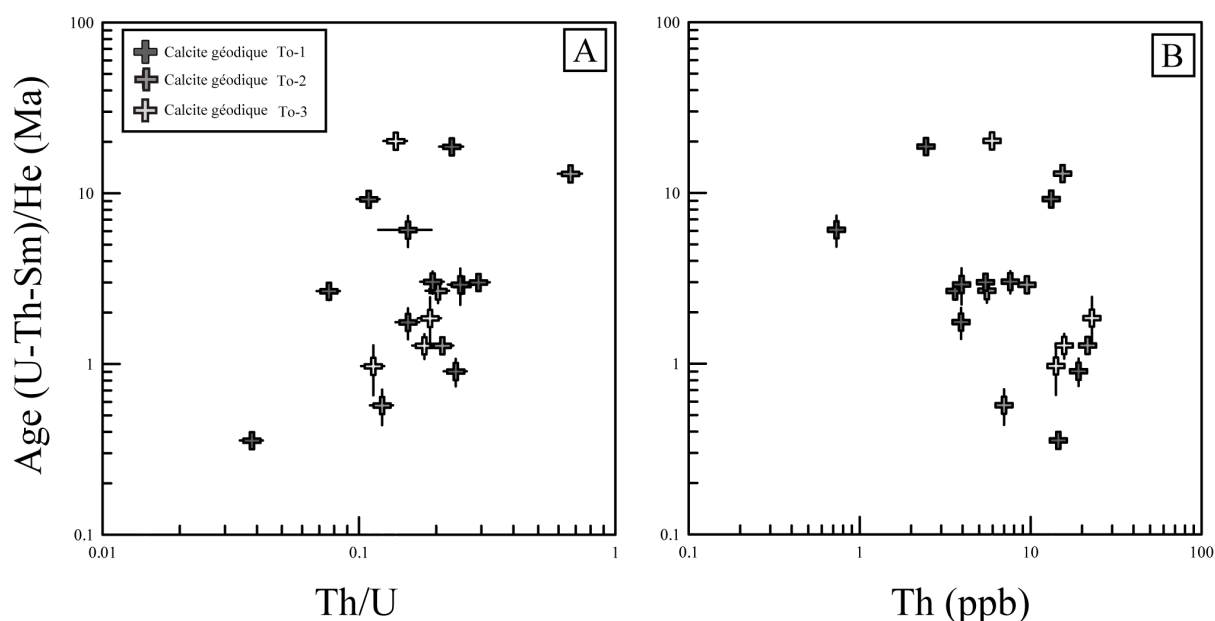


Figure V.5 : Diagramme des concentrations en thorium (A) et du rapport Th/U (B) en fonction des âges (U-Th-Sm)/He pour les échantillons de Tournemire.

## 4.2 Composition chimique des cristaux de calcite

### - Calcite de Gondrecourt

Les compositions chimiques des échantillons de Gondrecourt sont présentées dans le chapitre II. Les relations entre les âges He et la chimie sont présentées par la suite.

### - Calcite de Tournemire

Les compositions chimiques sont en accord avec les données déjà publiées dans la littérature (Peyaud et al., 2006) (Figure V.6). Les concentrations en éléments majeurs sont variables de 720 à 1957 ppm pour le magnésium, de 331 à 1228 ppm pour le manganèse et de 167 à 596 ppm pour le strontium.

Concernant les éléments des terres rares, leurs spectres normalisés présentent des profils avec enrichissement en terres rares lourdes et sans anomalie en cérium. Les spectres sont comparables à ceux publiés par Peyaud et al. (2006) et Mathieu et al. (2001) sur les échantillons de Tournemire aux alentours de 1000 ppb. Les profils des spectres en terres rares des cristaux de calcite de Tournemire suggèrent que ces cristaux de calcite géodique proviennent d'un fluide minéralisateur équilibré avec la roche encaissante argileuse et non avec la calcite marine syngénétique qui possède une anomalie négative en Ce.

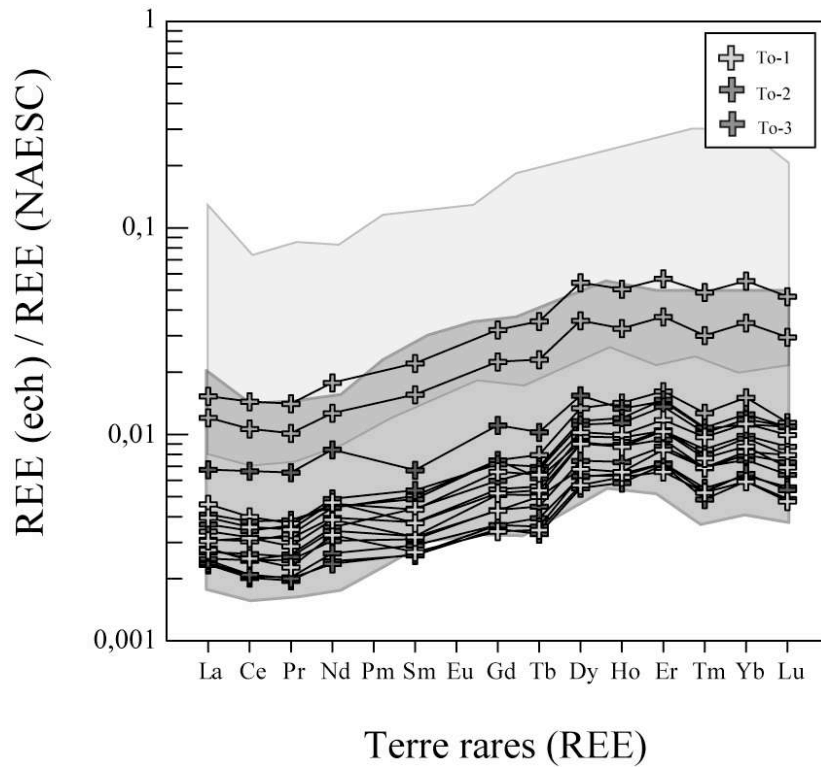


Figure V.6 : Distribution des éléments des terres rares normalisés aux argiles, pour les échantillons de Tournemire de cette étude (To1, To2 et To3), ainsi celle de Peyaud et al. (2006) (gris foncé) et Mathieu et al., 2001 (gris clair).

