



**HAL**  
open science

# Évolution structurale et thermique des Calédonides d'Écosse

Ella Jewison

► **To cite this version:**

Ella Jewison. Évolution structurale et thermique des Calédonides d'Écosse. Sciences de la Terre. Sorbonne Université, 2018. Français. NNT : 2018SORUS613 . tel-03294803

**HAL Id: tel-03294803**

**<https://theses.hal.science/tel-03294803>**

Submitted on 21 Jul 2021

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

**Sorbonne Université**

Institut des Sciences de la Terre de Paris

ED 398 : Géosciences, Ressources Naturelles et Environnement

# **Évolution structurale et thermique des Calédonides d'Écosse**

Ella JEWISON

Thèse de doctorat en Sciences de la Terre

Dirigée par : Nicolas BELLAHSEN, Loïc LABROUSSE et Claudio ROSENBERG

Présentée le 7 Décembre 2018

Devant un jury composé de :

<b>M. L. JOLIVET</b>	Professeur, Sorbonne Université	Président du Jury
<b>M. J-L PAQUETTE</b>	Directeur de recherche, Univ. Clermont-Ferrand	Examineur
<b>Mme C. WARREN</b>	Senior Lecturer, The Open University	Rapporteur
<b>Mme S. DUCHENE</b>	Professeur, Université Toulouse	Rapporteur
<b>M. N. BELLAHSEN</b>	Maître de Conférence, Sorbonne Université	Directeur
<b>M. L. LABROUSSE</b>	Professeur, Sorbonne Université	Directeur
<b>M. C. ROSENBERG</b>	Professeur, Sorbonne Université	Co-Directeur





*À ma sœur,*

**Résumé** Les prismes collisionnels ductiles sont classiquement décrits par analogie aux prismes frictionnels superficiels, avec des déformations localisées et en séquence, s'enracinant sur un niveau de décollement basal. Cependant, puisqu'ils se construisent sous la transition cassant-ductile ils impliquent aussi des déformations ductiles distribuées à toutes les échelles. L'accrétion des différentes unités pourrait donc être significativement différente. Pour documenter l'évolution d'un prisme ductile il faut donc étudier finement l'évolution thermique de chaque unité et des zones de cisaillement qui les séparent pour comprendre comment elles s'accrètent au prisme. La présente étude prend pour support l'exemple archétypique du prisme Calédonien des Highlands et se propose d'utiliser une panoplie d'outils de thermochronologie haute température comme la méthode U-Pb sur apatite, en soulignant l'apport de la datation SIMS pour la détection fine de populations d'âge dans des terrains polymétamorphiques associée à la méthode éprouvée de datation  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  sur micas. Les résultats U-Pb sur apatite et  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  sur muscovites montrent que le refroidissement à l'échelle du prisme se produit vers 415-400 Ma. Les résultats des datations  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  montrent également que les zones de cisaillement majeures dans le prisme ont des activités diachrones : La zone de cisaillement de Naver, la plus orientale, semble jouer dans des conditions  $> 500\text{ }^\circ\text{C}$  seule, et tôt dans l'histoire du prisme, alors que les cisaillements de Ben Hope et du Moine semblent jouer de façon concomitante de 440 Ma à 415 Ma, avant la localisation complète de la déformation sur le Moine, et le refroidissement général et uniforme du prisme.

**Abstract** Collisional wedges are typically described as analogue to frictional superficial wedges. The frictional wedges display localized deformations propagating in sequence and rooting on a basal decollement level. However rocks mechanics predicts that, below the brittle-ductile transition, rocks behavior change drastically and deformation occurs both with localized and distributed patterns, thus suggesting possible first order differences between crustal-scale wedge and accretionary prisms. To better understand how a ductile wedge is built, the present study focuses on the Northern Highlands Caledonian nappe stack to characterize when and how they accreted one to another. To capture this deep stacking, occurring at temperatures above 400-500 °C, we performed high temperature thermochronology : SIMS U-Pb dating of apatites, which happens to be a powerful tool for distinguishing age populations in polymetamorphic terranes, and  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  dating on micas. U-Pb data suggest a cooling at the scale of the wedge near 415-400 Ma. Our  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  data is consistent with this cooling in the internal part of the wedge near 415 Ma. The Naver thrust appears to be the older active shear zones, that ceased early in the Scandian sequence. Then,  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  data suggest that ductile deformation occurred coevally on the Ben Hope and Moine shear zones from 440 Ma to 415 Ma, before final localization on the Moine thrust and exhumation and cooling of the whole stacked sequence before 410 Ma.

## Remerciements

Tout d'abord je tiens à remercier les membres du jury d'avoir accepté d'évaluer ce travail. Merci à C. Warren et S. Duchene d'avoir accepté d'être les rapporteuses de cette thèse. Merci à J.L Paquette et L. Jolivet d'être les examinateurs de cette thèse et de faire partie de mon jury.

Je voudrais remercier mes trois directeurs de thèse : Nicolas, Loïc et Claudio. Merci pour l'opportunité de faire cette thèse. Merci pour votre disponibilité à toute épreuve, et votre patience. J'ai énormément appris à vos côtés, merci de m'avoir expliqué quatorze fois les mêmes choses. J'ai vraiment beaucoup aimé travailler avec vous.

Un grand merci à l'équipe sonde du CRPG de Nancy : Etienne, Johan et Nordine. Un grand merci à Raphaël Pik évidemment qui a toujours eu du temps pour moi malgré son emploi de temps du ministre. Merci d'être venu sur le terrain avec nous. Merci de me faire réaliser que je n'ai perdu toutes mes apatites en polissant trop. Merci à Etienne et Johan pour ces semaines à la sonde ionique. Merci de d'avoir un peu démystifier cette grosse machine à mes yeux.

Je souhaite aussi remercier l'équipe du laboratoire d'argon d'Orléans : Stéphane et Florian. Merci à Stéphane pour toutes ses explications et ses conseils. Merci aussi à Vincent et Morgane.

Merci à David Chew pour nous avoir accueilli dans son laboratoire à Trinity College, et m'avoir initiée aux pouvoirs du LA-ICPMS.

Je remercie aussi Benoit D. et Mathieu pour m'avoir encadré en M2 et m'avoir donné envie de faire de la recherche. Et merci à Omar, Nico et Michel pour être si divertissant pendant les séances de sonde et de MEB.

Un grand merci à tous ceux qui m'ont accueillis sur leur canapé pendant mes analyses à droite et à gauche. Un grand merci à Paul et surtout à Lionel et Julie (et Irko!), pour m'avoir acceptée en coloc à chacune de mes visites à Nancy. Merci à Loïc, Zineb et Vivi pour m'avoir accueillie à Orléans . En enfin, merci à Théo et Meg pour m'avoir hébergée le temps d'un weekend à Dublin :)

Merci à tous les copains du master Loïc, Le Chum, Maxime Daudet, Lowen et Camille S pour tous les souvenirs :) Merci aussi à JB et Maxime W.

mes partenaires de couloir et partenaires thermochronologues. C'est quand même plus sympas de broyer des cailloux à trois.

Merci du fond du coeur à tous les doctorants de l'ISTeP où qu'ils soient. Merci aux "anciens" Pauline, Julien, Erwann, Alexis, Aida, Elise, et Michele. Merci d'être toujours là. Marianne pour toujours être la "grande soeur", et ma partenaire de yoga. A Ben pour les blagues pourries. Mais surtout à mes partenaires de rédaction Lorella et Maxime, qui ont dû me supporter jusqu'à maintenant. Merci Maxime de toujours réussir à me dire les choses pour que je les comprenne, et merci Lorella de toujours être à l'écoute. Ce fut un plaisir de servir à vos cotés.

Merci à ma famille pour son soutien inconditionnel quoi qu'il arrive. Jean-Luc pour m'avoir toujours un peu drivé depuis Cherlieu! Merci à tous mes copains de Vincennes. Merci à Sandrine de me changer les idées et de venir courir avec moi. Merci à Margaux pour son soutien inconditionnel et nos psychanalyses respectives autour de bières. Merci à Camille pour avoir TOUJOURS été là, même à 10 000 km. Et merci infiniment à Sam, évidemment.

# Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction et contexte géologique</b>	<b>12</b>
1.1	Introduction . . . . .	12
1.2	Géodynamique, structure et stratigraphie . . . . .	20
1.2.1	La séquence orogénique dans les Calédonides Nord Atlantique . . . . .	20
1.2.2	La place de l'Ecosse dans l'orogène Calédonien . . . . .	25
1.3	La séquence structurale . . . . .	34
1.4	Histoire thermique des Highlands . . . . .	37
1.4.1	Métamorphisme régional : . . . . .	37
1.4.2	Estimations des conditions P-T des pics métamorphiques . . . . .	38
1.4.3	Estimations des conditions de température de la déformation : . . . . .	40
1.4.4	Chemin P-T-t dans la nappe de Naver . . . . .	41
1.4.5	Une phase grampienne dans les Highlands? . . . . .	43
1.5	Géochronologie des plutons et datation de l'activité des thrusts . . . . .	45
1.6	Thermochronologie : refroidissement des nappes . . . . .	49
1.7	Structure globale du prisme . . . . .	52
1.8	Questions soulevées . . . . .	54
1.8.1	La séquence structurale . . . . .	54
1.8.2	Chemin P-T-t des unités . . . . .	55
1.8.3	Comment relier les chemins P-T aux structures . . . . .	55
1.8.4	L'héritage thermique dans les nappes . . . . .	56
1.8.5	La séquence d'exhumation . . . . .	57

<b>2</b>	<b>Méthodes</b>	<b>58</b>
2.1	Notion de température de fermeture . . . . .	58
2.2	Datation U-Pb . . . . .	61
2.2.1	Principe de datation . . . . .	62
2.2.2	Datation des zircons . . . . .	63
2.2.3	Datation des apatites . . . . .	65
2.2.4	Les différentes méthodes de correction du Pb commun	66
2.2.5	Comparaison des méthodes de mesures . . . . .	69
2.3	Datation $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$ . . . . .	72
2.3.1	Principe de datation . . . . .	72
2.3.2	Datation par paliers, "Step Heating" . . . . .	74
2.3.3	Processus d'acquisition des données . . . . .	78
2.4	Datation (U-Th-Sm)/He . . . . .	79
2.4.1	Principes de datation . . . . .	79
2.4.2	Température de fermeture du système U-Th/He dans les zircons . . . . .	81
2.5	Thermométrie Raman sur matière organique . . . . .	82
<b>3</b>	<b>U-Pb in situ dating (SIMS) of apatites as constrains on the thermal evolution of the Scottish Caledonides</b>	<b>83</b>
3.1	Introduction . . . . .	84
3.2	Geological setting . . . . .	86
3.3	Sampling and analytical technique . . . . .	90
3.4	Results . . . . .	92
3.4.1	Samples from the Naver and Skinsdale nappe . . . . .	94
3.4.2	Samples from the Ben Hope nappe . . . . .	98
3.5	Discussion . . . . .	100
3.5.1	The importance of the common lead correction . . . . .	100
3.5.2	Apatites U/Pb ages across the Caledonian wedge . . . . .	101
3.5.3	Comparison with other thermochronometer . . . . .	103
3.6	Conclusion . . . . .	105
<b>4</b>	<b>Comparaison entre les âges U-Pb sur apatites à la SIMS et par LA-ICPMS</b>	<b>106</b>



4.0.1	Comparaison des âges Tera-Wasserburg et des moyennes pondérées des âges SIMS . . . . .	106
4.0.2	Conclusions . . . . .	112
<b>5</b>	<b>Datation U-Pb sur Zircon</b>	<b>113</b>
5.1	Introduction . . . . .	113
5.2	Résultats . . . . .	114
5.2.1	1- La signature des zircons du socle . . . . .	114
5.2.2	2- La cristallisation des plutons . . . . .	122
5.2.3	3- Les surcroissances dans le chevauchement de Naver .	125
5.3	Discussion . . . . .	128
<b>6</b>	<b>Déformations visible dans le prisme calédonien</b>	<b>133</b>
6.1	Les déformations à l'échelle du prisme . . . . .	133
6.2	Les déformations à l'échelle des zones de cisaillement majeures	134
6.2.1	La zone de cisaillement de Naver . . . . .	135
6.2.2	La zone de cisaillement de Ben Hope . . . . .	135
6.2.3	La zone de déformation du Moine . . . . .	138
<b>7</b>	<b><math>^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}</math> Dating</b>	<b>140</b>
7.1	Introduction . . . . .	140
7.2	Wedge-scale transect . . . . .	141
7.2.1	Chemical compositions of dated micas . . . . .	141
7.2.2	$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Dating Results . . . . .	144
7.3	Age transect across the Ben Hope shear zone . . . . .	152
7.3.1	Chemical composition of dated muscovites in the Ben Hope shear Zone . . . . .	152
7.3.2	Dating results along the Ben Hope shear zone transect	152
7.4	Transect from the Naver shear zone . . . . .	156
7.5	Interpretation of Ar/Ar ages . . . . .	158
7.6	Plateau age definition . . . . .	158
7.6.1	Closure temperature estimates . . . . .	159
7.6.2	Temperature reached in the nappes . . . . .	160
7.7	Could these data be linked to a cooling or recrystallisation event? . . . . .	162

7.7.1	In the Ben Hope shear zone : cooling or deformation ages? . . . . .	162
7.7.2	Across the entire wedge : Passive exhumation or retrograde recrystallisation? . . . . .	164
<b>8</b>	<b>Discussion</b>	<b>167</b>
8.1	Refroidissement à l'échelle du prisme . . . . .	167
8.1.1	Le refroidissement contraint par les données U-Pb sur apatite . . . . .	167
8.1.2	Le refroidissement contraint par les données $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ sur muscovite . . . . .	168
8.2	Les données géochronologiques loin des zones de cisaillement . . . . .	170
8.3	Les données d'âge des zones de cisaillement . . . . .	171
8.4	Chronologie du chemin PT . . . . .	178
8.4.1	L'unité de Naver . . . . .	178
8.4.2	L'unité de Ben Hope . . . . .	180
8.4.3	L'unité du Moine . . . . .	180
8.5	Une réelle phase grampienne dans les Highlands? . . . . .	181
8.6	Bilan des informations géochronologiques disponibles . . . . .	183
8.7	Implication structurales . . . . .	183
8.7.1	Coupe proposée par Soper et Barber (1982) . . . . .	184
8.7.2	Coupe proposée par Butler (2010) . . . . .	184
8.8	Coupes évolutives du prisme . . . . .	186
8.9	Comparaison avec les modèles précédents . . . . .	189
8.10	Conclusions . . . . .	190
<b>9</b>	<b>Bilan</b>	<b>191</b>

# Chapitre 1

## Introduction et contexte géologique

### 1.1 Introduction

Dans les prismes frictionnels, les déformations, essentiellement cassantes sont localisées sur des chevauchements qui portent les différentes unités accrétées. Ces chevauchements se connectent en profondeur à une interface correspondant à un changement de rhéologie appelé niveau de décollement. Ce niveau de décollement est souvent l'interface entre le socle cristallin et la couverture sédimentaire, mais d'autres exemples existent avec des niveaux évaporitiques au sein de la séquence sédimentaire (Alpes, Jura). Dans tous les cas ce niveau représente une discontinuité rhéologique qui permet une localisation des différentes déformations. Ce type de déformation est particulièrement visible dans les prismes superficiels récents comme le prisme de Nankai (Fig. 1.1.1 (Strasser *et al.*, 2009) ou dans les Rocheuses Canadiennes Fig. 1.1.2 (Konstantinovskaya et Malavieille, 2011).

La croûte peut en effet avoir des propriétés localisantes puisque qu'elle ne devient ductile que vers 10-15 km de profondeur (avec une composition quartzo-feldspathique et un gradient thermique raisonnable) (Fig. 1.1.4) Toutefois, dans les modèles, ces prismes crustaux ont des géométries très fortement inspirées des prismes frictionnels plus superficiels. Dans la coupe du Zagros, par exemple (Mouthereau *et al.*, 2007) on retrouve bien un niveau

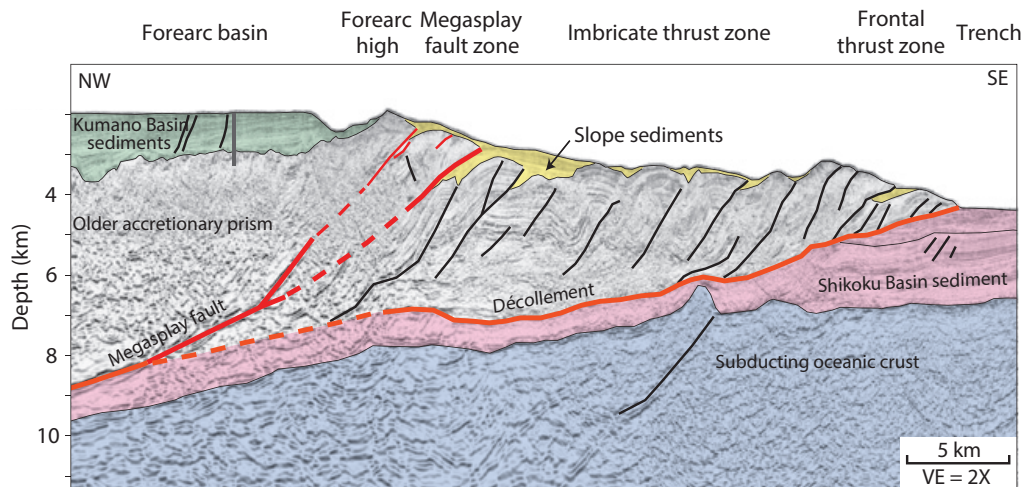


FIGURE 1.1.1 – Profil sismique à travers le prisme de Nankai où le prisme frictionnel présente des déformations localisées et la couverture se déforme au-dessus d'un niveau de décollement (rose) (Strasser *et al.*, 2009)

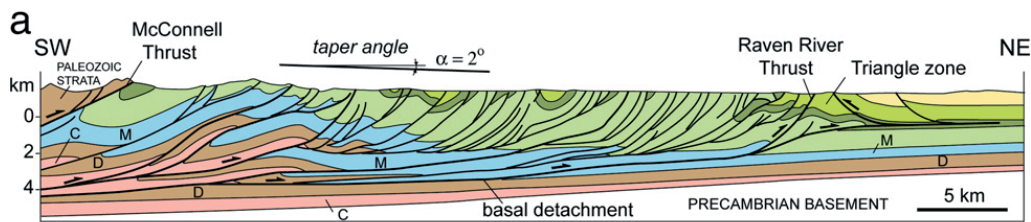


FIGURE 1.1.2 – Coupe équilibrée dans les Rocheuses Canadiennes montrant un niveau de décollement (basal detachment) entre le socle cristallin et la couverture sédimentaire, (Konstantinovskaya et Malavieille, 2011)

de décollement où tous les chevauchements s'enracinent, avec des déformations extrêmement localisées. Ces chevauchements sont dessinés de la même manière dans les parties superficielles et sédimentaires à comportement sûrement frictionnel que plus en profondeur dans le socle, où la prévalence de la résistance frictionnelle sur les mécanismes de déformation visqueux est beaucoup moins sûre.

Cette tectonique, décrite comme "thick-skinned", où le socle est impliqué dans les nappes ne prend pas en compte le caractère ductile des roches en profondeur. Il est donc simpliste de considérer l'accrétion de ces niveaux de la même manière que leurs analogues superficiels, c'est-à-dire en séquence

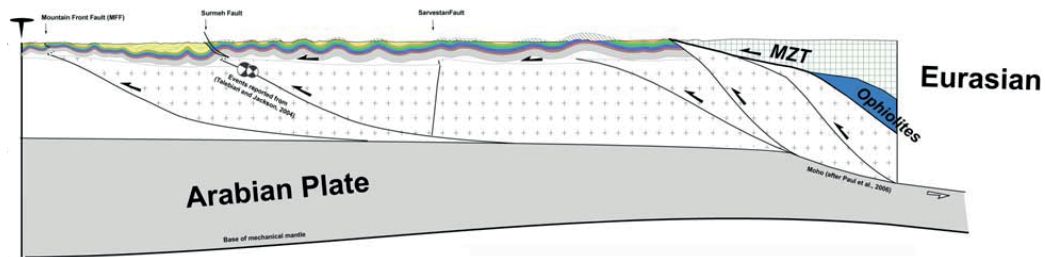


FIGURE 1.1.3 – Coupe dans le Zagros montrant un socle impliqué dans les unités accrétées au prisme (Mouthereau *et al.*, 2007)

et localisés. Sur la figure 1.1.4, sont montrés un exemple de localisation très prononcée de la localisation entre des niveaux de nappes sédimentaires : le chevauchement de Glarus (photo gauche), et des bandes de cisaillement qui sont beaucoup plus diffuses (photo droite) dans le socle du massif cristallin externe du Mont Blanc. Ce contraste de premier ordre doit se répercuter sur la dynamique du prisme. La question de comment les unités s'accrètent en profondeur est importante car, dans la plupart des orogènes, le prisme se construit en grande partie sous la transition cassant-ductile, à une trentaine de km de profondeur.



FIGURE 1.1.4 – Photos illustrant la différence de localisation de la déformation entre le chevauchement de Glarus extrêmement localisé et les bandes de cisaillement dans le massif du Mont Blanc

Dans les Alpes par exemple, où une partie du prisme implique des portions de croûte, les unités passent par plusieurs étapes dans leur histoire thermique. Dans un premier temps, ces unités sont enfouies, et peu de données de déformation sont disponibles pour cette étape (Boutoux *et al.*, 2016). Puis à

haute température, les déformations ductiles se produisent. Ces déformations sont exprimées par des grandes bandes de cisaillement, qui accommodent une grande quantité de la déformation. Il est remarquable que les structures héritées de la marge Européenne comme les failles normales ne sont que peu réactivées et ne constituent donc pas une zone préférentielle de localisation de la déformation. C'est pendant un pic de température relativement long, entre 10 et 20 Ma que les déformations distribuées se produisent (Fig. 1.1.5 courbe bleue, Boutoux *et al.* (2016)). Les unités sont ensuite exhumées par des déformations plus localisantes en avant dans le prisme (Boutoux *et al.*, 2016).

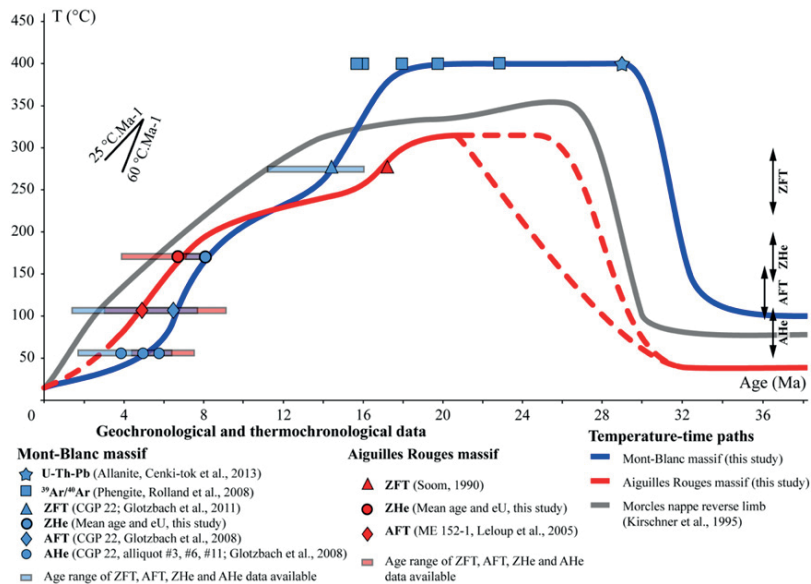


FIGURE 1.1.5 – Chemin température temps (T-t) de différentes unités dans les Alpes (Mont Blanc, bleu) (Boutoux *et al.*, 2016)

Pour faire un modèle de prisme complet, il faut donc aussi prendre en compte cette déformation distribuée et a priori précoce ayant lieu au sein des nappes, et préservée entre les contacts majeurs tardifs. Enfin, il faut comprendre comment la part cassante et superficielle est influencée, guidée, contrôlée, par cette part distribuée de la déformation, pour avoir une vision complète à l'échelle de la croûte, des prismes collisionnels. Dans le manuscrit qui suit il sera fait de façon aussi systématique que possible une nuance entre

chevauchements (*i.e* une déformation localisée) et zones de cisaillements (*i.e* des déformations ductiles), les premiers pouvant se superposer aux secondes.

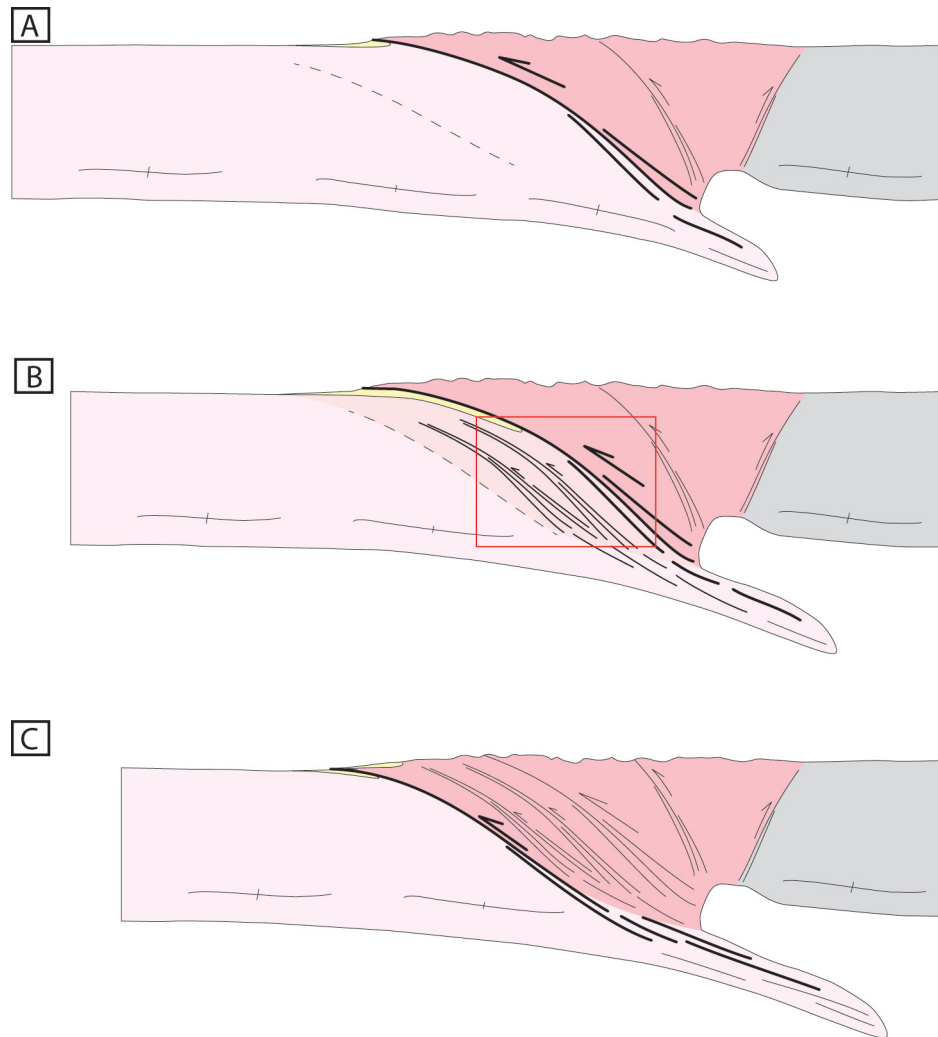


FIGURE 1.1.6 – Modèle de déformation dans les parties ductiles d'un prisme orogénique. A) début de l'enfouissement B) Déformations distribuées sous le chevauchement principal C) Accrétion de l'unité au prisme par localisation de la déformation HDR, Bellahsen 2015.

Pour documenter cette dynamique d'échelle crustale il est nécessaire de se tourner vers des prismes anciens ayant été construits en partie sous 30 km de profondeur et maintenant à l'affleurement. Le prisme des Calédonides d'Écosse est un bon candidat pour le faire. Le nord des Highlands en Écosse

correspond à un rétro-prisme d'une zone de collision beaucoup plus grande qui s'étend des Appalaches au Nord de la Scandinavie, et met en jeu deux cratons, Baltica et Laurentia et plusieurs micro-continent, tels qu'Avalonia.

L'essentiel des déformations qui structurent ce rétro-prisme ont eu lieu dans le faciès amphibolitique, c'est-à-dire sous la transition cassant-ductile. Par ailleurs, les différentes unités constituant le prisme sont composées d'une couverture sédimentaire monotone et d'un socle de composition peu différente (des quartzites *vs* des granites). Ce socle est impliqué dans la construction du prisme puisqu'il est impliqué dans au moins deux nappes. Le prisme des Highlands est donc particulièrement dépourvu de contrastes rhéologiques hérités ce qui en fait, a priori, un cas d'étude simple. De plus, de part sa position de rétro-prisme, on peut supposer que l'influence thermique de la subduction soit inexistante et que l'empreinte thermique visible actuellement ne résulte que des phases de collision et que les isothermes étaient pratiquement horizontales au début de l'histoire collisionnelle. Il est donc possible d'étudier l'évolution thermique de ces unités sans se soucier d'un éventuel héritage de la convergence pré-collisionnelle. De nombreuses expéditions de la British Geological Society ont été réalisées depuis plus de 100 ans dans les Highlands, ce qui en fait un des endroits les mieux cartographiés du monde. C'est aussi là que Peach et Horne ont cartographié de 1880 à 1900 puis décrit en 1907 le Moine Thrust (Law *et al.*) peu de temps après Marcel Bertrand (1884, (Trumpy et Lemoine, 1998)) interprète le Glarus comme un chevauchement dans les Alpes.

Pour pouvoir étudier ces niveaux crustaux il est nécessaire d'acquérir des données de chronologie aux températures où le prisme s'est construit soit probablement vers 500°C. Ces températures sont situées entre les températures classiques de la thermochronologie comme les datations hélium sur zircon ou apatite, et les données de la géochronologie comme l'U-Pb sur zircon ou monazite (Hodges, 2014). Le système U-Pb dans les apatites correspond à une température de fermeture proche de 400-450°C (Cherniak *et al.*, 1991) qui est donc adéquate pour étudier ces conditions de température. De plus, il est absolument nécessaire de construire une séquence des déformations qui ont lieu. Pour cela, des datations  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  sur des minéraux syn-cinématiques



sont proposées pour tenter de comprendre quand la localisation de la déformation se produit. Pour cela des profils d'âge à différentes échelles sont nécessaires. Un profil à l'échelle du prisme pour comprendre au premier ordre le refroidissement des unités les unes par rapport aux autres ; et des profils à plus haute résolution à travers les zones de cisaillement ductiles principales.

Au cours de cette thèse ont donc été effectués :

- des datations U-Pb sur apatites et zircon à la SIMS au CRPG de Nancy. J'ai pour cela passé 8 semaines sur place et travaillé avec Etienne Deloule et Johann Villeneuve.
- des datations U-Pb sur apatites à LA-ICPMS à Trinity College, en collaboration avec D. Chew, pendant un séjour de 2 jours en février 2018
- des datations  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  sur micas blancs et biotites ( $\sim 30$  échantillons) en dégazage progressif à l'ISTO avec Stéphane Scaillet.
- de la thermométrie RAMAN sur des particules organiques dans les unités de couverture (5 sur  $\sim 30$  lames testées) sur le spectromètre de l'IMPMC après une formation de O. Beyssac.
- la préparation d'échantillon pour des datations hélium sur zircon. Deux méthodes de datations étaient envisagés et 6 échantillons en méthode conventionnelle ont été préparés, ainsi que 12 échantillons en méthode non-conventionnelle. Des retards d'analyse n'ont pas permis d'intégrer ces résultats au présent manuscrit.

## Organisation du manuscrit

Ce manuscrit est organisé en huit chapitres. Le premier chapitre est consacrée à une étude bibliographique ayant pour but de poser le contexte de ce travail de thèse et de présenter les connaissances actuelles concernant le prisme calédonien. Le deuxième chapitre est un rappel des méthodes utilisées dans ce travail. La suite du manuscrit est organisé autour de deux axes : les datations U-Pb et les datations  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ . Le premier axe concerne les datations U-Pb et est composé d'un article soumis à Chemical Geology sur les datations U-Pb des apatites à la SIMS (Chap. 3). Le quatrième chapitre cor-

respond à une comparaison entre les méthodes SIMS et LA-ICPMS. Enfin, une section présente les datations U-Pb sur zircon. La deuxième partie présente les datations  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  et leur relation aux déformations visibles sur le terrain, avec un chapitre concernant les types de déformations visibles dans le prisme (Chap. 6) et un chapitre avec le résultats des datations (Chap. 7). Enfin, une discussion de l'ensemble des résultats est proposé dans le huitième chapitre.

## 1.2 Géodynamique, structure et stratigraphie

### 1.2.1 La séquence orogénique dans les Calédonides Nord Atlantique

Les Calédonides sont actuellement localisées de part et d'autre de l'Océan Atlantique : des Appalaches nord-américaines, au Groenland et jusqu'aux Calédonides scandinaves et écossaises.

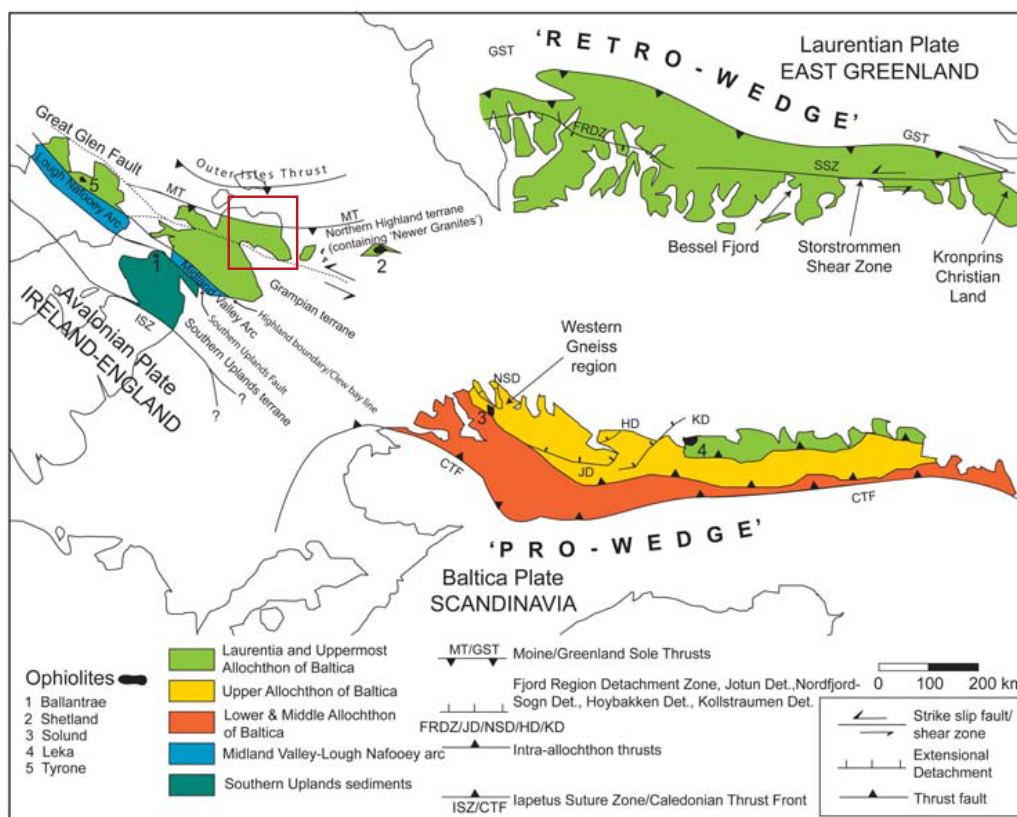


FIGURE 1.2.1 – Carte de localisation des Calédonides, montrant les différentes portions du prisme en Ecosse, Scandinavie et au Groenland. Le cadre rouge indique la zone d'étude, appartenant au rétro-prisme (unité verte). (Streule *et al.* (2010))

Cet orogène résulte de plusieurs événements paléozoïques associés à la fermeture de l'océan Iapétus et à la collision entre trois blocs continentaux : Laurentia, Baltica et Avalonia (Roberts (2003); Corfu *et al.* (2014); Strachan

*et al.* (2010), Fig. 1.2.2). Cette histoire polyphasée a abouti en Scandinavie à la superposition de différentes unités à vergence SE sur le socle assemblé au protérozoïque (Fig. 1.2.1). Ces unités sont nommées unités allochtones inférieure, moyenne, supérieure et sommitale (Fig. 1.2.1). Les roches des unités allochtones inférieure et moyenne sont des séries détritiques continentales issues de la marge de Baltica. Les terrains de l'unité allochtone supérieure sont d'affinité océanique (ophiolite, arc magmatique, bassins marginaux). L'allochtone sommital est lui composé de terrains d'affinité laurentienne (ophiolite et séries sédimentaires). Ces quatre unités charriées sur le socle de Baltica sont donc d'affinité de plus en plus distales en montant dans la séquence de nappes. L'édification de cette pile de nappe est décomposé en 5 événements tectono-thermiques. Ces événements sont liés à la fermeture de l'océan Iapétus ouvert au Cambrien.

L'événement **Finnmarkien** (Fig. 1.2.3a) est le premier événement associé à la construction des Calédonides en Scandinavie. Il est daté entre 520 Ma et 500 Ma, et visible seulement dans certaines nappes. Le pic de métamorphisme pendant cette période atteint le faciès éclogitique vers 505 Ma (Mork *et al.* (1988), Dallmeyer *et al.* (1991)). Cet événement résulte de la collision entre la marge Baltica et un arc magmatique (Dallmeyer et Gee, 1986), associé à une subduction dirigée vers l'océan Iapétus. La disparition de l'empreinte de cet événement au sud de la marge de Baltica est due à la terminaison de la subduction, peut-être localement tronquée par une faille transformante (Roberts, 2003). Le Finnmarkien marque donc le début d'une phase de la fermeture de l'Océan Iapétus (notamment la mer Ægir, entre Baltica et Sibéria). Cependant, le concept de l'événement Finnmarkien a depuis été fortement reconsidéré comme un événement mineur dans le nord de la Scandinavie. Dans tous les cas, son influence dans le sud de la Scandinavie est très probablement infime ou inexistante. (Kirkland *et al.*, 2009, 2008; Corfu *et al.*, 2011)

L'événement suivant dit "**Trondheim**" (Fig. 1.2.3b) consiste en une longue phase de déformation, et de métamorphisme au faciès schistes bleus. Ces déformations incluent principalement l'obduction de l'ophiolite sur un micro-continent détaché de Baltica. Les évidences géochronologiques pour cet événement sont des zircons dans les ophiolites datées à 493-482 Ma (Ro-

berts *et al.*, 2002). La subduction est toujours supposée être dirigée vers Laurentia.

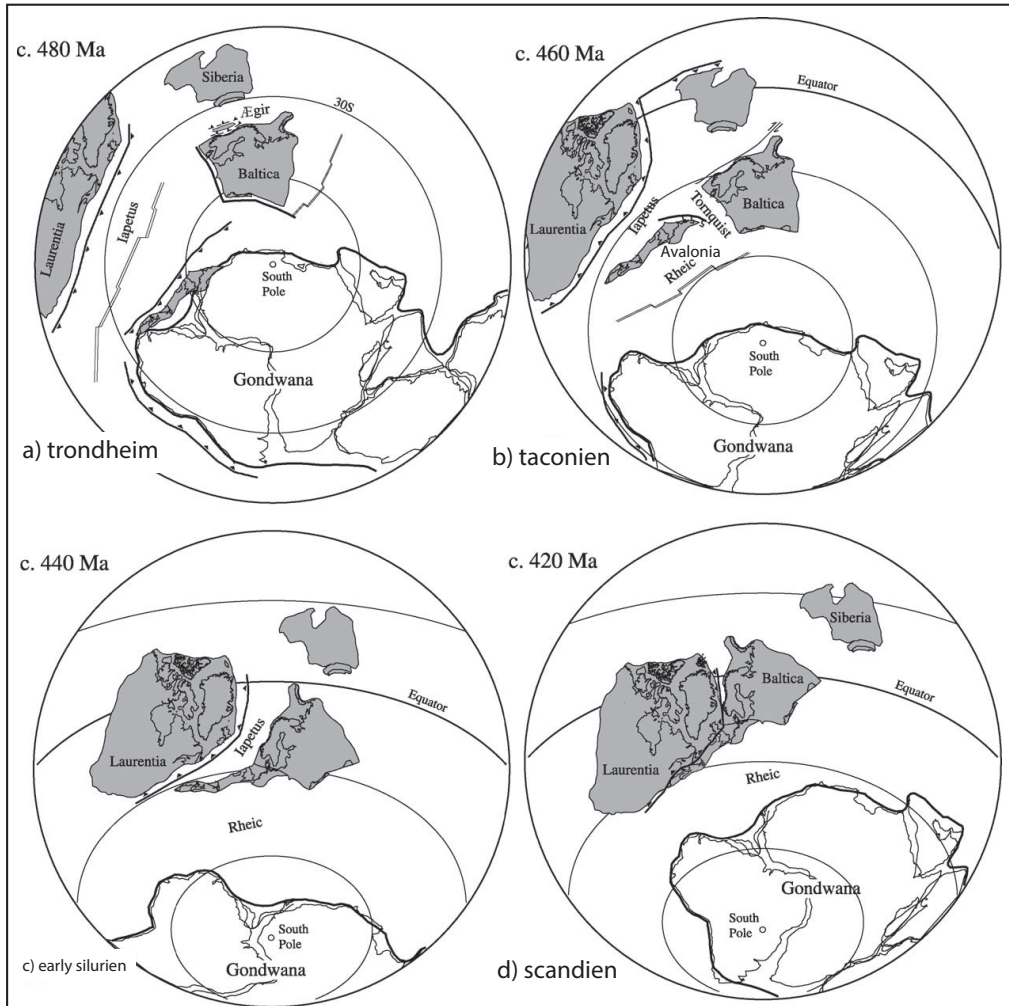


FIGURE 1.2.2 – Reconstruction paléogéographique de l’Ordovicien au Silurien montrant les interactions entre les trois blocs Laurentia, Baltica et Avalonia pendant l’évolution Calédonienne (d’après Roberts (2003)) a) pendant l’événement Trondheim (480-475 Ma). b) pendant le pic de métamorphisme de l’événement taconien le long de la marge Laurentienne. c) lors de la fermeture de la mer de Tornquist où Avalonia s’est accrété à Baltica. d) Lors de la collision scandienne continent-continent entre Laurentia et Baltica.