Il n'existe pas de corrélation entre les concentrations en uranium et thorium et les concentrations en éléments des terres rares (Figure V.7).

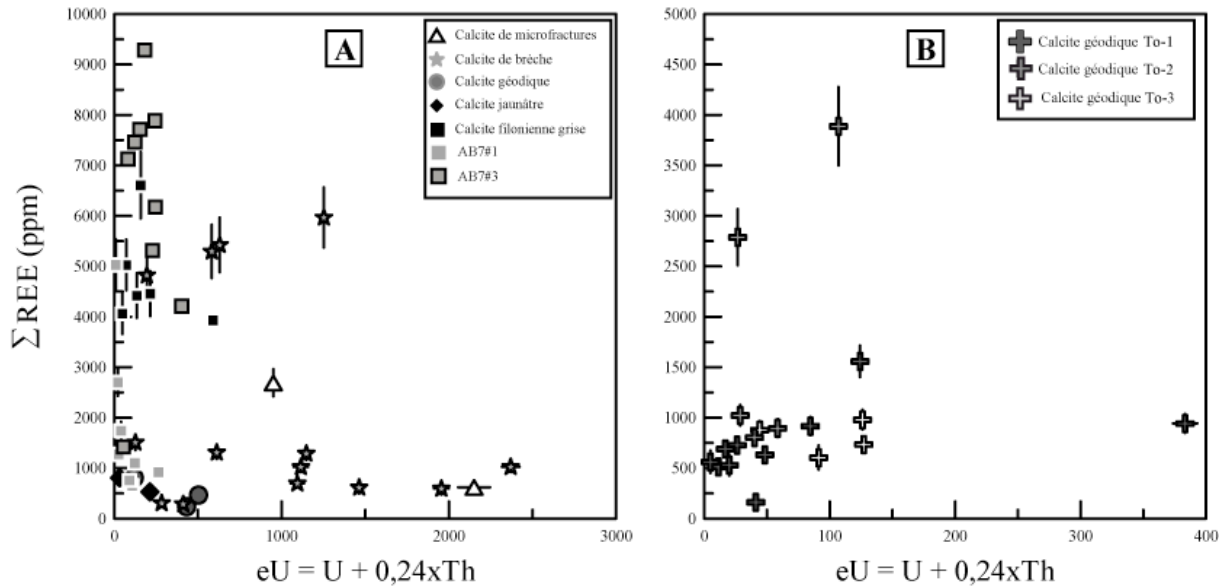


Figure V.7 : Diagrammes des concentrations en éléments des terres rares en fonction de l'uranium effectif pour les échantillons d'Augeville (A) et pour les échantillons de Tournemire (B).

## 5. Discussion

Les datations (U-Th-Sm)/He sur les échantillons de Gondrecourt et de Tournemire présentent des valeurs dispersées. Des simulations de l'âge He ont été réalisées en considérant un âge de précipitation de 35 Ma avec une histoire thermique isotherme à 20°C depuis leur formation jusqu'à leur exhumation à l'affleurement. Les âges obtenus ne sont pas en accord avec les âges modélisés en prenant en compte les paramètres de diffusion présentés dans le chapitre IV. Selon les paramètres de diffusion obtenus, les âges apparents seraient inférieurs à 1 Ma. En utilisant les paramètres de Copeland et al. (2007), les âges les plus vieux mesurés (32 à 35 Ma) atteignent les âges modélisés. L'ensemble des résultats des simulations et des paramètres utilisés se trouvent dans le tableau V.5.

Tableau V.5. : Modélisation des âges (U-Th-Sm)/He en fonction des paramètres de diffusion.

Ech	Ea kcal/mol	Ln(D0/a2)	Tc °C	Age (Ma)
Copeland, valeur min.	30,0±5,2	11,5±4,5	54	30
Copeland Valeur moyenne	28,8	7,6	68	33,2
Copeland, valeur max.	38,2±8,5	18,2±7,4	90	35
A2-2	23,3±0,2	6,6±0,1	10±2	1
B4a-8	26,7±0,7	12,4±0,3	13±5	1
B4a-14	17,3±0,5	4,2±0,1	-48±5	0
C1b-12	21,0±0,8	5,2±0,1	-8±7	0

Toutefois, les paramètres de diffusion de l'He obtenus dans cette étude (Chapitre IV) ou celle de Copeland et al. (2007) ne permettent pas de reproduire l'ensemble des âges obtenus. Les âges obtenus se trouvent entre ces deux valeurs. L'origine de la disparité des âges He peut être liée à la méthodologie de sélection de l'échantillon (masse, taille), cependant, aucune corrélation n'est notable concernant ces paramètres. Les concentrations d'uranium sont très variables d'un prélèvement à l'autre. L'implantation d'hélium de zones plus concentrées en uranium vers des zones moins concentrées peut générer des surestimations des âges (U-Th-Sm)/He. Avec une distance moyenne d'implantation de 23 µm, la taille des échantillons supérieure au millimètre est suffisante pour limiter les effets de zonation de l'uranium. Cette hypothèse est confortée par le fait qu'il n'existe pas de corrélation entre les masses et les âges (U-Th-Sm)/He (figure V.8).

La discussion porte sur les relations entre les compositions cristallo-chimiques des échantillons et l'évolution des microstructures dans la zone de déformation.