L’événement **taconique** (Fig. 1.2.3c) est considéré comme majeur dans l’évolution des Calédonides. Cet événement, de l’Ordovicien moyen à supé-

rieur, présente des indices dans l'allochtone supérieur (UA), dans la nappe de Kõli et sur l'île de Smøla. Les séries sédimentaires y sont déformées et faiblement métamorphisées avant l'intrusion des plutons d'âge Ordovicien supérieur à début Silurien. L'accrétion de ces terrains sur la marge Laurentienne se produit entre 470 Ma et 450 Ma (Dunning et Furnes, 1991). Une phase de fusion partielle pendant l'Ordovicien inférieur et moyen est aussi documentée par (Yoshinobu *et al.*, 2002). Par ailleurs, les plis et chevauchements associés à cet événement sont de vergence NW, ce qui est analogue avec les déformations taconiennes dans les Appalaches de l'Amérique du Nord. De plus, des plis à vergence SE, et des chevauchements mineurs clairement associés à l'événement Scandien suivant reprennent ces déformations précoces taconiennes. C'est sur cet argument de chronologie relative qu'est basé le scénario selon lequel ces terrains se seraient ensuite détachés de la marge et transportés au sommet de la pile de la nappe. Dans un contexte global Calédonien cet événement taconien est associé au grampien au Nord de l'Écosse et de l'Irlande (Soper *et al.*, 1999).

L'événement **scandien** (Fig. 1.2.3d) est l'événement principal métamorphique et tectonique dans les Calédonides, et correspond à l'épisode collisionnel au sens strict. La collision entre Baltica et Laurentia est relativement diachrone à l'échelle de l'orogène puisque le mouvement est oblique entre ces deux blocs. Cet événement implique une subduction sous Laurentia, terminée par une subduction continentale de la marge de Baltica sous celle de Laurentia entre la fin du Silurien et le début du Dévonien (Roberts, 2003). Cet épisode scandien constitue l'étape de structuration de l'édifice de nappes à proprement parler, et se surimprime aux épisodes Finnmarkien, Trondheim et Taconien. Le paroxysme de la collision est atteint à 430 Ma avec l'implication des roches de haute pression (éclogites de Bergen) de l'allochtone médian (nappe de Jotun) dans le prisme orogénique, puis à 410-400 Ma la phase de subduction continentale (éclogites de Ultra-Haute Pression des Gneiss de l'Ouest) enregistrée par l'autochtone (Labrousse *et al.*, 2010). Cette phase est immédiatement suivie de l'effondrement gravitaire de la chaîne (Andersen, 1992) et la divergence oblique de Laurentia et Baltica (Fossen, 2010), marquées par la reprise en détachements des grands chevauchements de l'édifice de nappes (Fossen, 2010) la localisation des mouvements décrochants le

long de grandes zones de cisaillement verticales (la zone de cisaillement de More-Trondelag et le faille de Great Glenn, par exemple) et la subsidence des différents bassins des vieux grès rouges.

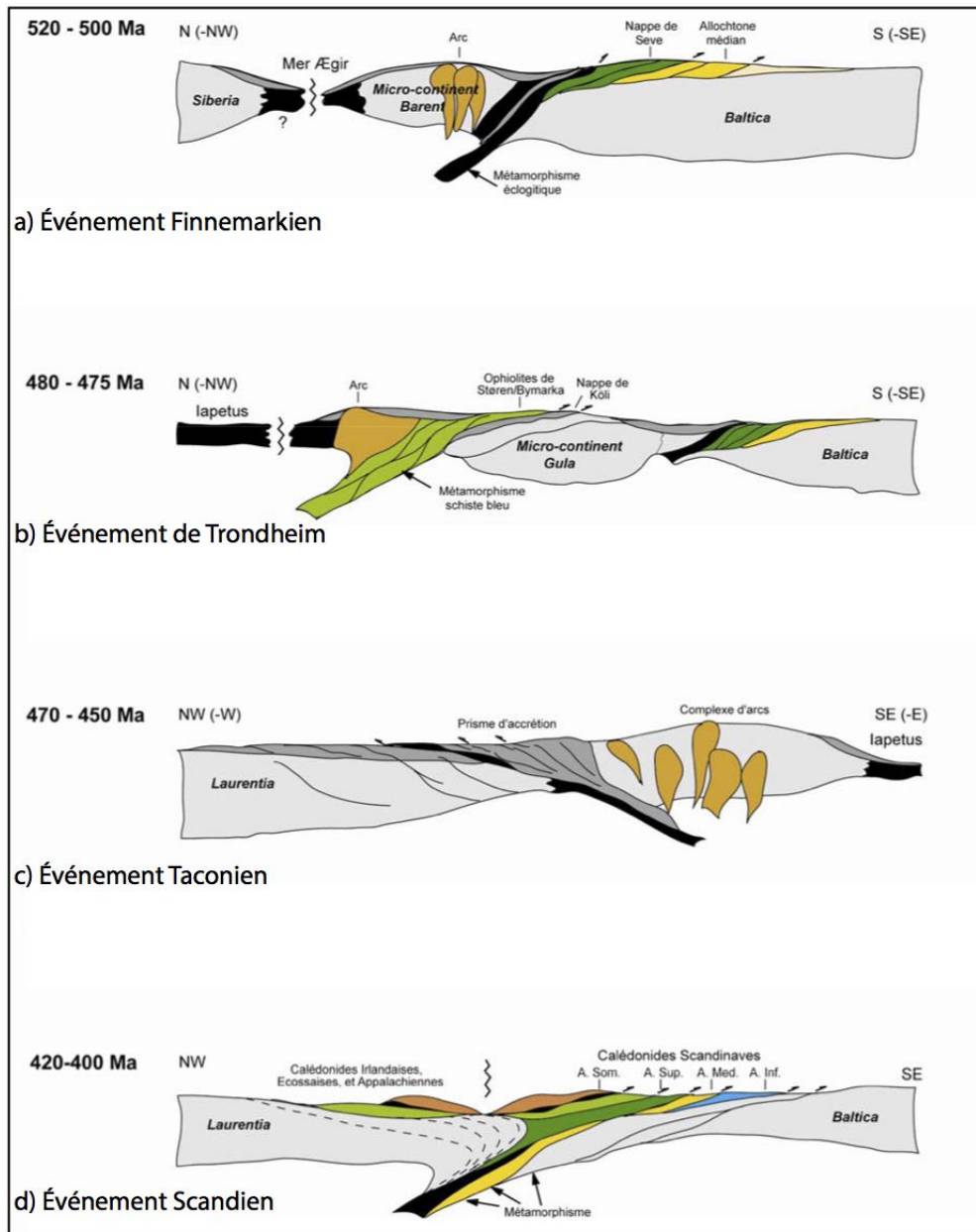


FIGURE 1.2.3 – Reconstitution des différents événements de la construction des Calédonides : a) Événement Finnemarkien, b) Événement Trondheim, c) Événement Taconien, d) Événement Scandien (d'après Schneider2004)

La séquence des différents événements tectono-métamorphiques majeurs est donc composée d'abord de trois événements impliquant des collisions entre un arc et la marge continentale du Cambrien à l'Ordovicien moyen (Fig. ??a, b, c) suivis par la phase majeure de déformation scandinave liée à la collision continent-continent oblique entre Baltica et Laurentia (Fig. 1.2.3d). C'est cet événement qui est à l'origine de la mise en place des nappes allochtones. Enfin, une phase de transtension sénestre accompagne le démantèlement de la chaîne. L'ensemble de ces déformations se produit entre 520 Ma et 390 Ma. Le calendrier de l'orogène Calédonienne Est-Groenlandaise ne cadre pas exactement avec ce calendrier classiquement admis, une phase de subduction continentale carbonifère (360 à 342 Ma) y étant enregistrée par des éclogites de UHP (Gilotti *et al.*, 2004).

## 1.2.2 La place de l'Ecosse dans l'orogène Calédonien

### Les différentes unités du prisme

La portion écossaise du prisme calédonien est localisée dans le rétro-prisme et correspond aux unités allochtones sommitales scandinaves (Fig. 1.2.1 et Fig. 1.2.4). On y retrouve deux épisodes de convergence dans cette portion du prisme : les déformations associées à la convergence entre Avalonia et Baltica (Fig. 1.2.2c) et celles associées à la collision continent-continent avec Laurentia (Fig. 1.2.2d). Dans cette région on ne retrouve pas d'unité d'affinité océanique comme c'est le cas en Scandinavie et au Groenland, mais un ensemble de nappes qui chevauchent le socle d'origine archéenne. La vergence des chevauchements est NW et donc opposée à celle en Scandinavie, d'où son interprétation en rétro-prisme

Le prisme écossais est composé d'une pile de nappes séparées par des zones mylonitiques qui juxtaposent des unités de nature et de degrés métamorphiques différents. Les chevauchements majeurs qui bordent les unités sont le Moine Thrust, le Ben Hope Thrust, le Naver Thrust, le Skinsdale Thrust et le Sgurr Beag Thrust (Fig. 1.2.4). L'ensemble de ces chevauchements montre une vergence vers le WNW à NNW (Barr *et al.*, 1986). L'empilement structural est ci-dessous décrit de bas en haut.



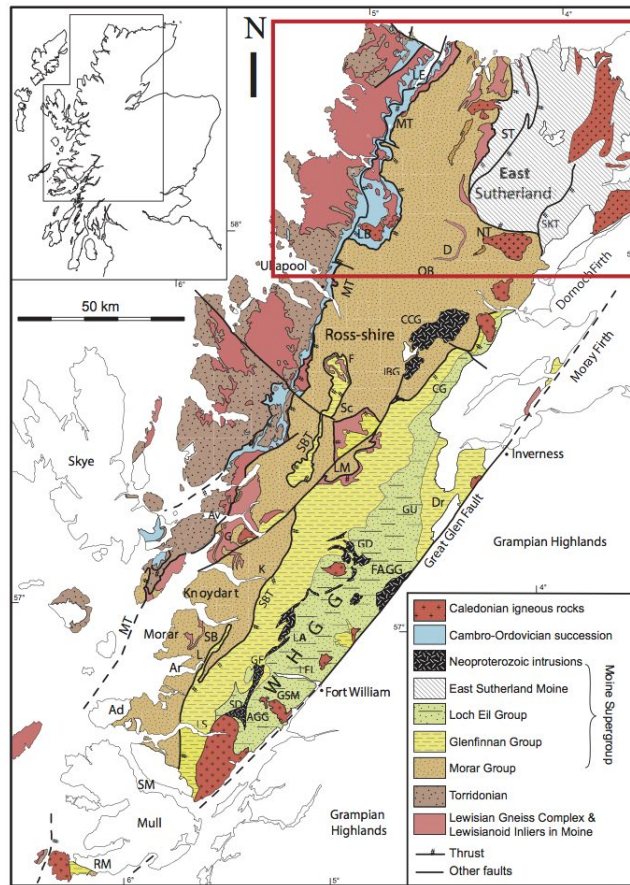


FIGURE 1.2.4 – Carte géologique des différentes unités du prisme écossais. Le cadre rouge montre la localisation de la figure 1.2.5 et de la zone d'étude MT : Moine Thrust, NT : Naver Thrust, ST : Swordly Thrust, SKT : Skinsdale Thrust, SGT : Sgurr Beag Thrust (Dewey *et al.*, 2015)

**L'autochtone Lewisien** L'autochtone est exposé à l'ouest de la chaîne (Strachan et Holdsworth, 1988). Il est composé d'un socle Lewisien (Lewisian Gneiss Complex, LGC) Archéen à Paléoprotérozoïque ainsi que d'une couverture sédimentaire Néoprotérozoïque (le groupe de Torridon (composé des sous-groupes de Stoer, Sleat et Torridon) (Goodenough *et al.*, 2011)) et d'une séquence Cambro-Ordovicienne discordante. Le socle LGC est typiquement défini comme étant composé de gneiss quartzofeldspathiques et de gneiss amphibolitiques à hornblende (Strachan et Holdsworth, 1988). Ces gneiss sont intrudés par de nombreux sills et dykes mafiques de direction NW-SE.

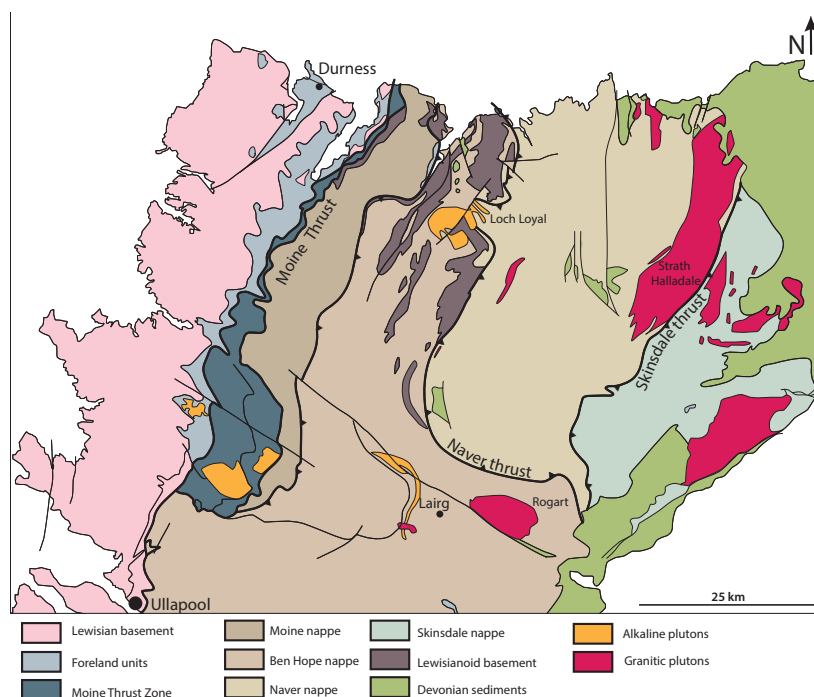


FIGURE 1.2.5 – Carte géologique des Highlands, montrant les différentes unités composant le prisme ainsi que les principaux chevauchement (Thigpen *et al.*, 2013)

La zone de cisaillement du Moine (**Moine Thrust Zone**, MTZ, sensu lato) est le chevauchement frontal calédonien du rétro-prisme écossais. Cette zone est caractérisée par des déformations essentiellement cassantes. Au sein de cette zone on retrouve les sédiments de la couverture autochtone et du socle Lewisien imbriqués et plissés dans une complexe séquence de chevauchements (Butler, 2010). La zone la plus large se situe à Assynt où de nombreux chevauchements sont imbriqués. Le chevauchement basal (Sole Thrust) est le plus jeune (Goodenough *et al.*, 2011). La partie la plus haute structurellement est le Moine Thrust, qui est le premier chevauchement à l'ouest à présenter des modes de déformation distribuées (mylonites, issues des sédiments autochtone et des sédiment du groupe du Moine). Les mylonites du Moine sont un trait caractéristique de ce chevauchement ductile épais. Ces mylonites sont principalement dérivées de protolithes quartzo-feldspathiques. Les minéraux sont très fortement déformés et les micas ont subi de multiples re-

cristallisations (Freeman *et al.*, 1998). La formation de ces mylonites semble se produire à une quinzaine de kilomètres de profondeur (Kelley et Powell, 1985). Ces mylonites avec un chevauchement basal sont interprétées comme résultant de la localisation progressive du chevauchement du Moine au cours du temps (Freeman *et al.*, 1998). Localement, la localisation de la déformation aboutie à la formation d'une faille à la base de ces mylonites du Moine (à Knockan notamment).

**La nappe du Moine** est délimitée à l'ouest par le chevauchement du Moine et à l'est par le chevauchement de Ben Hope (Fig.1.2.4). Elle est composée essentiellement de séries sédimentaires psammitiques et semi-pélitiques du groupe de Morar (appartenant au supergroupe du Moine, Fig. 1.2.5). On retrouve juste au-dessus du chevauchement du Moine localement des affleurements de socle d'affinité lewisienne (Fig. 1.2.4). L'analogie entre les gneiss de l'autochtone (LGC) et les portions de socle dans les nappes calédoniennes est établie sur la base d'une minéralogie similaire et de faciès métamorphiques semblables (Watson *et al.*, 1975). On retrouve aussi une fine portion de socle à l'est juste sous le Ben Hope.

**La nappe de Ben Hope** est structurellement au-dessus et à l'est de la nappe du Moine. Dans l'axe N-S, elle s'étend de la côte nord jusqu'à l'est de la culmination d'Assynt (Fig.1.2.5). Le chevauchement de Ben Hope superpose la pile de métasédiments du groupe de Morar et son socle impliqués dans des grands plis sur les roches du groupe de Morar de la nappe du Moine. Il est supposé que le chevauchement de Ben Hope se termine au sud en rejoignant le chevauchement du Moine (Leslie *et al.*, 2010).

**La nappe de Naver** est structurellement au-dessus de celle de Ben Hope. Le chevauchement de Naver superpose les roches migmatitiques de la nappe (Loch Coire Migmatite Complex) sur les roches non migmatitiques du Moine de la nappe de Ben Hope (Barr *et al.* (1986), Fig. 1.2.4 et Fig. 1.2.5).

Le chevauchement basal de la **nappe de Skinsdale** limite à l'est l'étendue de la formation du Loch Coire Migmatite Complex. Le chevauchement à sa base est cinématiquement analogue aux chevauchement de Naver puisqu'il présente une vergence NW et qu'il affecte la même unité de migmatites. De plus, la nappe présente un équivalent des méta-sédiments du Moine : la succession Scarben : une succession de psammites, pélites et semi-pélites

principalement non-migmatitiques. On retrouve cependant quelques indices de fusion localement et quelques leucogranites (Kocks *et al.*, 2006).

La nappe de **Sgurr Beag** est essentiellement visible au sud des Highlands. Deux possibilités sont évoquées pour relier son chevauchement à ceux du Nord. Une première hypothèse est de le rapprocher du chevauchement de Naver puisque les deux portent une unité migmatitique dans leur toit (Soper et Barber, 1982) et dont les nappes ont une lithologie similaire. Cependant, cette corrélation est à considérer avec prudence car ces migmatites ne sont pas totalement identiques, puisque la fusion partielle n'est localisée que dans les portions pélitiques dans la nappe de Sgurr Beag alors qu'elle est observée dans toutes les lithologies des métasédiments du Loch Coire (nappe de Naver). De plus, la migmatisation, aurait eu lieu à l'Ordovicien dans la nappe de Naver (Kinny *et al.*, 1999a) alors qu'elle serait Knordarienne (ie anté-Calédonienne) dans l'unité de Sgurr Beag (Hysop, 1992). Plus récemment, des arguments de textures des grenats (motifs d'inclusions notamment) rapprochent malgré tout ces deux unités qui auraient subi une recristallisation dans des conditions PT similaires Ashley *et al.* (2017). Une deuxième hypothèse serait de relier le chevauchement de Sgurr Beag au chevauchement de Skinsdale notamment sur la base d'arguments géochronologiques : des monazites, zircons et grenats (Bird, 2011; Cutts *et al.*, 2010; Rogers *et al.*, 1998; Kocks *et al.*, 2006) d'âges néoproterozoïques sont identifiés dans ces deux nappes.

Sur le terrain, l'identification précise de la localisation des chevauchements est délicate. La localisation de la déformation dans certaines zones comme la MTZ ou d'une autre manière dans les mylonites du Moine est avérée. Par contre, la localisation précise du chevauchement du Ben Hope est un peu plus délicate. Le chevauchement de Naver est plus facile à identifier puisqu'il met en contact une unité migmatitique sur une qui ne l'est pas, mais même à cet endroit de multiples petits chevauchements sont cartographiés (Torrisdale, Swordly), qui témoignent d'une localisation complexe de la déformation. De plus, l'essentiel de ces déformations sont ductiles ce qui suggère plutôt une nomenclature de zone de cisaillement plutôt qu'en chevauchement. Les conditions métamorphiques étant principalement continues et sans réel saut entre les différentes nappes cet argument rend aussi difficile l'identification

des nappes (sauf celle de Naver). D'ailleurs, dans de nombreuses études, tous les chevauchements ne sont pas explicitement cartés (le Ben Hope notamment). De plus, certains chevauchements cartés par le passé, comme celui de Kirtomy (Kinny *et al.*, 1999a; Dallmeyer *et al.*, 2001) n'apparaissent plus dans les articles plus récents (Thigpen *et al.*, 2013; Ashley *et al.*, 2015). La définition et la catégorisation des différentes nappes se fait donc plutôt sur la définition d'unités lithotectoniques que sur les conditions métamorphiques différentes ou sur des discontinuités tectoniques. On retrouve alors une unité du Moine qui ne présente quasiment que des sédiments du Moine, chevauchée par l'unité de Ben Hope qui présente des sédiments du Moine et des portions de socle impliqués dans les déformations. Enfin, l'unité de Naver est la seule à montrer des évidences de fusion partielle. Les différentes unités sont donc délimitées par des zones de cisaillement localisant la déformation à leur base. Ces zones de déformations sont ensuite interprétées comme un chevauchement à l'échelle du prisme.

### **Le Supergroupe du Moine**

Les roches paradérivées du supergroupe du Moine s'étendent du chevauchement du Moine à la côte Est écossaise et sont limités au sud par la faille de Great Glen. Ils représentent la couverture composée initialement de psammites, pélites et semi-pélites, des nappes du Moine, de Ben Hope et Sgurr Beag. (Groupe de Morar dans les nappes du Moine et de Ben Hope, et groupe Glenfinnan et de Loch Eil pour la nappe supérieure de Sgurr Beag, Fig. 1.2.6). Les roches de l'unité de Naver sont considérées comme analogues aux sédiments du Moine (Kinny *et al.*, 2003) (Fig. 1.2.6)

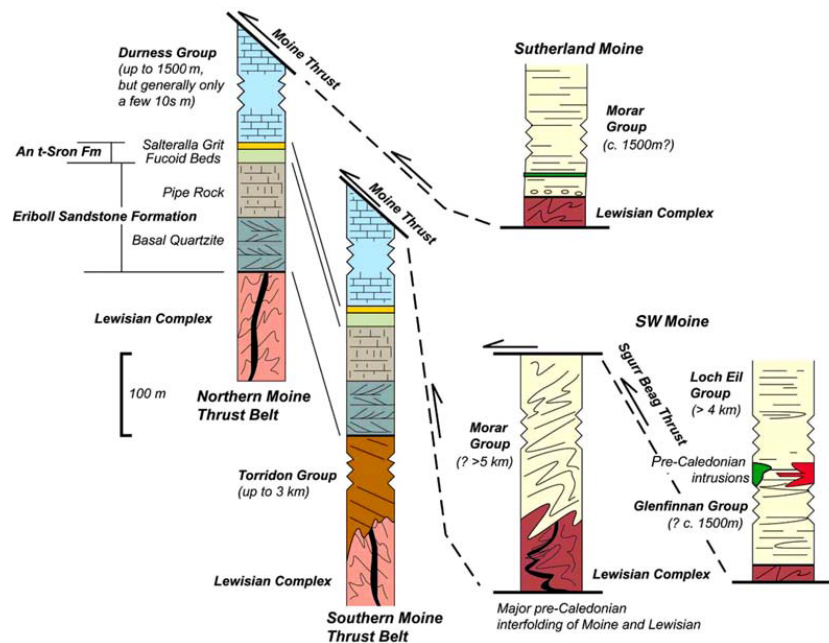


FIGURE 1.2.6 – Synthèse tectonostratigraphique dans les Highlands. Les deux premières colonnes montrent la séquence sédimentaire juste au dessus du chevauchement du Moine, les trois suivantes montrent la séquence dans les parties plus internes de la chaîne (Butler, 2010)

La stratigraphie et la nature des séries sédimentaires du Moine ont longtemps été discutées. En effet, l'absence quasi-totale de fossiles, la recristallisation intensive pendant le métamorphisme ainsi que l'intense déformation ductile pendant l'empilement des nappes rend complexe l'analyse et l'identification des structures sédimentaires originelles. Cependant, Strachan (1986), sur la base d'arguments des structures sédimentaires (stratifications obliques et entrecroisées) a déterminé que les sédiments du groupe du Loch Eil se sont déposés dans un environnement marin peu profond à tidal. Par la suite, les sédiments du groupe de Glenfinnan ont été identifiés comme caractéristiques d'un environnement marin plus profond (Strachan et Holdsworth, 1988). Les sédiments du groupe de Morar, eux, ont été interprétés comme plutôt représentatifs d'un environnement continental, la base de ce groupe étant dominé par des structures en tresse typiques d'un environnement alluvial (séquences "thinning-upward", stratification oblique dans des chenaux métriques, et des sens de courants unidirectionnels vers l'est). L'ensemble de la séquence du

Moine est donc représentative d'une séquence transgressive, avec à sa base une dominante de sédiments fluviatiles (Krabbendam *et al.*, 2008).

La provenance et l'origine des éléments clastiques est révélée par l'analyse des zircons détritiques (Fig. 1.2.7). Au sein du supergroupe du Moine, les plus jeunes zircons détritiques trouvés sont datés de  $\sim 1$  Ga (Friend *et al.*, 2003). Par ailleurs, les plutons les plus vieux qui intrudent cette séquence (West Highlands Granitic Gneiss, WHGG) sont datés de 870 Ma (Rogers *et al.*, 2001). Les sédiments du Moine se sont donc déposés entre 950 Ma et 870 Ma. De plus, ces sédiments se sont déposés dans un ou des bassins post-grenvillien dont les sources sont principalement paléoProtérozoïque à méso-Protérozoïque (entre 1,8 Ga et 1 Ga Friend *et al.* (2003)). Dans le détail, les sédiments du groupe de Morar (nappes du Moine et Ben Hope) ont une signature paléoprotérozoïque de 1 Ga à 1,8 Ga avec quelques grains archéens (Friend *et al.*, 2003).

Les signatures des nappes de Naver et du Moine sont donc assez similaires, avec des âges essentiellement plus jeunes que 1900 Ma, ce qui implique sans doute une origine commune (Friend *et al.*, 2003). Les deux nappes ont des distributions avec des pics d'occurrence vers 1400 Ma et 1600 Ma, mais quelques grains archéens sont aussi identifiés. Cela suppose que ces nappes sont composées du même paquet sédimentaire qui ne montre pas de contribution archéenne, donc qui ne dérive pas du socle Lewisien. La source des zircons datés à 1400 Ma et 1600 Ma est difficile à déterminer mais semble suggérer l'érosion de la province du Labrador, dans le craton Laurentien (Friend *et al.*, 2003). On retrouve aussi un des indices ténus de provenances grenvilliennes dans les nappes (vers 1,1 ou 1,0 Ga). Dans la nappe de Sgurr Beag à l'inverse, aucun âge plus vieux que 1900 Ma n'est présent et les pics d'occurrences maximales sont vers 1100 Ma et 1400 Ma (Friend *et al.*, 2003). Les sédiments de cette nappe sont donc d'origine différente de ceux de Naver et du Moine. Les produits d'érosion du Grenville sont plus représentés dans les sédiments de la nappe la plus haute (Cawood *et al.*, 2004). Ceci signe une évolution du drainage dans un même bassin au cours du temps si les sédiments de Sgurr Beag sont plus jeunes que ceux des nappes inférieures, ou des bassins sédimentaires de même âge et drainant des portions de socle différentes.

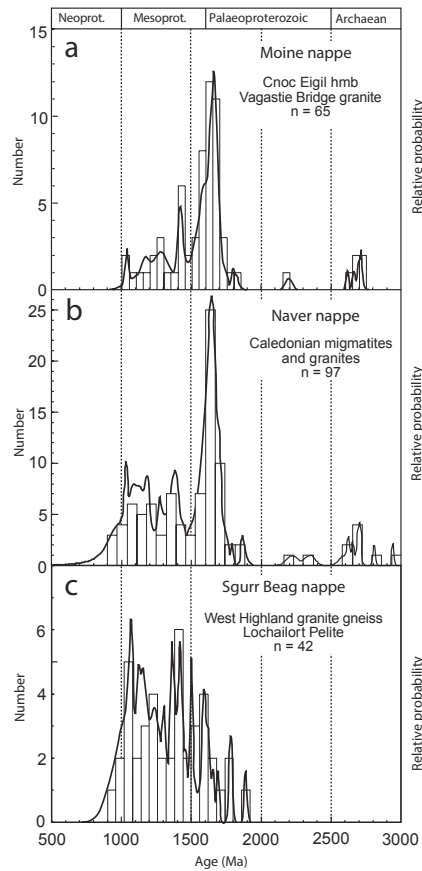


FIGURE 1.2.7 – Signature géochronologique des zircons détritiques et hérités de a) la nappe du Moine, b) la nappe de Naver et c) la nappe de Sgurr Beag (Friend *et al.*, 2003)

### Les Vieux Grès Rouges : formation post-orogénique ?

Les sédiments discordants post-orogéniques actuellement préservés principalement à l'est du granite de Strath Halladale (Fig. 1.2.5) font partie de la formation des vieux grès rouges (Old Red Sandstone, ORSS). La séquence, déposée en discordance sur les sédiments du Moine métamorphisés est elle-même divisée en trois groupes délimités par des discordances internes (Coward *et al.*, 1989). Dans la plupart des cas en Ecosse, les ORSS ne sont pas déformés et la séquence stratigraphique est quasi complète de l'Emsien au Fammenien (Dewey *et al.*, 2015) soit entre  $407,6 \pm 2,6$  et  $358,9 \pm 0,4$  Ma. Cependant, dans le NW des Highlands, dans ce qui est appelé le Ba-



sin Orcadien (entre Moray Firth et Caithness), les niveaux de la partie basse (Lower ORSS) sont plissés plusieurs fois avant le dépôts des horizons suivants (Middle ORSS), eux même déformés (Dewey *et al.*, 2015). Cela supposerait que les ORSS sont en parti syn-orogénique.

### 1.3 La séquence structurale

Les déformations dans les Highlands sont multiples et la série du Moine a subi trois épisodes tectono-métamorphiques successifs. Le premier est l'événement Knoydartien ( $\sim 840$  Ma, "pré-D1"); les deux suivants sont associés à l'orogénèse Calédonienne : le Grampien ( $\sim 461-467$  Ma, "D1") et le Scandien ( $\sim 430$  Ma, "D2").

- **pré-D1** : S'il existe des déformations pré-Calédonienne préservées ce sont des déformations au faciès amphibolite de l'épisode Knoydartien (Rogers *et al.*, 1998) interprétées comme synchrones de l'intrusion de pegmatites datées à  $827 \pm 2$  Ma et  $784 \pm 1$  Ma. Elles ont été très largement effacées par les déformations et recristallisations scandiennes (Kocks *et al.* (2006)). Ces déformations ne sont clairement identifiées que dans le sud de la nappe du Moine (au bord de la faille de Great Glen) (Rogers *et al.*, 1998).
- **D1** Les déformations dites grampiennes ne sont visibles dans les Highlands que dans la nappe de Naver (Fig. 1.3.1) associées à la fusion partielle des roches du Loch Coire Migmatite Complex. Ces déformations sont interprétées comme antérieures aux déformations principales D2 préservées uniquement au-dessus du chevauchement de Naver (Strachan et Holdsworth, 1988).
- **D2** Les déformations D2 sont les plus visibles et les mieux exprimées dans l'ensemble des unités. Les chevauchements à vergence NW-SE sont accompagnés de plissement et déformations intenses. La linéation d'étirement est portée principalement par les micas et les amphiboles. Cette linéation varie d'une direction de plongement vers l'ESE dans les unités basses (Moine et Ben Hope) à quasiment SSE dans les unités plus hautes (Naver et Skinsdale) (Chew *et al.* (2014), Fig. 1.3.1). Les microstructures indiquent un sens de cisaillement vers le NW selon ces

linéations. Les déformations s'accroissent à proximité des chevauchements dans des zones de blastomylonites plus ou moins développées. (Chew *et al.*, 2003; Kinny *et al.*, 2003; Kocks *et al.*, 2006). L'attribution scandinave de ces déformations est établie par la datation des plutons syn-tectonique (voir 1.5).

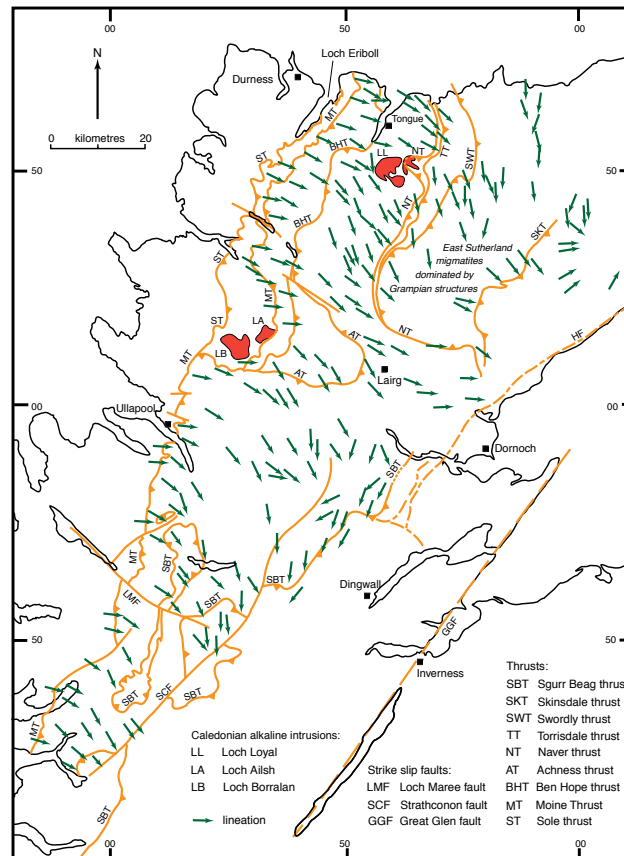


FIGURE 1.3.1 – Carte des linéations dans les Highlands. Ces linéations sont attribuées à l'ouest du Naver thrust aux déformations scandinaves et à l'est aux déformations grampiennes et scandinaves. (Law *et al.*)

- **D3-D4** Les dernières déformations visibles dans les Highlands sont celles associées avec l'épisode de déplacement sénestre le long de la faille Great Glen. Ces déformations sont principalement connues et datées au sud de celle-ci, mais elles s'expriment dans la nappe de Naver par un replissement des plis F3. Des structures extensives de grande envergure (le détachement de Nord-Fjord Sogn, Fig. 1.3.2 NSDZ) sont

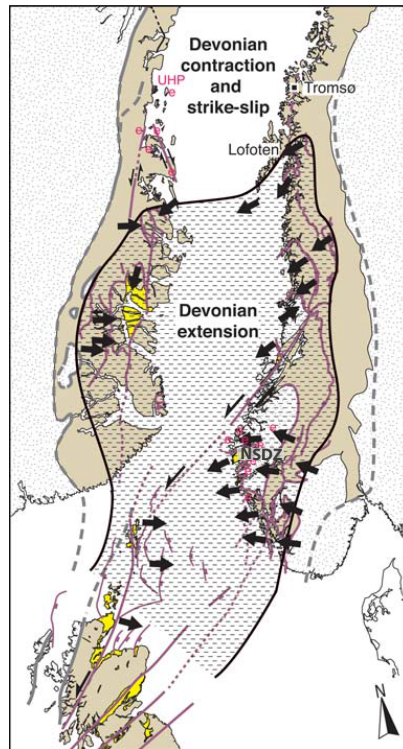


FIGURE 1.3.2 – Directions de transport et distributions des structures extensives entre 403 et 380 Ma dans l’Atlantique Nord. NSDZ , Nord-Fjord Sogn detachment zone (Fossen (2010))

visibles dans les régions scandinaves mais aucun détachement de telle magnitude n’est identifié à Terre en Ecosse (Fossen, 2010). Les témoins de l’extension sont néanmoins univoques : la mise en place et la déformation du bassin Orcadien (Fig. 1.3.2), et les déformations décrochantes et en transtension devoniennes dans le sud des Highlands (Fossen, 2010).

En mer, les chevauchements calédoniens sont plus clairement repris en extension lors de la mise en place des bassins dévoniens (Wilson *et al.*, 2010) (Fig. 1.3.2). Les données sismiques suggèrent que le remplissage de ces bassins dévoniens est en partie contrôlée par la réactivation des failles calédoniennes qui les bordent (notamment le chevauchement de Naver) (Coward *et al.*, 1989; Fossen, 2010; Wilson *et al.*, 2010). La faille du Great Glen, au sud des Highlands, est elle aussi supposée

avoir joué un rôle majeur dans les déformations extensives et transpressives (Fossen, 2010; Coward *et al.*, 1989). Le mouvement le long de cette faille est en partie estimé vis à vis de faille structurellement analogue où les mouvements senestres sont établies (Walls Boundary Fault). L'amplitude du rejet sénestre fini sur la GGF n'est pas correctement estimé puisque les corrélations de part et d'autre de cette faille sont impossibles mais il est évalué à environ 200-300 km d'après des données paléomagnétiques. Certains auteurs proposent même un déplacement de l'ordre de 500 à 700 km exigés par les reconstitutions paléogéographiques entre Baltica et Laurentia (Dewey et Strachan, 2003).

## 1.4 Histoire thermique des Highlands

### 1.4.1 Métamorphisme régional :

Ce prisme orogénique est composé de nappes superposées de grades métamorphiques croissants le haut (Barr *et al.*, 1986; Johnson et Strachan, 2006). Ce gradient régional inverse augmente du faciès des schistes verts au front de la chaîne, dans le chevauchement du Moine, à ceux des amphibolites moyen et supérieur dans la nappe de Naver (Fig. 1.4.1, (Barr *et al.*, 1986; Friend *et al.*, 2000). En carte, les isogrades des faciès schistes verts, amphibolite supérieur et amphibolite moyen (Fig. 1.4.1) apparaissent parallèles à la trace des chevauchements. Ce gradient barrovien est typique de la collision continentale. Il n'y a pas d'évidence de reliques de métamorphisme associé à une phase de subduction, ce qui indique que l'empreinte thermique enregistrée dans cette région n'est due qu'à la collision, comme on pourrait s'y attendre dans un rétroprisme, et qui fait l'intérêt de la présente étude : l'héritage thermique des stades prés-collisionnels est supposée faible. Ce métamorphisme inverse est attribué à l'empilement de nappes en séquence, et de portion de croûte moins en moins profonde (Barr *et al.*, 1986).

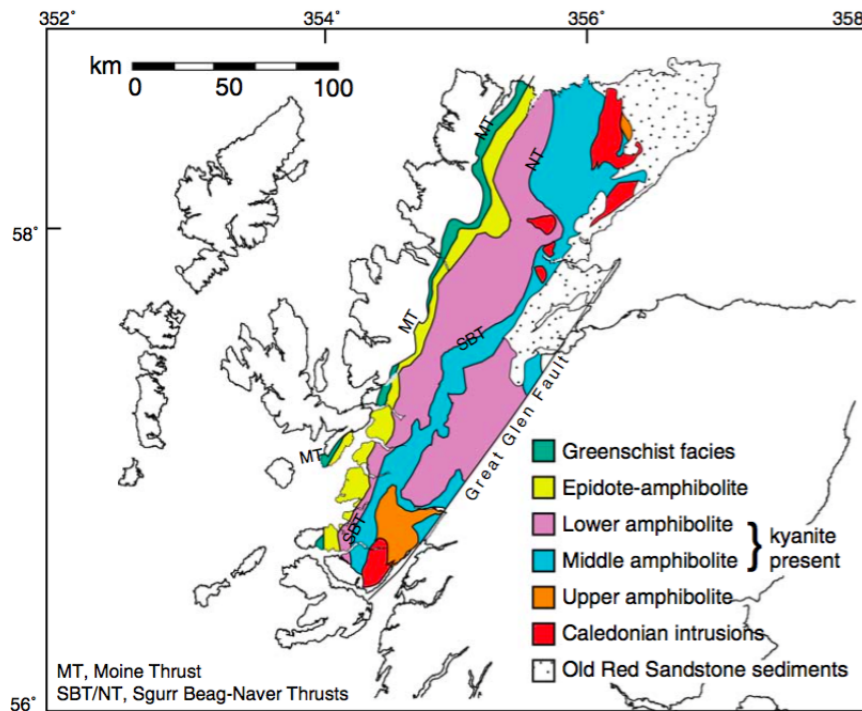
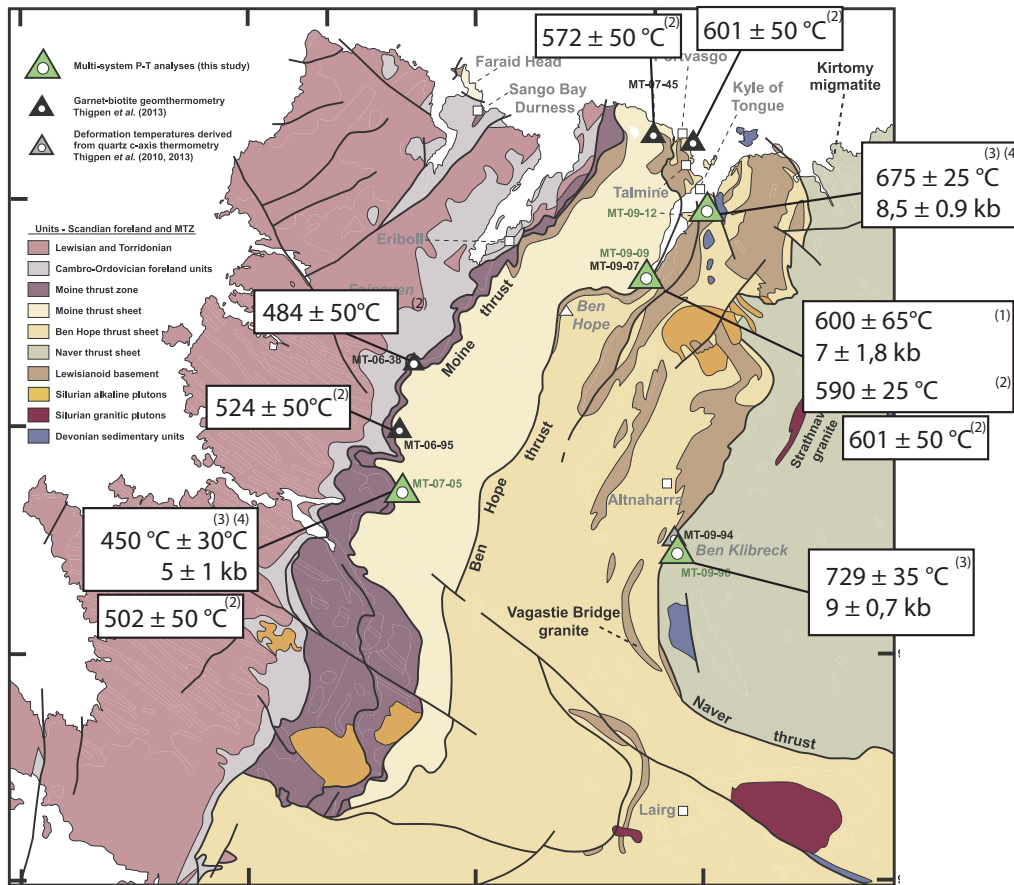


FIGURE 1.4.1 – Carte des faciès métamorphiques dans les Highlands, Streule *et al.* (2010)

### 1.4.2 Estimations des conditions P-T des pics métamorphiques

Les conditions précises de pression et de température sont difficiles à estimer en raison de la pauvreté des assemblages minéralogiques, les sédiments du Moine étant essentiellement des psammites. Cependant, quelques estimations par thermomètres et baromètres simple-équilibre ont été publiées (Thigpen *et al.*, 2013; Ashley *et al.*, 2015), Fig.1.4.2) ainsi que quelques rares pseudosections (Ashley *et al.*, 2017).

Dans la nappe du Moine, juste au-dessus du chevauchement du Moine, ont été calculées des températures de  $484 \pm 50^\circ\text{C}$  à  $524 \pm 50^\circ\text{C}$  (Fig.1.4.2). Au sommet de cette unité, les températures atteignent  $572 \pm 50^\circ\text{C}$  et  $601 \pm 50^\circ\text{C}$  (Fig.1.4.2). Une estimation par pseudosection à la base de la nappe du Moine indique des conditions de  $450 \pm 30^\circ\text{C}$  à  $5 \pm 1 \text{ kb}$  Ashley *et al.* (2015). Dans l'unité de Ben Hope, les conditions sont comprises entre  $600 \pm 65^\circ\text{C}$  à



- (1) Average P-T multi-équilibre (2) garnet-biotite thermometrie (3) Pseudosection Thermocalc (4) Si p.f.u et Fe#

FIGURE 1.4.2 – Synthèses des estimations P-T faites par Thigpen *et al.* (2013) et Ashley *et al.* (2015)

7 ± 1 kb à la base de l'unité, à 729 ± 35 °C, 9 ± 0,7 kb (Ashley *et al.*, 2015) au sommet de l'unité.

L'unité de Naver est une unité de nettement plus haute température incluant le complexe migmatitique de Loch Coire (LCMC). Les conditions de formation de ces migmatites, sont estimées à 650-700 °C et 11-12 kbar (thermométrie gt-cpx et barométrie gt-plagio-cpx-qtz, Friend *et al.* (2000)). D'autres conditions plus basses de ~ 640-660 °C et 5 kbars ont aussi été obtenues dans cette unité (thermomètre gt-bt Burns *et al.* 1994). Le métamorphisme dans les Highlands est donc progressif de la base au sommet de l'empilement

desnappes.

### 1.4.3 Estimations des conditions de température de la déformation :

Thigpen *et al.* (2013) ont également estimé des températures de déformation dans ces unités en examinant l'ouverture de l'angle  $c$  du quartz. Sur un transect allant de la base de l'unité du Moine vers la base de l'unité de Naver (Ben Kilbrek) (Fig. 1.4.3). Sur la figure 1.4.3 une augmentation de la température de déformation est visible du Nord au Sud, en bordure du chevauchement du Moine. En effet, les températures varient de  $420^{\circ}\text{C}$  sur la rive nord à  $580^{\circ}\text{C}$  au niveau d'Assynt. Sur le transect perpendiculaire au prisme, un net saut de température de déformation a lieu entre la MTZ et l'unité du Moine ( $470^{\circ}\text{C}$  à  $575^{\circ}\text{C}$  au Nord d'Assynt à Gorm Loch More, Fig. 1.4.4). Cependant, cette différence s'atténue en allant vers le Sud d'Assynt, pour disparaître au niveau du Loch Ailsh ( $580^{\circ}$  de part et d'autre du chevauchement du Moine, Fig. 1.4.4). À l'inverse, aucun changement net n'est documenté à travers le chevauchement de Ben Hope (Fig. 1.4.3,  $\sim 600^{\circ}\text{C}$ ), pas plus qu'à travers celui de Naver pour peu que la quantité de données soit considérée comme significative.

L'ensemble de ces données de températures sont rapportées sur une coupe NW-SE (Fig. 1.4.4). Sur cette figure est visible l'absence de saut thermique à l'échelle du prisme, entre les unités du Moine, de Ben Hope et de Naver.

Une augmentation progressive de la température du pic de métamorphisme et de la température de déformation sont visibles sur l'ensemble de l'empilement de nappes (Thigpen *et al.*, 2013; Ashley *et al.*, 2015) (Fig.1.4.4).

À l'inverse du chevauchement du Moine, le Ben Hope et le Naver thrust ne sont pas des limites thermiques majeures.

Les températures de déformation et les températures du pic de métamorphisme sont similaires ce qui indique que la déformation a lieu proche du pic de métamorphisme.

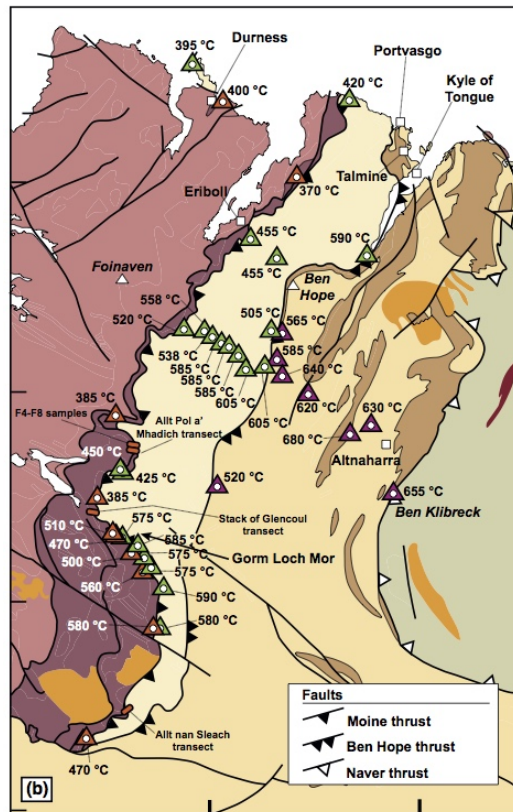


FIGURE 1.4.3 – Données de température de déformation obtenues par méthode de l'ouverture de l'axe c du quartz (Thigpen *et al.* (2013)). Les couleurs des figurés indique la nappe à laquelle chaque échantillon appartient (orange : Moine Thrust Zone, vert : Moine et violet : Naver)

#### 1.4.4 Chemin P-T-t dans la nappe de Naver

Avec les données de thermobarométrie publiées, il est possible de reconstruire un chemin P-T pour la nappe de Naver. En effet, les textures de fusion partielle (migmatites) sont interprétées comme pré-datant les autres assemblages de plus basse température et surtout de plus basse pression. C'est sur la base de datation de zircons dans ces migmatites de Naver qui produisent des âges de  $460 \pm 13$  Ma et  $467 \pm 10$  Ma, (Kinny *et al.*, 1999a) qui ne correspondent pas aux âges de déformation scandinave (400-430 Ma) que cet événement a été décrit. Friend *et al.* (2000) propose donc un chemin P-T-t horaire avec une « double boucle » (Fig. 1.4.5) avec un événement HT - HP



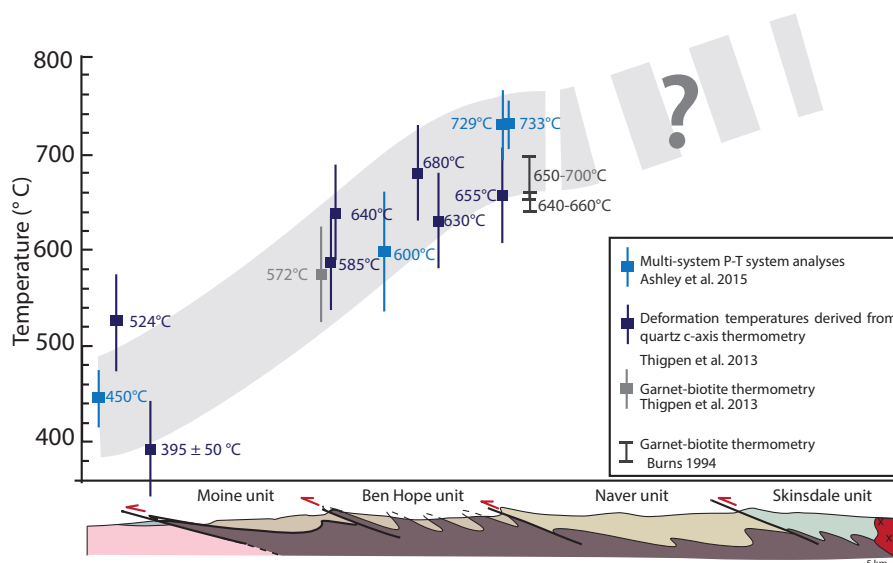


FIGURE 1.4.4 – Synthèse des températures de pic de métamorphisme et de température de déformation dans les différentes unités du prisme.

au grampien et MP - HT au scandien. Cependant, ce choix de chemin à « double boucle » est basé sur une seule information de basse pression indiquée par des textures de décompression dans les plagioclases entre les grenats et la matrice (Fig. 1.4.5, étape (e)). Aucune autre information pétrologique n'appuie cette hypothèse, même si l'évènement grampien est bien défini plus au sud (voir section suivante). Le passage entre les deux épisodes pourrait être plus direct, sans passer par une phase de décompression avant l'augmentation de température (Fig. 1.4.5), ce qui tendrait à dire que soit le grampien n'a pas eu d'influence majeure dans cette région, soit que le rééquilibrage thermique entre les deux évènements est resté limité. De plus ce chemin n'est potentiellement possible que pour la nappe de Naver. Les nappes inférieures n'ayant probablement pas subi le premier évènement grampien, ils n'auraient pas suivi cette double boucle. Ashley *et al.* (2015) ne montrent d'ailleurs pas de chemin prograde bien défini avant le pic de métamorphisme dans la nappe de Naver, alors qu'il le précise pour les deux autres.

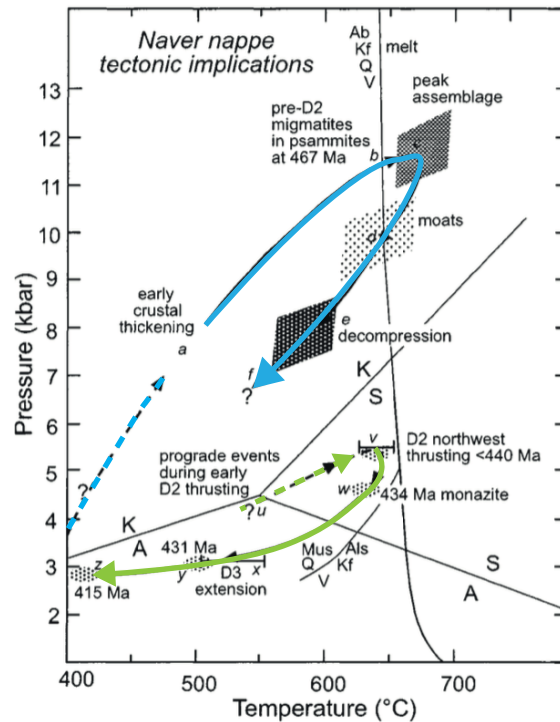


FIGURE 1.4.5 – Chemin Pression-Température proposé par Friend *et al.* (2000). On y retrouve les conditions de migmatitisation (c) du grampien (flèche bleue) et les conditions du pic de métamorphisme du scandien (v, flèche verte).

### 1.4.5 Une phase grampienne dans les Highlands ?

Le début de l'épisode grampien est défini classiquement par l'âge de l'ophiolite de Ballantrae (Ballantrae Ophiolitic Complex, dans la région du Midland Valley Terrane) à  $478 \pm 8$  Ma représentant l'obduction d'un arc volcanique dont les terrains grampiens sont la marge passive (Oliver *et al.*, 2000). La phase grampienne n'est documentée dans les Highlands qu'à travers deux âges U-Pb sur zircon ( $460 \pm 13$  Ma et  $467 \pm 10$  Ma) qui sont décrits comme synchrones de l'épisode de fusion partielle dans la Nappe de Naver, lieu où les déformations anté-scandiennes sont plus visibles que dans les nappes sous-jacentes. En effet, aucune donnée géochronologique ou structurale dans les métasédiments de Morar (unité du Moine et de Ben Hope) ne sont associables au grampien. En revanche, deux âges dans la nappe du Moine sont documentés qui ne correspondent ni au scandien ni au grampien. Ce sont des données

Lu-Hf sur grenats qui produisent des âges de  $448,1 \pm 7,4$  Ma et  $447,3 \pm 1,7$  Ma (Bird *et al.*, 2013). Ces âges sont associés au chemin prograde ou au pic de métamorphisme au regard de leur distribution de Lu au sein des grains de grenat (Bird *et al.*, 2013). Ces âges sont trop jeunes pour être identifiés comme le prograde du grampien et trop vieux pour représenter le pic de l'événement scandien. Les auteurs proposent ainsi un autre événement tardi-ordovicien dans la région (Bird *et al.*, 2013). Plus au nord, dans la nappe de Sgurr Beag, quelques autres âges autour de 470 Ma sont décrits. Dans la bordure d'un grenat des monazites en inclusions ont été datées par Cutts *et al.* (2010) à  $464 \pm 4$  Ma, et interprétées comme représentant le grampien. L'événement grampien est en revanche relativement bien décrit au Sud de la faille de Great Glen. En effet de nombreuses données géochronologiques sont associées à l'événement grampien : les datations Rb/Sr dans les sédiments Daldariens entre 468 et 484 Ma (Harte *et al.*, 1984; Dempster *et al.*, 2002) ainsi que des âges Sm/Nd à 467 et 472 Ma sur grenats (Baxter *et al.*, 2002). Cependant, il reste très éloigné géographiquement et structurellement des nappes considérés dans cette étude. À l'inverse, aucune déformation associée au scandien n'est visible dans cette région au sud. L'explication la plus souvent utilisée pour expliquer cette distribution des déformations et des âges est le grand rejet le long de la GGF qui aurait juxtaposé des terrains éloignés au moment des déformations grampiennes (plusieurs centaines de km de déplacement). Cela montre que l'héritage thermique est complexe dans les Highlands et très inégalement réparti entre les nappes. Les âges obtenus sont en général très difficilement reliables aux déformations de façon univoque.

Par ailleurs, l'existence d'un événement grampien est nécessaire pour expliquer le métamorphisme amphibolitique et la fusion partielle syn- raccourcissement. En effet, Johnson et Strachan (2006) ont montré que le court lapse de temps de l'orogénèse scandienne, soit environ 18 Ma, était trop faible pour expliquer un métamorphisme amphibolitique supérieur dans la nappe de Naver. Il est donc proposé que les roches aient subi un événement thermique précédent l'étape de déformation scandienne et qui garderait un héritage thermique permettant les pics de métamorphisme observés pendant le scandien (Johnson et Strachan, 2006). Cela suppose qu'il n'y ait pas de véritable chemin double boucle comme proposé par Friend *et al.* (2000) avec une pé-

riode de decompression, puisque les roches doivent rester enfouies au chaud au moins jusque 440 Ma (le début des déformations scandiennes ?) (Johnson et Strachan, 2006).

## 1.5 Géochronologie des plutons et datation de l'activité des thrusts

De nombreux plutons sont présents dans les différentes unités du prisme et beaucoup d'entre eux ont été datés par U-Pb (notamment sur zircon). De plus l'âge d'activité des chevauchements principaux est souvent mis en évidence à travers leurs relations avec les plutons. Les plutons syn-orogéniques sont évidemment les plus précieux pour calibrer le calendrier des déformations. Dans les Highlands, ce sont ce type de datations qui permettent de comprendre la chronologie des chevauchements.

**Origine et mise en place des plutons** En effet, la fermeture de l'océan Iapétus à été accompagnée de la mise en place d'un magmatisme calco-alcalin de l'Ordovicien au Dévonien associé à la subduction sous Laurentia. Les plutons dans les Highlands sont divisés en deux catégories : la syénite de Loch Loyal, Loch Ailsh et Loch Borralan, et les granites comme le Strath Halladale, le Strathnaver, ou le granite de Helmsdale. Les premiers sont dominés par des leuco et mélano-syénite et les seconds par des granodiorites, granites et diorites. Cette classification se retrouve aussi spatialement puisque les syénites sont localisées à l'ouest dans les nappes inférieures et les granites à l'est dans les nappes supérieures (Fig. 1.5.1). Dans la fenêtre d'Assynt, on retrouve la plus grande abondance de pluton alcalins avec le Loch Ailsh et le Loch Borralan ainsi qu'une multitude de dykes et de sill (Goodenough *et al.*, 2004).

L'ensemble de ces plutons ont des relations étroites avec les chevauchements principaux. En effet, leur mise en place sont toutes plus ou moins associées au mouvement des chevauchements majeurs. Le granite de Strath Halladale par exemple recoupe localement le chevauchement de Skinsdale. Il ne présente pas de déformations pénétratives associées au chevauchement

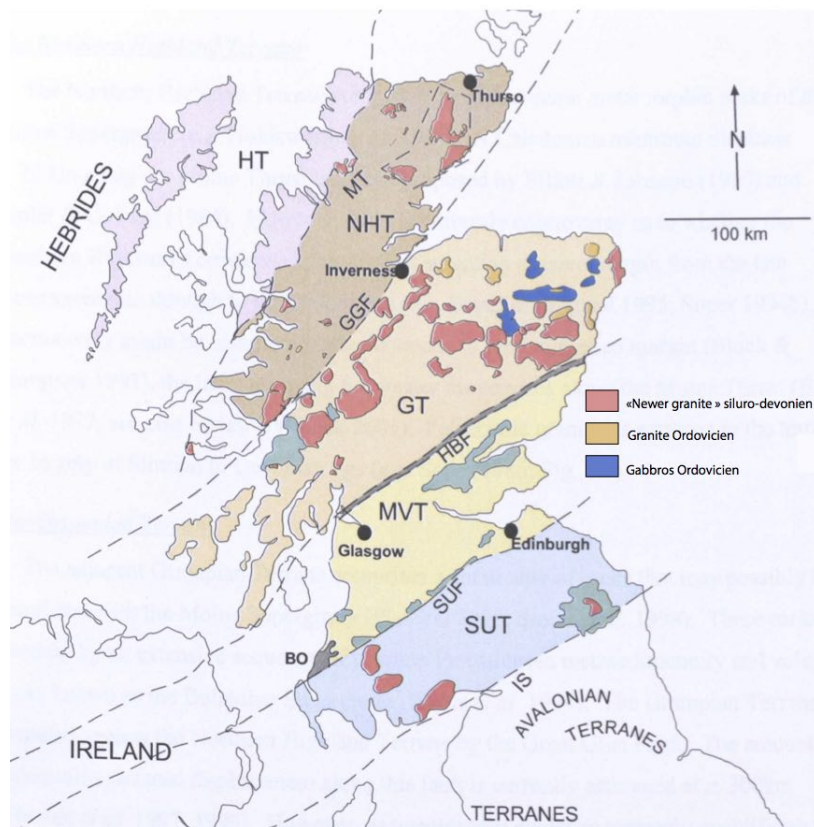


FIGURE 1.5.1 – Carte des plutons Calédonien dans les différentes régions d’Ecosse. On retrouve dans les Highlands les granites faisant parties de la Newer Granite Suite. (D’après Kocks (2002))

mais est dominé par des fabriques magmatiques et des déformations secondaires de haute à moyenne température typiques de la mise en place au niveau de la mi-croûte (Kocks *et al.*, 2006; Tribe et D’Lemos, 1996). De plus il présente des sens de cisaillement similaires à ceux du chevauchement de Skinsdale. Il est donc considéré comme synchrone du mouvement de Skinsdale (Kocks *et al.*, 2006). De la même manière, les plutons de Loch Aish et de Loch Borralan sont étroitement liés au chevauchement du Moine. Une première partie de ces complexes ont lieu pendant le jeu du chevauchement et une seconde est postérieure au chevauchement.

Par ailleurs, le pluton de Loch Loyal recoupe le chevauchement de Naver mais est considéré comme postérieur au mouvement sur le chevauchement.

Seuls les granites de Helmsdale et de Rognat ne sont pas associés à des chevauchements mais sont liés aux failles de Helmsdale et de Strath Fleet respectivement. Ces failles sont soupçonnées d'avoir un rôle dans le mouvement décrochant post-scandien (KOCKS *et al.*, 2014; Torsvik *et al.*, 1983). Les granites à l'est sont donc probablement antérieurs aux syénites de l'ouest, et viennent ensuite les granites post-collision scandinave.

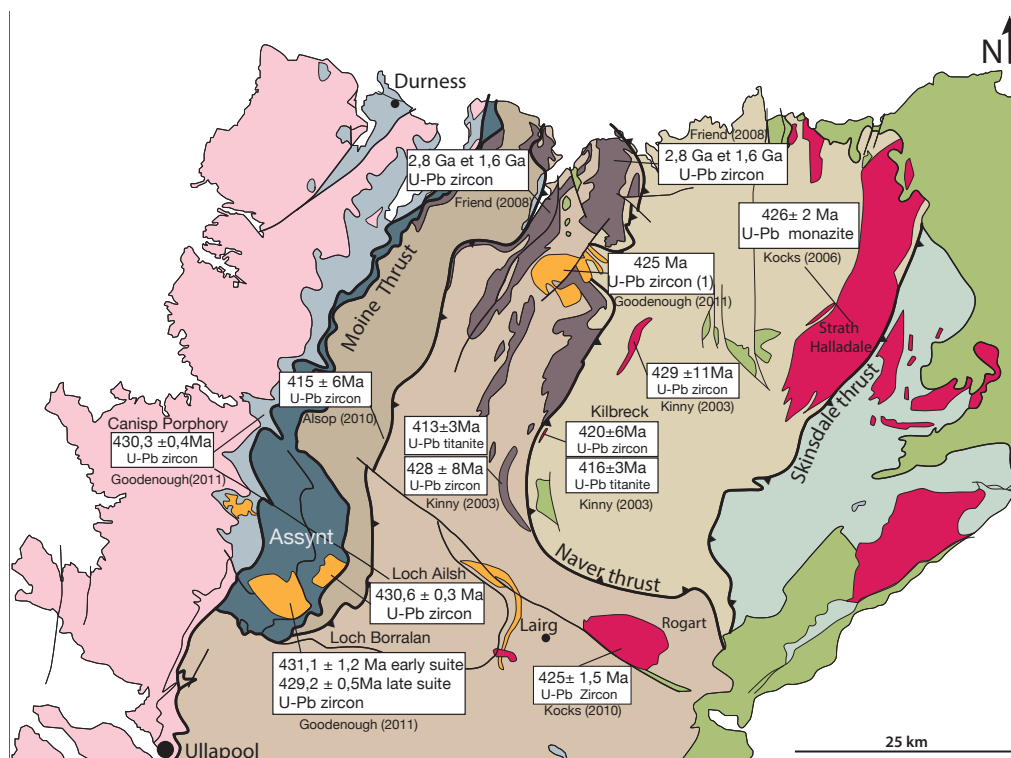


FIGURE 1.5.2 – Synthèses des plutons datés dans les Highlands, Goodenough *et al.* (2011), Kinny *et al.* (2003), Kocks *et al.* (2006), Kocks *et al.* 2010.

**Datation des plutons** Dans la Moine thrust zone et spécialement dans la région d'Assynt par exemple, le Loch Ailsh (Fig. 1.5.2) a été daté à  $430,6 \pm 0,3$  Ma. Le pluton Borralan dans la même région d'Assynt est composée de deux suites de syénite. La première suite est interprétée comme précédant le mouvement des chevauchements et étant synchrone du mouvement alors que la seconde suite est interprétée comme étant postérieure à l'activité des chevauchements. La suite primaire est daté  $431 \pm 1,2$  Ma (U-Pb sur zircon

(Goodenough *et al.*, 2011) et la suite tardive  $429,2 \pm 0,5$  Ma (Fig. 1.5.2). Les Canisp Porphyry sont des sills se trouvant sous le Sole Thrust, dans les sédiments dévoniens (donc à la base de la MTZ) et interprétés comme anté-déformation du Sole Thrust. Ces sills sont datés par la même méthode U-Pb sur zircon à  $430,4 \pm 0,4$  Ma (Goodenough *et al.*, 2006, 2011) (Fig. 1.5.2).

Un autre pluton syn-déformation dans la nappe du Moine a été daté à  $415 \pm 6$  Ma (Alsop *et al.*, 2010).

Dans la nappe de Ben Hope seul deux âges de cristallisation de plutons sont connus : Le Loch Loyal et le Rogart pluton (Fig.1.5.2). Le Loch Loyal intrude les sédiments du Moine et est décrit comme postérieur à l'épisode de déformation scandinave. Il est daté à  $\sim 425$  Ma (Fig. 1.5.2, Goodenough *et al.* (2011), mais par une seule mesure est concordante). La cristallisation du pluton de Rogart est datée à  $425 \pm 1,5$  Ma (Fig. 1.5.2 Kocks *et al.* (2006)). Trois portions de socle Lewisien ont été datées par U-Pb sur zircon dans la nappe de Ben Hope (Fig. 1.5.2). Ces trois «inliers» sont structurellement dans les coeurs de plis. Deux «inliers» au nord possèdent une empreinte géochronologique greenwillienne avec des âges variant de 2,8 Ga à 1,6 Ga suggérant un âge de cristallisation vers 2,8 Ga et une réouverture du système vers 1,6 Ga (ou une perte en Pb, Friend *et al.* (2008)). Dans le sud, la portion datée est le Vagastie Bridge à  $428 \pm 8$  Ma (âge zircon, Kinny *et al.* (2003)).

Dans la nappe de Naver le pluton principal est celui de Strath Halladale. Il a été daté à  $426 \pm 2$  Ma (U-Pb sur monazite, Kocks *et al.* (2006), Fig. 1.5.2). Celui-ci étant interprété comme syn-déformation, il date le mouvement le long du thrust de Skinsdale.

D'autres datations renseignent également sur les âges de déformations. Dans la nappe de Naver par exemple, le Strathnaver ainsi que le Ben Kilbreck sont interprétés aussi comme syn-déformation scandinave (D2, Kinny *et al.* (2003), Fig.1.5.2) et sont datés à  $429 \pm 11$  Ma et  $420 \pm 6$  Ma respectivement (Kinny *et al.*, 2003)

L'ensemble de ces datations permettent de mettre en évidence un pulse magmatique à l'échelle de l'orogène vers 425-430 Ma et pendant un très court laps de temps. Ce pulse magmatique permet aussi de contraindre l'activité de certains thrusts :

- Le chevauchement de Skinsdale est actif à  $426 \pm 2$  Ma

- Le chevauchement de Naver était actif vers 425 Ma
- Le chevauchement du Sole n'était pas encore actif à  $430,4 \pm 0,4$  Ma.

Les données géochronologiques étant dispersées et ne permettant pas toujours de dater la déformation des chevauchements majeurs, la datation direct des mylonites du Moine semblait nécessaire pour s'assurer de l'âge de son fonctionnement. En s'intéressant aux micas syn-déformation des mylonites du Moine il a été possible de dater la mylonitisation. En utilisant la méthode Rb/Sr sur ces minéraux syn-déformation, Freeman *et al.* (1998) montrent que dans la célèbre zone de Knockan les âges Rb/Sr des mylonites du Moine sont situés entre 437 et 425 Ma . Dans la zone de Dundonnell, les âges varient de 429 Ma à 408 Ma. Ces âges sont interprétés comme représentant la fin de la déformation ductile, au moment où les micas cesse de (re-)cristalliser. Ces données suggèrent donc que des portions de mylonites ont cessé de fonctionner vers 430 Ma mais que d'autre portions du chevauchement ont fonctionnée jusque 408 Ma, indiquant ainsi une localisation de la déformation au cours du temps. Des âges K-Ar sur ces même échantillons, ont également été produit pour valider les âges Rb/Sr. Puisque la température de fermeture de ce système est plus basse, les âges devraient être plus jeunes. Cependant les âges K-Ar sont nettement plus vieux (de 11 Ma à 32 Ma), ce qui fut interprété comme conséquence d'un excès d'argon. Enfin, via la chimie des micas, ils montrent que les conditions PT pendant la cristallisation sont assez constantes, ce qui suppose qu'entre 437 et 408 Ma, le Moine thrust est resté à la même profondeur et il n'y a eu que très peu d'exhumation (ou qu'elle n'a pas eu une grande influence sur la température dans les zones de déformation).

## 1.6 Thermochronologie : refroidissement des nappes

Le refroidissement des nappes a été documenté par Dallmeyer *et al.* (2001) le long d'un transect au nord du prisme (Fig. 1.6.1). L'essentiel des échantillons datés ont subi des températures supérieures à 500°C. La température de fermeture des systèmes Ar/Ar dans les muscovites est de  $\sim 425^\circ\text{C}$  (Harrison *et al.*, 2009) et comprise entre 400 et 600°C dans les amphiboles (Mark



Harrison, 1981). Les âges Ar-Ar obtenus sur muscovite et hornblende sont donc interprétés comme des âges de refroidissement. Ces âges sont relativement homogènes à l'échelle du prisme : Les âges hornblende varient de  $396 \pm 4$  Ma et  $436 \pm 4$  Ma, avec un léger rajeunissement des âges vers les zones internes :  $404,2 \pm 0,4$  Ma (Fig. 1.6.1). Les âges muscovite varient de  $423 \pm 0,2$  Ma à  $416,4 \pm 0,2$  Ma sur l'ensemble des nappes (Fig. 1.6.1). L'ensemble de l'empilement de nappes semble donc se refroidir de manière homogène. De plus, les températures de fermeture du système  $^{39}\text{Ar}$ - $^{40}\text{Ar}$  sur muscovite sont plus basses que sur hornblende ( $\sim 100^\circ\text{C}$  de différence). Des âges similaires dans les deux méthodes indiquent un refroidissement rapide vers  $500^\circ\text{C}$ . Enfin, on observe que les données thermochronologiques sont plus perturbées proche des thrusts, qu'au sein des nappes (Fig. 1.6.1). Il y a donc un grand écart entre les différents thermochronomètres dans les âges à l'aplomb du Ben Hope et du Naver thrust. Enfin, on retrouve dans l'unité de Naver on retrouve des âges hornblende plus jeune que les âges muscovite ce qui est incohérent au vu de leur température de fermeture. Aussi, de nombreux âges  $^{39}\text{Ar}$ - $^{40}\text{Ar}$  sur muscovite au front de la chaîne sont nettement plus vieux que la tendance générale ( $\sim 460$ - $490$  Ma, fig.1.6.1). Ces âges sont interprétés comme perturbés par de l'excès d'argon bien que leur spectre ne sont pas plus perturbés que les autres (Dallmeyer *et al.*, 2001).

Ces données montrent que le refroidissement est rapide et quasi-synchrone dans les nappes de Ben Hope et de Naver. Le refroidissement synchrone des unités suggère que leur exhumation ne se soit pas faite en séquence, où chaque unité est refroidie l'une après l'autre des zones internes aux zones externes. Cela suggère aussi que les thrusts de Ben Hope et de Naver sont inactifs à ce moment. Le rajeunissement vers l'est montre plutôt l'inverse. L'évolution du refroidissement reste donc mal documentée.

Pour résumer, dans les Highlands, on retrouve un événement principal scandien entre 430-408 Ma, qui est responsable de la mise en place de chevauchements ductiles majeurs à l'échelle de ce rétro-prisme Calédonien. Les déformations et événements thermiques précédents cette phase scandienne sont communément regroupés sous le terme grampien. Cette phase orogénique est décrite comme représentant l'accrétion d'un arc volcanique au

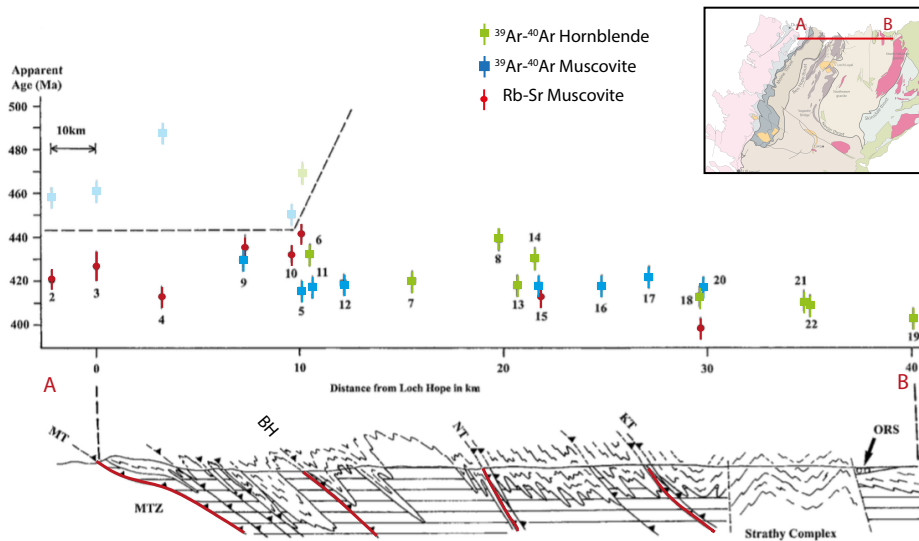


FIGURE 1.6.1 – Transect de thermochronologie au nord des highlands à travers les unités du Moine de Ben Hope et de Naver Dallmeyer *et al.* (2001) par méthode Ar-Ar sur muscovite (bleue) et hornblende (vert) et Rb/Sr sur muscovite (rouge))

continent Laurentia.

Les seules datations d'âge grampiennes directement dans les Highlands sont celles de la nappe de Naver où deux surcroissances de zircons produisent des âges de  $461 \pm 13$  Ma et  $467 \pm 10$  Ma (U-Pb, Kinny *et al.* (1999a)). Ces données sont mises en relation avec la datation U-Pb sur titanite du granite de Fort Augustus ( $470 \pm 2$  Ma, Rogers *et al.* (2001)), elle même interprétée comme représentant le métamorphisme amphibolitique grampien dans les sédiments du Moine plus au Sud.

D'autres datations indiquent un événement avant  $\sim 430$  Ma. Les datations Sm/Nd et Lu-Hf dans des grenats au motif chimique prograde (concentration de Lu plus forte aux bordures du grenat) montrent un métamorphisme vers 470-465 Ma similaire au nord et au sud de la GGF, suggérant l'enregistrement d'un même événement de part et d'autre de cette limite (Bird *et al.* (2013)). Cependant certains de ces âges suggèrent aussi un événement thermique vers 450 Ma (Bird *et al.*, 2013).

## 1.7 Structure globale du prisme

**Structures en profondeur** L'importance relative des différents chevauchements est encore floue et a d'ailleurs beaucoup évolué. De nombreux chevauchements secondaires ne sont plus beaucoup mentionnés dans la littérature récente (Kirtomy Thrust, Swordly thrust, voir même le Ben Hope). De plus, la structure en profondeur des chevauchements majeurs (Moine, Ben Hope (?), Naver, Skinsdake) est largement inconnue. Deux propositions de coupe à grande échelle sont présentées dans la figure suivante.

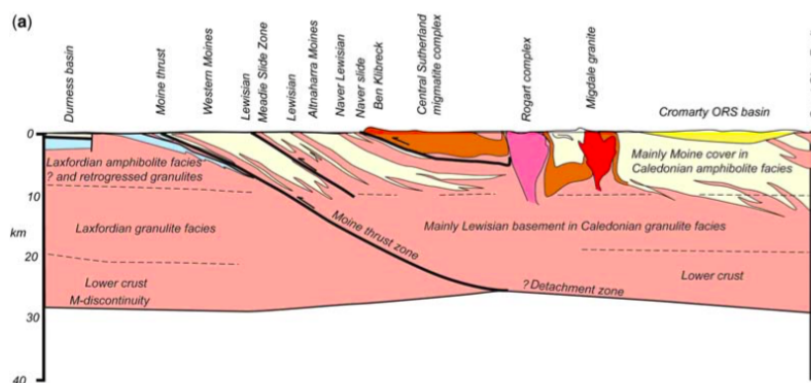


FIGURE 1.7.1 – Coupe proposé par Soper et Barber (1982) avec un chevauchement du Moine crustal

La première proposition de coupe est basé sur la géophysique et notamment les données sur la géométrie du Moho et sur les fabriques inclinées visibles en sismique (Soper et Barber, 1982). Cette coupe montre un chevauchement du Moine qui vient s'enraciner dans la croûte inférieure (Fig. 1.7.1). L'autre caractéristique majeure est le chevauchement de Naver qui ne s'enracine pas sur le même détachement que le Moine. Ce modèle pose un soucis du point de vue de la quantité de raccourcissement accomodé par le chevauchement du Moine. En effet, 50 km de raccourcissement sont estimé dans les sédiments autochtones, et le socle correspondant n'est pas représenté sur cette coupe.

La seconde proposition est très différente (proposée par Butler et Coward (1984)). Dans celle-ci le chevauchement du Moine s'enracine de manière très superficielle à la mi-croûte. Tous les autres chevauchement ne sont pas de

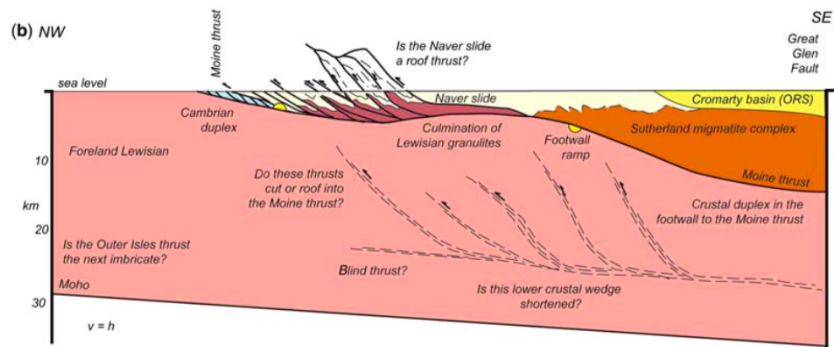


FIGURE 1.7.2 – Coupe proposé par Butler et Coward (1984). Dans cette coupe, le chevauchement du Moine ne s'enracine qu'à la mi-croûte.

grande importance et s'enracinent tous sur le Moine. Il n'y a pas de différence majeure entre le chevauchement de Naver, qui porte l'unité la plus chaude et les chevauchements plus bas.

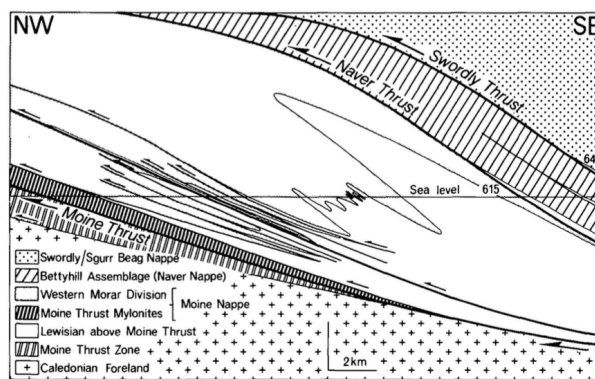


FIGURE 1.7.3 – Coupe schématique de l'empilement des nappes calédoniennes, Holdsworth et Grant (1990)

**Modèle de prisme :** Le seule "modèle" de prisme proposé pour les Highlands est celui de (Holdsworth et Grant, 1990). Il y propose un modèle basé sur les déformations du quartz dans les roches du Moine. Dans un premier temps, ce modèle implique une mise en place en séquence des thrusts de l'intérieur vers l'extérieur de la chaîne, pour expliquer le métamorphisme inverse (Swordly, Naver puis Moine, Fig. 1.7.3). Ce modèle présente bien le plisse-

ment intense des sédiments du Moine et du socle Lewisien. Dans cet exemple, le pendage du Moine thrust est faible pour expliquer le faible métamorphisme présent dans la base de l'unité du Moine.

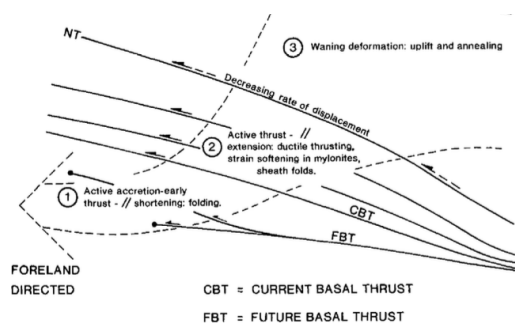


FIGURE 1.7.4 – Coupe schématique de l'empilement des nappes calédonniennes, Barr *et al.* (1986)

Trois étapes composent donc l'évolution de ce modèle (Fig. 1.7.4). Dans un premier temps, l'accrétion des différentes unités vers l'avant-pays (Fig. 1.7.4, cercle 1). Cette accrétion se fait par l'activité successive des différents chevauchement à grande profondeur. Cela implique un épaissement crustal synchrone du raccourcissement et la mise en place de plis crustaux. La deuxième étape passe par le processus de « softening » aux seins des mylonites basales (Fig. 1.7.4, cercle 2). Enfin, la troisième phase implique la « guérison » des fabriques et l'érosion et l'uplift (Fig. 1.7.4, cercle 3).

## 1.8 Questions soulevées

### 1.8.1 La séquence structurale

La séquence structurale semble être comprise au premier ordre : l'ensemble des chevauchements semblent jouer de manière synchrones, précocement et pendant une durée très courte. Dans ce cas, qu'en est-il de la localisation progressive de la déformation de moins en moins en profondeur dans la croûte ?

L'âge des chevauchements et donc la séquence des thrusts semble être surtout contrainte par des âges thermochronologiques et de géochronologiques.

La séquence est donc est déterminée de façon indirecte. Le but de notre étude est de tenter de la contraindre de manière directe avec des transect de plus petite échelle. Il faut surtout dater de manière plus précise ces chevauchements car dans l'état actuel des connaissances, une activité synchrone est supposée parce que les âges sont dans les incertitudes les uns des autres.

### 1.8.2 Chemin P-T-t des unités

Plusieurs incertitudes existent sur les conditions de P-T pendant l'orogénèse. Est ce que toutes les unités ont un chemin P-T-t semblable? Autrement dit, les pics de métamorphisme des différentes unités correspondent-ils tous aux mêmes conditions P-T? Par ailleurs, ce pic de température est-il synchrone dans toutes les nappes? Enfin, est-il possible de relier ces chemins P-T à des durées d'enfouissement? Et est ce que les pics de températures sont tous de la même durée dans les différentes nappes?

### 1.8.3 Comment relier les chemins P-T aux structures

Dans l'état actuel, les données de thermobarométrie s'intéressent aux différences de conditions métamorphiques des différents événements de l'orogénèse calédoniennes. Les données de thermobarométrie ne s'intéressent pas à chaque nappe comme une unité propre, ayant une évolution PT potentiellement différente des autres unités. Après avoir correctement défini les chemins P-T, il est important de pouvoir relier cette évolution à la séquence de chevauchement et donc à l'évolution des différentes unités. Les chemins de ces différentes unités sont-ils potentiellement rattachables à la séquence de thrusts? Est ce que les pics de températures se traduisent par une activité synchrone des thrusts? Pour répondre en partie à ces questions, il serait profitable de dater les surcoissances de certains minéraux (U-Pb sur les apatites ou les zircons par exemple) dans les zones de cisaillement des chevauchements. Ainsi, il serait possible de connaître directement l'âge de l'activité des zones de cisaillement majeurs. Relier les chemins PT et les structures tectoniques majeures sera alors bien plus aisée.