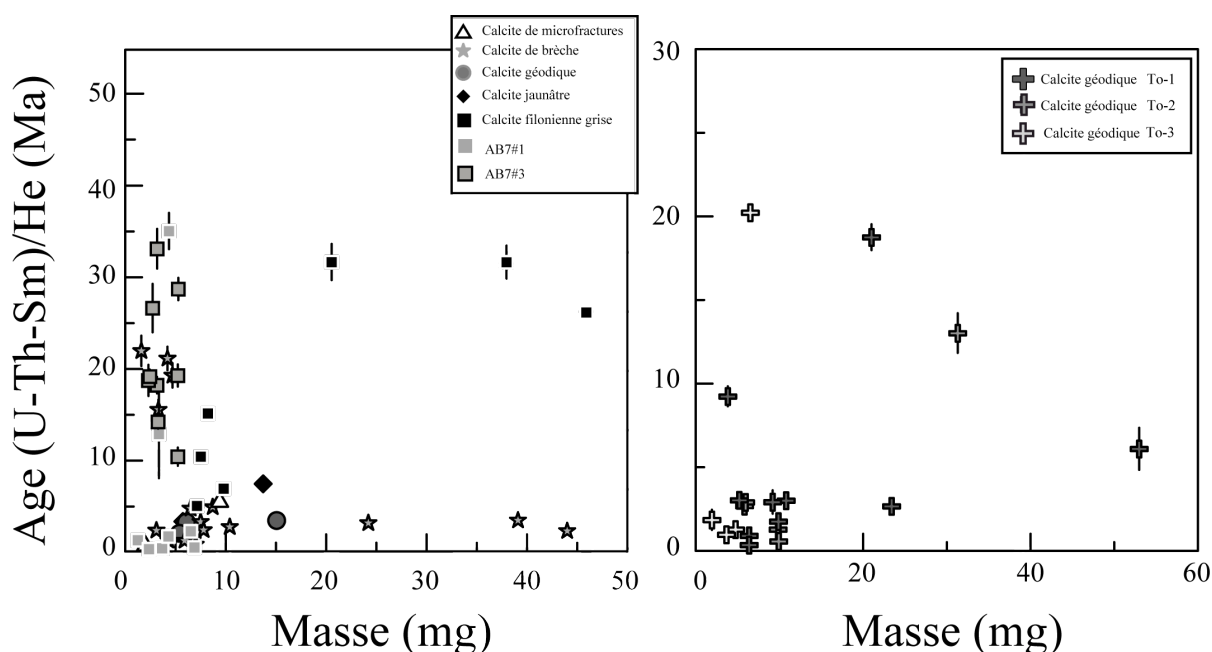


Figure V.8 : Age hélium des échantillons analysés en fonction de la masse, à gauche pour les échantillons d'Augeville et à droite pour les échantillons de Tournemire.

### 5.1 Influence de l'hélium commun

Lors de la précipitation des cristaux de calcite, de l'hélium commun peut se trouver piégé dans le réseau cristallin et s'ajouter à l'hélium radiogénique qui sera produit après la précipitation. Cet hélium commun peut donc modifier les âges (U-Th-Sm)/He et être à l'origine de la dispersion des données mesurées dans cette étude. L'hélium commun peut se localiser dans les inclusions fluides ou se trouver piégé dans le réseau cristallin.

L'estimation des quantités d'hélium commun est difficile à établir car il dépend des concentrations en He de la solution minéralisatrice et des vitesses de précipitation. Le tableau V.5 regroupe des gammes de concentration d'He mesurées dans des aquifères et cristaux de calcite de faille pour comparaison. La quantité d'hélium contenue dans les inclusions fluides peut être suffisamment importante pour compromettre la fiabilité de la datation hélium (Pik et Marty, 2009).

Pour déterminer les concentrations d'hélium dans des inclusions fluides des échantillons, il est nécessaire de faire deux hypothèses : 1- la proportion d'inclusions fluides est homogène et de l'ordre 0,01 % de la masse de l'échantillon et 2- les eaux de la nappe oxfordienne sont représentatives des eaux tertiaires responsables de la minéralisation des cristaux étudiés (tableau V.6). Les concentrations d'He supposées provenant des inclusions fluides varient de 0,0002 à 2,8 pmol/g en fonction du nombre d'inclusions piégées et des concentrations du fluide minéralisateur. Les cristaux de calcite précipités récemment (<1 Ma) dans la zone de déformation associée au rift de Corinthe présentent une gamme de concentration d'He égale ou supérieure à celle déduite précédemment par le piégeage (Pik et Marty, 2009). Les concentrations mesurées sont de l'ordre de 0,48 à 6,38 pmol/g.

Cependant, les cristaux étudiés dans cette étude (Gondrecourt et Tournemire) présentent des concentrations en hélium supérieures à celles qui ont été calculées en prenant

en compte un certain pourcentage d'inclusions fluides. Les inclusions fluides ne jouent pas de rôle significatif dans le budget d'hélium ce que confirment d'autres observations.

Tout d'abord les expériences de diffusion (chapitre III) ne présentent pas de relâchement ponctuel important d'hélium et cela pour l'ensemble des expériences de diffusion réalisé. Or, il est probable que le processus de décrépitation d'inclusions survienne au cours des paliers de chauffage.

Tableau V.6. : Concentration d'hélium dans différents milieux (aquifères, lac, calcite de faille).

Type	Location	Origine	<sup>4</sup> He (pmol/g) eau aquifère	<sup>4</sup> He (pmol/g)  Calcite (0,01 % d'eau)
Weiss (1971)				
Eau de surface (10°C)	-	-	2,10	0,0002
Battani et al. (2011)				
Aquifère	Bassin de Paris	Nappe Oxfordien	1401	0,14
Aquifère	“	Nappe Dogger	2802	0,28
Lavastre et al. (2010)				
Aquifère	Bassin de Paris	Oxfordien	549	0,06
Aquifère	“	Callovo oxfordien	2338	0,23
Pik et Marty (2009)				
Calcite de fracturation(V. max.)	Corinthe	-	-	6,38
Calcite de fracturation(V. min.)	“	-	-	0,48
Calcite de fracturation(V. moy.)	“	-	-	3,00

## 5.2 Relation entre la chimie et les âges (U-Th-Sm)/He

Il existe des relations entre les âges (U-Th-Sm)/ He et les compositions chimiques des échantillons d'Augeville. Les échantillons de Tournemire ne présentent pas de telles corrélations. Les échantillons d'Augeville qui présentent les âges hélium les plus vieux sont ceux qui présentent les concentrations en éléments des terres rares les plus élevées (supérieures à 3000 ppm). Ces échantillons ont également des anomalies en cérium très prononcées ainsi que des rapports (La/Yb)<sub>N</sub> voisins de 1. À l'inverse, les échantillons qui présentent des âges He jeunes sont ceux qui présentent des concentrations totales en éléments des terres rares les plus faibles, entre 500 et 3000 ppm. Ils présentent également des similitudes concernant les rapports (La/Yb)<sub>N</sub>, rapport souvent inférieur à 1, et des anomalies en cérium moins marquées, voire voisines ou supérieures à 1 (Figure V.9). Les échantillons à faibles concentrations de magnésium ou à fortes concentrations en strontium sont ceux qui présentent les âges les plus vieux (Figure V.10).