#### 1.8.4 L'héritage thermique dans les nappes

La phase grampienne dans les Highlands est exprimée localement par les migmatites portées par les nappes de Naver et Sgurr Beag, les plus hautes structurellement et les plus à l'est. S'il est clair qu'il existe une paragenèse pré pic de métamorphisme scandien, son âge est très mal contraint. Cette paragenèse peut être Précambrienne ou bien représenter une phase précoce des déformations scandiennes. L'influence de cet événement sur la structure thermique de la chaîne est importante puisque cela implique une différence de température de la croûte au moment de l'empilement des nappes. Cela pourrait aussi expliquer la localisation de la déformation sur la nappe de Naver, qui constituerait alors aussi un contraste de rhéologie important. La thermochronologie moyenne température est particulièrement adaptée pour répondre à ces questions. Il faut en effet tenter de comprendre si les âges grampiens sont réels ou s'ils résultent d'un reset partiel entre les âges grenvilliens et les âges scandiens. La thermochronologie plus basse température (He sur zircon et sphène) permettrait de faire cette distinction puisqu'elle date le dernier refroidissement enregistré par le minéral.

Par ailleurs, la distribution spatiale du grampian est aussi intrigante. C'est surtout au sud de l'île de Skye, vers Moar et vers Knoydart (c'est à dire dans le sud des Highlands, au sud de la Great Glen fault) que l'événement grampien a été identifié. La seule occurrence de cet événement thermique au nord est la présence de migmatites dans la nappe de Naver ce qui implique qu'il est donc très peu développé. C'est très étrange qu'on ne retrouve pas de relique grampienne systématique dans les autres nappes et/ou de façon continue entre ces deux régions. De plus certains affirment que la nappe de Sgurr Beag porte également des migmatites sur son toit, permettant de la relier à la nappe de Naver, mais les indices issus des zircons détritiques semblent plutôt contredire la nature commune de ces nappes. C'est également étrange que cette nappe qui est exposée bien plus à l'ouest que celle de Naver porte des reliques de déformations grampiennes. Les mêmes remarques s'appliquent à l'événement néoprotérozoïque Knoydartian dont on ne sait pas quel événement géodynamique il représente.

### 1.8.5 La séquence d'exhumation

Selon Dalmeyer *et al.* (2001) tous les chevauchements jouent aux même températures (vers 450°-500°C). Deux possibilités peuvent expliquer ce fonctionnement synchrone : soit la résolution spatiale des données de Dalmeyer n'est pas assez haute et les sauts d'âge de part et d'autre des thrusts sont invisible à cette échelle. Soit la température de clôture de l'Ar/Ar est trop basse et on ne voit que l'exhumation tardive, et non celle issu de l'activation des thrusts. Pour palier ca, il faut faire des transects d'échelles différentes, et surtout des transects à très petite échelle le long des thrusts (Ben Hope et Naver). Enfin, il est aussi possible que la température de clôture de ces différents thermomètres soient encore trop mal contrainte. Il faut donc travailler au second ordre. Pour valider cette l'exhumation synchrone, il faut pouvoir comparer les données de refroidissement de part et d'autre des contacts majeurs. Il faut aussi coupler ces données avec d'autresx thermochronomètres (comme l'U-Pb sur les surcroissances dans les apatites, l'Ar/Ar et l'He) ce qui permettra de contraindre le chemin de refroidissement de façon plus fine à plusieurs températures le long du chemin.



# Chapitre 2

## Méthodes

Dans le cadre de cette thèse, plusieurs méthodes de datation ont été utilisées sur différents minéraux pour tenter de définir de la manière la plus fine possible l'évolution thermique des différentes unités, l'âge de leurs paragneisses et éventuellement l'âge des épisodes de déformation qui les ont générées. Pour relier les informations des différentes méthodes de datation en un chemin Température-temps (T-t) puis possiblement Pression-Température-temps-déformation, il est nécessaire de passer par la notion importante de température de fermeture, qui permet de comparer les âges entre eux.

### 2.1 Notion de température de fermeture

**Température de fermeture :** Le comportement des systèmes isotopiques est complexe et diffère d'une phase minérale à l'autre. Ainsi, mesurer les rapports isotopiques dans différentes phases permet de dater des événements différents : cristallisation et recristallisation, associées ou non à une déformation selon les évidences texturales ou refroidissement, a priori indépendant des phases de déformation. Cela s'explique par le fait que chaque couple « méthode/minéral » est régi par des processus de diffusion thermo-dépendants qui leur sont propres. La diffusion correspond à la mobilité des atomes dans le système cristallin et est décrite par le flux des atomes dans la structure cristalline. Ce flux de matière est fonction du gradient de concentration et du coefficient de diffusion. Ce coefficient est défini pour un élément donné

dans un minéral donné, à une température et pression donnés, et pour une composition chimique précise (c'est la loi de Fick) . Quand la température de cristallisation d'un minéral est si haute que la diffusion de l'isotope fils vers l'extérieur du grain (et de l'isotope père dans un sens ou l'autre) est aussi rapide que sa production, alors l'accumulation d'isotopes fils n'est plus représentative du temps écoulé. Dans ces conditions, le système est considéré comme « ouvert ». Quand la température chute, la vitesse (et le parcours moyen intégré) de diffusion vers l'extérieur diminue jusqu'à ce que la perte soit négligeable vis-à-vis de la production radiogénique. Le système est alors considéré comme « fermé ».

La température de fermeture correspond donc à la température en-dessous de laquelle les éléments chimiques ne peuvent plus diffuser vers l'extérieur du système et à partir de laquelle le rapport père-fils ne dépend plus que du temps écoulé. Une température de fermeture est valable pour un isotope donné dans une phase minérale donnée, mais dépend aussi d'autres paramètres (Dodson, 1973a). Elle s'exprime suivant la fonction mathématique itérative suivante :

$$T_f = \frac{E/R}{\ln \left( \frac{ART_f^2(D_0/a^2)}{EV} \right)} \quad (2.1)$$

où :

E est l'énergie d'activation (kJ/mol) associée au processus de diffusion

R est la constante des gaz parfaits (J/(K. mol))

$D_0$  est la constante préexponentielle de la loi d'Arrhenius (coefficient de diffusion à température infinie) ( $\text{cm}^2/\text{s}$ )

a est le rayon de diffusion, souvent assimilé à la taille de grain ( $\mu\text{m}$ )

V est la vitesse de refroidissement ( $^\circ\text{C}/\text{s}$ )

$T_f$  est la température de fermeture

A est un paramètre reflétant la géométrie des grains (sphère, disque ou cylindre)

Cette équation suppose que la perte des isotopes fils se fait exclusivement par diffusion volumique et que le milieu extérieur est un « puits infini », c'est-à-dire qu'il existe toujours un gradient de concentration entre le grain

et le milieu extérieur (où la concentration est considérée comme toujours nulle). La fermeture d'un système est en fait progressive, il existe une gamme de température où l'élément fils est partiellement retenu (zone de rétention partielle, ou "partial retention zone"). La figure 2.1.1 présente les différentes températures de fermeture classiquement admises pour les méthodes thermochronologiques les plus employées.

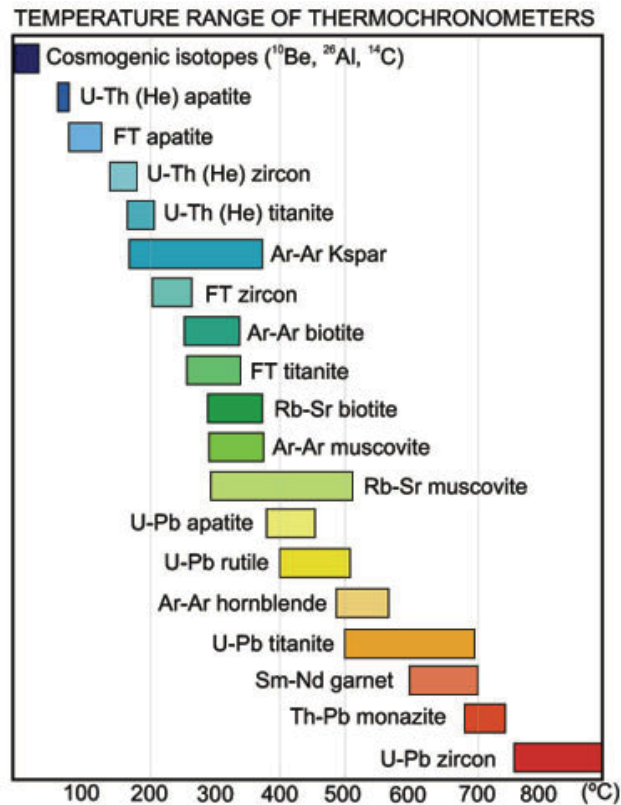


FIGURE 2.1.1 – Température de fermeture des principaux thermochronomètres

Dans le cadre de cette thèse, trois méthodes thermochronologiques ont été utilisées : U/Pb sur apatite et zircon, Ar/Ar sur muscovite, biotite et hornblende, et U-Th/He sur zircon afin de couvrir des températures allant de la cristallisation (U-Pb sur zircon) à des températures de refroidissement de moyenne température (Ar/Ar et U/Pb sur apatite) à des températures plus basses (U-Th/He sur zircon). La température de fermeture du système U-Pb dans les zircons est si haute (Rubatto) que les âges U-Pb sont considérés

soit comme des âges de cristallisation ou de recristallisation. À l'inverse, la température de fermeture du système U/Pb pour l'apatite est comprise entre 425°C et 500 °C pour des vitesses de refroidissement de 2 à 100°C/Ma (et un rayon de diffusion de 25µm, (Chamberlain et Bowring, 2000)).

En effet, la température n'est pas le seul facteur qui influence la fermeture ou l'ouverture du système isotopique. De nombreux facteurs font varier la diffusion et donc la  $T_f$ . Certains sont pris en compte dans l'équation de Dodson : vitesse de refroidissement : un refroidissement lent se traduisant par une température de déformation plus basse ; la taille de grain : des grains plus petits se "ferment" à plus basse température, la diffusion y étant plus "facile". D'autres paramètres ne sont pas pris en compte dans le modèle de Dodson : la composition chimique des minéraux, la présence d'inclusions, l'état du réseau cristallin (clivages, défauts par radiation/déformation) en ce qui concerne le minéral lui-même. D'autres facteurs externes rentrent en jeu également : la déformation, et les transferts de fluides dans la roche, qui peuvent tous deux modifier les distances effectives de diffusion. Cette notion de température de fermeture doit donc être appliquée avec prudence, notamment dans des contextes de métamorphisme où recristallisation déformation et transferts de fluides sont par définition concomittants.

## 2.2 Datation U-Pb

Parmi les nombreuses méthodes de datations disponibles, la méthode utilisant les deux couples uranium-plomb est couramment utilisée. C'est aussi la première à avoir été développée pour dater des minéraux très riches en uranium comme la pechblende et l'uraninite (Nier, 1939; Holmes et Lawson, 1927). Son intérêt principal réside dans les grandes demie-vies des isotopes pères (0.7038, 4.468 et 14.010 Ga pour  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$  et  $^{232}\text{Th}$  respectivement) de la filiation radioactive U→Pb qui permet de s'intéresser à des événements extrêmement vieux (Wilde *et al.*, 2001).

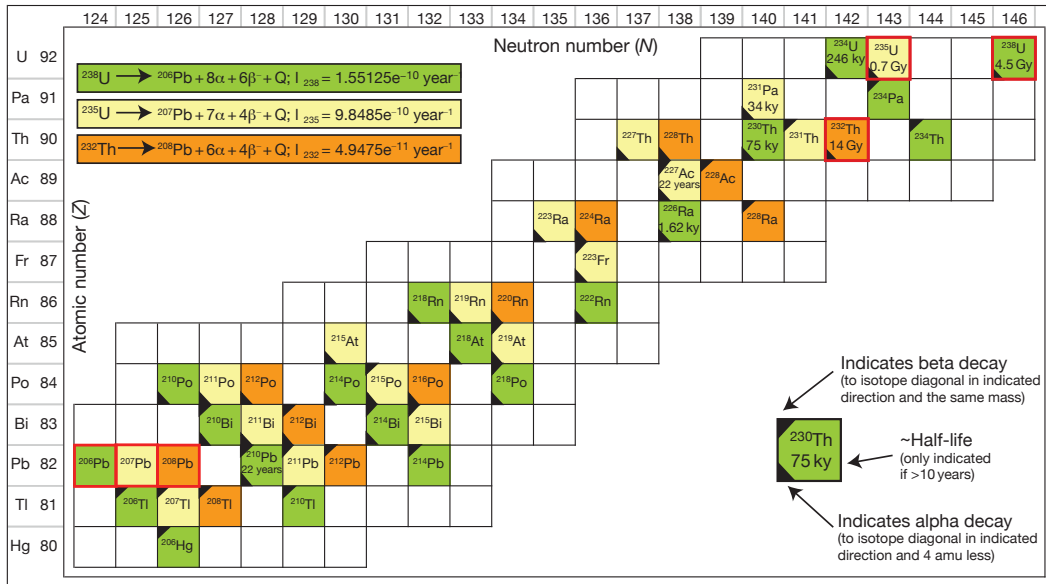


FIGURE 2.2.1 – Tableau représentant les différentes chaînes de désintégrations des isotopes U-Th-Pb, les équations-bilan de désintégration et les temps de demie-vie de chaque isotope. (Schoene, 2014)

## 2.2.1 Principe de datation

Le principe de datation du système uranium-thorium-plomb repose sur la désintégration de 3 éléments pères  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  et  $^{232}\text{Th}$  en trois éléments fils stables  $^{206}\text{Pb}$ ,  $^{207}\text{Pb}$  et  $^{208}\text{Pb}$ , respectivement. Aucun de ces trois isotopes pères ne se désintègrent directement en isotopes du plomb, mais en une suite de désintégrations  $\alpha$  ou  $\beta$  qui aboutit aux mêmes éléments fils (Fig. 2.2.1). Chaque couple a une demie-vie différente (Fig. 2.2.2), les trois constituant donc trois chronomètres indépendants. Au cours du temps, les quantités d'uranium et de thorium décroissent et la quantité de Pb augmente. De plus, la composition isotopique du Pb radiogénique varie également du fait que les constantes de désintégrations ne sont pas les mêmes (Fig. 2.2.2).

Trois équations d'âges peuvent donc être écrites pour calculer trois âges différents :

$$age\left(\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}\right) = \frac{\ln\left(\frac{^{206}\text{Pb}^*}{^{238}\text{U}} + 1\right)}{\lambda_{238}} \quad (2.2)$$

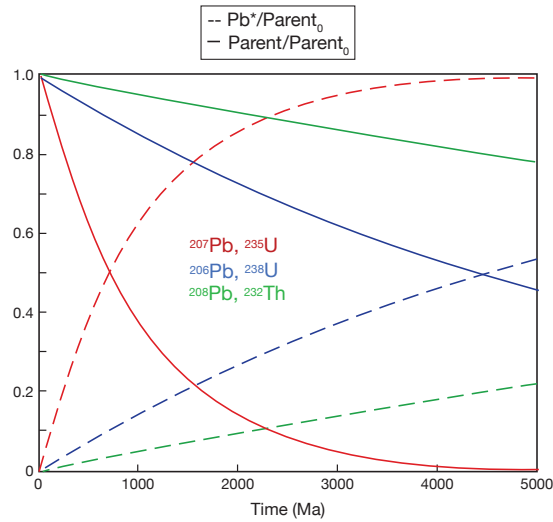


FIGURE 2.2.2 – Graphique illustrant les différents demies-vies des isotopes pères :  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  et  $^{232}\text{Th}$  ainsi que l'accumulation des isotopes fils  $^{206}\text{Pb}$ ,  $^{207}\text{Pb}$  et  $^{208}\text{Pb}$  (Schoene, 2014)

$$age\left(\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}\right) = \frac{\ln\left(\frac{^{207}\text{Pb}^*}{^{235}\text{U}} + 1\right)}{\lambda_{235}} \quad (2.3)$$

$$age\left(\frac{^{208}\text{Pb}}{^{232}\text{Th}}\right) = \frac{\ln\left(\frac{^{208}\text{Pb}^*}{^{232}\text{Th}} + 1\right)}{\lambda_{232}} \quad (2.4)$$

Où les isotopes labellisés (\*) représentent les isotopes radiogéniques respectifs de chaque chaîne de désintégration. Un rapport élémentaire fils/père ne peut donc donner directement un âge que si la quantité de plomb présent avant la fermeture du système (appelé souvent plomb commun, ou plomb non-radiogénique) est négligeable ou corrigée devant la quantité de plomb produite par la désintégration.

Cette triple filiation U-Th-Pb constitue la force de cette méthode, car elle permet de vérifier la concordance ou non du système (minéral) daté.

## 2.2.2 Datation des zircons

Les zircons sont particulièrement propices à la datation par le système U-Pb car ce sont des minéraux accessoires présents dans beaucoup de lithologies

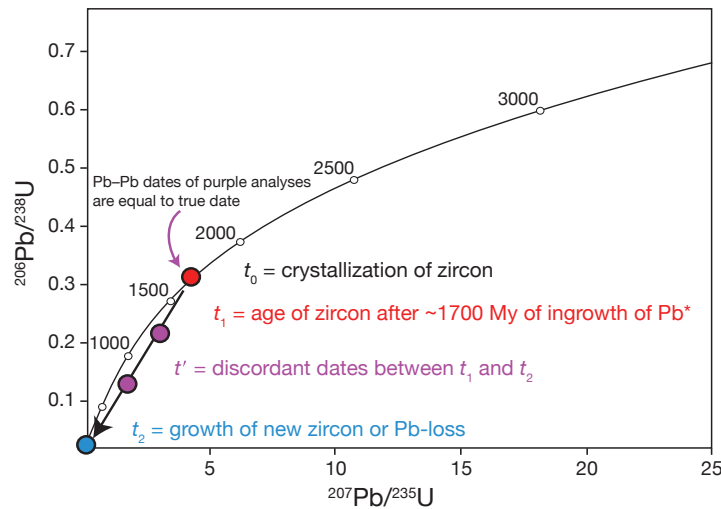


FIGURE 2.2.3 – Diagramme Concordia Wetherill représentant l'évolution hypothétique d'un zircon ayant cristallisé à 1700 Ma (le cercle rouge, intercept haut) et ayant subi une ouverture du système et une perte en plomb moderne (cercle bleu) (Schoene, 2014)

et avec des teneurs en uranium importantes et une teneur en plomb commun très faible, rendant les datations particulièrement faciles et robustes. De plus, la diffusion extrêmement réduite des isotopes concernés dans ce minéral rend possible une préservation d'évènements très anciens.

La visualisation des âges U-Pb se fait classiquement au moyen d'un graphique dit de Wetherill (Fig.2.2.3) qui permet de représenter les rapports isotopiques des deux couples U-Pb. La courbe concordia matérialise les points d'analyses donnant le même âge par les méthodes  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  et  $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$  (Fig. 2.2.3). Lorsque les rapports n'aboutissent pas à un point sur la concordia cela représente ou une ouverture du système ou une quantité de plomb initiale non-nulle, ce qui est considéré dans le cas des zircons comme dû à une contamination en laboratoire (Schoene, 2014). Une ouverture peut être liée à de nombreux processus thermiques comme le métamorphisme, un épisode magmatique, ou des circulations de fluides notamment, rendant la diffusion vers l'extérieur du minéral significative et entraînant une perte de plomb a priori de faible affinité pour le réseau cristallin du zircon. Si cette perte est totale, la mesure retombera à l'origine du diagramme concordia, si la perte n'est que partielle alors la mesure sera discordante. Dans le cas d'une perte

partielle les mesures s'aligneront sur une droite qui recoupera la concordia en deux points. Un intercept «haut» correspondant à l'âge de cristallisation et un intercept «bas» qui correspond à la dernière ouverture du système (Fig. 2.2.3). Sur la figure 2.2.3 est présenté un exemple de mesures concordantes : le cercle rouge, à  $t_1$  après environ 1700 Ma de fermeture du système et d'accumulation du Pb. Les cercles violets ( $t'$ ) représentent des mesures dans le cas où ce même grain est partiellement ouvert vers  $t_2$  (cercle bleu).

### 2.2.3 Datation des apatites

Même si les zircons sont de loin les minéraux les plus souvent datés en U-Pb, de plus en plus d'études s'intéressent aux apatites, mais aussi aux monazites, titanites, rutiles, xénotimes voire même à la calcite. Ces minéraux sont de structure cristalline très différente de celle du zircon et peuvent, notamment, incorporer une quantité non-négligeable de Pb commun lors de leur cristallisation.

L'apatite par exemple, peut accommoder dans son réseau cristallin du Pb<sup>2+</sup> par substitution avec le Ca<sup>2+</sup>. Le plomb ainsi incorporé dans le cristal aura la composition isotopique du plomb commun du protolite à l'âge de formation du minéral, incluant les 4 isotopes du plomb (<sup>204</sup>Pb, <sup>206</sup>Pb, <sup>207</sup>Pb et <sup>208</sup>Pb). Cette substitution implique qu'après un certain temps les isotopes sont présents dans le système cristallin sont un mélange des isotopes du plomb commun, et des isotopes radiogéniques issus de la désintégration radioactive.

Pour contourner ce problème de Pb initial, la manière classique de visualiser des âges U/Pb sur apatite est le diagramme Tera-Wasserburg avec <sup>207</sup>Pb/<sup>206</sup>Pb en ordonnée et <sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U en abscisse (Fig. 2.2.4). De la même manière que le diagramme Wetherhill, ce diagramme présente une concordia qui est le lieu de tous les âges concordants. Dans cette représentation, les rapports du Pb sont des rapports « bruts » sans correction du Pb initialement présent dans le minéral. De la même manière que dans la Fig. 2.2.3, l'intercept bas représente l'âge de la dernière ouverture du système, mais en revanche, l'intercept « haut » n'a pas de signification géochronologique particulière, et renvoie à des âges souvent très (trop) vieux. C'est, l'intercept de la droite de discordia définie par les mesures et l'axe des ordonnées qui a un



sens et représente le rapport initial du plomb commun :  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ . Plus un point d'analyse est proche de l'intercept haut et plus le grain analysé est riche en Pb commun.

La précision de l'intercept bas dans un diagramme TW est défini par la qualité de la régression des mesures, c'est à dire qu'il faut des mesures de grains ayant des quantités de Pb commun très différentes et un rapport isotopique initial commun pour bien contraindre la discordia et donc son intercept bas. Une autre manière de travailler avec des âges apatites est d'évaluer la quantité de Pb initial et de réaliser une correction des rapports élémentaires Pb/U pour obtenir les rapports "radiogéniques" des équations 2, 3 et 4.

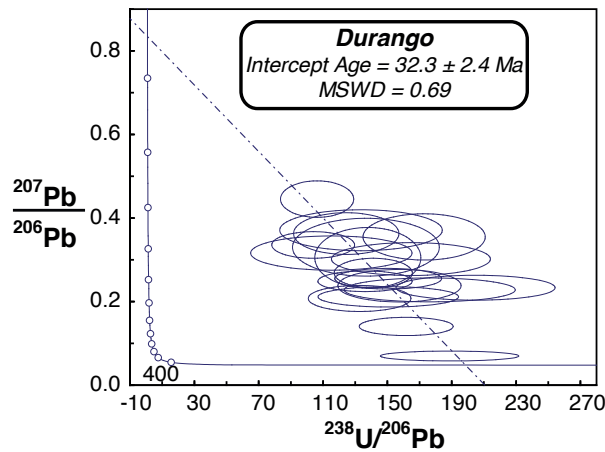


FIGURE 2.2.4 – diagramme Tera-Wasserburg d'un échantillon de Durango, souvent utilisé dans les analyses LA- ICPMS (Chew *et al.*, 2011a). Les analyses sont présentées sans correction de Pb commun dans un graphique  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  vs  $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$

## 2.2.4 Les différentes méthodes de correction du Pb commun

Plusieurs méthodes sont disponibles pour calculer des âges U-Pb sur apatite.

1- La première méthode est l'estimation des rapports isotopiques du Pb initial via une phase minérale ne produisant pas de Pb radiogénique. Les feldspaths sont souvent utilisés pour ainsi corriger les rapports isotopiques du Pb. On passe par la mesure de l'isotope 204 de plomb qui n'est pas radiogénique, et donc ne représente que la part de plomb commun (Chamberlain et Bowring, 2000). La correction utilise la mesure des rapports  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  dans les feldspaths qui est ensuite utilisée pour corriger la mesure dans l'apatite. Cependant cela suppose un équilibre isotopique entre l'apatite et l'autre phase ce qui n'est pas toujours évident dans des roches métamorphiques, et impossible dans les roches détritiques.

Pour faire ces corrections, il faut estimer la proportion de Pb commun dans l'apatite qui est souvent exprimée par la fraction  $f_{206}$  :

$$f_{206} = \frac{^{206}\text{Pb}_c}{^{206}\text{Pb}_{mes}} \quad (2.5)$$

où l'indice c renvoie au plomb commun et mes à la quantité totale, mesurée. Il est ensuite possible de calculer  $f_{206}$  avec les rapports  $(\frac{^{206}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}})_c$  et  $(\frac{^{206}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}})_{mes}$

$$f_{206} = \frac{(\frac{^{206}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}})_c}{(\frac{^{206}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}})_{mes}} \quad (2.6)$$

Et enfin d'exprimer le rapport U/Pb corrigé par :

$$\frac{^{206}\text{Pb}^*}{^{238}\text{U}} = (1 - f_{206}) \left( \frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}} \right)_{mes} \quad (2.7)$$

La correction par le  $^{204}\text{Pb}$  est de loin la plus satisfaisante de toutes puisqu'elle ne suppose pas la concordance des systèmes isotopiques. Cependant, il n'est pas toujours possible de mesurer de façon correcte cet isotope notamment lors d'analyses ICPMS in situ où les interférences avec le  $^{204}\text{Hg}$  sont non-négligeables. Une phase de chimie seule peut supprimer ces interférences (ID-MC-ICPMS).

Dans ces cas, deux autres corrections sont possibles : avec le  $^{208}\text{Pb}$  et le  $^{207}\text{Pb}$ . La correction du  $^{208}\text{Pb}$  est aussi basée sur le fait que tout l'excès de  $^{208}\text{Pb}$  ( $^{208}\text{Pb}_{mes} - ^{208}\text{Pb}^*$ ) est attribué au  $\text{Pb}_c$ . Dans ce cas, le rapport radiogé-

nique peut être estimé avec les mesures du Th et de U :

$$\frac{{}^{208}\text{Pb}^*}{{}^{206}\text{Pb}^*} = \frac{{}^{232}\text{Th}_{mes}(e^{\lambda_{232}t} - 1)}{{}^{238}\text{U}_{mes}(e^{\lambda_{238}t} - 1)} \quad (2.8)$$

Cette méthode de correction fonctionne particulièrement bien pour des rapports Th/U < 0,5 mais ne l'est pas quand il avoisine 7 puisque dans ce cas, le rapport  ${}^{208}\text{Pb}^* / {}^{206}\text{Pb}^*$  est proche de la valeur du Pb commun.

Enfin, il est possible de faire le même type de correction avec le  ${}^{207}\text{Pb}$ , ce qui est souvent le cas dans les datations à la microsonde. De la même manière, cela suppose que les systèmes U et Th soient concordants.

**2-** La deuxième méthode consiste en l'utilisation du diagramme Tera-Wasserburg. Lorsque les mesures sont réparties de manière linéaire, l'intercept de la droite de régression et de l'axe des ordonnées indique en théorie le rapport isotopique du  $\text{Pb}_c$  et la distance à cet intercept la quantité de  $\text{Pb}_c$  du grain ou spot analysé. Cela n'est vrai que si la seule source de discordance est la présence de  $\text{Pb}_c$ . La vérification a posteriori que le rapport isotopique du  $\text{Pb}_c$  est de l'ordre de grandeur de celui attendu est un argument en faveur de la signification effective de l'autre intercept en terme d'âge. Alternativement, il est possible d'ancrer la droite de régression à un certain rapport isotopique initial arbitraire, estimé soit par le modèle de Stacey et Kramers (1975) soit par la mesure d'une autre phase minérale. Cependant cela n'est possible en théorie, que si l'on prouve que cette phase et les apatites sont cogénétiques.

**3-** La correction avec le  ${}^{204}\text{Pb}$  : Puisqu'avec la SIMS il est possible de mesurer correctement le  ${}^{204}\text{Pb}$  dans chaque grain, il est possible de recalculer grain par grain la quantité de Pb radiogénique en soustrayant la quantité de  $\text{Pb}_c$ . Le processus est expliqué dans la figure 2.2.5. Pour calculer un âge  ${}^{206}\text{Pb}/{}^{238}\text{U}$  il est nécessaire de mesurer le rapport élémentaire  ${}^{206}\text{Pb}/{}^{238}\text{U}$  et le rapport isotopique  ${}^{204}\text{Pb}/{}^{206}\text{Pb}$ . La correction porte directement sur le rapport élémentaire.

Il est possible alors de manipuler les âges  ${}^{206}\text{Pb}/{}^{238}\text{U}$  corrigés et d'y décerner des populations à l'aide d'indicateurs statistiques tels que la "MSWD" ou le "probability of fit" et d'en faire ensuite les moyennes pondérées (Schneider

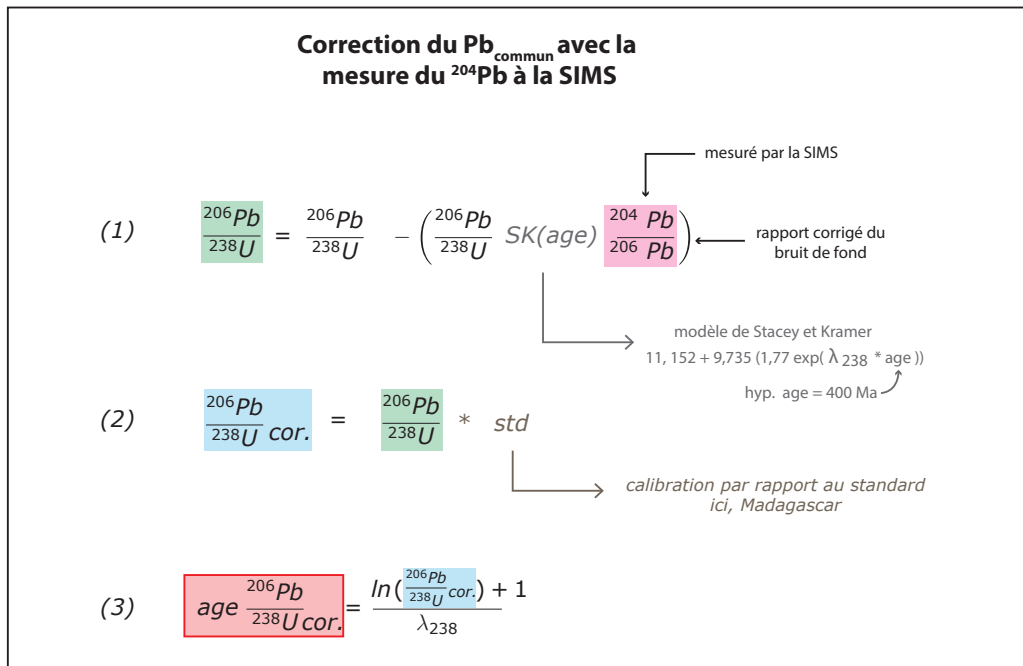


FIGURE 2.2.5 – Schéma explicatif de la méthode de correction de Pb commun effectué à la SIMS

et al., 2015).

### 2.2.5 Comparaison des méthodes de mesures

Il existe trois méthodes de mesures pour la datation U-Pb : ID-TIMS, SIMS et ICPMS. Toutes ces méthodes nécessitent une séparation des minéraux par densité et une séparation magnétique des échantillons pour ensuite sélectionner les grains d'intérêt et les monter dans une bague de résine (SIMS et LA -ICPMS) ou les dissoudre par une phase d'attaque chimique (ID-TIMS et plus rarement pour les zircons ID-ICPMS)

La **ID-TIMS** (Isotope-Dilution Thermal Ion Mass Spectrometry) : Cette méthode est la première à avoir été mise en place et la seule option disponible pendant de nombreuses années. La première étape après avoir sélectionné les minéraux consiste à réaliser une mise en solution des grains dans de l'HF ou de HCl et de rajouter un traceur de concentration connue (un "spike") pour

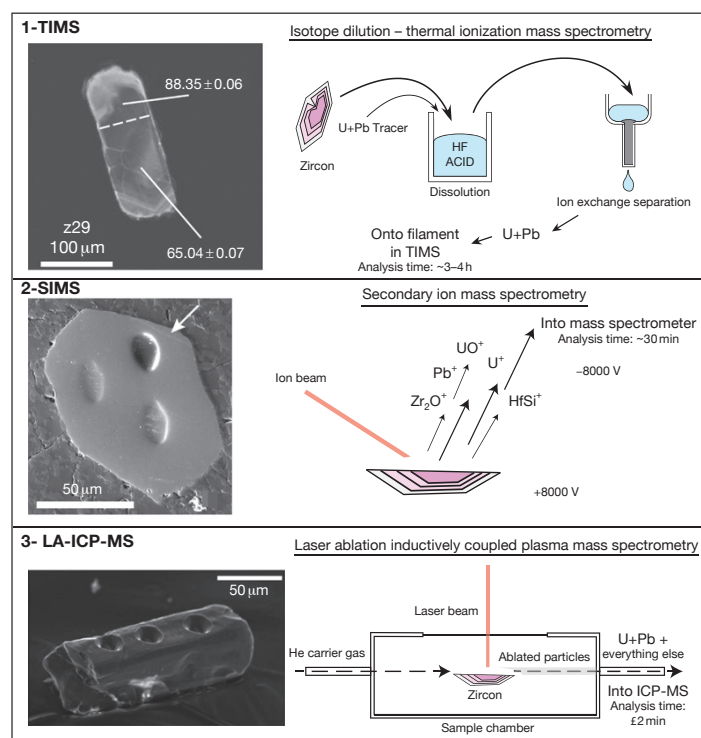


FIGURE 2.2.6 – Schéma explicatif et comparatif des différentes méthodes disponibles pour la géochronologie U-Pb. Les tailles de spots et les temps d'analyses sont aussi présentés (Schoene, 2014)

l'U et le Pb. Le traceur, permet de convertir les rapports des intensités mesurées par le spectromètre de masse en concentrations. L'U et Pb sont séparés par échange d'ions et mesurés séparément. L'échantillon est chargé sur un filament dans un spectromètre de masse et chauffé pour ioniser et analyser les isotopes. C'est de loin la méthode la plus précise pour les datations U-Pb ( $\sim 0,5\%$  de l'âge  $^{206}\text{Pb}$ - $^{238}\text{U}$ ) mais les temps de mesures sont longs (3-4 h) et il n'est pas possible de dater des échantillons qu'en moyennant l'âge de tous les zircons dissous. Seuls quelques cas particuliers spectaculaires ont permis de relier âges TIMS et textures (Schoene et Baxter, 2017). La seule manière de séparer les différentes phases de croissance d'un même zircon est d'abréger les zones externes (surcroissances) pour ne mesurer que l'âge des coeurs.

La **SIMS** (Secondary Ion Mass Spectrometer), développée à partir des années 1970, a la particularité d'analyser des portions extrêmement petites des

minéraux : les spots sont de 10 à 40  $\mu\text{m}$  de large et la profondeur de mesure est quasi nulle (quelques  $\mu\text{m}$ ). La matière ablatée par le faisceau d'ions primaires ( $\text{O}^+$  ou  $\text{O}_2^+$ ) est ionisée (plasma) et ensuite accélérée dans un spectromètre de masse. Cette méthode nécessite l'utilisation de standards de composition isotopique connue pour calibrer les rapports mesurés. Les standards doivent être d'un âge du même ordre de grandeur que celui des échantillons et de composition chimique la plus proche possible pour éviter les effets de matrice et être mesurés régulièrement au cours des sessions d'analyse pour corriger des dérives instrumentales. La résolution spatiale de ce type de mesure permet d'étudier des grains à la structure interne complexe, et également de dater les minéraux dans leur contexte textural (une lame mince peut être placée dans le porte échantillon). Les SIMS permettent d'obtenir des résolutions de masse très élevées (10 000) ce qui permet de séparer la plupart des interférences isobariques. Dans le cas des datations U-Pb, cette haute résolution permet notamment de séparer le  $^{204}\text{Pb}$  et le  $^{204}\text{Hg}$  et ainsi réaliser une correction du Pb initial. La précision des âges acquis par SIMS sont de l'ordre de 3% et le temps d'analyse est de l'ordre de 10 minutes pour un zircon et 30 minutes pour une apatite.

La méthode **LA-ICPMS** (Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry) développée dans les années 1990 a été rapidement très utilisée en raison de sa rapidité et de son faible coût (notamment par rapport à la SIMS). Dans cette méthode, un laser ablate un échantillon, puis les éléments vaporisés sont transportés par un flux de plasma porteur (souvent de l'He pour l'U-Pb). Un standard est également nécessaire pour faire le lien entre une composition isotopique connue et l'échantillon. Le temps d'analyse est de quelques dizaines de secondes. La grande différence avec la SIMS est la profondeur d'ablation de l'échantillon qui peut atteindre plusieurs dizaines de  $\mu\text{m}$ . Cela oblige à considérer d'éventuelles hétérogénéités dans le plan vertical des mesures, notamment dans le cas d'échantillons hétérogènes, mais permet aussi de faire des profils verticaux d'analyses. Il est aussi possible de faire des datations U-Th-Pb à la microsonde électronique, en analysant les compositions élémentaires et non isotopiques. Cette méthode a l'avantage d'une grande précision spatiale (taille du spot  $\sim 1\mu\text{m}$ ) mais cela suppose des

concentrations élevées en U des hypothèses fortes : concordance et absence de Pb commun. Cette méthode n'est en pratique mise en oeuvre que sur des monazites (Williams *et al.*, 1999).

## 2.3 Datation $^{40}\text{Ar} - ^{39}\text{Ar}$

### 2.3.1 Principe de datation

La méthode  $^{40}\text{Ar}^* / ^{39}\text{Ar}$  est issue de la datation K-Ar qui est fondée sur la désintégration du  $^{40}\text{K}$  en  $^{40}\text{Ca}$  (89,5% des désintégrations) et en  $^{39}\text{K}$  (11,5%) (Fig. 2.3.1). Ces techniques de datation sont couramment utilisées du fait de l'abondance de minéraux potassiques ; elles permettent une précision de l'ordre de 1%.

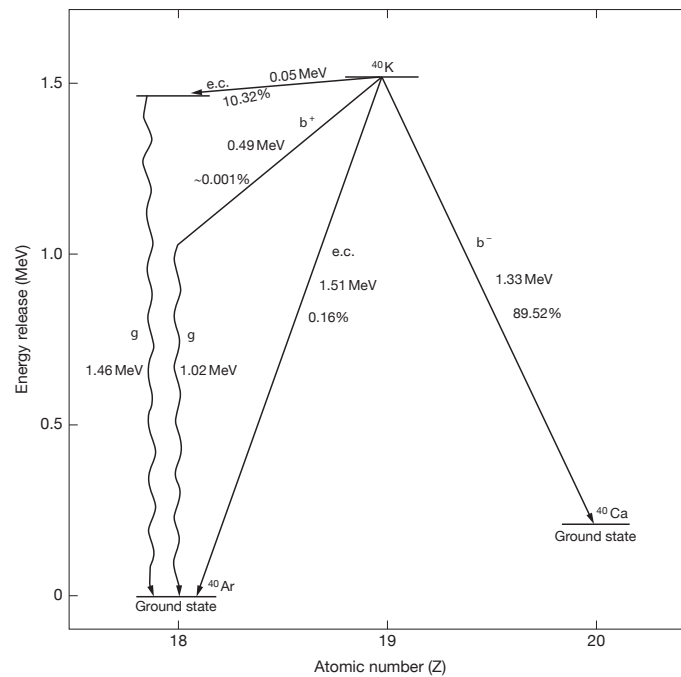


FIGURE 2.3.1 – Schémas de désintégration du  $^{40}\text{K}$  en  $^{40}\text{Ar}$  et  $^{40}\text{Ca}$ . (McDougall and Harrison 1999)

Cette méthode fut développée (Merrihue and Turner 1966) pour contourner le problème de la mesure séparée du K et de l'Ar. En effet, dans la datation K-Ar, les deux éléments sont mesurés sur deux aliquots différents,

ce qui engendre des problèmes si les échantillons ne sont pas homogènes. Dans la méthode  $^{40}\text{Ar}^*$ - $^{39}\text{Ar}$ , l'activation neutronique par irradiation dans un réacteur nucléaire transforme le  $^{39}\text{K}$  naturellement présent dans l'échantillon en  $^{39}\text{Ar}$ . Le rapport  $^{40}\text{K}/^{39}\text{K}$  étant constant (Humayun and Clayton 1995), le rapport isotopique  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  est représentatif de l'âge. L'estimation de la transformation induite est décrite par la formule suivante :

$$^{39}\text{Ar} = ^{39}\text{K} \Delta T \int \phi(\epsilon) \sigma(\epsilon) d(\epsilon) \quad (2.9)$$

où

- $^{39}\text{Ar}$  est le nombre d'atomes formés par irradiation
- $^{39}\text{K}$  est le nombre d'atomes dans l'échantillon irradié
- $\Delta T$  est le temps d'irradiation (adapté en fonction de l'âge de l'échantillon)
- $\phi(\epsilon)$  est la densité du flux neutronique à l'énergie  $\epsilon$
- $\sigma(\epsilon)$  la section efficace d'irradiation à l'énergie  $\epsilon$

Par ailleurs, la quantité d'isotope  $^{40}\text{Ar}^*$  radiogénique est obtenue par l'équation :

$$^{40}\text{Ar}^* = \frac{\lambda^{40}}{\lambda} K (\exp^{\lambda t} - 1) \quad (2.10)$$

Ce qui permet d'écrire en combinant les équations (2.9) et (2.10) :

$$\frac{^{40}\text{Ar}^*}{^{39}\text{Ar}} = \frac{e^{\lambda t} - 1}{J} \quad (2.11)$$

où

$$J = \frac{^{39}\text{K} \Delta t}{^{40}\text{K} \int \phi(\epsilon) \sigma(\epsilon) d(\epsilon)} \frac{\lambda}{\lambda} \quad (2.12)$$

$$t = \frac{1}{\lambda} \ln\left(\frac{^{40}\text{Ar}^*}{^{39}\text{Ar}} J + 1\right) \quad (2.13)$$

Plusieurs hypothèses sous-tendent ces équations :

- La teneur initiale en  $^{40}\text{Ar}$  est supposée nulle.
- Tout l'  $^{40}\text{K}^*$  est retenu dans le système et l'Ar mesuré n'a que deux origines possibles : radiogénique ( $^{40}\text{Ar}^*$ ) ou atmosphérique ( $^{40}\text{Ar}$  atmos).