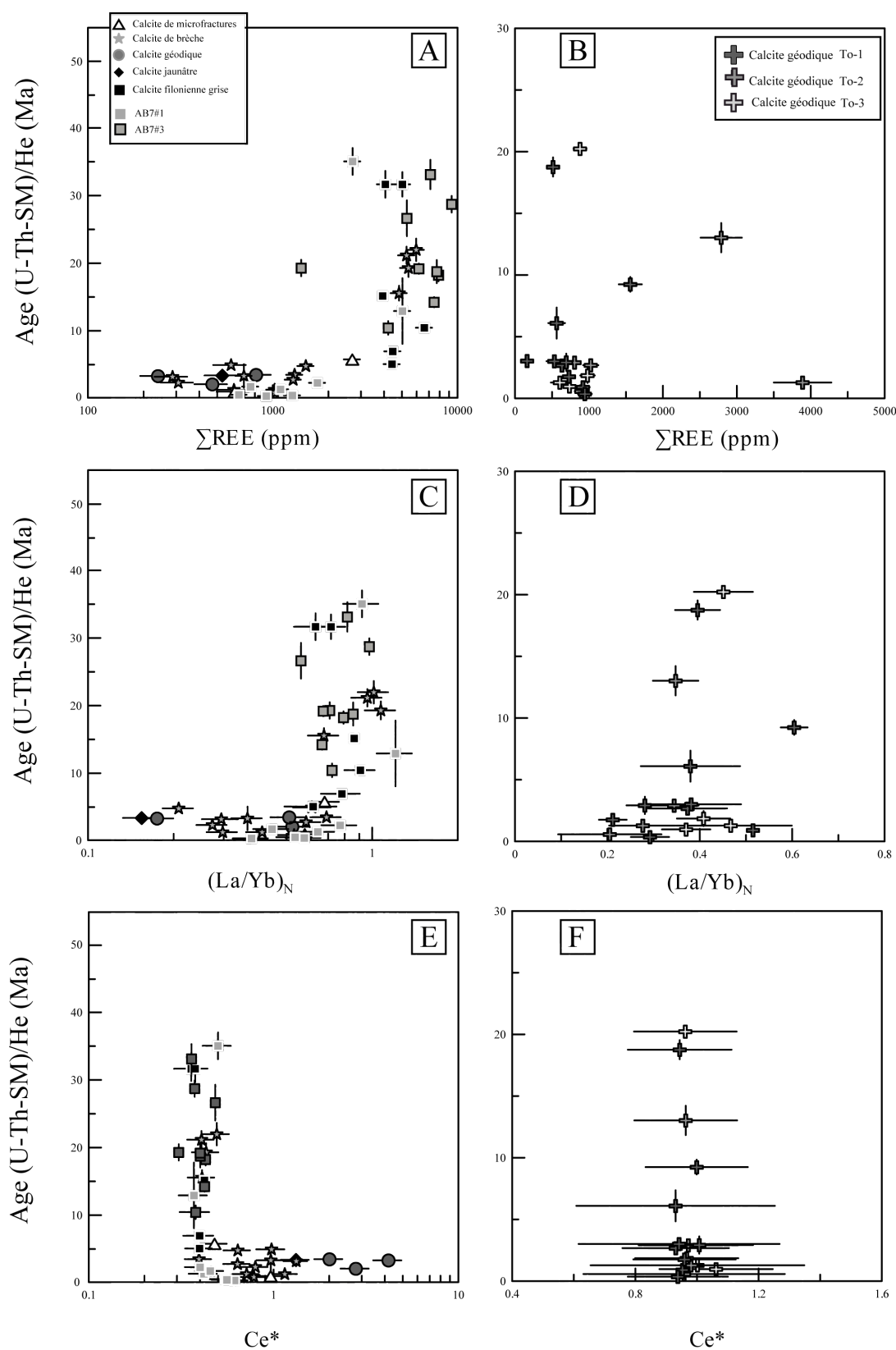


Figure V.9 : Diagrammes de l'âge (U-Th-Sm)/He des échantillons en fonction de la somme des éléments des terres rares, du rapport  $(\text{La}/\text{Yb})_N$  et de  $\text{Ce}^*$ . Les diagrammes (A, C et E) présentent les résultats obtenus pour les échantillons d'Augeville (Gondrecourt) et les diagrammes (B, D et F) présentent les résultats des échantillons de Tournemire.