- Tout l' $^{39}\text{Ar}$  est issu de la désintégration du  $^{40}\text{K}$
- La composition isotopique du potassium ( $\frac{^{39}\text{K}}{^{40}\text{K}}$ ) est la même quel que soit le système étudié et n'a changé depuis la cristallisation (sauf qu'à cause de la désintégration du  $^{40}\text{K}$ )

### 2.3.2 Datation par paliers, "Step Heating"

L'intérêt principal de cette méthode est qu'elle permet un dégazage progressif de l'argon du minéral, par opposition à la méthode K-Ar qui procède à la fusion totale de l'échantillon. La fraction d'échantillon est ainsi chauffée par étapes à des températures croissantes, libérant son argon au fur et à mesure de la chauffe. Chaque mesure représente un palier de température, le dernier palier correspondant à la fusion totale de l'échantillon. Ces données sont représentées sous forme d'un spectre d'âges (Fig. 2.3.2) où chaque rectangle représente l'âge apparent en fonction de la fraction de gaz libérée à chaque étape.

La séquence concordante des spectres (homogènes, avec des paliers de même âge apparent) est classiquement interprétée comme un indice de distribution homogène d' $^{40}\text{Ar}^*$  dans le grain : elle permet de calculer un âge « plateau » (Fig. 2.3.2A). À l'inverse, les spectres d'âges discordants signalent une distribution hétérogène de l'argon dans l'échantillon, due à une (ou plusieurs) perturbation(s) du système (Fig. 2.3.2B et C). En première approximation, l'allure des spectres est communément supposée refléter la répartition spatiale de l'argon dans le grain (des bordures vers le coeur du cristal, mais c'est loin d'être le cas des minéraux hydroxylés (McDougall, I & Harrison, 1988) et le lien entre géométrie des spectres et la localisation intracristalline de l'argon reste un sujet controversé.

Un âge total est obtenu en sommant toutes les fractions de gaz libéré et est théoriquement l'équivalent de l'âge K-Ar (Total Gas Age, TGA).

**L'excès d'argon** La méthode  $\frac{^{40}\text{Ar}}{^{39}\text{Ar}}$  se fonde sur l'hypothèse que la concentration d'argon radiogénique initial est nulle, ce qui n'est pas garanti. En effet, l' $^{40}\text{Ar}$  est présent en quantité de trace dans toutes les roches et minéraux potassiques à tous les niveaux de la croûte et celui-ci peut être remobilisé

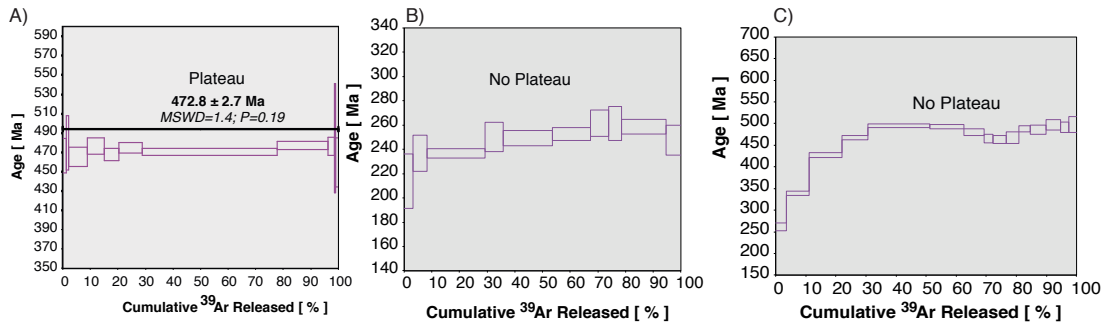


FIGURE 2.3.2 – Exemples de spectre d'âge par dégazage progressif. A) exemple d'âge plateau, B) et C) exemple de motif de dégazage ne permettant pas de calcul d'âge plateau (d'après Hansma *et al.* (2016))

(libéré) par l'ouverture de ces systèmes pour venir contaminer d'autres minéraux susceptibles de l'incorporer. Ceci constitue les cas d'excès d'argon donnant des âges apparents supérieurs à l'âge réel de l'échantillon.

Si la source est externe, comme la circulation de fluide riche en <sup>40</sup>Ar alors on parle d'excès d'argon *stricto sensu* (excess argon en anglais). Dans ce cas le système isotopique est considéré comme ouvert. Souvent, lorsque un cas d'excès d'argon se produit, la valeur  $\frac{40\text{Ar}^*}{36\text{Ar}}$  est corrigée avec le rapport  $\frac{40\text{Ar}}{36\text{Ar}}$  ( $\frac{40\text{Ar}^*}{36\text{Ar}} = 295,5$  (Steiger et Jager, 1977)). Cependant, corriger de ce rapport implique que les fluides métamorphiques avec lesquels les grains s'équilibrent possède le même rapport. De plus cela suppose que l'excès d'argon est reparti de manière homogène dans le grain et libéré de manière homogène dans tous les steps.

La forme des spectres d'âges peut être également diagnostique d'excès d'argon. Les premiers paliers, à basse température, peuvent provoquer le décrépitement des fluides et phases hydratées occlus et porteurs d'argon non-radiogénique et non atmosphérique. Cela aura pour conséquence de produire des âges anormalement vieux au début du dégazage. Une autre forme caractéristique associée à de l'excès d'argon est le spectre en "U" (Fig. 2.3.3), avec des âges initiaux plus vieux, un bas de selle approchant l'âge réel de l'échantillon, puis des âges progressivement plus vieux à nouveau. Cette forme est possiblement causée par la libération aux basses températures d'inclusions de fluides et aux hautes températures d'inclusions vitreuses ou d'inclusions

solides (Boven *et al.*, 2001; Harrison *et al.*, 1994) ou plus simplement par le dégazage différentiel de deux phases d'âges différents. Dans le cas d'un excès d'argon, les âges ne peuvent donc pas être interprétés comme des âges géologiquement significatifs.

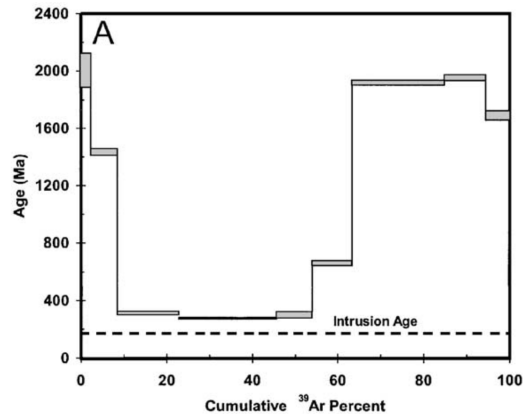


FIGURE 2.3.3 – Exemple de spectre en U de « step-heating » qui montre un excès d'argon (d'après Lanphere and Dalrymple 1976)

**Température de fermeture et température de cristallisation :** La température de fermeture du système K-Ar dans les **muscovites** a été historiquement calibré par rapport au grade métamorphique autour de  $T_f = 350^\circ\text{C}$  (Hodges 1991). Cependant des études expérimentales ont tenté d'estimer les paramètres de diffusion des muscovites afin de déduire la température de blocage  $T_f$  plus rigoureusement. La figure 2.3.4 montre comment la température de fermeture varie avec la taille de grain, les grains les plus petits possédant des température de fermeture plus basses que les grands (Fig. 2.3.4). Pour une taille de grain de  $100\mu\text{m}$ , et une vitesse de refroidissement de  $100^\circ\text{C}/\text{Ma}$  alors la  $T_f$  est de  $425^\circ\text{C}$ . Cependant, cette estimation de  $T_f$  est réalisée avec une géométrie de diffusion supposée sphérique. D'autres études suggèrent que la géométrie sphérique n'est pas forcément pertinente pour la muscovite et suggèrent un modèle cylindrique (Mark Harrison *et al.*, 1985)

Par ailleurs, cela suppose aussi que l'Ar dégaze de la même manière dans le vide (pendant la mesure) que dans la nature.

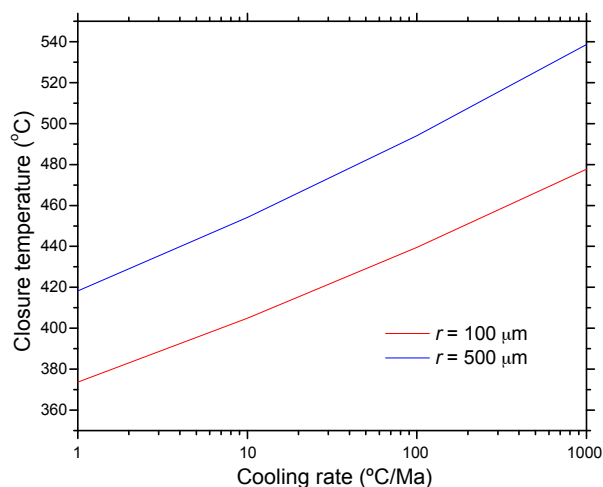


FIGURE 2.3.4 – Variation de la température de fermeture en fonction de la vitesse de refroidissement et la taille du domaine de diffusion à 5 kbars ( $E=64$  kcal/mol et  $D_0 = 20\text{cm}^2/\text{s}$  (Harrison et al. 2009))

Les muscovites étant présentes dans de nombreux contextes géologique et dans des grandes gammes de conditions P-T, la question de ce que représente la fermeture du système isotopique dans le chemin P-T se pose. Si les muscovites cristallisent à des températures plus hautes que la température de  $T_f$ , alors la fermeture du système représente un âge de refroidissement (Goodenough *et al.*, 2011). À l'inverse, dans des situations de déformation intenses, qui entraînent une recristallisation du minéral ou du moins une ouverture isotopique, l'âge enregistré sera un âge interprété comme de la néo-cristallisation (Villa, 2016; Uunk *et al.*, 2018)).

La température de fermeture dans les **biotites** est estimée de la même façon entre 350°C et 400°C Les paramètres influençant cette température sont : le  $X_{Mg}$ , les sites de localisation de l'Al (IV) et la quantité d'halogènes. Evidemment, les paramètres externes qui influencent la  $T_f$  de la muscovite influencent aussi celle de la biotite (vitesse de refroidissement, fluides ...)

La température de fermeture dans les **amphiboles** a été étudiée dans deux travaux importants (Mark Harrison, 1981; Dahl, 1996). Ces deux études ont montré que les températures de fermeture étaient comprises entre 580°C et 480 °C pour des tailles de grain de 40μm et 80 μm et des vitesses de refroidissement allant de 1000°C/ Ma à 5 °C/ Ma. Il est aussi montré que la

température de fermeture n'est pas dépendante du rapport Fe/Mg dans le minéral (Mark Harrison, 1981).

Il apparaît donc que, toute chose étant égale par ailleurs, les températures de fermetures sont décroissantes des amphiboles aux micas (muscovite puis biotite) (Fig. 2.1.1).

**Déformation et température de fermeture** La déformation joue un rôle important dans l'ouverture potentielle du système isotopique. La déformation provoque des changements majeurs dans le réseau cristallin en générant des dommages et des défauts dans les mailles. Cela a pour conséquence de favoriser la diffusion. De plus, la déformation peut être associée à la réduction de la taille des grains, favorisant aussi la diffusion. Par ailleurs, la déformation peut favoriser la cinétique de recristallisation des minéraux et donc un réajustement isotopique. Il existe des exemples où des zones de déformations intenses sont totalement remises à zéro (Mulch, 2004). Enfin, la déformation peut favoriser la circulation des fluides dans la roche à toutes les échelles.

### 2.3.3 Processus d'acquisition des données

Toutes les datations Ar-Ar de cette thèse ont été réalisées dans le laboratoire de l'ISTO d'Orléans.

Les échantillons, une fois broyés, tamisés et nettoyés à l'éthanol et à l'acide nitrique (5%) ont été séchés et les grains d'intérêt sélectionnés à la main. Ils sont ensuite pesés et emballés dans des petits paniers de papier aluminium et placés les uns sur les autres dans une navette. Au sein de cette navette, un lot de standard de sanidine (Fish Canyon) est intercalé tous les 5 échantillons afin de mesurer le paramètre d'irradiation  $J$  le long de la colonne d'irradiation et d'interpoler la valeur spécifique à chaque échantillon. Les échantillons ont été irradiés à CLICIT (OSU, Corvallis) pendant 10 heures.

Les échantillons sont ensuite chargés dans un porte-échantillons et placés dans un hublot connecté à la ligne d'extraction. La ligne, ayant été ouverte pour placer le porte-échantillons, est étuvée à 180 ° pendant 48 heures afin d'éliminer la contamination atmosphérique piégée sur les surfaces. Le déga-

zage est effectué au moyen d'un laser CO<sub>2</sub>. Le gaz extrait est ensuite purifié pendant 6 min grâce à deux pièges. Le premier est un "piège froid" qui consiste à refroidir le gaz en plaçant un mélange d'éthanol et d'azote autour de la ligne. Le deuxième piège est une série de deux getters (SAES Getters C50-st101). Les différents isotopes (<sup>36</sup>Ar, <sup>37</sup>Ar, <sup>38</sup>Ar, <sup>39</sup>Ar, <sup>40</sup>Ar) sont mesurés via un multiplicateur d'électrons, sur 10 cycles. Entre chaque palier, un blanc est fait pour mesurer le bruit de fond et en corriger la contribution sur les différents isotopes au cours de la session journalière.

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

### 2.4.1 Principes de datation

La méthode de datation (U-Th-Sm)/He est basée sur la production de <sup>4</sup>He par les chaînes de désintégration de l' U, Th et Sm. Les atomes d'hélium sont intégrés au réseau cristallin et l'âge hélium correspond alors à l'équilibre entre sa production, sa rétention dans le système et sa perte par diffusion et éjection sur les bordures.

4 équations décrivent cette production de particules  $\alpha$ .

$${}^{238}\text{U} = {}^{206}\text{Pb} + 8\alpha + 4\beta \quad (2.14)$$

$${}^{235}\text{U} = {}^{207}\text{Pb} + 7\alpha + 4\beta \quad (2.15)$$

$${}^{232}\text{Th} = {}^{208}\text{Pb} + 6\alpha + 4\beta \quad (2.16)$$

$${}^{147}\text{Sm} = {}^{143}\text{Nd} + \alpha \quad (2.17)$$

Avec ces 4 équations il est alors possible d'écrire une équation liant la production totale d'He et la quantité d'éléments pères :

$${}^4\text{He} = 8 * {}^{238}\text{U}(\exp(\lambda_{238}t) + 1) + 7 * {}^{235}\text{U}(\exp(\lambda_{235}t) + 1) + 6 * {}^{232}\text{Th}(\exp(\lambda_{232}t) + 1) + {}^{147}\text{Sm}(\exp(\lambda_{147}t) + 1) \quad (2.18)$$

Où  $\lambda$  représente la constante de désintégration  $\alpha$  et  ${}^{238}\text{U}$ ,  ${}^{235}\text{U}$ ,  ${}^{232}\text{Th}$ ,  ${}^{147}\text{Sm}$  représentent les quantités mesurées des isotopes. L'hypothèse de base est encore que la quantité de  ${}^4\text{He}$  est nulle au temps initial. Il est donc possible de calculer la contribution de chaque isotope à la production d'He. Cette valeur est définie par  $eU$  :

$$eU = U + 0,24Th + 0,008Sm$$

$eU$  est appelée « quantité d'uranium efficace » et les coefficients (1, 0,24 et 0,008) sont fonction de la quantité d'éléments pères et des constantes de désintégration. Cette valeur permet d'estimer la qualité du réseau cristallin et d'ainsi mieux estimer la diffusion. En effet, si  $eU$  est trop grand, les nombreuses désintégrations affaiblissent le réseau et influencent fortement la rétention d'He (Gautheron et al. 2003, Flowers et al. 2003). Alternativement, si  $eU$  est trop faible, la valeur d'He sera trop faible pour être correctement mesurée.

Deux méthodes sont possibles pour réaliser ces mesures : la méthode dite conventionnelle et la méthode in situ. La méthode conventionnelle implique de monter des grains dans des capsules en platine après avoir mesuré leurs caractéristiques géométriques (longueurs, largeurs, nombre de « pointes » des zircons). Les capsules sont ensuite placées dans un creuset et le gaz est extrait par chauffage laser jusqu'à des températures de  $\sim 1500^\circ\text{C}$ . (par un laser diode à 980 nm). Ensuite, le gaz est purifié dans la ligne grâce à deux pièges (charbon et getter) avant d'être introduit dans le spectromètre. Les pièges permettent de séparer les oxydes, l'argon et l'eau ainsi que l'hydrogène et hydrocarbures de l'He. Une fois la mesure de l'He faite par le spectromètre de masse et les caractéristiques du minéral connues, il est possible de calculer une concentration en He (mol/g)

Pour mesurer les quantités de U, Th et Sm, les capsules sont ouvertes et les zircons sont fondus (avec l'aide de solvant ( $B(OH)_3$ ), les zircons sont chauffés à  $990^\circ\text{C}$  pendant 1h). Les « perles » formées par la fusion sont ensuite

passées à l'ICPMS ; les valeurs obtenues sont corrigées à l'aide de standards pour être converties en ppm pour chaque grain.

La méthode in situ implique un montage différents des grains. Dans ce cas, les grains sont montés dans du Telfon et les mesures sont réalisées par ablation laser. Dans un premier temps l'He est mesuré, avec des tailles de spot d'environ  $20\mu\text{m}$ . Dans un deuxième temps, les isotopes pères sont mesurés, au même endroit par ablation laser ICPMS. La taille du spot de la seconde mesure est d'environ  $60\mu\text{m}$ . (Ternois et al. in prep). Cette technique nécessite également l'estimation du volume ablaté.

L'ensemble de ces mesures ont été réalisées au CRPG de Nancy. Les deux méthodes devaient être réalisées mais à cause de complications techniques seulement la méthode conventionnelle a pu être réalisées avec l'aide Bouchaïb Tibari.

## 2.4.2 Température de fermeture du système U-Th/He dans les zircons

La température de fermeture de ce système dans les zircons est comprise entre  $170\text{ }^{\circ}\text{C}$  et  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Reiners *et al.*, 2004).

Dans cette méthode la taille des grains datés est primordiale. En effet, les désintégrations des éléments pères relâchent de fortes quantités d'énergie qui se répartit entre la particule  $\alpha$  et l'élément lourd restant. Puisque la particule  $\alpha$  est bien plus légère une fois l'énergie convertie en énergie cinétique, la distance parcourue par ces particules est de l'ordre de  $20\mu\text{m}$  (Ketcham *et al.*, 2011). Plus la taille du grain est grande, plus il y a de particules  $\alpha$  retenues et donc plus la correction de l'éjection  $\alpha$  sera petite. De plus la taille du grain est souvent associée à la taille du domaine de diffusion même si de nombreuses études expérimentales proposent plutôt de parler de « domaine de diffusion efficace » souvent plus petit que la taille du grain. Plus le domaine de diffusion est petit, plus la température de fermeture du système sera haute.



## 2.5 Thermométrie Raman sur matière organique

**Principe de la méthode** La spectroscopie Raman est une technique basée sur l'étude de l'organisation de la matière carbonée. En effet, les roches sédimentaires peuvent contenir une proportion non-négligeable de matière carbonée. Avec l'augmentation de la température, cette matière carbonée va progressivement s'organiser en graphite, et cette technique repose sur l'évaluation du taux de graphitisation atteint. Cette altération de la structure de la matière organique est irréversible, elle permet d'obtenir des informations sur la température maximale atteinte d'un échantillon.

Le spectre Raman de la matière organique est caractérisé par deux groupes de bandes :  $1100\text{-}1800\text{ cm}^{-1}$  et  $2500\text{-}3100\text{ cm}^{-1}$ .

L'aire relative des pics est représentative du degré d'organisation de la matière carbonée. Le calcul de la température se fait via le rapport d'aires entre les différentes bandes. Deux calibrations sont disponibles, une pour les hautes températures (entre  $330\text{ °C}$  et  $650\text{ °C}$ ) et une pour les basses températures (entre  $220\text{ °C}$  et  $350\text{ °C}$ ) (Beyssac *et al.*, 2002; Lahfid *et al.*, 2010)

Les mesures ont été réalisées dans le laboratoire IMPMC à l'université Pierre et Marie Curie. 10 à 15 spectres sont généralement nécessaires par échantillon. La mesure a toujours lieu sur de la matière organique localisée sous un grain transparent. En effet, puisque le polissage de la lame déforme localement les minéraux, il ne faut pas que ces modifications du réseau soient prises en compte pour la mesure de la graphitisation.

Le traitement des données consiste en un ajustement des différents paramètres (par des courbes de Voigt ou de Lorentz) théoriques aux spectres acquis, après une correction de la ligne de base. Cela permet ensuite de calculer les aires des différentes bandes. L'incertitude sur les températures est de l'ordre de  $50\text{ °C}$ .

## Chapitre 3

# U-Pb in situ dating (SIMS) of apatites as constrains on the thermal evolution of the Scottish Caledonides

**U-Pb in situ dating (SIMS) of apatites as constrains on the thermal evolution of the Scottish Caledonides**

Ella Jewison<sup>1</sup>, Etienne Deloule<sup>2</sup>, Nicolas Bellahsen<sup>1</sup>, Loïc Labrousse<sup>1</sup>, Claudio Rosenberg<sup>1</sup>, Johan Villeneuve<sup>2</sup>, Raphaël Pik<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Sorbonne Université, CNRS-INSU, Institut des Sciences de la Terre Paris, ITeP UMR 7193, F-75005 Paris, France.

<sup>2</sup> Centre de Recherches Pétrographiques et Géochimiques, Université de Lorraine, CNRS, Vandoeuvre-lès-Nancy, France

**Abstract** The Highlands region in north Scotland is part of a collisional system built during the closure of the Iapetus ocean during Ordovician to Silurian times. In north Scotland, this Scandian collision stage is responsible for the metamorphism and deformation imprint visible today. Despite drawing a collisional wedge largely studied, the detailed deformation sequence

is still unknown and the complex thermal history suffers from lack of data at mid-crustal temperature. Indeed, the wedge is well documented for thermochronological and geochronological systems recording peak metamorphic conditions (U-Pb on zircon and monazite) but there is a lack of data near 500°C, the temperature at which deformation occurred. Apatite which is quite common in most of the metamorphic and magmatic rocks appears to be a relevant candidate with its U-Pb temperature closure around 425°C. Unfortunately, the apatite structure can accommodate a significant amount of common lead, not estimated in ICP-MS dating technique, leading to high uncertainty. The innovative SIMS approach used in this study allows a direct in-situ and precise estimate of the  $^{204}\text{Pb}$  isotope concentration. We present here apatite U-Pb ages that are corrected from common lead using the  $^{204}\text{Pb}$  correction. We show that analysis of corrected ages populations yields age estimates with a lower uncertainty and an assessed statistical meaning more reliable than bulk use of non-corrected ratio in the usual Tera-Wasserburg discordia plot. Apatite ages are then discussed in terms of wedge building sequence in the Scottish Caledonides. The apatite data shows a regional cooling event around 410 Ma across the wedge, which suggest that thrusts mapped within the Moine thrust hanging-wall are inherited from high grade conditions early within or prior to the eventual Scandian syn-convergence exhumation stage.

Keywords : U-Pb dating, apatite, SIMS, Scottish Caledonides, Moine thrust belt

### 3.1 Introduction

To unravel the mechanics of orogenic wedges and the crustal rheology it implies, the most precise knowledge of their structural and thermal long-term evolution is necessary. The pressure-temperature-time (P-T-t) paths of different units in collisional wedges provide their burial and exhumation rates but also some constraints on localization processes, duration and rates of shortening accommodated by the main thrusts. To precisely constrain the thermal history of tectonic units, several geo-thermochronometers al-

low for a complete documentation, from high (potentially up to 800 °C) to low temperature stages (less than 200 °C), with U/Pb dating on zircons and low temperature thermochronology, respectively. Between those extrema,  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  dating on various minerals is among the most popular methods, although there is ongoing debate on the behaviour of argon along metamorphic pressure-temperature-strain-fluid paths (Villa, 2016). U/Pb techniques have thus been developed for other minerals than zircons : it is now commonly reported that U/Pb system has a closure temperature close to 600°C in titanite and close to 450°C in apatite (Cherniak *et al.*, 1991; Chamberlain et Bowring, 2000). Those thermochronometers can thus provide valuable information for the thermal history through those temperatures, typical of the amphibolite facies prevailing in the inner core of orogens. Collisional deformation developed in these amphibolite facies conditions can be found in the Scottish Caledonides where the structure of the Silurian Scandian orogen is particularly well mapped (British Geological Survey, 1966). There, the rocks experienced a thermal peak around 500°C to 700°C (Ashley *et al.*, 2015) before being exhumed in an overall transpressional nappe stack (e.g., Dallmeyer *et al.* (2001)) the precise timing and rates of exhumation are poorly constrained due to uncomplete dataset. In this contribution, we present new U/Pb ages on apatites from different levels within the nappe stack. U/Pb dating on apatite, an accessory but common mineral in a great variety of rocks (igneous, metamorphic and sedimentary), is now used as a thermochronometer (Mark *et al.*, 2016) but also as a source tracker in detrital basins (O’Sullivan *et al.*, 2018). Dating is so far carried out either on LA-ICP-MS (Chew *et al.*, 2011b) or TIMS (Cochrane et al. 2014). However, apatite can incorporate a significant amount of common lead in its structure, and the proportion of common lead compared to radiogenic lead is rarely measured, yet significant source of uncertainty. Indeed, the  $^{204}\text{Pb}$  isotope, the only non-radiogenic lead isotope, is poorly estimated on LA-ICP-MS because of mass interferences. In contrast, SIMS dating, thanks to the development of the large radius ion microprobe providing high sensitivity at high mass resolution can accurately measure  $^{204}\text{Pb}$ , and hence provide a  $^{204}\text{Pb}$  corrected age. This appears relevant for unravelling temperature-time evolutions of polymetamorphic terranes, such as the Northern Highlands, where successive orogenic stages (grampian and

scandian) are expected to produce close age populations in geochronological record. Here, we present new U/Pb ages on apatite derived from SIMS analyses, aiming at distinguishing the latest significant pulse undergone by the Caledonian nappe stack and exhibit the impact of common lead on age estimates.

## 3.2 Geological setting

The Northern Highlands (Fig. 1) are part of an extensively studied Caledonian collisional orogen that resulted from the closure of the Iapetus Ocean during the Ordovician-Silurian Caledonian orogeny. In the Highlands, which form the retro-wedge of the orogen, two major tectonic phases are classically described : the Grampian phase (480-440 Ma) and the Scandian phase (430-400 Ma) that culminated in the stacking of metamorphic nappes (Moine, Ben Hope, Naver, Skinsdale, Fig. 1) over Lewisian autochthonous crust (Barr *et al.*, 1986). Those nappes are composed of basement inliers topped by 3 lithostratigraphical metasedimentary units : Morar, Glenfinnan and Loch Eil units that form the Moine supergroup (Holdsworth, 1994). The basement inliers are found in two structural positions : as allochthonous sheets above major ductile thrusts and in the core of large recumbent folds (Strachan and Holdsworth 1988). The nappe stack displays a structurally inverted metamorphic gradient, from greenschist in the frontal thrust zone to upper-amphibolite in the uppermost Naver nappe (Barr *et al.*, 1986) (Fig. 1). The Moine and Ben Hope nappes (Fig. 1) are dominated by psammite deformed in the subsolidus domain whereas rocks in the Naver nappe display evidence of partial melting (Kinny *et al.*, 1999a). Most of the deformation visible in the Highlands is supposed to be Scandian in age (Strachan et Holdsworth, 1988), and has largely obliterated the original structural relationship between the Lewisian basement rocks and the Moine supergroup (Strachan et Holdsworth, 1988). Rocks from the Moine and the Ben Hope units display a poly-deformation history. D1 deformations is defined by weak, N to NNE-trending mineral lineation (Alsop *et al.*, 2010) and bedding-parallel foliation. This stage is “tentatively” associated to the pre-Caledonian Knoydartian event (Alsop *et al.*, 2010; Rogers *et al.*, 1998). Scandian D2 deformation is the most penetrative

phase and resulted in the development of tight to isoclinal folds (F2) and a pervasive sub-horizontal foliation (S2) that intensifies toward the belts of mylonites associated with D2 ductile thrusts (Alsop *et al.*, 2010; Strachan *et al.*, 2010). D2 is also marked by a pronounced mineral stretching lineation that swings from gently ESE-plunging in the west adjacent to the Moine to SSE-plunging in the east near the Naver thrust (Alsop *et al.*, 2010). This lineation defines the thrust transport direction towards NNW to WNW. This stage culminated in the emplacement of the Moine nappe onto the Laurentian foreland along the Moine Thrust Zone (Fig. 1). A third set of late structures composed of F3 folds with vertical axial surface has been described (Alsop *et al.*, 2010).

The time constraints on Scandian deformation rely mainly on ages from the deformed granites and syenites in the nappe stack. In the Naver nappe, U-Pb dating on zircons from the Ben Kilbreck granite and the Strathnaver granite yield ages at  $420 \pm 6$  Ma and  $429 \pm 11$  Ma, respectively (Kinny *et al.*, 2003). These ages were assigned to granite crystallization interpreted as coeval with the D2 event (Kinny *et al.*, 2003). The Ben Kilbreck granite also yields a significantly younger U-Pb on titanite age at  $416 \pm 3$  Ma, interpreted as post-metamorphic cooling (Kinny *et al.*, 2003). Two older ages are reported from zircon rims of migmatites in the Naver nappe at  $467 \pm 10$  Ma and  $461 \pm 13$  Ma (Kinny *et al.*, 1999a). These ages are thought to date partial melting in the Naver nappe prior to nappe stacking during the Grampian orogeny (Kinny *et al.*, 1999a). The Strath Halladale granite, to the east, was dated by U-Pb on monazite (Kocks *et al.*, 2006) and produced an age of  $426 \pm 2$  Ma. This granite body cross-cuts the Skinsdale Thrust but also shows evidence of emplacement during late stages of D2-D3 thrusting (Kocks *et al.*, 2006). In the Ben Hope nappe, the Loch Loyal syenites are interpreted as post-dating the regional ductile deformation (Holdsworth, 1999; Dallmeyer, 2001). Only one concordant zircon analysis was obtained from the Loch Loyal, indicating crystallization at  $\sim 425$  Ma (Goodenough *et al.*, 2011). The Vagastie Bridge inlier, interpreted as emplaced during the D2 event, yielded a U-Pb zircon crystallization age of  $428 \pm 8$  Ma (Kinny *et al.*, 2003) and a U-Pb on titanite age of  $413 \pm 3$  Ma interpreted as post-metamorphic cooling (Kinny *et al.*, 2003). The Rogart Pluton is composed of

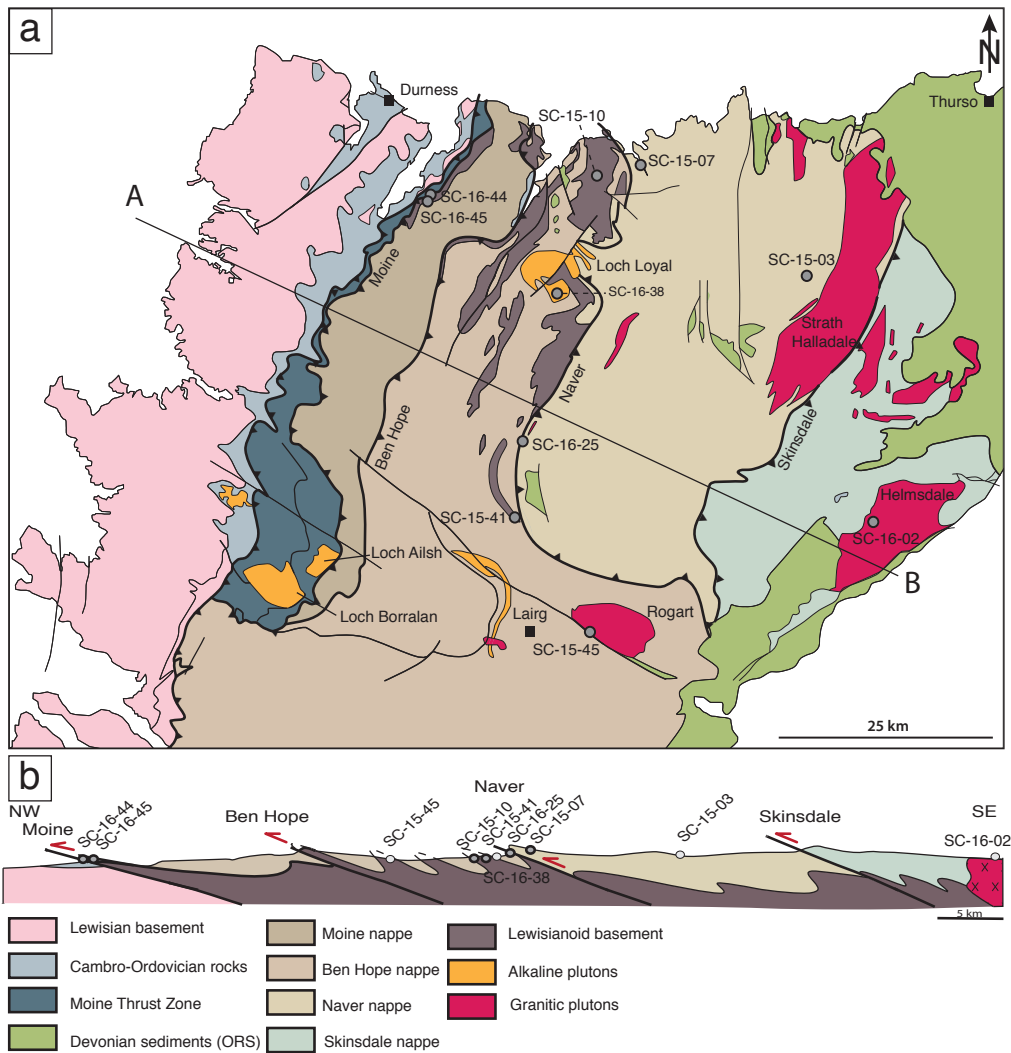


FIGURE 3.2.1 – Geological setting of the Scottish Caledonides. a) Geological map of the Highlands (after Thigpen *et al.*, 2013) showing the major thrusts (Moine, Ben Hope, Naver, Skinsdale), the litho-tectonic units, the samples dated, and the location of the cross-section. b) Cross section across the major units of the Scottish Caledonides, and location of the samples.

a quartz-monzodiorite outer rim, a granodiorite rim and an innermost granite (KOCKS *et al.*, 2014). The central part of the pluton is described as post-D2 considering that the regional foliation in the country rocks is reoriented significantly in the vicinity of the pluton which has been dated at  $425 \pm 1.5$

Ma by U-Pb on zircon. This age is thus supposed to represent the end of D2 thrusting (KOCKS *et al.*, 2014). In the Moine unit, a syn-D2 metagranite yielded an age of  $415 \pm 6$  Ma (Alsop *et al.*, 2010) suggesting that deformation still occurred at that time. Two syenites in the Lower part of the Moine Thrust Zone were dated (Goodenough *et al.*, 2011). The early suite of the Borrallan pluton, interpreted as syn-thrusting, is dated at  $431 \pm 1.2$  Ma. The later suite of the Borrallan pluton is dated at  $429.2 \pm 0.5$  Ma and is described as postdating any movement on the thrusts (Goodenough *et al.*, 2011). The Loch Ailsh syenite is dated at  $430.6 \pm 0.3$  Ma (Goodenough *et al.*, 2011). Thus, to sum up, most of the magmatic scandian activity seems to happen between 435 Ma and 425 Ma, which suggests that a partial melting occurred below the crustal wedge in the lithospheric and upper mantle. The main thrust activity stage leading to wedge building occurred at about the same time, possibly until 410 Ma (Freeman *et al.*, 1998). Cooling of the nappe stack is documented by  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  ages on muscovite and hornblende. In the Naver nappe, muscovite ages range from  $423 \pm 0.2$  Ma to  $417.9 \pm 0.2$  Ma while in the Ben Hope nappe ages range between  $416.4 \pm 0.2$  Ma and  $419.8 \pm 0.2$  Ma (Dallmeyer *et al.* 2001). The hornblende ages show a slight decrease toward the east from  $446 \pm 0.3$  Ma in the Ben Hope nappe to  $404.2 \pm 0.4$  Ma in the easternmost part of the Naver nappe (Dallmeyer *et al.*, 2001). The  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  ages on muscovite are interpreted as cooling ages (Dallmeyer *et al.*, 2001) and are coeval with the U/Pb ages on titanite (Kinny *et al.*, 2003). The Rb/Sr ages on muscovite in the Moine, the lower Ben Hope, and the Naver nappes are coeval with the  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  ages from  $442 \pm 4$  Ma to  $396 \pm 4$  Ma. Rb/Sr dating has also been performed to date the deformation in the Moine mylonites. Since the acknowledged closure temperature of the Rb/Sr isotopic system in white mica is higher ( $550^\circ\text{C}$ ) than the peak temperature reached by the rocks (around  $350^\circ\text{C}$ ), the ages yielded by this method are considered as syn-tectonic crystallization ages of muscovites. They range from 437 Ma to 408 Ma (Freeman *et al.*, 1998). This variation may result from strain localization within the Moine mylonites during thrusting. The youngest ages are therefore supposed to represent the cessation of activity on the Moine thrust at 408 Ma (Freeman *et al.*, 1998). Those data show that, excepted the significantly younger ages recorded in the



Moine Thrust mylonites, there is no clear regional age gradient from the lowest to the highest units of the wedge. This suggests that no in-sequence pattern can be documented by these ages and that close to the eastern thrusts, no isotopic disturbance is measured.

Constraining the thermal evolution of this nappe stack within the amphibolite facies requires more intermediate temperature (400°C-600°C) data, since the only available thermochronological data are  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  ages. Among the available thermochronometers, U-Pb on apatite (closure temperature around 450 °C, (Harrison *et al.*, 2009) is within the temperature ranges acquired by the rocks during deformation, and is less prone to metamorphic reaction than titanite or monazite, which makes it suitable to document cooling in the Scandian wedge.

### 3.3 Sampling and analytical technique

The aim of this study is to further document the thermal history of each unit in the Caledonian wedge as well as the possible thermal signals associated to thrust activity. Samples were therefore collected from each nappe from the basement rocks and plutons, both close and far from major thrusts. Sample SC-15-07 and SC-15-03 are migmatites from the Naver unit (Fig. 3.2.1), respectively close to- and far from the Naver basal thrust. SC-15-07 (Fig. 3.3.1g) consists of quartz, feldspar and biotite, SC-15-03 contains quartz, feldspar, biotite, muscovite and chlorite (Fig. 3.3.1h). Sample SC-16-25 (Fig. 3.3.1f) is a deformed rock from the Naver basal thrust shear zone made of quartz, feldspar, biotite and epidote. Sample SC-15-45 (Fig. 3.3.1e) is from the Rogart syn-orogenic pluton in the Ben Hope nappe composed of quartz, feldspar, biotite, muscovite and chlorite. SC-15-41 (Fig. 3.3.1e) is also from the Ben Hope unit, located close to the Naver shear zone and consists of quartz, biotite, muscovite, feldspar and amphiboles.

Apatites were extracted from crushed samples by means of grain-size, magnetic and density separation. Suitable grains for dating were hand-picked and mounted in an araldite resin. The samples were then polished to reveal their cores, and imaged using cathodo-luminescence (Fig. 3.3.3). The Pb analyses were carried out at CRPG (Nancy, France) with both the Cameca IMS

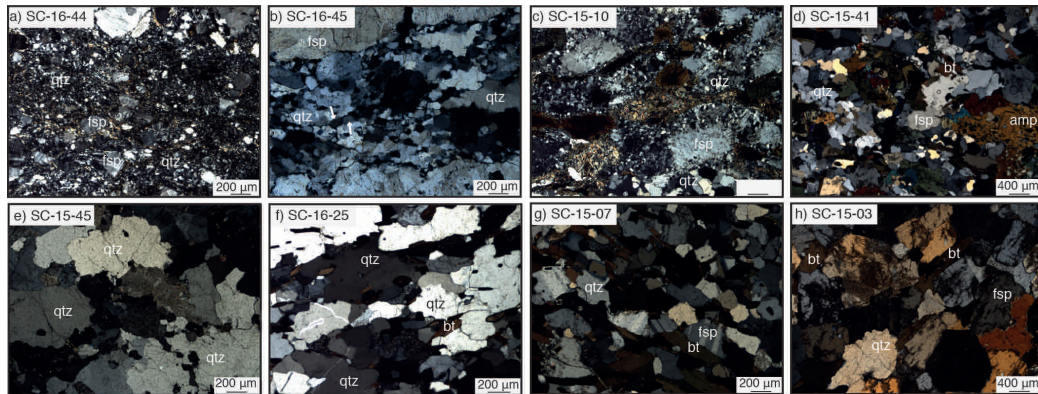


FIGURE 3.3.1 – Micro-photographs (crossed polarizers) of thin sections from representative samples. See figure 1 for sample locations. (a) Sample SC-16-44, Lewisianoid basement, Moine Thrust Zone, showing feldspar clasts, partly fractured, within a recrystallized quartz matrix. (b) Sample SC-16-45, Lewisianoid basement showing quartz grains and subgrains (white arrows). Some large, elongate and lobate grains indicate dynamic recrystallization by grain boundary migration, but most equant grains and subgrains point to subgrain rotation recrystallization. (c) Sample SC-15-10, Lewisianoid basement. Large clasts of feldspar surrounded by smaller, isometric, recrystallized grains, pointing to dynamic recrystallization. (d) Sample SC-15-41, Lewisianoid basement. Weakly elongate and lobate quartz grains, indicating recrystallization by grain boundary migration. (e) Sample SC-15-45, Rogart Pluton. Large lobate boundaries of quartz grains indicating recrystallization by grain boundary migration. (f) Sample SC-16-25, within the Naver Thrust. Note the large, elongate and lobate grain boundaries of quartz, suggesting recrystallization by grain boundary migration. (g) and (h) Samples SC-15-07 and SC-15-03. Migmatites from the Naver nappe, randomly distributed and only weakly elongated grains of feldspar, quartz and biotite.