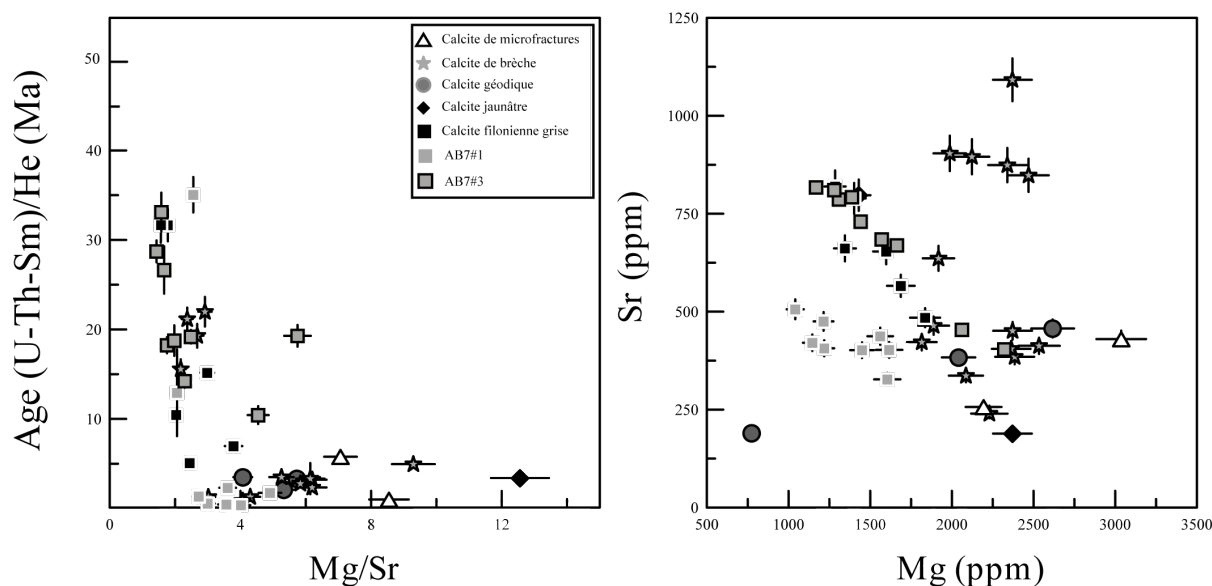


Figure V.10 : Diagrammes de l'évolution des âges (U-Th-Sm)/He en fonction des rapports Mg/Sr (à gauche). Evolution du strontium en fonction du magnésium (à droite) pour les échantillons d'Augeville.

De telles variations pourraient être le résultat de l'influence des teneurs en éléments dans les cristaux de calcite. A ces quantités, les substitutions de magnésium et de strontium à la place du calcium ne sont que très ponctuelles dans le réseau et la densité d'atomes d'hélium dans le réseau est également très faible. Pour que la chimie influence de façon significative la diffusion, il faut que les variations chimiques soient plus importantes. Or, dans le cas des échantillons d'Augeville, les variations des éléments mineurs sont très faibles et varient de 1000 à 3000 ppm de magnésium et de 250 à 900 ppm pour le strontium.

La rétention de l'hélium dépend de l'origine des cristaux de calcite dont il a été démontré dans le chapitre II qu'ils possèdent une chimie différente. Les remplissages bréchiques et les cristaux géodiques sont moins rétentifs que les cristaux de calcite filonienne. Les cristaux bréchiques présentant des âges vieux présentent des signatures géochimiques proches des filons. Les phases avec les âges les plus élevés, ou les phases les plus rétentives, correspondent aux dernières phases de circulations de fluide.

### 5.3 Comportement mécanique des échantillons

Rybacki et al. (2011) proposent que la concentration en dislocations et que les nanostructures des cristaux de calcite augmentent au cours de l'activité d'une zone de faille. Ainsi la concentration de défauts pourrait augmenter au cours des étapes d'ouvertures successives de la zone de déformation de Gondrecourt. Selon les résultats obtenus dans les chapitres I et IV, la densité des nanostructures dans un cristal forme des hétérogénéités de diffusion dans celui-ci en créant de multiples domaines de diffusion. Ainsi, les cristaux les plus préservés sont les derniers cristaux de la séquence paragenétique. Les âges (U-Th-Sm)/He et leurs hétérogénéités seraient liés à l'état de déformation du réseau cristallin. La figure V.11 présente les stades de croissance d'une calcite filonienne (échantillon C3). Il est observable que le nombre de macles diminue des premiers aux derniers stades de croissance.



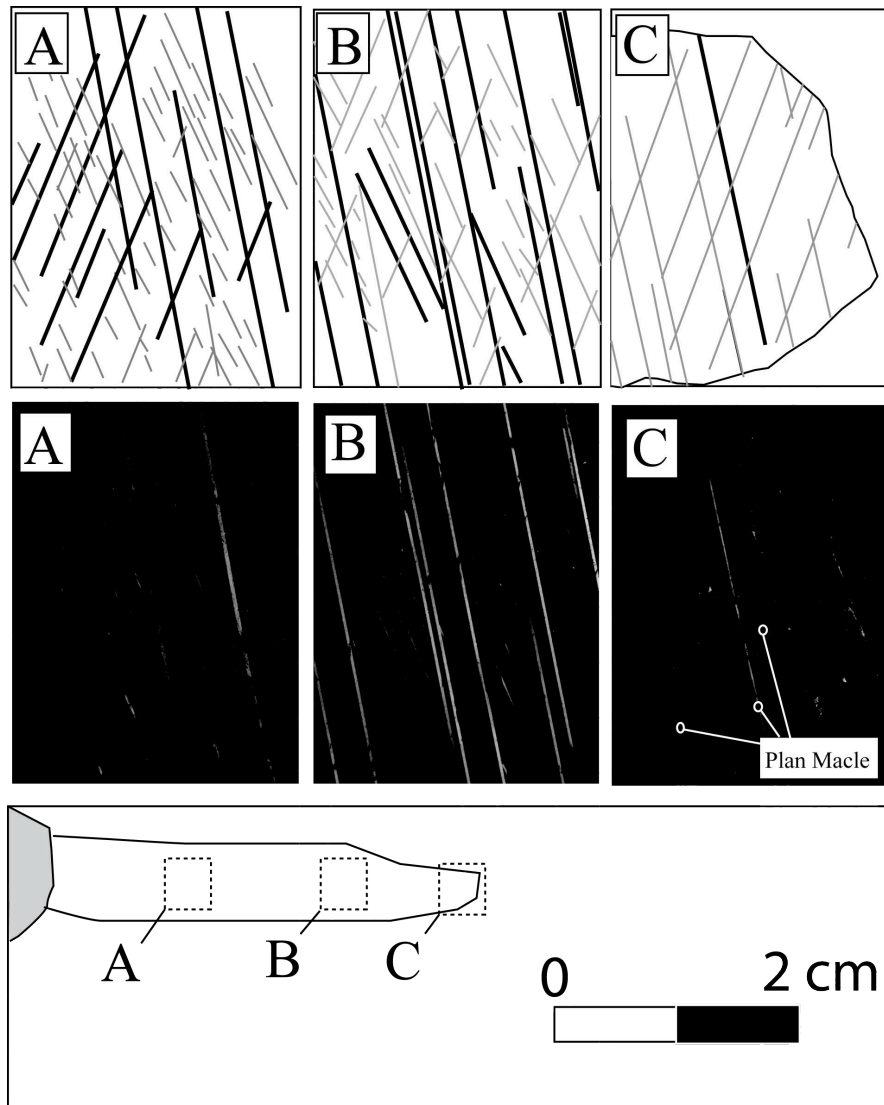


Figure V.11 : Photos et schémas de l'évolution des macles le long d'un cristal de calcite filonienne en LPA. De l'éponte vers l'extérieur du grain, de A à C, le nombre de macle diminue. Les macles mineures (gris) et les majeures (noir) sont représentées sur le schéma.

Cette déformation peut générer au cours des différents épisodes tectoniques des domaines de diffusion de plus en plus petits et par conséquent des hétérogénéités de la rétention de l'hélium et cela explique la dispersion des âges obtenus. Dans les expériences de diffusion, dans un premier temps, les domaines de plus petite taille se vident de l'He alors que les domaines les plus gros conservent mieux l'hélium. De fait, les cristaux de calcite dans une zone de déformation ne sont pas les meilleurs candidats pour réaliser une étude chronologique basée sur l'hélium.

Toutefois, ces hypothèses ne sont pas suffisantes car elles n'intègrent pas le fait que les cristaux de calcite géodique de Tournemire ne soient pas rétentifs, alors que ces cristaux sont théoriquement moins concentrés en dislocations, ou clivages et nanostructures. Toutefois, leur concentration en uranium est relativement faible, de plus ces prélèvements se situaient proches des bordures des cristaux sur l'échantillon macroscopique. Les bordures présentaient des surfaces de dissolution par observation au MEB. Les processus d'altération superficielle, qui pourraient éventuellement perturber le signal chronologique, ne sont pas

maîtrisés pour ces échantillons. L'He situé proche des bordures avec l'atmosphère diffusera plus rapidement à l'extérieur du cristal alors que celui se trouvant dans un cristal situé au cœur d'un remplissage calcitique sera plus difficilement libéré.

Cette dernière hypothèse explique pourquoi les cristaux de géode de Tournemire, ou de la zone de déformation, et les cristaux échantillonnés à l'affleurement (AB7) présentant des traces de lichens et d'oxydation sont très pauvres en hélium et présentent des âges anormalement faibles. AB7#3 est également un échantillon qui provient de la surface mais il ne semble pas affecté par ces processus.

## 6. Conclusion

Des datations (U-Th-Sm)/He réalisées sur des remplissages de calcite de la zone de déformation de Gondrecourt (Augeville), ainsi que sur des cristaux de calcite géodique dans des argilites du tunnel de Tournemire sont extrêmement variables.

Dans le cas de Gondrecourt, l'âge est compris entre 35 et 0,1 Ma. L'âge le plus vieux peut avoir une signification géologique car la formation du fossé d'effondrement est considérée comme fin Eocène-Oligocène.

Les âges des cristaux de calcite de Tournemire sont beaucoup plus jeunes (20 Ma à 0,4 Ma) et ne correspondent pas à l'époque de formation des fractures. Par contre, comme les cristaux de calcite sont géodiques, leur formation lors de circulation à une époque plus récente ne peut être totalement exclue. Toutefois, les prélèvements ont été réalisés sur le même échantillon.

Il est montré que la variation des âges des cristaux de calcite de Gondrecourt est en partie liée à leur position dans la succession paragénétique ou, pour le cas des zones bréchiques, à la superposition d'une fracturation et d'une déformation tardives. Ce résultat est très important car il montre que la diffusion de l'hélium dépend du degré de déformation du minéral (dislocations, microfissures, nanostructures, clivages, etc...) ce qui rejoint les données obtenues dans les expériences de diffusion.

## Synthèse

Le développement de la méthode (U-Th-Sm)/He comme outil chronométrique dans les cristaux de calcite de faille nécessitent une approche pluridisciplinaire et à multi-échelles de l'évolution cristallographique de ces cristaux dans les zones de déformation. Cette étude fait le lien entre les propriétés cristallochimiques des cristaux de calcite de failles et les processus de diffusion. Ces propriétés sont essentielles car elles peuvent influencer sur l'efficacité de la méthode (U-Th-Sm)/He dans ces types de remplissages.

Les axes de travail de cette étude ont été définis à partir des premiers résultats de datation (U-Th-Sm)/He qui présentent des âges fortement dispersés. Le premier axe est basé sur une approche descriptive de la zone de faille et une approche géochimique isotopique ( $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$ ) et quantitative élémentaire du fossé de Gondrecourt. Des phases majeures de remplissages, bréchiques et filoniennes, ont été identifiées et ont permis de réaliser un modèle pétrogénétique complet de la zone de déformation étudiée. Le deuxième axe est une étude des comportements diffusifs de l'hélium à partir d'expériences de diffusion associées à une étude cristallochimique centrée sur l'évolution microstructurale des cristaux de calcite. L'ensemble des résultats montre un lien entre les microstructures et la diffusion de l'hélium dans le minéral.

Des mesures d'âges (U-Th-Sm)/He sur l'ensemble de ces phases de remplissages et sur d'autres cristaux de calcite géodique provenant de Tournemire (Aveyron) permettent de tester la faisabilité de la datation (U-Th-Sm)/He sur des cristaux de calcite de failles à la lumière de leurs caractéristiques minéralogiques, géologiques et géochimiques.

### **1. Caractérisation et histoire paragénétique des phases de remplissage de la zone de déformation d'Augeville**

Les remplissages des fractures de la zone de déformation de Gondrecourt sont des cristaux de calcite précipités dans différentes conditions en relation avec l'évolution tectonique de cette zone. La déformation étudiée est attribuée à la période Eocène-Oligocène. Ces remplissages s'inscrivent dans la dernière phase de cimentation du bassin parisien identifié par Brigaud et al. (2009). Elle est le témoin de la mise en place du fossé d'effondrement de Gondrecourt. L'étude haute résolution de ces remplissages a permis d'inventorier géochimiquement les phases de remplissage de cette zone à travers une étude pétrographique de terrain et de laboratoire couplée à des analyses géochimiques des éléments traces et des isotopes stables  $\delta^{18}\text{O}$  et  $\delta^{13}\text{C}$ . L'histoire paragénétique de ces remplissages calcitiques a été construite à partir des observations texturales entre les différents cristaux et les phénomènes diagénétiques identifiés.