1280 HR and 1270 E7. The primary O- beam was set at an intensity of 30nA and the spot size was 20-30  $\mu\text{m}$ . The secondary positive ions were measured with a mass resolution ( $M/\Delta M$ ) of 9000 to separate peaks of interest from isobaric interferences, an energy window of 30 eV, and no energy offset, by ion counting in mono-collection mode. Each cycle included a measurement of masses : 198.3,  $^{40}\text{Ca}^{231}\text{P}^{1603}$ ,  $^{40}\text{Ca}^{331}\text{P}^{1603}$ , 203.6,  $^{204}\text{Pb}$ ,  $^{206}\text{Pb}$ ,  $^{207}\text{Pb}$ ,  $^{208}\text{Pb}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}^{160}$  and  $^{238}\text{U}^{160}$  with counting times of 4 seconds per peak (except for  $^{206}\text{Pb}$  and  $^{207}\text{Pb}$  with 12 seconds per peak).  $^{40}\text{Ca}^{231}\text{P}^{1603}$  and  $^{40}\text{Ca}^{331}\text{P}^{1603}$  were used as reference masses to calculate the U and

lead contents. The Madagascar apatite was used as standard to determine the relative ionization yield of U and Pb, with the Pb/U ratio expressed as a function of UO/U ratio.

The external error on the  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  ratios, measured on the Madagascar standard (dated at 473.46 Ma) for each session, is propagated on the final error of each sample measurements. With the measurement of the  $^{204}\text{Pb}$  isotope it is possible to calculate  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  corrected ages using the measured  $^{204}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  ratios and the continental common lead compositions from Stacey and Kramers (1975). This allows us to calculate probability density plots and weighted average plots using  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  corrected ages (Fig. 3.4.1 column 2 and 3), and compare them to the uncorrected Tera-Wasserburg intercept ages (Tera and Wasserburg, 1972) (Fig. 3.4.1 column 1). The data for each sample are reported in Fig. 3.4.1 in the three different diagrams.

All data were treated using ISOPLOT software (Ludwig, 2000). We did not use the classical Wetherhill Concordia plot, because the uncertainty on the  $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$  common lead corrected ratios made them poorly relevant.

## 3.4 Results

Isotopic data from 10 samples are reported here. All of the Tera-Wasserburg diagrams shown are unanchored with common lead. The weighted average and the probability density plots use corrected  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  ages (Fig. 3.4.1).

The Tera-Wasserburg diagrams have been done to plot and discuss Pb isotopic data uncorrected from the common Pb contribution, and are currently used when this correction cannot be achieved with precision. In this study, the common Pb corrected and averaged ages are compared to the Tera-Wasserburg ages. The Tera-Wasserburg diagrams have been done to plot and discuss Pb isotopic data uncorrected from the common Pb contribution, and are currently used when this correction cannot be achieved with precision. In this study, the common Pb corrected and averaged ages are compared to the Tera-Wasserburg ages in order to show how SIMS dating of apatite enables a more thorough use of isotope ratios measured in apatite. We present  $^{204}\text{Pb}$  corrected data on probability density plots (PDP) and weighted average (WA) graphics. All samples are post-processed the same way : on the

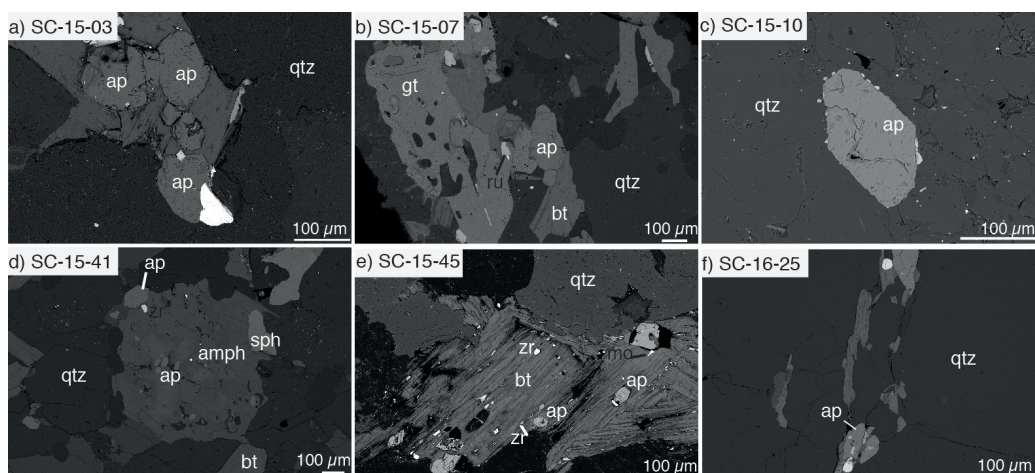


FIGURE 3.3.2 – SEM images of samples showing the location of apatites in mineral assemblages of the rocks. (a) sample SC-15-03 showing apatite grains in contact with- and largely included within biotite (b) sample SC-15-07 showing large apatite grain in contact with quartz, biotite and garnet (c) sample SC-15-10 showing a euhedral apatite within a quartz aggregate (d) sample SC-15-41 showing small apatites included in an amphibole grain in addition to a larger euhedral grain at the boundary between amphibole and quartz (e) sample SC-15-45 showing euhedral apatites included within biotite (f) sample SC-16-25 showing slightly elliptical apatites elongated in the foliation plane.

PDP, we determine if there is only one or several age population. If there is only one age population all data are used in the WA graphics to calculate the age (e.g., Fig. 3.4.1h). If several populations can be identified, we select the data that correspond to the main and youngest population, on the PDP diagram. We gradually add ages to the WA so that the MSWD and probability of fit calculated with the WA confirm that it is statistically meaningful (Fig. 3.4.1i). Processing concretely consisted in first maximizing probability of fit (assessing one consistent population) and second increasing number of ages considered in the population until closest to one MSWD is reached.

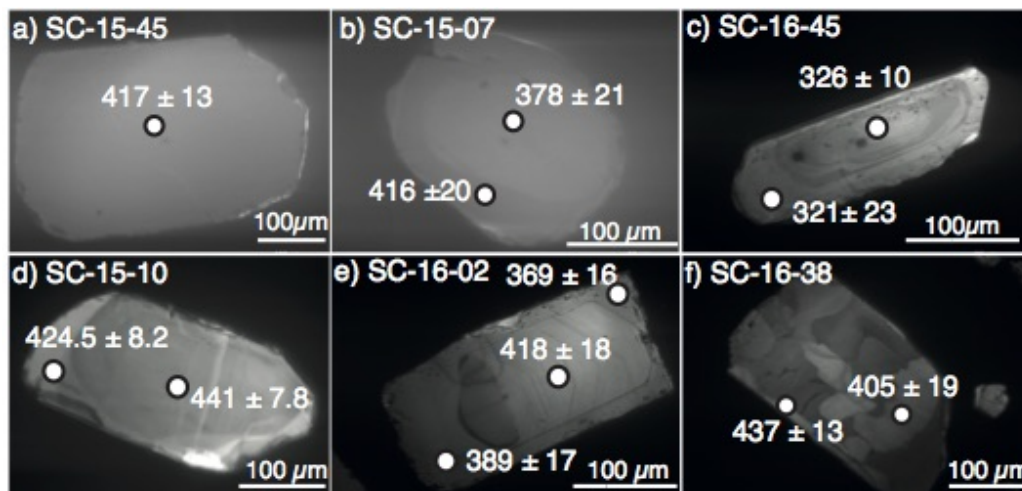


FIGURE 3.3.3 – : Cathodoluminescence photographs of apatite grains. The circle represents the position of the SIMS spot and numbers indicate  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  corrected ages. (a) Sample SC-15-45 shows a homogeneous texture, typical for all grains of the sample. (b) Sample SC-15-07 presents a weak zonation sub-parallel to the grain margin (c) Sample SC-16-45 shows a fine and sharp zonation subparallel to the grain margin. (d) Sample SC-15-10 exhibits light, large rims surrounding large parts of the darker core. (e) Sample SC-16-02 presents a large, euhedral rim, discordant to the zoned internal core. (f) Sample SC-16-38 shows complex amalgamation texture and tiny rim

### 3.4.1 Samples from the Naver and Skinsdale nappe

Migmatites from the Naver nappe, SC-15-07 and SC-15-03 (Fig. 3.2.1), collected respectively, above the Naver thrust and near the Strath Halladale granite both exhibit high temperature quartz textures, as shown by the large, lobate boundaries of dynamically recrystallized grains. These fabrics suggesting grain boundary migration indicate that the rocks deformed at high temperature ( $> 500^\circ\text{C}$  according to Stipp et al. 2002) (Fig. 3.3.1g and h). The micas are poorly oriented in the foliation, suggesting that these rocks are only moderately deformed. No lower temperature deformation seems to have occurred, based on textural, microscopic observations. In both samples, most of the apatite grains are texturally homogeneous : the CL images did

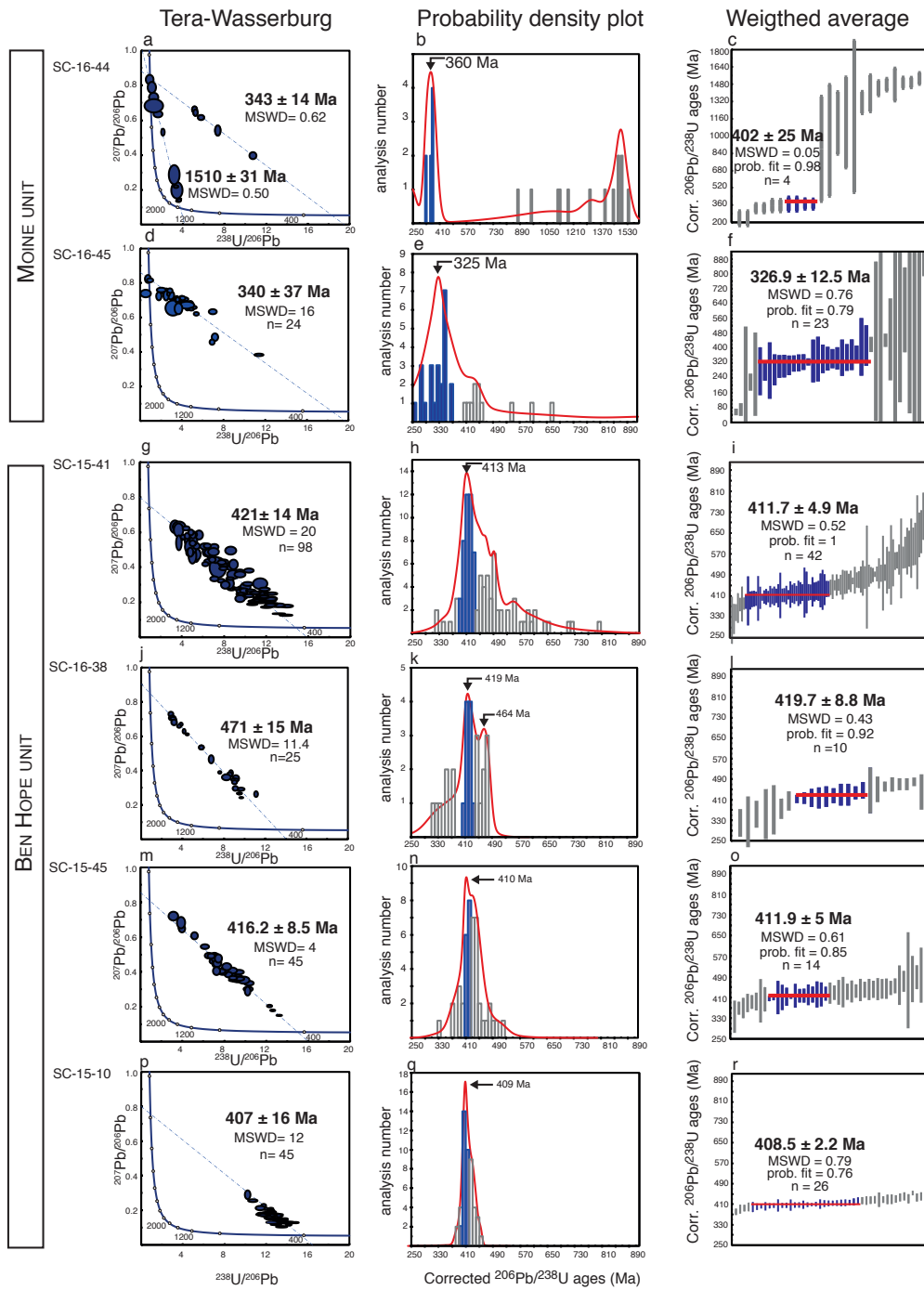


FIGURE 3.4.1 – key on next page



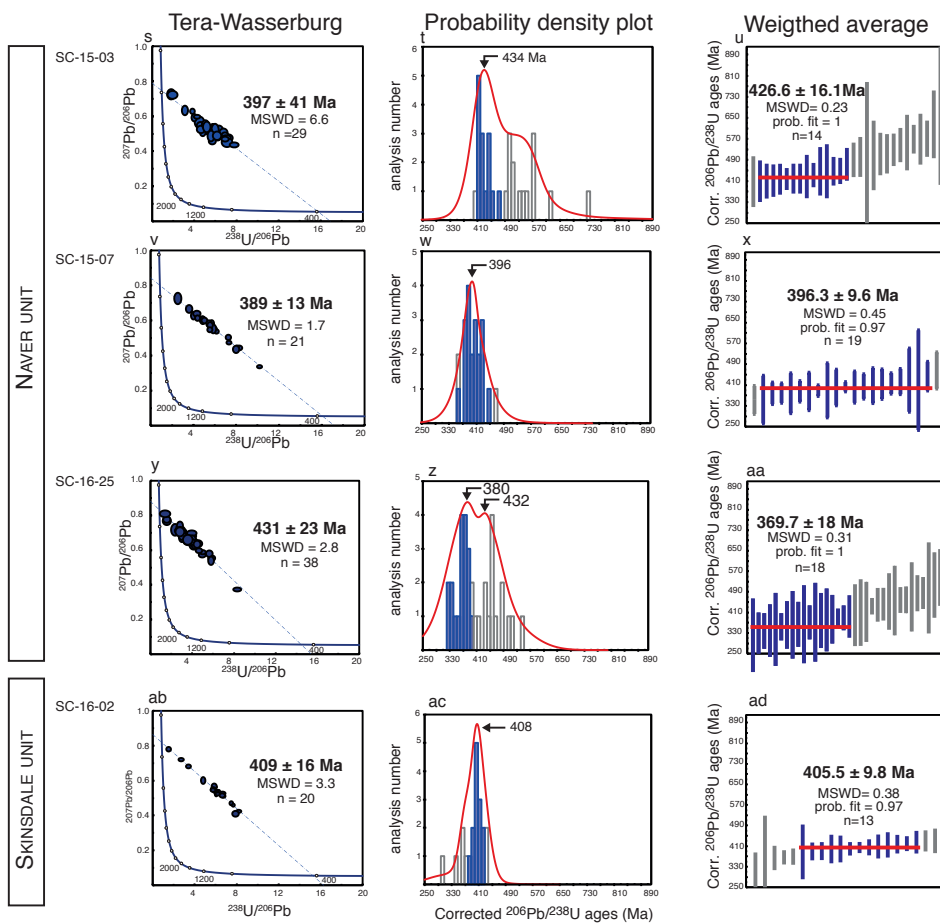


FIGURE 3.4.2 – U/Pb data on apatite represent by Tera Wasserburg diagrams (first column), probability density plots (second column) and weighted average distribution of  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  corrected ages (third column). Blue filled bars in the probability density plots correspond to the blue bars and in the weighted average diagrams

not show any differences in luminescence except for a couple of grains in the SC-15-07 who displayed distinct cores and rims. (Fig. 3.3.3b SC-15-03 is similar to Fig. 3.3.3a). In these samples, apatites were located mainly near biotites as well as scattered in the quartz matrix (Fig. 3.3.2). Some apatites in SC-15-03 bear inclusions of zircon and monazites, but none of those were analysed.

The isotopic data of the two samples show a widespread variation of the uncorrected ratio of  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  in the Tera Wasserburg diagram yielding lower

intercept ages of  $397 \pm 41$  Ma and  $389 \pm 13$  Ma (Fig. 3.4.1g, h). For sample SC-15-07, the probability density plot of the corrected ages shows a single population distribution centred around 396 Ma. 19 of 21 values were used to calculate the weighted average age for this sample that yields  $396.3 \pm 9.6$  Ma with a MSWD of 0.45 and a probability fit of 0.97. Both the corrected age and the Tera-Wasserburg age fall inside their reciprocal uncertainty. On the contrary, sample SC-15-03 does not show a single population, and only the data that constitute the main peak (14 values) were used to calculate the weighted average age that is  $426.6 \pm 16.1$  Ma with a MSWD of 0.23 and a probability of fit of 1. In both samples, the scatter of isotopic ratios does not correlate with any variation of textures or habitus of apatites.

In this unit, one sample provided data that are too complex or under-documented and that will not be used for geological interpretation (SC-16-25, Fig. 3.4.2y, z, aa). Sample SC-16-25 from the Naver thrust shows a fabric dominated by grain boundary migration in quartz (Fig. 3.3.1f). This suggests that deformation occurred at temperatures higher than 500 °C (Stipp et al., 2002). The Tera Wasserburg lower intercept yields an age of  $431 \pm 23$  Ma (Fig. 3.4.2y). However, the PDP shows two distinct peaks, one at 380 Ma and another one at 432 Ma. The 18 youngest ages were used to calculate the corrected age of the youngest peak which is  $369.7 \pm 18$  Ma with a MSWD of 0.31 and a probability of fit of 1. No textural differences seen in cathodo-luminescence can explain this bimodal distribution (similar to Fig. 3.3.3b). The ages of the two populations being very close, one cannot exclude that they actually define a single population. In such case, the age would be around 410 Ma, which is consistent with the other samples. However, more data are needed to confirm that.

The only sample from the Skinsdale nappe is from the Helmsdale granite (SC-16-02, Fig. 3.2.1), and an age  $409 \pm 16$  Ma was obtained with the lower intercept in the Tera Wasserburg diagram (Fig. 3.4.2ab). The PDP shows an almost perfect mono-modal distribution centered at 408 Ma. To calculate the WA age, the 13 values that really constitute the peak yield a corrected WA age of  $405.5 \pm 9.8$  Ma (MSWD= 0.38 and probability of fit of 0.97). The apatites from this sample show magmatic zonings and distinct cores and rims (Fig. 3.3.3e).



### 3.4.2 Samples from the Ben Hope nappe

Samples SC-15-10 and SC-15-41 were collected within Lewisian inliers along the north shore, in the Ben Hope unit (Fig. 3.2.1, Fig. 3.3.1c et d). SC-15-41 does not appear to be strongly deformed, but where present, dynamically recrystallized quartz aggregates indicate grain boundary migration (Fig. 3.3.1d). The sample SC-15-10 appears to record high temperature textures shown by the widespread dynamic recrystallization of feldspar clasts into finer grained aggregates (Fig. 3.3.1c). This suggests that the deformation temperature is higher than 500°C according to the review by Fitzgerald and Stunitz (1994). Sample SC-15-45 (Fig. 3.2.1) from the Rogart pluton in the Ben Hope unit (Fig. 3.3.1e) also shows grain boundary migration of quartz grains.

In the Ben Hope nappe, sample SC-15-41, a Lewisianoid orthogneiss from a recumbent basement fold (Fig. 3.2.1) and sample SC-15-38, a syenite from the Loch Loyal complex (Fig. 3.2.1) show complex age patterns. Sample SC-15-41 shows an extremely scattered pattern on the Tera-Wasserburg diagram (Fig. 3.4.1g) that gives an age of  $423 \pm 14$  Ma. Several age populations can be observed (Fig. 3.4.1h). The main one provides a WA age of  $411.7 \pm 4.9$  Ma (MSWD= 0.52 and probability of fit = 1). The Loch Loyal syenite (SC-15-38) exhibits a far less scattered Tera-Wasserburg diagram (Fig. 3.4.1i), but, in the PDP, shows 3 different age populations : around 350 Ma, 416 Ma and 464 Ma. The 10 values constitutive of the main peak yield a WA age of  $419.7 \pm 8.8$  Ma. Both samples show very diverse apatites textures : SC-15-41 shows quite numerous rims and cores textures (similar to SC-15-07 in Fig. 3.3.3b) while SC-16-38 shows amalgamation and rims textures (Fig. 3.3.3f). None of these textures corresponds to any of the age populations.

The other two samples from the Ben Hope nappe provide isotopic ratios that are simpler to interpret in terms of ages. In the syn-orogenic Rogart pluton (SC-15-45, Fig. 3.2.1), the apatites are mainly located in the biotite grains and they are texturally homogeneous (Fig. 3.3.2, 4a). The Tera Wasserburg lower intercept age is  $416.2 \pm 8.5$  Ma (Fig. 3.4.1m). The probability density plot shows a rather unimodal distribution. The WA age is  $411.9 \pm 5$  Ma taking into account the 14 values of the main peak (MSWD = 0.61 and pro-

bability of fit = 0.85) (Fig. 3.4.1o).

The other sample is from a Lewisianoid inlier (SC-15-10, Fig. 3.2.1). The lower intercept on the Tera-Wasserburg diagram corresponds to  $407 \pm 16$  Ma (Fig. 3.4.1p). The PDP shows an almost perfect single population distribution centred around 409 Ma. The 26 values constitutive of the peak were used to calculate the WA age of  $408.5 \pm 2.2$  Ma (MSWD = 0.79 and probability of fit = 0.76). The apatites often show rims in this sample but without any relationship with the age (Fig. 3.3.3d).

subsection Samples from Moine nappe and the Moine Thrust Zone Sample SC-16-44, within the Moine Thrust Zone (Fig. 3.2.1), displays microstructures suggesting lower temperature of deformation compared to all other samples (Fig. 3.3.1b). The quartz grains are significantly smaller (30-40  $\mu\text{m}$ ) than those from the previous higher units and recrystallization occurs exclusively by subgrain rotation. Feldspars do not show any sign of recrystallization and are often fractured. These observations suggest that the deformation temperatures might be as low as 400°C. Sample SC-16-45 (Fig. 3.2.1), located in the Moine sediments, just above the Moine thrust, exhibits lower temperature textures and a large finite deformation (Fig. 3.3.1a). The feldspars clasts show fractures decorated by recrystallized grains. The old, elongate and lobate quartz grains are locally dissected by smaller, isometric grains and subgrains, pointing to recrystallization by sub-grain rotation. Both processes point to lower deformation temperature than the more internal samples described above.

The 2 samples from this nappe yield very complex data and the resulting ages are not easy to interpret. Sample SC-16-45 is located in the foreland, in a basement inlier just above the Moine thrust (Fig. 3.2.1). The lower intercept on the Tera-Wasserburg diagram from sample SC-16-45 yields an age of  $340 \pm 37$  Ma (Fig. 3.4.1d), the very large uncertainty being explained by the data scattering. The PDP shows one main population at 325 Ma, and a less obvious population at 440 Ma. The 23 values of the main peak were used to calculate the WA corrected age of  $326.9 \pm 12.5$  Ma (MSWD = 0.76 and probability of fit 0.79.). This age is very young compared to all other ages of this study and of the literature. The apatites from this sample are mostly homogeneous. The few apatites with overgrowths (Fig. 3.3.3c) yield

the same age as the homogeneous apatites.

The last sample (SC-16-44) is a basement rock, in the Moine Thrust Zone. The Tera-Wasserburg diagram (TW) shows two distinct population ages, one that intercepts the Concordia at  $1510 \pm 31$  Ma and one that intercepts the Concordia at  $343 \pm 14$  Ma (Fig. 3.4.1a). The 4 values that compose the main youngest peak were selected to calculate the weighted average age of  $402 \pm 25$  Ma (MSWD= 0.05 and probability of fit = 0.98). The 4 younger grains that yielded younger ages were not texturally different from the others (similar to Fig. 3.3.3b).

## 3.5 Discussion

### 3.5.1 The importance of the common lead correction

The estimate of the common lead  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  from the intercept of discordia line with the y-axis in TW, provide an a posteriori test on the relevance of linear regression. Expected value according to two-stages Stacey and Kramer (1975) ranges from 0.8597 and 0.8697 between 350 Ma and 500 Ma. All of our regressions are within this interval except the old population in sample SC-16-44 yielding an age of  $1510 \pm 31$  Ma which even gives an abnormally high ratio for this age range and sample SC-15-41 that yields a common lead  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  ratio close to 0.8. This can be explained by the scatter of data commented further down. Anyway, the likelihood of computed common lead  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  ratio in TW diagram is not an evidence for single population as exemplified by sample SC-16-25.

Therefore, as U/Pb dating on apatite with a SIMS allows the precise measurement of the  $^{204}\text{Pb}$  isotope content, each measured Pb isotopic composition can be corrected from the proportion of non-radiogenic lead to calculate its age, instead of correcting the whole sample population by anchoring the discordia in the TW diagram. This produces an age for each measured spot, and allows to consider the age scattering in a statistical approach and distinguish different populations.

Regarding the proportion of common lead, if the  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  and the  $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$  ratio display a range wide enough in one sample, it is possible to determine

a well-defined lower intercept in TW diagram (for example samples SC-15-45 and SC-15-07). But even in those cases, WA ages have similar or better MSWD than TW ages.

In any case, the restricted range of isotopic ratios or the complex polyphase thermal history of the apatite do not allow to define a precise lower intercept in the TW diagram. Then the WA and the PDP of the corrected ages are very important to define ages from the U-Pb data sets. In sample SC-15-03 for instance, the high MSWD in the TW diagram suggests more than one population. The corrected ages in the PDP allow to separate the last thermal (434 Ma) event from a previous (inherited?) thermal event ( $> 490$  Ma). Once the last event is separated, the WA age is  $423 \pm 17$  Ma. For sample SC-15-41, the uncorrected Tera-Wasserburg diagram does not allow a satisfying lower intercept since the MSWD reaches 21. The obvious scattering of the data suggests more than one population of ages. The PDP shows several populations and the WA diagram of those data yield an age of  $411.9 \pm 5$  Ma.

The figure 6 present the uncorrected ages against the corrected ages of this study. Four of the ten sample are close to the first diagonal showing that the corrected age and the uncorrected ages are similar. Among the four samples with a significant difference between the two ages, three clearly showed several age population close one to another (SC-16-44, SC-16-38, SC-16-25) which could only be assessed on the basis of SIMS data, reinforcing the relevance of our method. Sample SC-15-03 yields a corrected age older than the TW age which is biased by a anomalous common lead intercept ( $< 0.8$ , Fig. 3.4.1s). Moreover, with the corrected ages the regional thermal peak at  $\sim 407$  Ma is more pronounced (Fig. 3.5.1), showing that this thermal event is narrower in time. The post Caledonian thermal event is also detected in our data ( $\sim 350$  Ma visible in three samples SC-16-45, SC-16-38 and SC-16-25).

### 3.5.2 Apatites U/Pb ages across the Caledonian wedge

Overall, our apatite U/Pb ages are remarkably constant from West to East (Fig. 3.5.2). Together, they define a cooling age of about  $410 \pm 2$  Ma that seems to be coeval in the three uppermost tectonic units (i.e. the

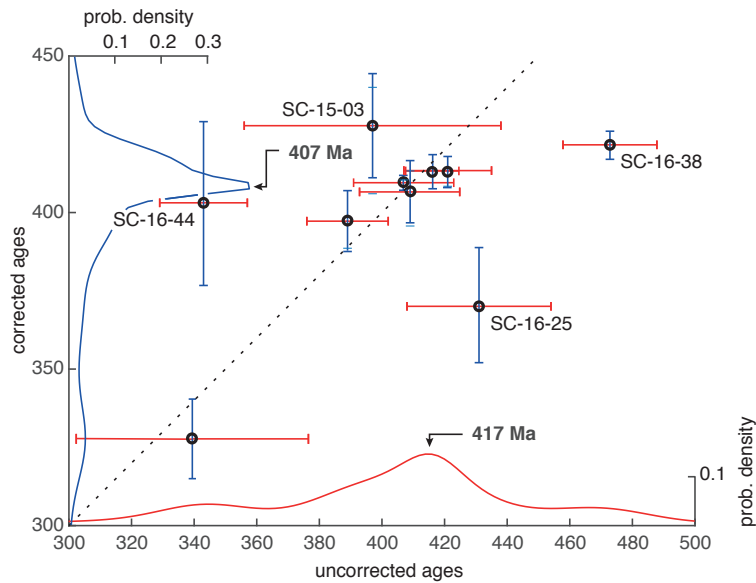


FIGURE 3.5.1 – Correlation plot of corrected and uncorrected ages. The probability density plot of each method is presented (blue : corrected ages, red : uncorrected ages) with the same amplitude scale. Data plotting along the first diagonal correspond to ages that remain unchanged irrespective of the correction applied.

Ben Hope, Naver, and Skinsdale units). At this time the temperature of the samples was most likely around 450°C. From those results, we suggest that the upper Caledonian nappe stack was exhumed as a whole during early Devonian times, at around 410 Ma, without significant differential exhumation and hence strain localization along high temperature thrusts.

Samples located within thrust/shear zones (Moine or Ben Hope thrust), as SC-16-25, SC-16-44, SC-16-45, yielded complex age data. Sample SC-16-45 has the highest common lead proportion which implies a large incertitude on the result with a TW age of  $363 \pm 44$  Ma and a WA common lead corrected age of  $327 \pm 11$  Ma. Sample SC-16-25 has 2 age populations or one poorly defined. Finally, sample SC-16-44 provides 2 distinct age populations in both the TW diagram and the PDP. It is noteworthy that the sample is from the lowest tectonic unit, just below the Moine thrust, where the temperature peak reached 300°C (Johnson et al. 1985). Our results (Fig. 3.4.1) show a young age population at  $343 \pm 14$  Ma (although poorly defined because of

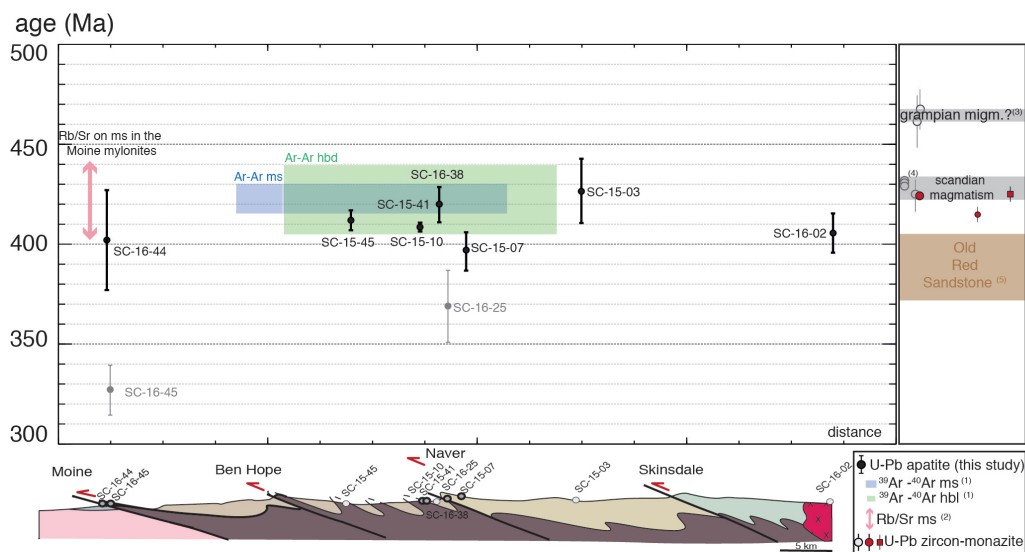


FIGURE 3.5.2 – Cross section and synthesis of geochronological data in NW Highlands from this study and literature : (1) Dallmeyer et al. (2001), (2) Freeman et al. (1998), (3) Kinny et al. (1999), (4) Goodenough et al. (2011), (5) Dewey et al. 2015

the limited number of data) and an older one at  $1510 \pm 31$  Ma, suggesting a limited reset of the U/Pb ages on few apatites. It is the only sample showing this old age consistently with the fact that the maximum temperature it reached was lower compared to the others. The isotopic signatures and the young ages of these three samples might reflect fluid circulation or post-scandinavian reactivation within the major shear zones. These processes could have induced re-opening of the isotopic system. The reset of apatite below its usually defined closure temperature has indeed already been documented, notably in high fluid circulation contexts (Corfu et al., 1997).

### 3.5.3 Comparison with other thermochronometer

In the Naver and the Ben Hope nappe, and in the Assynt region all of the major plutons (Strath Halladale, Strathnaver, the Rogart pluton, the Loch Loyal) are dated by U/Pb methods (mainly on zircon) between 431 and 425 Ma (Goodenough et al. 2001, Kocks et al., 2006, Kocks et al. 2014) (Fig. 3.5.2). Given that our U/Pb ages on apatites from both Archean basement

and syn-orogenic plutons are bracketed between 423 Ma and 397.8 Ma, they are most likely related to the cooling of the wedge, not to post-emplacement cooling of plutons.

Our dataset is also consistent with the literature.  $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$  ages on muscovite are around  $420 \pm 5$  Ma (Dallmeyer *et al.*, 2001) and there is no spatial age trend from east to west in those data, as also observed in our own data. The closure temperature of the  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  system in muscovite is about  $425^\circ\text{C}$  at 10 kb, for rapid cooling rates ( $10^\circ\text{C}/\text{My}$ ) and 100 m diffusion radius, but estimates as low as  $300^\circ\text{C}$  are also proposed (Harrison *et al.*, 2009; Hames et Bowring, 1994). As the closure temperature of  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  chronometer in muscovite is considered lower than the one commonly reported for the U/Pb system in apatite, the  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  ages are supposed to be younger than the U/Pb ages. The figure 6 shows that it is not systematically the case. Thus, either some ages are unprecise either the closure temperatures for both systems are not controlled by the same parameters (cooling rate, grain size, deformation, fluid circulation). In any case, the  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  data as well as our data strongly suggest that the Caledonian wedge was being exhumed as a whole, with no significant differential uplift along its internal thrusts, at about 407 Ma. Thus, the main thrusts (Naver and Ben Hope) were largely inactive at that time and not responsible for any significant relative exhumation.

One enigmatic feature of the scandinavian orogeny is its limited duration (20-30 Myrs) (Thigpen *et al.*, 2013). Indeed, the post orogenic sediments of the Old Red Sandstone Fm. (ORS) are inferred to be Devonian, the Lower Old Red Sandstone Fm. are Emsian (i.e.  $407.6 \pm 2.6$  to  $393.3 \pm 1.2$  Ma, Dewey et al. 2015) and the Middle Old Red Sandstone are Eifelian to Givetian (i.e.  $393.3 \pm 1.2$  to  $382.7 \pm 1.6$  Ma Rogers 1989). The ORS are mainly undeformed and they unconformably overly the metamorphic Moine sequence (Dewey *et al.*, 2015). Therefore, at about 400 Ma, the wedge was already eroded and our samples were exhuming. Only 2 U/Pb ages on apatites are as young as 400 Ma (SC-15-07 and SC-16-02). However, given their uncertainty, the cooling event could have occurred at around 410 Ma (see above). In such case, our data would suggest that the cooling was quite fast between 410 and 400 Ma, at a rate of about  $50^\circ\text{C}/\text{Ma}$  (around  $500^\circ\text{C}$  in 10 Ma).

To focus discussion on the Moine thrust activity published Rb/Sr ages on

muscovites appear as relevant. They range between 440 and 408 Ma (Freeman *et al.*, 1998). These ages are interpreted to date the crystallization of muscovites during deformation at about 350 °C, i.e., below their closure temperature (around 400 °C). The youngest age may reflect the cessation of muscovite formation due to exhumation of the thrust footwall (where the samples were taken) above the brittle-ductile transition. It is also probable that the Moine thrust continued after 408 Ma, as suggested by (Freeman *et al.*, 1998). At 400 Ma, thus shortly after the Moine thrust activity, the ORS were deposited. This also strongly suggests that the Moine was responsible for the exhumation and cooling of the overlying nappes.

### 3.6 Conclusion

In this study, we present ten new U-Pb ages on apatite obtained by SIMS, with a common Pb correction based on the measured  $^{204}\text{Pb}$  isotope. For seven of those samples the common lead corrected ages and the statistical analysis yield better precision ages than the uncorrected Tera-Wasserburg ages, showing the interest of this method.

The new U-Pb ages on apatite obtained and corrected for  $^{204}\text{Pb}$  show that a cooling event may have taken place at about 410 Ma, which is consistent with the literature data. We also show that cooling was coeval along almost the whole section, suggesting that the Caledonian wedge was passively exhumed and weakly deformed at that time. This period is coeval with the activity of the frontal Moine thrust. Thus, we conclude that the passive exhumation of the Caledonian wedge after its thermal and deformation peak was due to the frontal Moine thrust that localized most of the deformation at this time.



# Chapitre 4

## Comparaison entre les âges U-Pb sur apatites à la SIMS et par LA-ICPMS

Les échantillons datés à la SIMS ont été datés sur un LA-ICPMS (Dublin, au Trinity College avec la collaboration D. Chew) de manière à comparer les résultats des deux méthodes.

### 4.0.1 Comparaison des âges Tera-Wasserburg et des moyennes pondérées des âges SIMS

#### 1- Ages issus des deux méthodes cohérents

Parmi les dix échantillons datés par les deux méthodes, six produisent des âges TW issus des deux méthodes cohérents (Fig. 4.0.1 et Fig. 4.0.2) : les échantillons SC-15-41, SC-15-45, SC-16-02, SC-15-03, SC-15-10 et SC-15-07. Les âges de l'échantillon SC-15-07 sont séparés de 3 Ma uniquement et peuvent être considérés comme globalement cohérents entre eux (Fig. 4.0.2) De plus, pour ces six échantillons les trois âges : TW des deux méthodes et WA de la SIMS, sont similaires aux erreurs près. Pour tous ces échantillons, les âges WA issus de la SIMS produisent des incertitudes de même ordre ou plus petites que les TW de l'ICPMS. La méthode de sélection des âges corrigés et la moyenne pondérée sont donc probablement une meilleure ma-

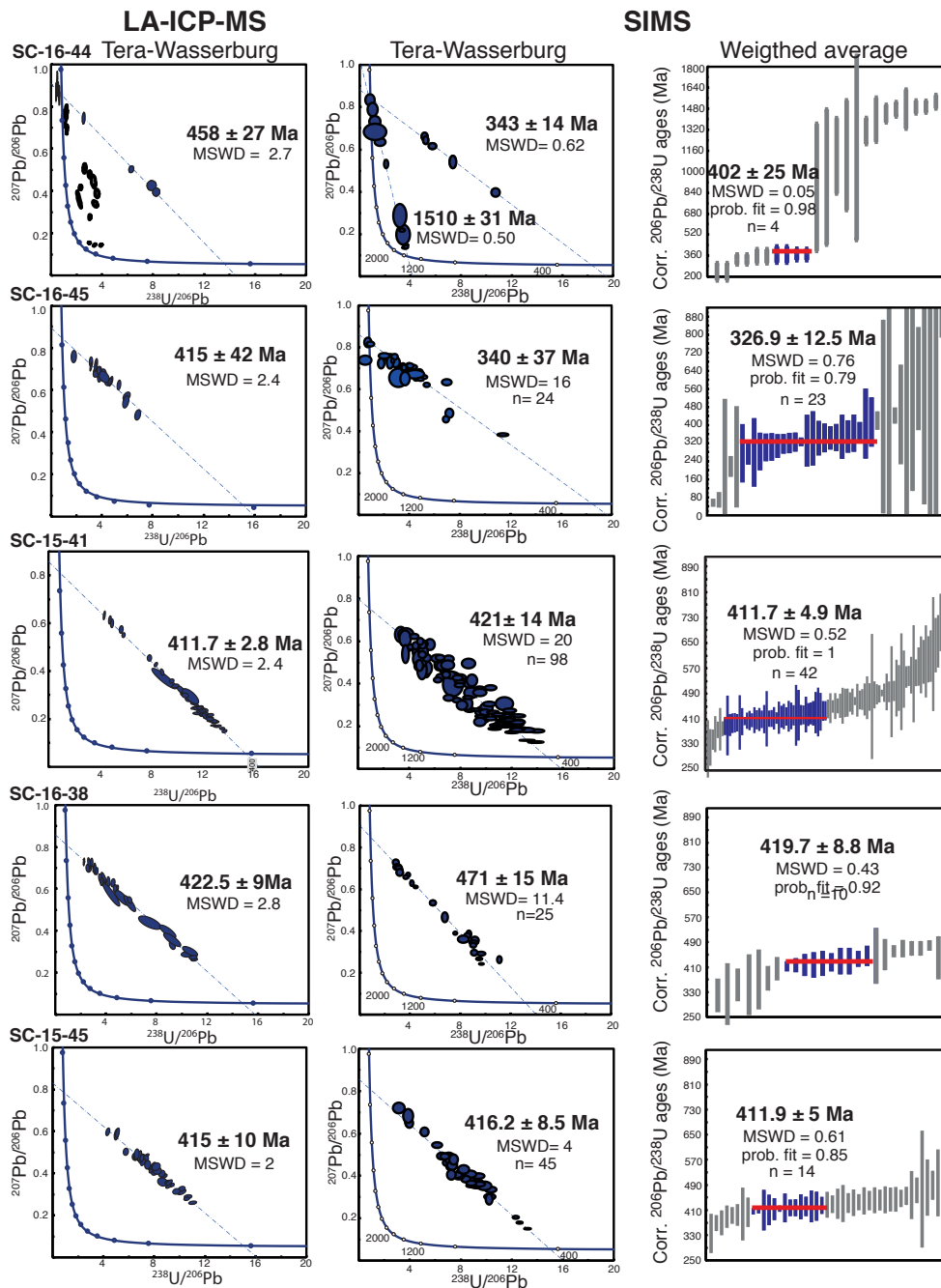


FIGURE 4.0.1 – Comparaison entre les âges TW produits par ICPMS (colonne 1) et les âges TW et WA produits par SIMS (colonne 2 et 3).

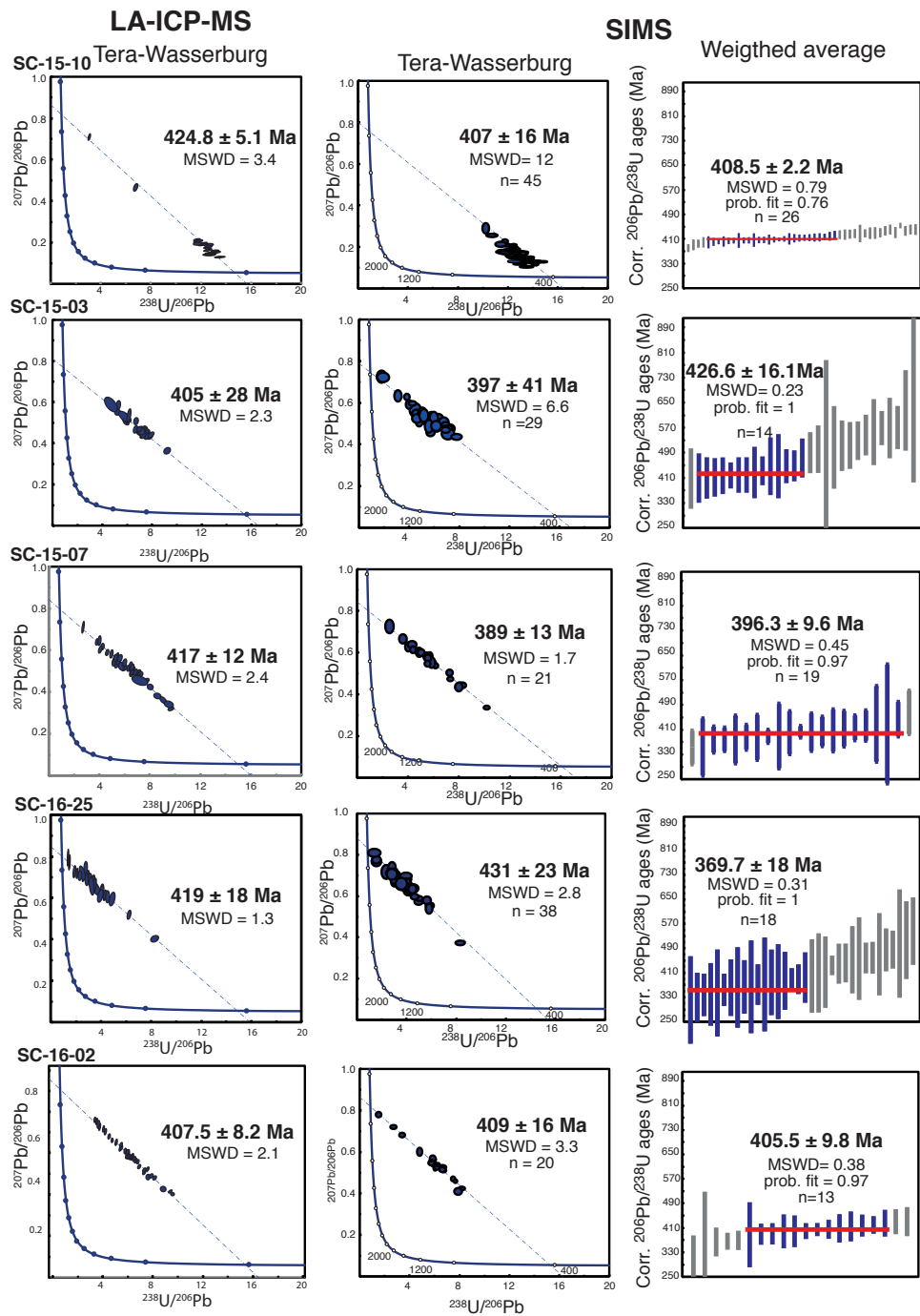


FIGURE 4.0.2 – Comparaison entre les âges TW produits par ICPMS (colonne 1) et les âges TW et WA produits par SIMS (colonne 2 et 3)

nière de traiter et visualiser la donnée (sauf l'échantillon SC-15-41 dont la dispersion est discutée plus loin).

## **2- Interêt de la sélection des données pour la moyenne pondérée**

Dans trois des cinq cas où les âges TW diffèrent entre les deux méthodes, l'application de la sélection des âges SIMS corrigés pour la moyenne pondérée permet de réconcilier les deux méthodes. Pour l'échantillon SC-16-44 par exemple, le faible nombre de données définissant la discordia la plus jeune explique probablement pourquoi les âges TW sont différents. Cependant, les âges SIMS sélectionnés pour la moyenne pondérée produisent des âges en accord avec ceux issus du TW de l'ICPMS ( $402 \pm 25$  Ma et  $458 \pm 27$  Ma). Dans ce cas, l'âge TW produit par la SIMS est vraiment anormalement jeune et les âges ICPMS et WA sont plus cohérents avec la littérature et les autres échantillons.

Le cas le plus surprenant est l'échantillon SC-16-25. Les deux âges TW de cet échantillon sont compatibles. Cependant, avec la moyenne pondérée et la sélection des âges corrigés à la SIMS, la nouvelle population sort de l'intervalle d'incertitude des âges TW. Sur la figure 4.0.2 la moyenne pondérée montre clairement deux populations, dont seule la plus jeune est homogène en âge. La grande incertitude ( $\pm 18$  et  $23$  Ma) est donc soit explicable par la faible teneur en plomb radiogénique soit par le fait que cet échantillon présente bien deux populations d'âges différents.

Enfin pour l'échantillon SC-15-07, les âges TW étaient relativement incompatibles ( $417 \pm 12$  Ma et  $389 \pm 13$  Ma), mais la sélection des âges pour la moyenne pondérée permet de réconcilier les deux méthodes ( $396.3 \pm 9.6$  Ma).

## **3- Les données incohérentes**

Parmi les dix échantillons, deux donnent des résultats significativement différents en fonction de la méthode utilisée : SC-16-45 et SC-16-25.

Le premier échantillon montre deux âges TW extrêmement différents,  $425 \pm 42$  Ma et  $340 \pm 37$  Ma. La sélection des données corrigées ne fait que rajeunir cet âge, mais réduit considérablement l'incertitude associée. Toutefois, cet âge corrigé est anormalement jeune et très différent du reste des données

corrigées. Même si cela reste difficile à interpréter, il semble qu'il y ait eu un évènement jeune dans la région, peut être un rejeu des zones de cisaillement, avec des circulations de fluides, éventuellement chauds, qui ont réouvert le système U-Pb. Cet évènement est aussi mis en évidence dans les données des zircons. La réactivation (en extension) des zones de cisaillement calédonienne a déjà été documentée offshore au nord de l'Ecosse (Wilson *et al.*, 2010). Il est donc probable que cela ait pu être le cas onshore plus au sud. Enfin, un dernier échantillon pose problème. Les deux TW de l'échantillon SC-16-25 donnent des âges similaires, mais la sélection des données pour la moyenne pondérée produit un âge qui sort de ces incertitudes. Cela est dû au fait que seule la moyenne pondérée permet de séparer les deux populations d'âges et donc de sélectionner uniquement la plus jeune.

#### 4- Problèmes soulevés

**Dispersion des données** L'échantillon le plus surprenant quant à la datation LA-ICPMS est le SC-15-41. La très grande variabilité en  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  visible à la SIMS n'est plus visible avec l'ICPMS. Cela aurait pu être dû à un problème de calibration à la SIMS, mais toutes les calibrations de standards d'une session sont utilisées sur l'ensemble des échantillons de la session et aucun des autres échantillons ne présente une telle dispersion. L'intercept haut dans les deux cas, est relativement similaire (0.8 ou 0.85). La meilleure incertitude de l'âge ICPMS est donc explicable par une dispersion plus faible selon l'axe  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ . De la même manière, la dispersion dans l'échantillon SC-16-45 est beaucoup plus grande en  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  dans la SIMS que sur le diagramme TW de l'ICP-MS.

**Intercept haut et Pb initial** Sur les diagrammes TW, l'intercept de la discordia avec l'axe des ordonnées renseigne sur la valeur du Pb ( $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ ) initial présent dans les grains. L'ensemble des données SIMS présente des intercepts hauts compris entre 0.7888 et 0.9052 (Fig. 4.0.1 et Fig. 4.0.2). Les valeurs initiales du Pb ( $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ ) obtenues avec les données LA-ICPMS varient entre 0.8112 (SC-15-03) et 0.9084 (SC-16-44) (Fig. 4.0.1 et Fig. 4.0.2).

Pour certains échantillons, les rapports du  $Pb_c$  diffèrent significativement d'une méthode à l'autre. Les rapports de l'échantillon SC-15-10 par exemple

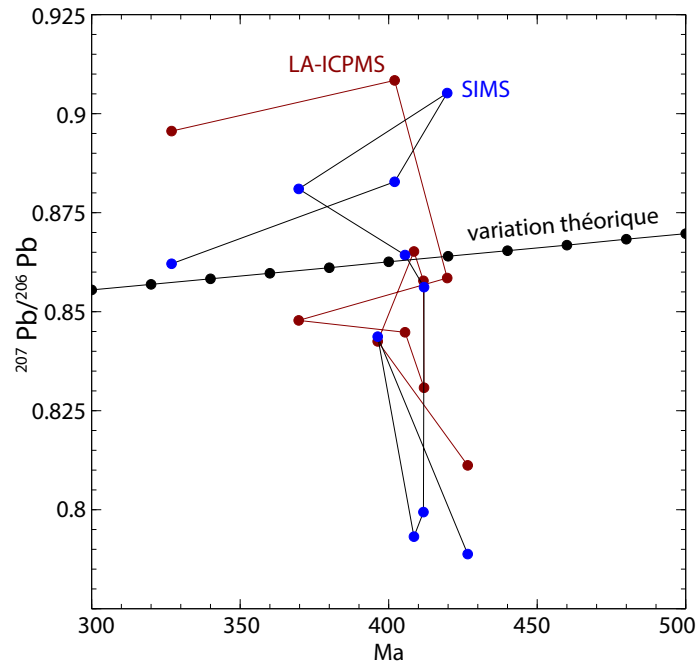


FIGURE 4.0.3 – Comparaison entre les valeurs de  $Pb_{commun}$  attendues d'après le modèle de Stacey et Kramers (1975) (noir) et les intercepts hauts définis par les données à la SIMS (bleu) et à l'ICPMS (rouge)

varient de 0.8652 à 0.7932, alors que les âges ne varient "que" de 17,8 Ma. À l'inverse, le rapport de l'échantillon SC-15-07 est très similaire dans les deux méthodes alors que les valeurs de l'intercept bas sont très différentes  $\sim 28$  Ma. Sur la Fig. 4.0.3, on remarque que les variations de  $Pb_c$  estimé par l'intercept haut dans les diagrammes TW varient de manière beaucoup plus forte que les variations théoriques calculées d'après le modèle de Stacey et Kramers (1975). Cela suggère donc que ces variations sont bien le reflet de populations d'âges différents. La procédure habituelle (Chew *et al.*, 2011a) étant de construire le graphique, déterminer l'ordre de grandeur d'âge (intercept bas), puis d'ancrer la valeur de  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  correspondant à cet âge, cet ancrage diminue souvent beaucoup l'incertitude des données ICPMS, ce qui rend cette technique attractive. Cependant, ce processus implique de contraindre l'interprétation des données à partir de l'analyse de ces mêmes données, ce qui semble surcontraindre la discordia, et diminuer artificiellement l'erreur.

## 4.0.2 Conclusions

Les âges SIMS et ICPMS se valident donc les uns les autres, dans la plupart des cas. Cette double datation a donc permis de démontrer la pertinence de la datation à la SIMS et de la correction du  $Pb_c$ , pour la détermination fine du dernier épisode de fermeture des apatites, puisque dans la plupart des cas, les âges de moyenne pondérée sont plus précis que ceux des TW. Par ailleurs, cette sélection sur les âges corrigés permet de séparer des événements impossible à séparer sur les données ICPMS. Enfin, la taille du spot étant plus petite à la SIMS il est possible de mesurer des zones précises ou des surcroissances particulièrement fines, que la taille du spot de l'ICPMS ne permet pas d'atteindre sans mordre sur des parties plus internes du grain.

Dans le cas d'histoire thermiques simples (refroidissement simple), la méthode ICPMS est suffisante et permet de mesurer de nombreux grains par échantillons en peu de temps pour réduire le plus possible les erreurs et incertitudes. Si les grains ont des teneurs en  $Pb_c$  très importantes alors la datation à la SIMS présente un intérêt significatif. De plus, dans le cas où l'histoire est polymétamorphique et où les différents événements à dater sont a priori relativement proches ( $\leq 10-20$  Ma d'écart) la méthode de mesures et de correction du  $Pb_c$  à la SIMS se révèle pertinente. En effet, il faut être sûr de ne pas sous-échantillonner et fusionner deux événements thermiques en un seul âge. Ce choix implique cependant un grand temps d'acquisition de données.

# Chapitre 5

## Datation U-Pb sur Zircon

### 5.1 Introduction

Les datations U-Pb sur apatites ont été complétées par des données U-Pb sur zircons obtenues à la SIMS de Nancy (cf chapitre Méthodologie, et tableau en annexe), lorsque les chimies s’y prêtaient. Ces données permettent de dater la cristallisation des zircons étant donnée la très haute température de fermeture du système U-Pb dans les zircons (900°C, Cherniak et Watson (2000)). Ainsi, on a accès à l’âge de cristallisation de plutons, à un épisode de fusion partielle dans des migmatites ou encore par exemple de surcroissance cristalline pendant un épisode métamorphique de haut grade. Il peut y avoir des événements postérieurs à la cristallisation des zircons, responsables d’une réouverture partielle (déformation, percolation de fluides, menant à une perte de Pb radiogénique dans le cas des zircons), ils sont alors potentiellement identifiables sur les discordia par l’intercept bas, qui correspond à la dernière ouverture du système isotopique.

Dans le cas des Calédonides d’Ecosse, où les terrains sont polymétamorphiques et où localement le métamorphisme est de haute température (700°C), le but de ces datations était de documenter précisément les événements grampiens et possiblement scandiens en étudiant les surcroissances de zircons. Le grampien n’étant identifié que dans la nappe de Naver, nous avons exploré les nappes sous-jacentes. Il s’agissait notamment de comprendre l’étendue de l’évènement grampien.



L'autre objectif de ces analyses était de dater des surcroissances syn-tectoniques de zircons dans les zones de cisaillement au sein des chevauchements pour dater le fonctionnement de ces accidents. Pour cette raison la datation à la SIMS d'un nombre limité de zircons a été préférée à la datation LA-ICPMS d'un grand nombre de zircons. Certes l'analyse statistique des populations d'âges obtenues reste limitée, mais le contrôle textural de la signification de chaque âge est plus important dans l'optique de la problématique de la thèse.

Enfin, quelques plutons n'ayant pas d'âge U-Pb sur zircons, il s'agissait de compléter la base de données disponible dans la littérature. Les plutons au front du prisme sont déjà datés assez précisément (Loch Ailsh, Loch Borralan par exemple). D'autres plutons comme le granite de Helmsdale ou le pluton Rogart n'étaient pas encore datés et certains âges étaient particulièrement imprécis : en particulier le Loch Loyal n'est daté au scandien que par un unique zircon concordant, (Goodenough *et al.*, 2011)). La localisation des échantillons datés par cette méthode est présentée dans la figure 5.1.1.

## 5.2 Résultats

### 5.2.1 1- La signature des zircons du socle

Quatre échantillons de socle ont été datés dans cette étude : un échantillon juste au dessus du chevauchement du Moine (SC-16-45, "Lower Moine Unit"), un juste au dessus du chevauchement de Ben Hope (SC-15-19, "Lower Ben Hope Unit") et deux localisés dans la nappe de Ben Hope (SC-15-10 et SC-15-41, "Upper Ben Hope Unit"). Les résultats de ces quatres échantillons sont présentés sur les figures 5.2.1 et 5.2.7.

Les grains de l'échantillon **SC-16-45 ("Lower Moine Unit")** sont illustrés dans la figure 5.2.2. Ils présentent des textures assez complexes avec plusieurs épisodes de croissance/dissolution et des zonations magmatiques. Les cercles représentent les spot de mesures et les valeurs notées sont les âges  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  correspondants.

Les rapports de cet échantillon se placent juste au-dessus de la concor-

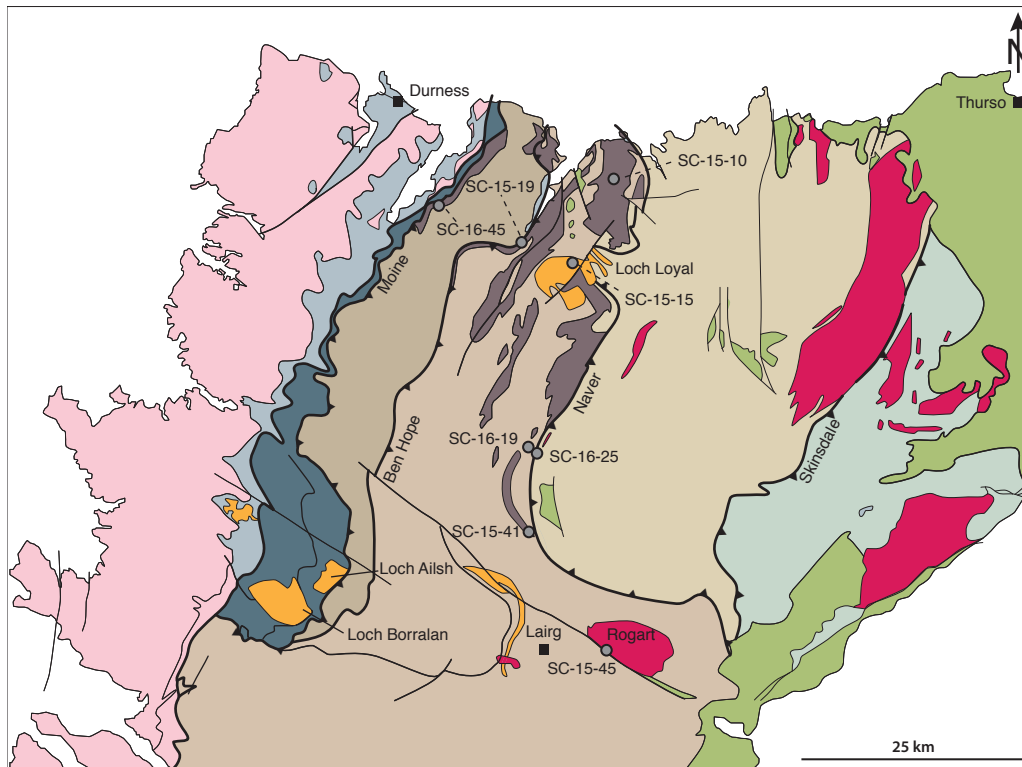


FIGURE 5.1.1 – Localisation des échantillons datés par U-Pb sur zircon

dia dans la figure 5.2.1a. Cela indique que les systèmes sont probablement concordants mais que l'erreur sur les rapports isotopiques est sous-estimée pour ces mesures. Les deux âges phanérozoïques sont également concordants. Dans ce cas, l'intercept bas n'a pas vraiment de valeur et la moyenne pondérée est plus représentative de l'événement principal. La moyenne pondérée est de  $2784 \sim 69$  Ma. Pratiquement tous les âges  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  sont archéens et varient de  $2891 \pm 49$  Ma à  $2210 \pm 23$  Ma excepté les deux mesures du grain n°5 (Fig. 5.2.2). Seuls ces deux âges phanérozoïques sont Carbonifère et Crétacé. La texture de ce grain est complexe : un coeur à zonation probablement magmatique, puis une surface de dissolution et enfin deux zones de surcroissance. Ce sont ces deux surcroissances qui donnent des âges de  $329 \pm 3$  Ma et  $143 \pm 2$  Ma. Cette texture de dissolution puis de surcroissance est typique de circulation de fluides à la fin de son histoire (Harley et Kelly, 2007; Roberts et Finger, 1997). Les grains plus vieux présentent des textures différentes, avec

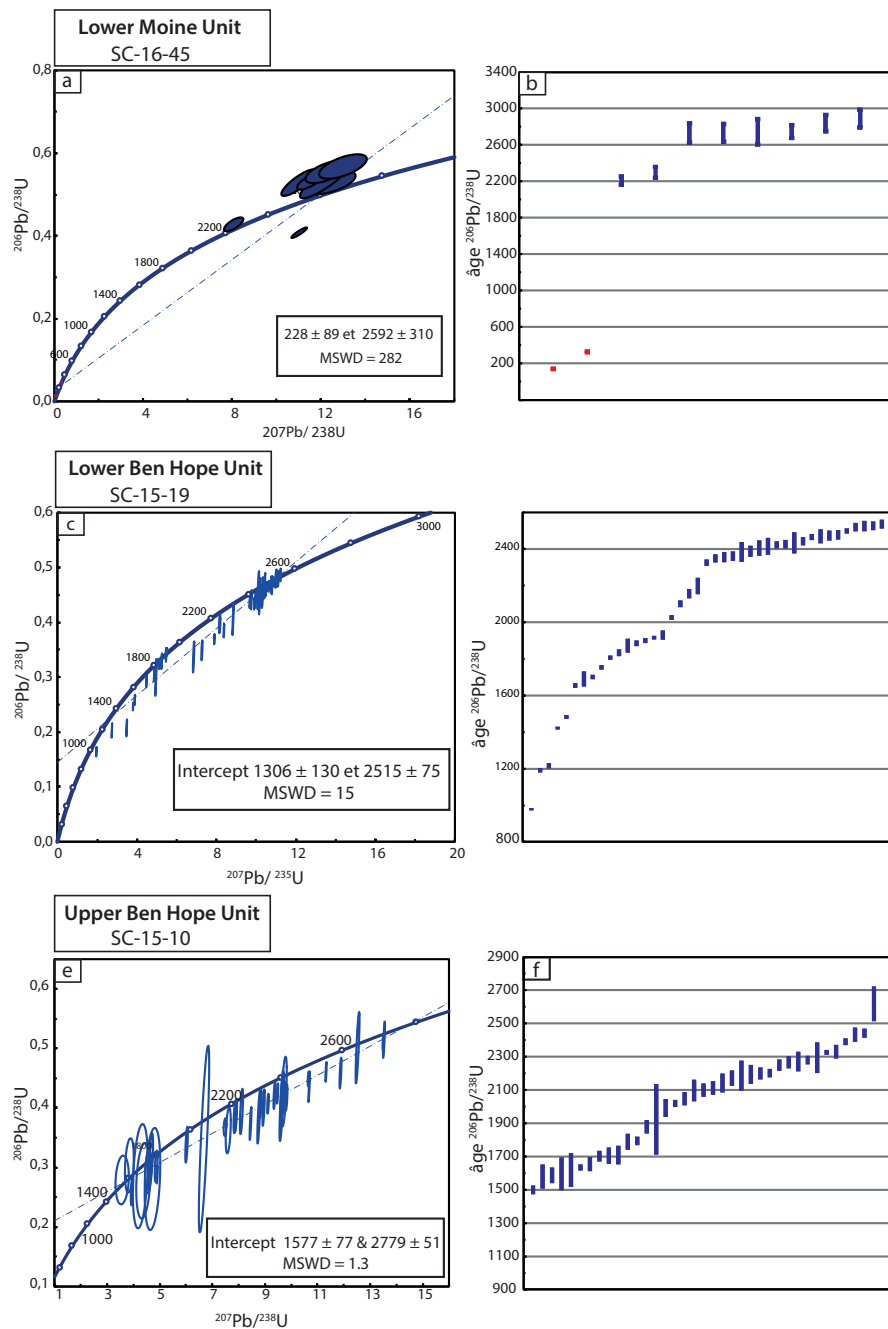


FIGURE 5.2.1 – La première colonne montre les diagrammes Wetherhill des échantillons de socle de nappes du Moine et de Ben Hope, la seconde colonne montre les diagrammes de répartition des âges  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$

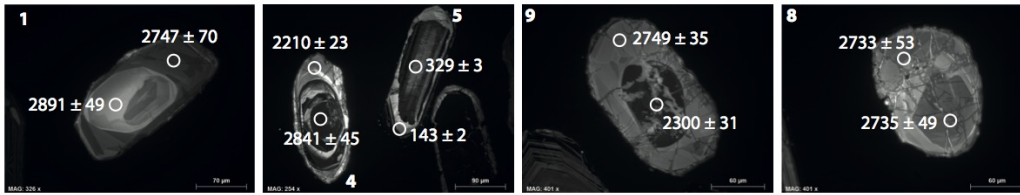


FIGURE 5.2.2 – Images en cathodoluminescence des grains de l'échantillon **SC-16-45** et localisation des impacts de SIMS

notamment beaucoup de fractures cicatrisées (Fig. 5.2.2, grain 8) invisibles dans le grain jeune (l'épisode de fracturation serait-il Scandien ?). L'épisode calédonien n'est donc pas enregistré dans la nappe du Moine dans les zircons, ce qui n'est pas vraiment étonnant au vu des températures maximales estimées pour le pic Scandien dans l'unité inférieure du Moine ( $\sim 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), bien inférieures à celles où le zircon est susceptible d'enregistrer un événement métamorphique (ie  $\sim 700\text{ }^{\circ}\text{C}$ , Rubatto *et al.* (2001))

L'échantillon **SC-15-19 (Lower Ben Hope Unit)** est localisé juste au dessus du chevauchement de Ben Hope, dans une portion de socle (Fig. 5.1.1). Les grains sont présentés dans la figure 5.2.3 où on observe une grande diversité de textures.

L'essentiel des grains présentent des zonations oscillantes typiques des zircons magmatiques (Fig. 5.2.3, grain 40, 13, 20, 28 par exemple). D'autres grains possèdent des surcroissances homogènes (Fig. 5.2.3, grain 15) ou zonées (Fig. 5.2.3, grain 20, 28). Enfin, quelques grains sont plus complexes avec des coeurs aux géométries discordantes (Fig. 5.2.3, grain 24, 4, et la bordure du grain 22). Les surcroissances présentes sur l'essentiel des grains étaient malheureusement trop fines pour être datées (Fig. 5.2.3, grain 7, 16, 13, 24 par exemple). Malgré la diversité des textures, les âges de cet échantillon sont principalement protérozoïques et varient entre  $978 \pm 3\text{ Ma}$  et  $2555 \pm 10\text{ Ma}$ . L'intercept bas de cette discordia produit un âge de  $1306 \pm 130\text{ Ma}$  sans signification réelle, celui-ci étant plus vieux que les zircons les plus jeunes pris en compte.

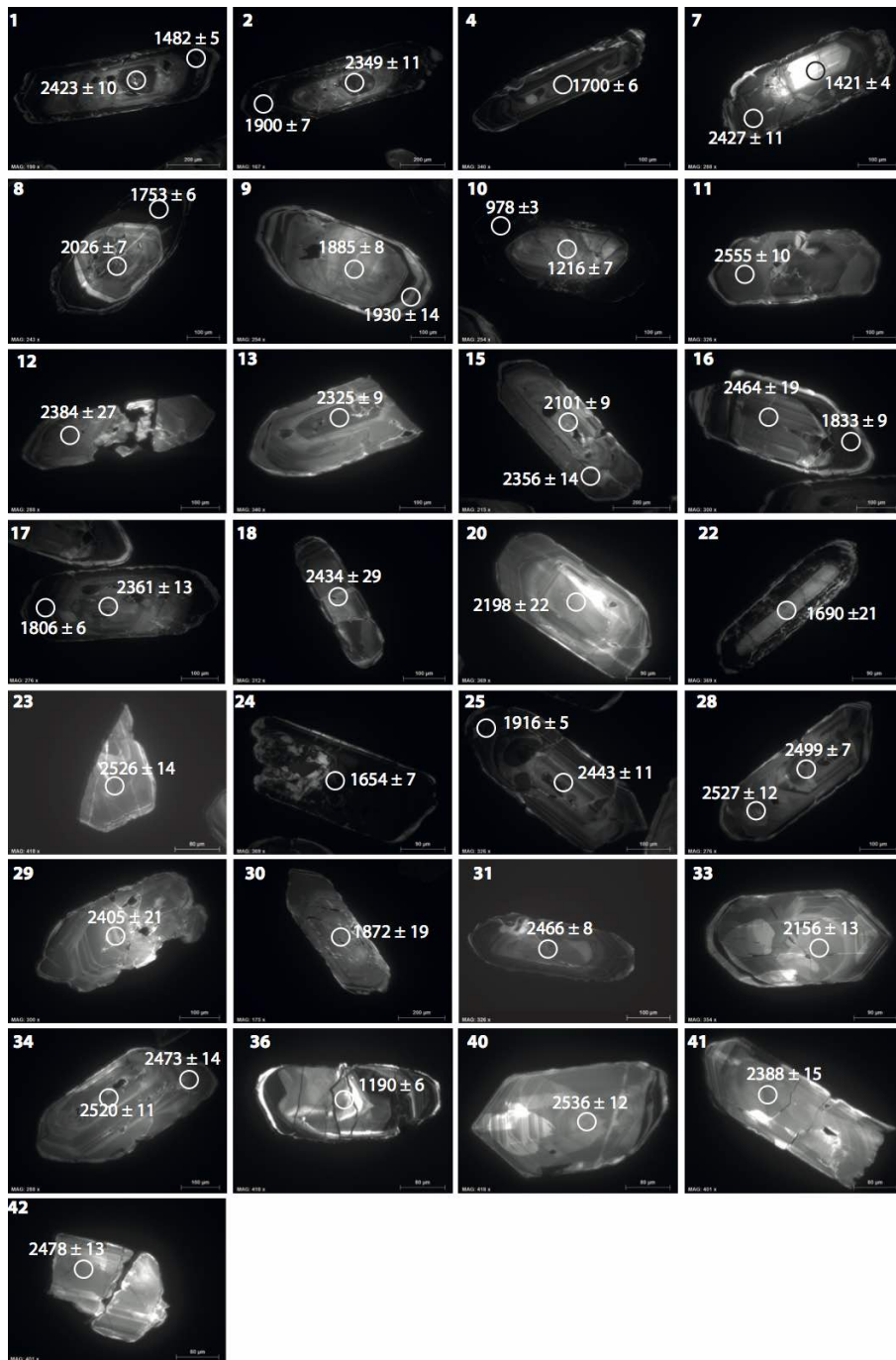


FIGURE 5.2.3 – Images en cathodoluminescence de l'échantillon SC-15-19 (Lower Ben Hope Unit) et localisation des impacts de SIMS

Les zircons de l'échantillon **SC-15-10, Upper Ben Hope Unit** ont des textures hétérogènes avec des coeurs et de bordures de luminescences contrastées (Fig. 5.2.4). La variété texturale des zircons se reflète dans la distribution des âges, avec des coeurs plus vieux et des bordures jeunes. La distribution des données montre un étalement des âges  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  entre 1500 Ma et 2700 Ma (Fig. 5.2.1e et f). Cet étalement des données définit une discordia dans le diagramme Wetherhill (Fig. 5.2.1e) qui définit un intercept bas à  $1577 \text{ Ma} \pm 77 \text{ Ma}$ . L'intercept haut est de  $2779 \pm 51$ . Aucun événement grampien ou scandien n'est donc enregistré dans cet échantillon dominé par des âges archéens.

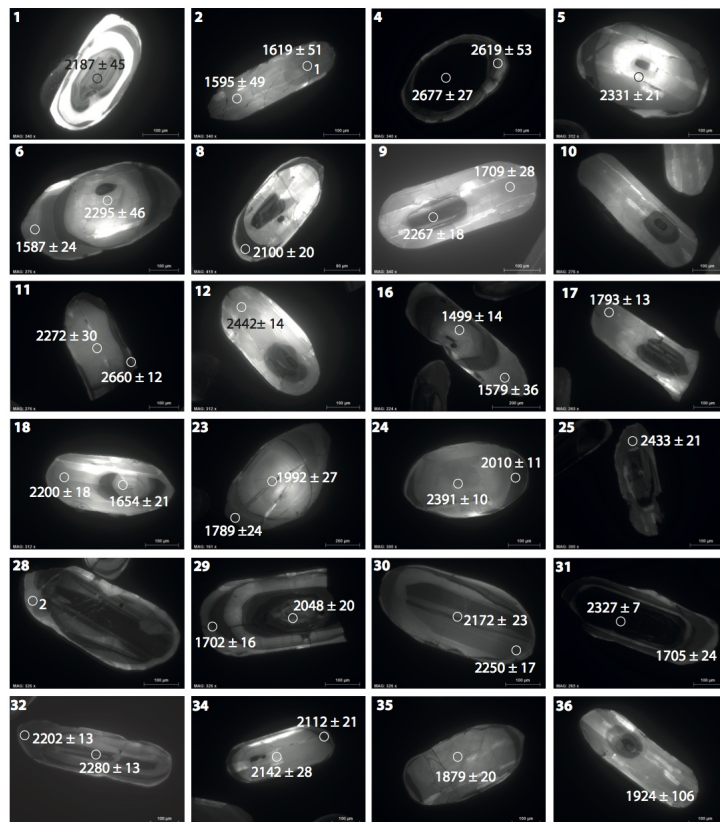


FIGURE 5.2.4 – Images en cathodoluminescence des grains de zircons de l'échantillon **SC-15-10**. Les grains sont essentiellement hétérogènes avec un coeur bien visible et de multiples surcroissances, probablement des textures de recristallisation de haute température

L'échantillon **SC-15-41 (Upper Ben Hope unit)**, de l'unité de Ben Hope est une portion de socle Lewisien impliquée dans un pli de socle ("lewisianoïde") (Fig. 5.1.1). Les grains de cet échantillon sont illustrés dans la figure 5.2.5 et 5.2.6. La figure 5.2.5 présente les grains produisant des âges scandiens et la figure 5.2.6 présente les grains produisant des âges antérieurs.

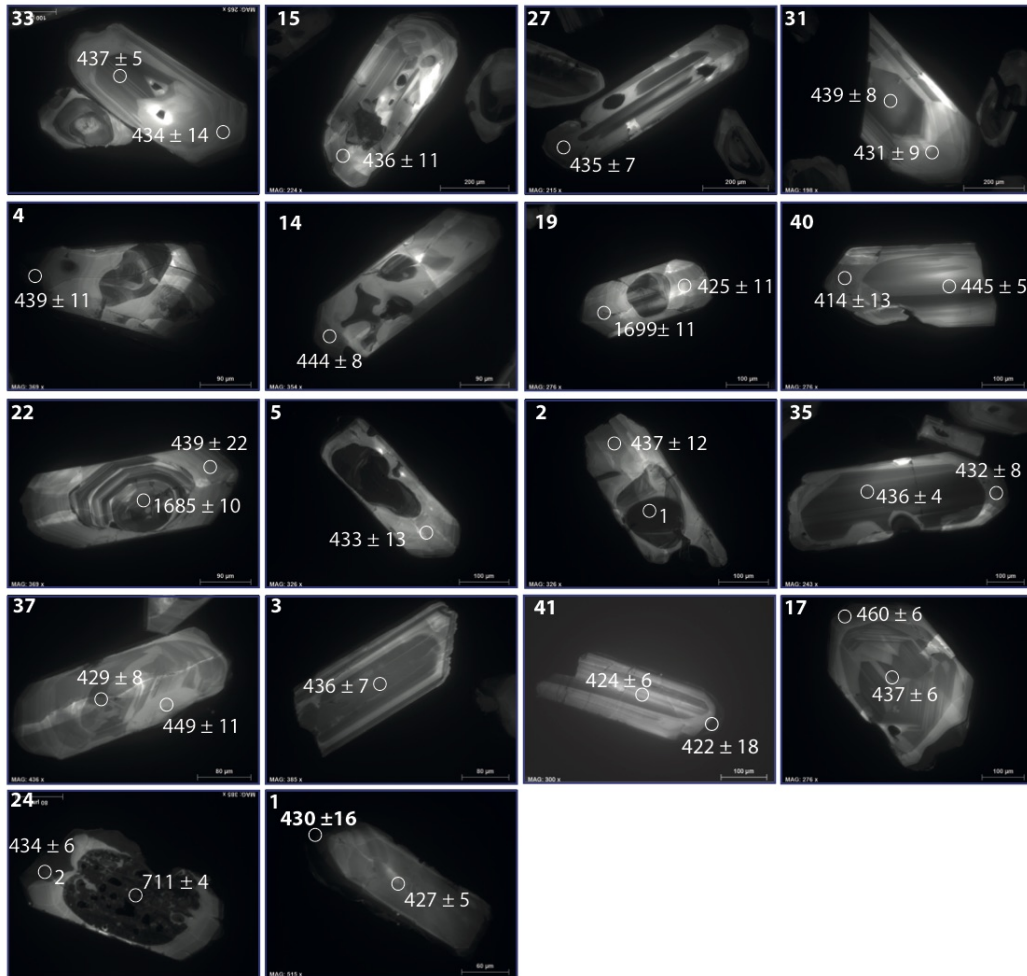


FIGURE 5.2.5 – Images en cathodoluminescence des grains de l'échantillon **SC-15-41** produisant des âges scandiens

Certains de ces grains présentent des textures similaires à ceux de l'échantillon SC-15-10, qui est aussi une portion de socle (Fig. 5.2.5a, grain 19, 5, 2 ou 22), mais ces grains donnent des âges scandiens et non protérozoïques comme dans l'échantillon SC-15-10. On retrouve aussi des textures "convo-



lute" (Fig. 5.2.5, grain 4, 14, 15). L'essentiel des grains montre plusieurs domaines de croissances. Les âges scandiens sont principalement situés sur des bordures ou des surcroissances, mais pas exclusivement : certains coeurs de grains ont aussi des âges scandiens (Fig. 5.2.5, grain 33, 31, 40, 41).

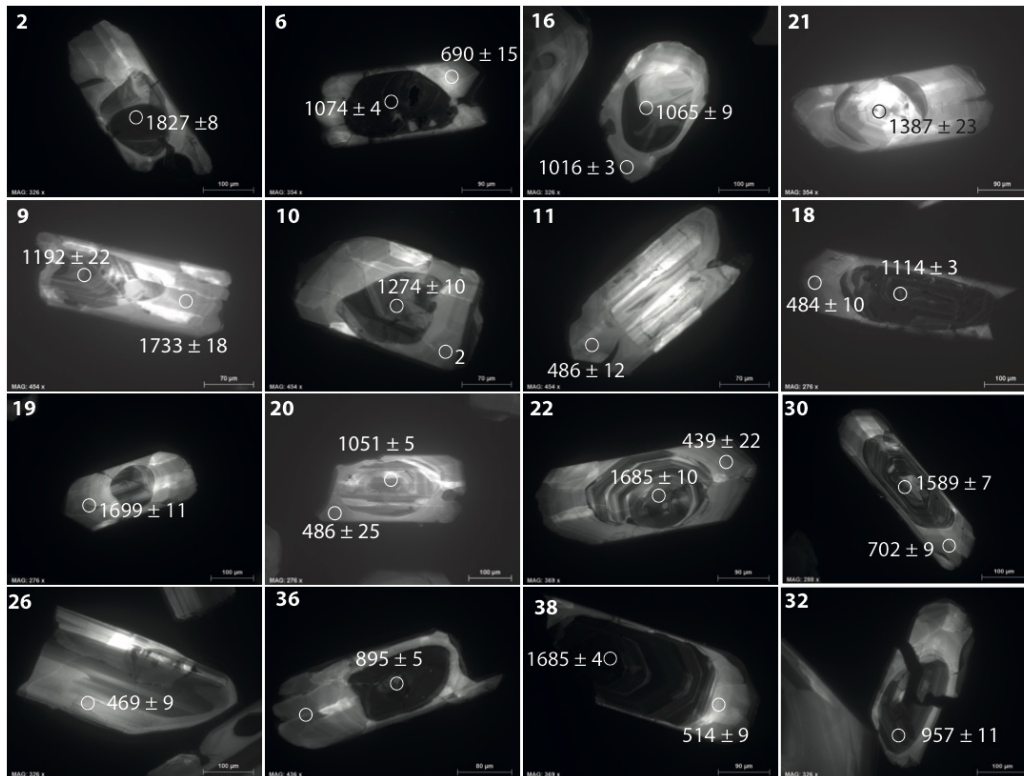


FIGURE 5.2.6 – Images en cathodoluminescence des grains de l'échantillon SC-15-41 produisant des âges protérozoïques

Sur la figure 5.2.7a est présentée la moyenne pondérée des âges scandiens de cet échantillon. Les 24 mesures produisent un âge moyen de  $434,7 \pm 3$  Ma, avec un MSWD et une probabilité de fit qui attestent d'une unique population d'âge. Ces mêmes mesures produisent un âge d'intercept bas de  $431 \pm 51$  Ma (Fig. 5.2.7, bleu). Cependant cette discordia ne permet pas un intercept haut puisque l'ensemble des données est globalement concordant. Dans ce cas, l'âge de la moyenne pondérée des zircons concordants à plus de sens. La discordia définie par la famille d'âges antérieurs à l'épisode scandien, produit un intercept inférieur de  $998 \pm 110$  Ma (Fig. 5.2.7a, violet). Cet intercept,



outre sa grande incertitude est plus vieux que les âges les plus jeunes pris en compte, et ne reflète donc pas un épisode unique de réouverture du système U-Pb anté- calédonien.

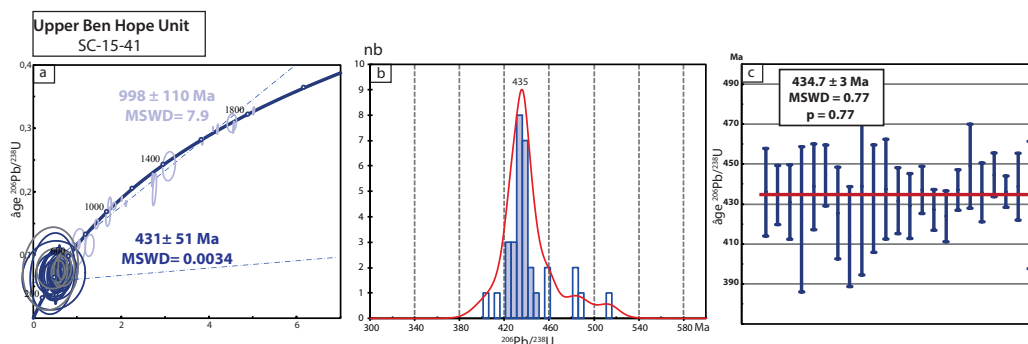


FIGURE 5.2.7 – a) Diagramme Wetherhill de l'échantillon SC-15-41 montrant deux populations et les valeurs deux intercepts bas respectifs, b) distribution des probabilités d'âge et c) moyenne pondérée de la population scandinave sélectionnée sur le diagramme b

## 5.2.2 2- La cristallisation des plutons

Deux plutons ont été datés dans cette étude au sein de la nappe de Ben Hope. Le premier est le pluton de Loch Loyal (**SC-15-15**) et le second est le pluton de Rogart (**SC-15-45**)

Le pluton Loch Loyal (**SC-15-15, Loch Loyal**) est une syénite qui recoupe le chevauchement de Naver (Fig. 5.1.1). Il a été précédemment daté à 425 Ma mais par un seul zircon concordant. Les textures sont très diverses dans cet échantillon et sont présentées sur la figure 5.2.9.

On retrouve des textures de zonations magmatiques en surcroissance ou formant le coeur de zircons (Fig. 5.2.9 grain 15 ou 23). On retrouve aussi des grains avec des zonations oscillantes et des surcroissances homogènes (Fig. 5.2.9, grains 29, 34). Également présentes sur plusieurs grains des textures dites "convolutées" ou "chaotiques" témoignent d'une dissolution-recristallisation si forte que les parties internes du grain ne sont plus géométriquement concordantes (Fig. 5.2.9 grain, 28, 14, 7 ou 8).