Chronologiquement, trois stades majeurs se succèdent :

Le premier stade correspond à une hydrofracturation qui se développe dans l'encaissant carbonaté, surmontée par une couche imperméable marneuse qui provoque des surpressions locales. La seconde étape correspond à l'ouverture des zones de faiblesse préférentielle où vient se localiser la fracturation lors de chaque extension. Ces ouvertures successives tendent à isoler des clastes de roche encaissante par des étapes de minéralisation. Cet épisode conduit au développement d'une brèche chaotique. Plus tardivement les

extensions conduisent à la formation de larges filons de calcite à croissance syntaxiale avec également des remplissages au niveau des brèches chaotiques.

Chacune de ces étapes de remplissage présente des caractéristiques géochimiques bien distinctes. Le continuum de l'évolution de la zone de déformation est marqué par une évolution régulière des concentrations chimiques. Cette étude permet de contraindre l'évolution mécanique des cristaux de calcite dans une zone de déformation de failles. Les cristaux les plus déformés sont les plus précoces associés aux brèches hydrauliques et aux remplissages chaotiques alors que les cristaux plus préservés du développement de microfissures sont les cristaux de calcite filonienne et certains cristaux du remplissage bréchtique. Ces informations sont très importantes pour la discussion des âges (U-Th-Sm)/He obtenus sur ces phases de remplissage.

## 2. Evolution cristalline à basse température de la calcite

L'étude de l'évolution structurale de la calcite à basse température est un préalable indispensable à toute étude de comportement diffusif de gaz rare dans un minéral. L'évolution cristalline au cours d'expériences de chauffage peut perturber les phénomènes premiers recherchés. Pour les carbonates, des évolutions minérales ont déjà été mises en évidence comme un recuit, une cicatrisation des défauts (e.g Rodriguez et al. 2009) ou bien le traitement thermique d'un échantillon de calcite influe sur la vitesse d'onde acoustique dans les cristaux de calcite. Les résultats ATG et DRX obtenus dans cette étude présentent une évolution cristallographique depuis la température ambiante jusqu'à la température de décarbonatation à 560°C, sans perte de masse. Cette évolution est assistée par la dilatation anisotrope de la calcite sous l'effet de la température. Les coefficients de dilatation sont positifs dans la direction de l'axe (c) et négatifs dans les directions des axes (a) et (b). L'accommodation de cette déformation sous l'effet de la température génère une rééquilibration mécanique de la calcite qui conduit à la contraction du réseau sur lui même, assisté par la composante compressive de dilatation. Ces déplacements se traduisent par la formation de microfissures dans la structure cristalline. Lorsque ces dernières augmentent au cours du temps, elles s'interconnectent les unes aux autres pour former, à terme, des plans de faiblesse ou des plans de clivage de dilatations. Ces processus sont observables pour des températures inférieures aux températures de décarbonatation (environ 560°C). Le phénomène de décarbonatation quant à lui est le paroxysme de l'étirement cristallin qui aboutit à la libération de molécule de CO<sub>2</sub>. Aux échelles de temps expérimentales, ces microfissures ne sont pas réversibles et altèrent la stabilité nécessaire à la bonne conduite de détermination des paramètres de diffusion.

## 3. Mécanismes de diffusion de l'hélium

La compréhension de la diffusion des gaz rares dans les minéraux doit être phénoménologique et quantitative. Par rapport aux travaux de Copeland et al. (2007), ce travail apporte une connaissance des mécanismes de diffusion de l'hélium dans les cristaux de calcite. Les expériences de diffusion conduites dans ce travail se sont appuyées sur les observations des évolutions cristallographiques à basse température sur les échantillons de Gondrecourt. Les expériences de diffusion sur les échantillons de la zone de déformation de Gondrecourt présentent une hétérogénéité concernant les paramètres de diffusion (E ou

l'énergie d'activation,  $\ln(D_0/a^2)$  et le facteur pré-exponentiel). Ces résultats sont différents de ceux obtenus par Copeland et al. (2007) qui obtiennent globalement des valeurs reproductibles des énergies d'activation de l'ordre de 30 kcal/mole et de  $\ln(D_0/a^2)$  de  $10 \text{ s}^{-1}$ . Toutefois, il ressort de ce travail que la calcite de faille présente plusieurs domaines de diffusion.

Les domaines de diffusion jouent un rôle majeur dans les cinétiques de diffusion de l'hélium. Les domaines de diffusion sont des subdivisions en plusieurs volumes de l'espace de diffusion de l'hélium dans un échantillon. Ces domaines de diffusion peuvent être assimilés à l'état microstructural de la calcite où l'interconnexion de microstructures définit des domaines géométriquement isolés. L'hélium est relâché plus rapidement dans les domaines les plus petits. Les domaines de diffusion et l'hétérogénéité des comportements diffusifs dépendent des différences d'état structural entre chaque cristal. L'état structural dépend lui de l'histoire géologique du minéral mais également de ses conditions de prélèvement et de sa préparation. La présence de ces domaines est également observée dans les travaux de Copeland et al. (2007). Ces résultats mettent en évidence les liens étroits qu'ont les coefficients de diffusion dans un minéral avec leur microstructure, et leurs évolutions microstructurales. Autrement dit, les minéraux n'auront pas les mêmes propriétés diffusives en fonction de leur degré de déformation. La calcite étant un minéral fragile, elle est propice au développement de ce types de structures, ce qui en fait un bon minéral pour étudier ce type de phénomène mais n'en est pas un pour obtenir des âges chronométriques fiables. L'évolution mécanique des cristaux dans les zones de déformation est un frein à la bonne conduite de l'utilisation des carbonates comme outil thermochronométrique (Figure S.1).

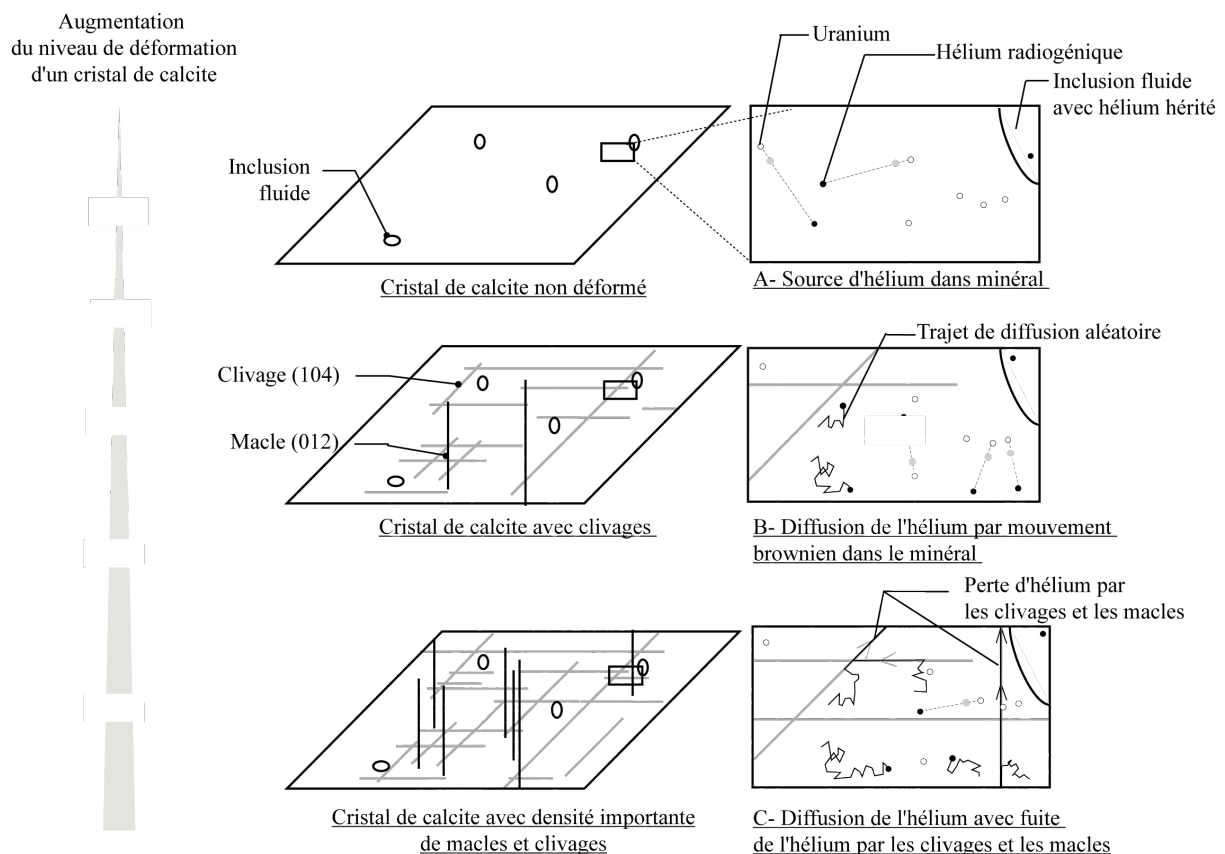


Figure S.1 : Schéma conceptuel de diffusion de l'hélium en fonction de l'évolution des microstructures (macles, clivages) dans la calcite.

#### 4. Essai de datation (U-Th-Sm)/He

Les datations (U-Th-Sm)/He d'échantillons de la zone de déformation d'Augeville et de la zone de fracturation dans les argilites de Touremire présentent une forte dispersion. Dans le cas de la zone de déformation d'Augeville, les âges varient de 0 Ma à 32 Ma, et dans le cas des échantillons de Touremire, les résultats varient de 0,4 Ma à 18 Ma. Cette grande dispersion n'est pas acceptable pour pouvoir proposer une datation de ces remplissages.

Toutefois, les datations (U-Th-Sm)/He de la zone de déformation de Gondrecourt couplées aux informations géochimiques permettent de noter que les âges les plus vieux correspondent aux phases de minéralisation les plus tardives. Ces phases présentent des âges maximum de l'ordre de 35 Ma correspondant à une période fini Eocène-Oligocène (Figure S.2).

L'hétérogénéité des âges des cristaux de calcite de Gondrecourt est attribuée à leur degré de déformation, hérité de la succession d'événements tectoniques dans la zone de déformation. Ce résultat est très important pour la thermochronologie car il montre que le degré de déformation est un paramètre majeur pour discuter des problèmes de diffusion dans les minéraux.

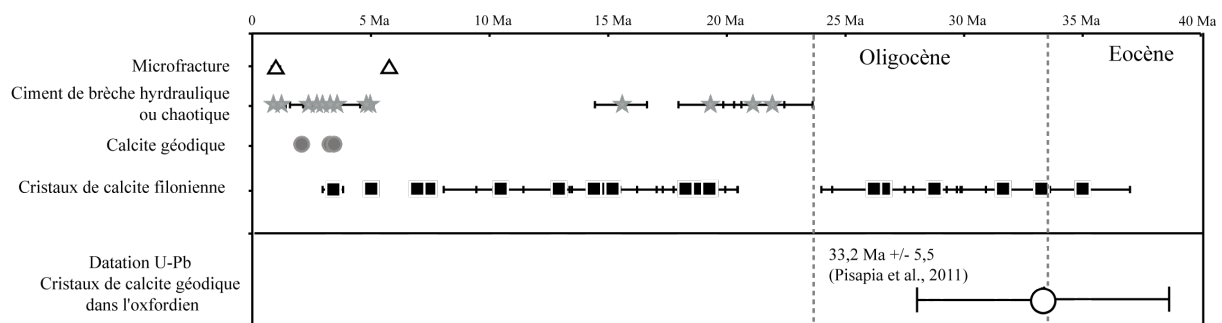


Figure S.2 : Ages (U-Th-Sm)/He dans les différents remplissages calcitiques de la zone de déformation d'Augeville.