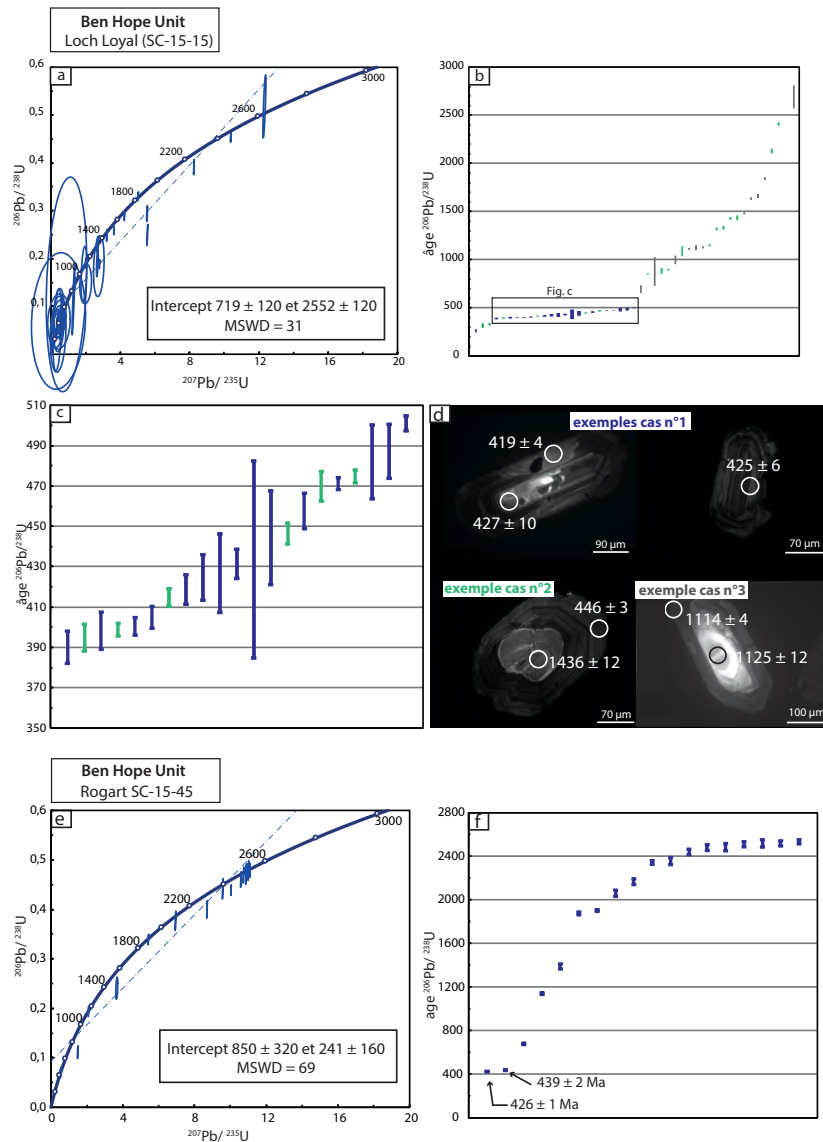


FIGURE 5.2.8 – Données des zircons des plutons Loch Loyal (SC-15-15) et Rogart (SC-15-45) a) Diagramme Wetherhill des zircons de Loch Loyal, b) diagramme de répartition de tous les âges c) diagramme de répartition des âges sélectionnés pour le calcul de la moyenne pondérée, d) textures représentatives des trois groupes de zircons, e) diagramme Wetherhill des zircons de Rogart, f) diagramme de répartition des âges de Rogart montrant les deux âges scandiens. Les barres d'âge sont représentées en fonction des cas : bleu, cas 1, vert cas 2, gris, cas 3. Cf texte pour la signification des cas

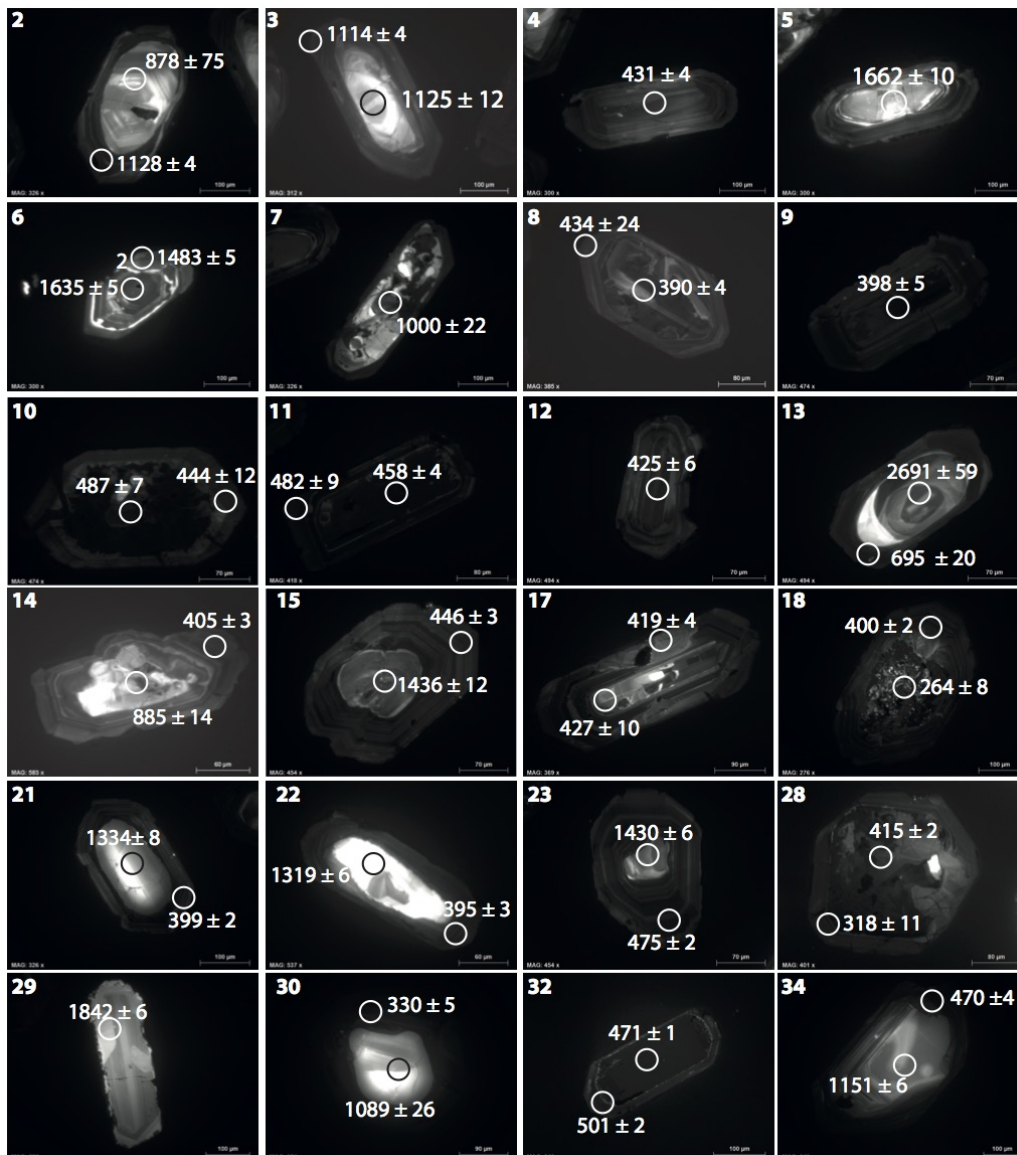


FIGURE 5.2.9 – Images en cathodoluminescence des grains de zircons de l'échantillon **SC-15-15**. Une grande diversité de textures est visible dans les grains de ces échantillons

L'intercept bas défini par l'ensemble des mesures est de  $719 \pm 120$  Ma et l'intercept haut est de  $2552 \pm 120$  Ma. Là, encore ces valeurs n'encadrent pas la population prise en compte, ce qui rend sûrement compte de réouvertures successives multiples du système isotopique. Dans la figure 5.2.8b est montré

la distribution de tous les âges  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  qui sont très largement étalés entre 700 Ma et  $\sim 2700$  Ma, avec une population d'âges récents entre 390 Ma et 501 Ma. Les âges entre 390 Ma et 500 Ma semblent dispersés de manière continue sur l'intervalle (Fig. 5.2.8c). Pour mieux comprendre la relation entre les âges et les textures des zircons, trois groupes ont été définis (bleu, vert gris sur la Fig. 5.2.8c et d). Le premier cas (âges bleus) rassemble les zircons ayant des textures magmatiques et pas d'héritages précambrien. Le deuxième cas (âges verts) rassemble les zircons ayant des textures magmatiques avec des coeurs d'âge précambrien et des surcroissances magmatiques d'âge phanérozoïque. Les zircons de la troisième catégorie (en gris) sont des zircons avec des textures magmatiques et des âges uniquement précambriens. On remarque que la totalité des zircons qui produisent des âges entre 400 et 500 Ma ont des textures magmatiques. Sur ces 24 mesures, les 15 concordantes à plus de 90 % s'étalent uniformément sur l'intervalle.

L'échantillon **SC-15-45** est issu du pluton granitique de Rogart dans la nappe de Ben Hope (Fig. 5.1.1). Les grains de cet échantillon sont illustrés dans la figure 5.2.10. Ces grains présentent tous des zonations oscillantes associées à l'épisode magmatique de ce pluton.

Les données de cet échantillon varient entre  $2534 \pm 10$  Ma et  $426 \pm 1$  Ma (Fig. 5.2.8). Seuls deux âges sont scandiens :  $426 \pm 1$  Ma et  $439 \pm 2$  Ma (Fig. 5.2.10 grain 2 et 17). Ces deux âges sont des surcroissances de zircons à coeur magmatiques. Leur faibles erreurs ne permettent pas de faire une moyenne pondérée avec un MSWD et un probability of fit raisonnable. Le reste des données définit un intercept bas de la discordia à  $850 \pm 320$  Ma.

### 5.2.3 3- Les surcroissances dans le chevauchement de Naver

Pour tenter de dater un épisode de recristallisation pendant l'activité du chevauchement de Naver plusieurs échantillons dans cette zone de cisaillement ont été datés. Deux échantillons dans cette zone de cisaillement ont été datés : **SC-16-19** et **SC-16-26**. Les données de ces deux échantillons sont présentées sur la figure 5.2.11.

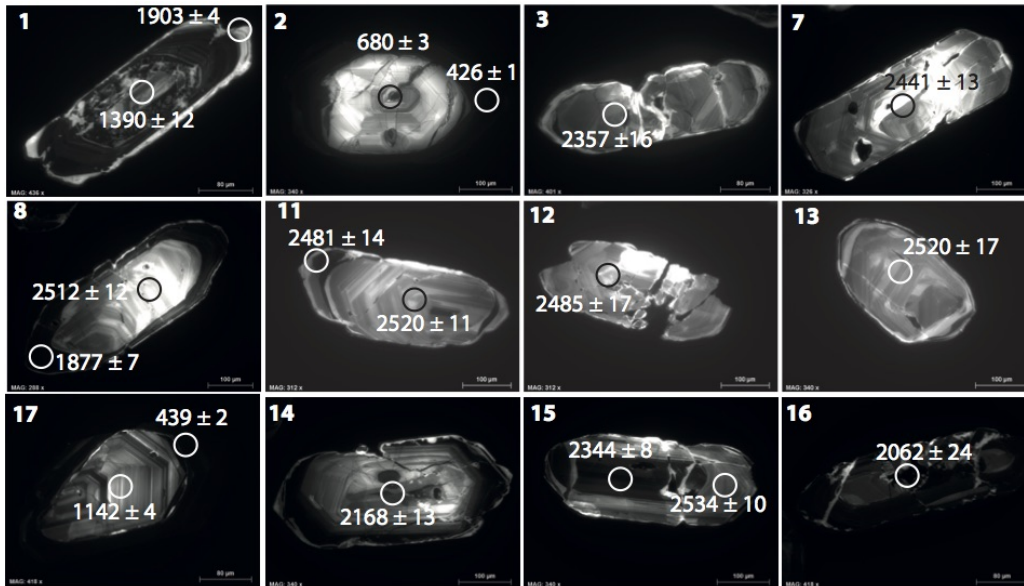


FIGURE 5.2.10 – Images en cathodoluminescence des grains de l'échantillon **SC-15-45**. Les deux seuls âges scandiens proviennent de surcroissances sur le grain 2 et 17

L'échantillon **SC-16-19** est localisé dans l'unité de Ben Hope, juste en dessous du chevauchement de Naver (Fig. 5.1.1). Les grains de cet échantillon ont de claires surcroissances homogènes qui entourent un coeur présentant souvent mais pas nécessairement des zonation magmatiques (Fig. 5.2.12, grain 27, 2, 23 par exemple).

Les résultats des datations de cet échantillon sont présentés dans la figure 5.2.11. Aucune des surcroissances ne produit d'âge scandien ou grampien alors que cet échantillon est proche de la nappe de Naver, de plus haut grade. L'essentiel des données produisent des âges protérozoïques ou archéens (Fig. 5.2.11). On remarque également sur la figure 5.2.11 que deux populations sont présentes. Une première avec des forts rapports  $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ , supérieurs à 8,3, et une seconde famille avec des rapports compris entre 3,5 et 4,9. La première famille définit un intercept bas à  $1652 \pm 120$  Ma et la seconde famille à  $1612 \pm 14$  Ma. L'essentiel des âges de la seconde famille sont concordants ou sont proches de l'être ce qui implique que les erreurs sont probablement sous-estimées dans cet échantillon. Cependant, la dispersion est telle que

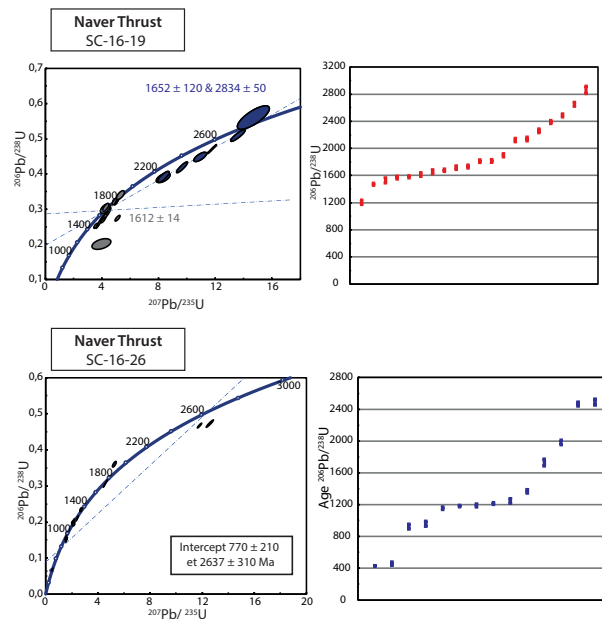


FIGURE 5.2.11 – Données des zircons échantillons dans le Naver Thrust (SC-16-19 et SC-16-26) a) Diagramme Wetherill SC-16-19, b) diagramme de répartition de tous les âges

faire une moyenne pondérée sur ces mesures entraîne des valeurs de MSWD et de probabilité de fit trop importantes. Peut-être que la seconde population correspond à l'ouverture et au reset partiel de la première famille.

L'échantillon **SC-16-26** est un échantillon dans la zone de cisaillement du chevauchement du Moine (Fig. 5.1.1). Dans cet échantillon les grains de zircon présentaient des textures diverses : des zonations magmatiques (Fig. 5.2.13), des surcroissance (Fig. 5.2.13, grain 3 et 10), et des grains homogènes (Fig. 5.2.13, grain 16).

Dans la diversité de ces textures, seuls 2 grains ont produit des âges scandiens à  $458 \pm 20$  et  $430 \pm 4$  (Fig. 5.2.11). Dans les deux cas, ces âges sont issus de surcroissances (Fig. 5.2.13, grain 3 et 10). À part ces deux grains, l'ensemble des âges produits pour ces grains est protérozoïque, avec un intercept bas de  $770 \pm 210$  Ma (Fig. 5.2.11)

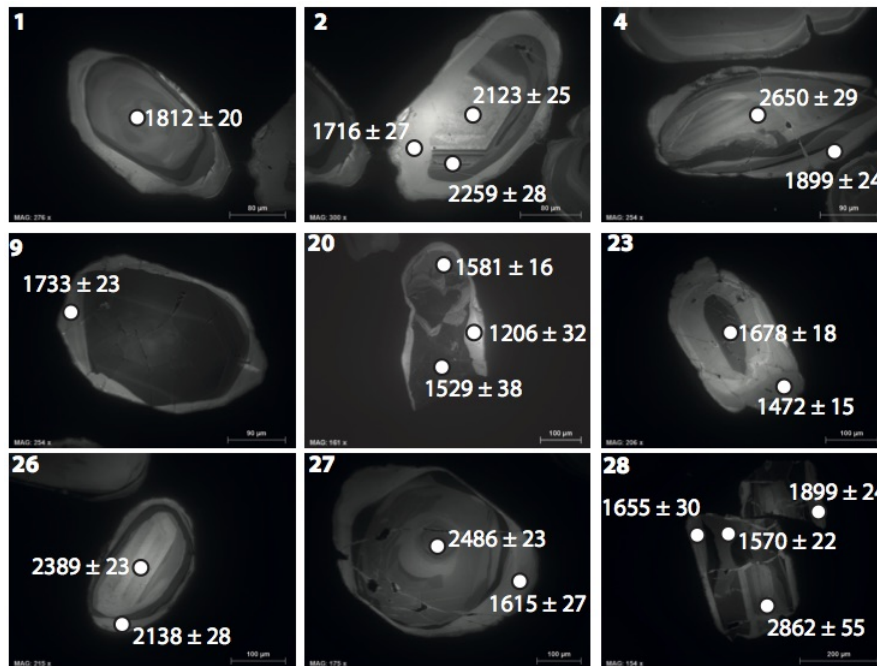


FIGURE 5.2.12 – Images en cathodoluminescence des grains de l'échantillon SC-16-19

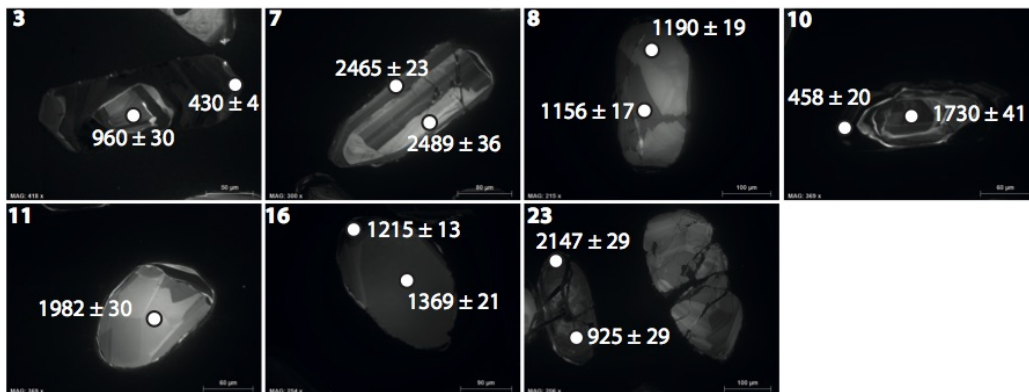


FIGURE 5.2.13 – Images en cathodoluminescence des grains de l'échantillon SC-16-26

### 5.3 Discussion

La figure 5.3.1 présente les différentes distributions d'âges dans les échantillons. Les spectres issus des données brutes (courbes pointillées) et les

spectres issus des analyses concordantes (courbes pleines) ne sont que ponctuellement différents. Deux types de distributions sont visibles dans les échantillons (Fig. 5.3.1). Dans un premier temps, on remarque que les spectres a, b, c, et d sont similaires avec une influence limitée des âges protérozoïques et une présence d'âges scandiens (Fig. 5.3.1a, b, c et d). À l'inverse, les spectres e, f, g et h sont dominés par des âges protérozoïques et parfois archéens, et n'ont pas d'enregistrement scandien (sauf 2 âges dans dans le spectre h). Parmi les spectres avec avec une réelle signature calédonienne et une faible influence des âges plus vieux, deux échantillons sont des plutons (b, Rogart, et c, Loch Loyal). Ils ont une signature géochronologique significativement différentes des roches du socle où dominant les âges protérozoïques et notamment paléoprotérozoïques. L'échantillon SC-15-41 provient de ce qui est cartographié comme un pli de socle sous le chevauchement de Naver mais présente plutôt un profil d'âges similaire aux plutons syn-orogéniques. Si cet échantillon représente du socle, il a perdu quasiment toute son influence anté-calédonienne. De plus, les textures des zircons produisant des âges scandiens ont des textures magmatiques et ne sont pas localisé uniquement sur des surcroissances. Il s'agit donc d'un réel épisode de cristallisation de zircons enregistré vers  $434,7 \text{ Ma} \pm 3 \text{ Ma}$  par la portion de socle exhumée dans le pli proche de la zone de cisaillement du chevauchement de Naver. Celui-ci est le seul de la séquence tectonique étudiée qui porte une telle signature.

**Les âges protérozoïques** Les échantillons SC-15-19 (Fig. 5.3.1g) et SC-15-10 (Fig. 5.3.1e) sont issus de deux portions de socle de la même unité, l'unité de Ben Hope, mais le premier est localisé juste dans le toit du chevauchement de Ben Hope ("Lower Ben Hope") alors que le second est au coeur de l'unité ("Upper Ben Hope"). Même si on retrouve dans les deux cas une influence majeure des âges protérozoïques, quelques différences sont remarquables. Le spectre e, le "Upper Ben Hope" montre deux populations de zircons hérités : une population comprise entre 1,5 Ga et 2 Ga, et une population entre 2 Ga et 2,5 Ga. À l'inverse, le spectre g, ("Lower Ben Hope") montre clairement une population d'âges entre 2,3 Ga et 2,5 Ga et des âges beaucoup plus dispersés entre 1,4 Ga et 2,2 Ga. Enfin, seul le spectre g montre des âges archéens. Son pic à 1 Ga représente des âges discordants et n'a donc pas de signification directe.



**Héritage et comparaison avec le Complexe Lewisien** Nombre des zircons datés sont hérités d'épisodes magmatiques ou métamorphiques plus anciens que l'épisode Calédonien. Ils peuvent provenir soit d'épisodes anté-sédimentation des zircons détritiques dans les unités para-dérivées (i), et alors signer leur source, ou (ii) d'épisodes métamorphiques de haut grade subis indifféremment par les unités para- et ortho-dérivées avant le scandien. Dans les deux cas, les retrouver dans le socle lewisien et dans les portions de socle des nappes est un argument de corrélation. i-L'identification des provenances détritiques du groupe du Moine est source de plusieurs problèmes (Kinny *et al.*, 2003). La source de sédiments la plus souvent citée est l'orogène Grenville sur la marge Laurentienne, qui est responsable des âges vers 1 Ga (voir 950 Ma). Ces âges de zircons hérités ne sont bien visibles que sur deux échantillons : SC-15-19, où ils sont discordants, et SC-16-26. Ces deux échantillons sont localisés près du chevauchement de Naver (Fig. 5.3.1a et g). ii- Certains pics correspondent à d'autres événements orogéniques régionaux. De multiples épisodes de métamorphisme ont été recensés dans l'autochtone Lewisien. Dans les terrains de la région d'Assynt et de Rhiconich, deux épisodes de métamorphisme au faciès granulite sont datés vers 2,5 Ga et 2,7 Ga (Friend et Kinny, 2001). Le premier événement est assez bien visible dans les spectres a et b (Fig. 5.3.1, dans le chevauchement de Naver et dans le pluton de Rogart) et le second est à peine visible dans le spectre h (Fig. 5.3.1 "Lower Moine unit"). Le métamorphisme Laxfordien, daté vers 1.7 Ga dans les deux terrains d'Assynt et de Rhiconich (Kinny *et al.*, 2005) est en revanche difficilement visible dans les spectres, où aucun réel pic isolé à cet âge là n'est visible, pas plus que dans les valeurs d'intercepts bas des discordias (sauf peut-être l'échantillon SC-16-19, avec un intercept à  $1652 \pm 120$  Ma, mais l'incertitude sur cette mesure est considérable, et ce n'est pas un échantillon de socle).

Il semble donc que les données des zircons ne supportent que mal l'hypothèse d'une origine commune pour le socle Lewisien et les portions de socle lewisianoïde, proposée historiquement sur la base d'arguments lithologiques. Ceci étant la valeur statistique des spectres présentés est discutable, une étude LA-ICPMS sur plusieurs centaines de zircons dans chaque échantillon donnerait sans doute autre chose. Encore une fois l'objectif principal de la

présente étude est de mettre en évidence des surcroissances scandiennes plus que d'identifier la signature lewisienne des protolithes des nappes.

**Quelques âges scandiens** Les données issues des plutons viennent confirmer l'âge du pulse magmatique scandien avec les âges du Loch Loyal dispersés sur l'intervalle 400-500 Ma et les deux zircons datés à  $426 \pm 1$  Ma et  $439 \pm 2$  Ma dans le Rogart. Par ailleurs, l'enregistrement de la phase scandienne n'est visible dans des portions de socle anté-calédonien que juste en dessous du chevauchement de Naver (SC-15-41). Celui-ci est donc le seul des chevauchements dont le jeu affecte des portions du prisme capable de recristalliser du zircon. Je l'interprète donc comme la signature d'un jeu profond et précoce dans la phase scandienne ( $434,7 \pm 3$  Ma) du chevauchement de Naver. Les autres chevauchement n'ont qu'un enracinement plus superficiel.

**Absence quasi-totale d'âges grampiens** Dans l'ensemble de ces zircons, très peu d'âges grampiens ont été identifiés. Dans les nappes du Moine et de Ben Hope, ainsi que dans le chevauchement de Naver, il n'y a pas d'enregistrement de cet événement (thermique, magmatique, tectonique) ni à l'échelle du prisme, ni au sein des chevauchements. Seuls deux spectres montrent quelques âges grampiens, le spectre b (échantillon 15-45) et d (échantillon 15-15, Fig. 5.3.1)

**Quelques âges étonnamment jeunes** L'échantillon SC-16-45 au front de la chaîne est le seul à présenter deux âges post-Calédoniens à  $329 \pm 3$  Ma et  $143 \pm 2$  Ma (Fig. 5.3.1h et Fig. 5.2.1), les deux âges étant sur un même grain. Si l'âge mésozoïque est trop largement discordant pour avoir une signification, l'âge paléozoïque est concordant à 95 % et donc sans doute significatif. Il est notable aussi que ces âges anormalement jeunes soient obtenus dans un échantillon où les âges sur apatites sont également très jeunes. En effet, l'âge de l'intercept bas sur le diagramme de Tera-Wasserburg de l'échantillon SC-16-45 est de  $340 \pm 37$  Ma. L'échantillon juste en dessous du chevauchement du Moine SC-16-44 produit un âge de  $343 \pm 14$  Ma. Les données zircons et apatites au front de la chaîne sont donc du même ordre de grandeur et révèlent toutes deux une empreinte post-Calédonienne.

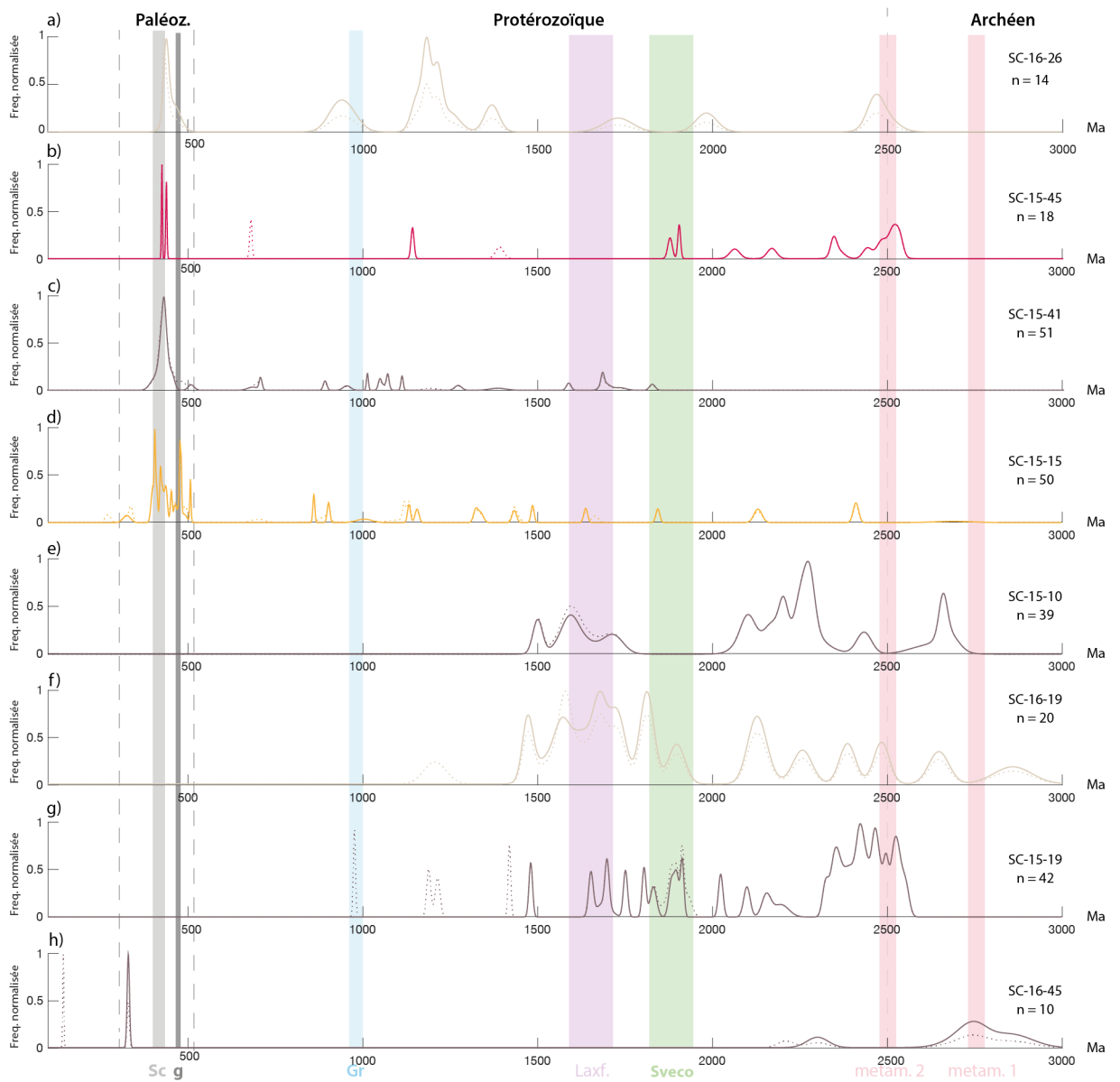


FIGURE 5.3.1 – Distribution des âges des différents échantillons. La courbe en pointillé représente l'ensemble des âges, la courbe continue représente les âges concordants à plus de 90 %. Sc et G représentent les gammes d'âges scandinave et grampienne. Sont aussi représentées les gammes d'âge de l'orogène Svecofennien (Sv), Grenvillien (Gr) (Kinny *et al.*, 2003) ainsi que les épisodes métamorphiques du socle Lewisien autochtone (metam 1, metam 2 et Lax. : événement Laxfordien) (Corfu *et al.*, 1994; Friend *et al.*, 2003; Kinny *et al.*, 2005)

# Chapitre 6

## Déformations visible dans le prisme calédonien

### 6.1 Les déformations à l'échelle du prisme

L'essentiel des échantillons de couverture sont des psammites du super-groupe du Moine. Elles sont composées de quartz, micas blancs, localement des biotites, et des épidotes. En lames minces, les déformations sont exprimées essentiellement par une foliation définie par les micas. La déformation semble intense car aucune texture prograde n'est préservée. De plus, ce qui semble contrôler la localisation de la déformation est la proportion de micas vs quartz et surtout la capacité des micas à se connecter pour matérialiser les zones de cisaillement. Le mécanisme de localisation le plus probable est donc la connexion de phases faibles.

Au sein des différentes unités elles-mêmes, la quantité de déformation finie semble relativement constante. Elle n'est (comme on pouvait s'y attendre) plus pénétrative et intense que dans les zones de cisaillement majeures (Naver, Ben Hope, Moine). Les plis de grande longueur d'onde, visibles en carte, sont systématiquement déversés et transposés dans la schistosité régionale. La limite socle-couverture ne semble pas avoir joué comme une zone de localisation de la déformation, sans doute du fait du faible contraste de minéralogie entre les méta-psammites et les méta-granites.

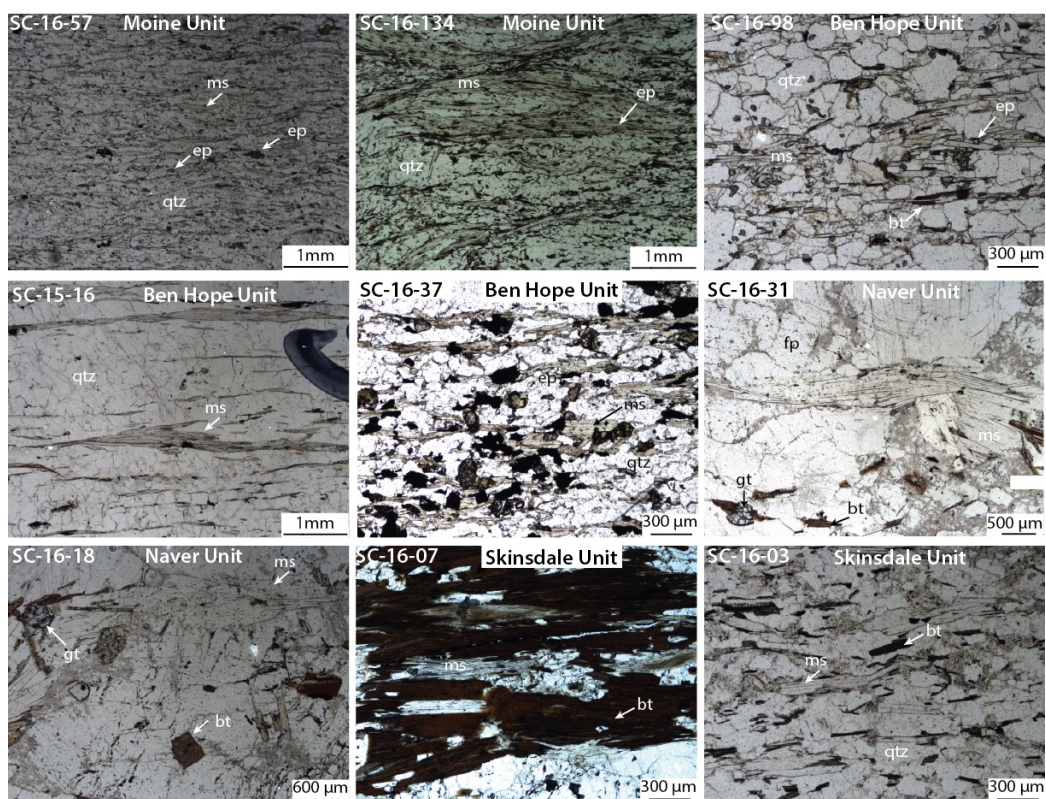


FIGURE 6.1.1 – Photographies optiques des échantillons datés par  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  sur micas. Les échantillons proviennent de l'ensemble des nappes constitutives du prisme.

## 6.2 Les déformations à l'échelle des zones de cisaillement majeures

Les zones de cisaillement qui séparent les différentes unités du prisme sont cartographiées avec très grande précision dans les cartes disponibles (British Geological Survey). Cependant, les déformations visibles sur le terrain laissent supposer que la localisation de la déformation dans ces zones de cisaillement reste difficilement identifiable, et qu'il constitue autant des sauts de taux de déformation finie que des zones de localisation à proprement parler.



### 6.2.1 La zone de cisaillement de Naver

La zone de cisaillement de Naver est caractérisée par de nombreux plis anisopaques. Ces plis sont visibles à toutes les échelles (Fig. 6.2.1B et C). Les longueurs d'onde de ces plis sont fortement variables et diminuent vers le chevauchement basal. La quantité de raccourcissement semble ainsi augmenter vers le chevauchement basal, ce que nous interprétons comme la signature d'une augmentation de la quantité de cisaillement finie. Aucune réactivation de bas grade ou continuum d'activité à travers la transition cassant-ductile n'a été décrite ou vue sur le terrain. Cette zone de cisaillement n'a donc visiblement pas été active au cours de toute l'histoire du prisme.



FIGURE 6.2.1 – Exemples des déformations visibles dans la zone de cisaillement de Naver. De nombreux plis anisopaques sont visibles, de plus en plus resserrés vers le chevauchement basal. (de loin (C) à proche (A) du chevauchement basal de Naver)

### 6.2.2 La zone de cisaillement de Ben Hope



FIGURE 6.2.2 – Photos représentatives des déformations dans la zone de cisaillement du Ben Hope. A) sous la zone de cisaillement, B et C au dessus de la zone de cisaillement)

On voit la connectivité des micas et la ségrégation des micas et des quartz en lits de minéralogies distinctes augmenter vers le sommet du profil (Fig. 6.2.2). Il semble que la déformation finie augmente de la base vers le sommet, que la schistosité évolue progressivement en une foliation. Les marqueurs du cisaillement sont relativement rares, sans doute du fait de l'absence de porphyroblastes (grenats ou feldspaths) capables d'enregistrer la part rotationnelle de la déformation. Comme dans la zone de cisaillement de Naver, aucune localisation progressive de la déformation ne vient étayer une possible activité continue au cours de l'exhumation des unités superposées. Cette zone de cisaillement semble n'avoir eu qu'une activité profonde.

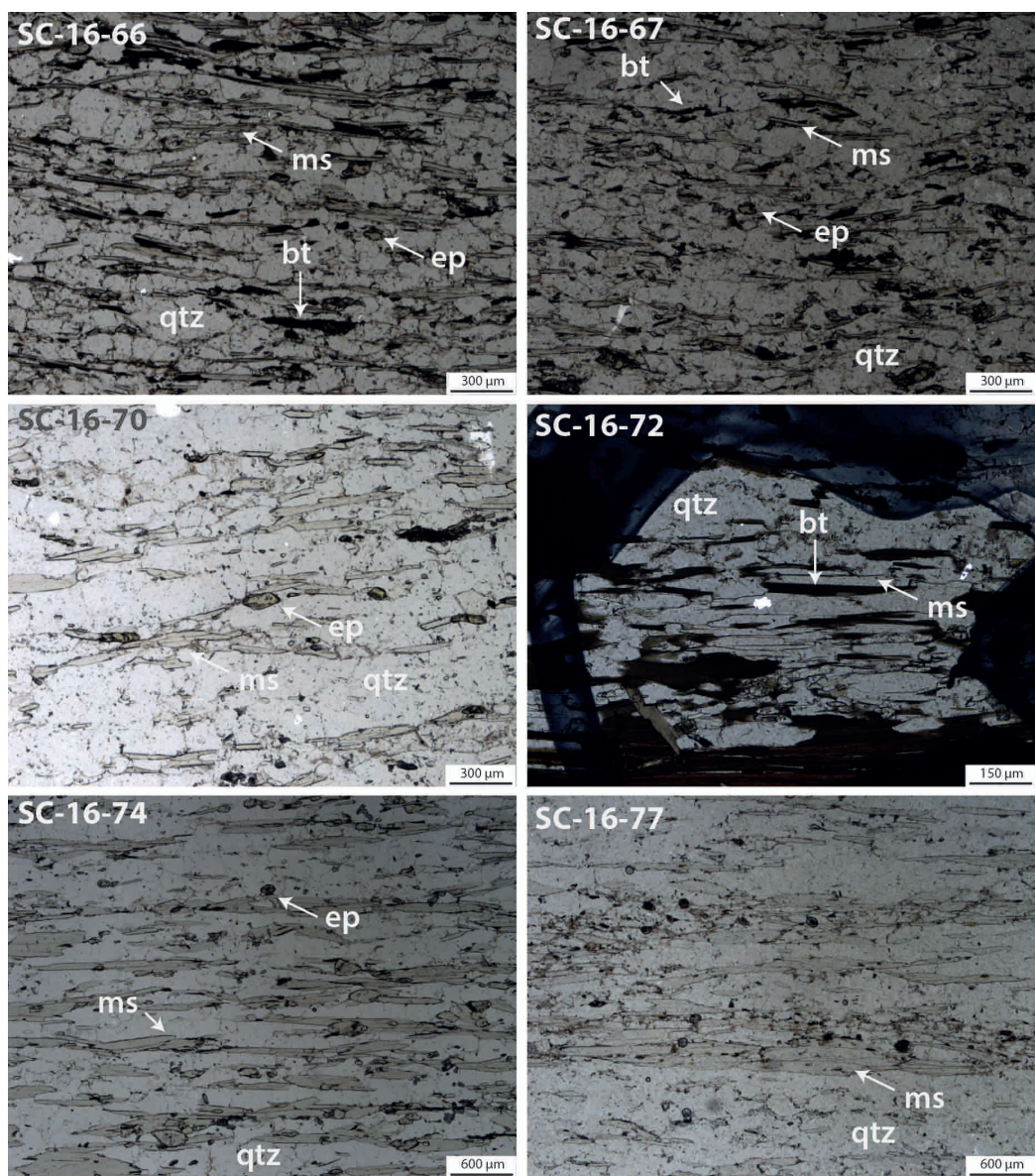


FIGURE 6.2.3 – Photographies optiques des échantillons datés par  $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$  sur micas, en lames minces orientées selon le plan XZ de la déformation finie, dans la zone de cisaillement de Ben Hope de la base (SC16-66) vers le sommet (SC16-77) du transect.



### 6.2.3 La zone de déformation du Moine

Les mylonites du Moine présentent plusieurs caractéristiques lithologiques fondamentalement différentes des autres zones de cisaillement étudiés. Les roches du Moine montrent toutes les transitions connues entre des mylonites de haut grade déformées dans le champ de la déformation ductile des tectosilicates, jusqu'à des mylonites de bas grades, caractérisées par de la réduction de la taille de grain, le développement de structures de type S-C (Figure 6.2.4). Comme décrit dans la littérature la zone de cisaillement du Moine relativement large dans son expression ductile (Freeman *et al.*, 1998) s'est progressivement localisée sur des chevauchements discrets au cours de son jeu. Les roches de part et d'autre du chevauchement principal ont donc d'abord été affectées par une déformation relativement distribuée et ont continué à être déformées au cours de leur exhumation syn-collisionnelle.



FIGURE 6.2.4 – Photographies caractéristiques des mylonites du Moine à Faraid Head.

Il semble donc que les 3 zones de cisaillement étudiées aient été initiées en

profondeur, mais que seul le chevauchement du Moine ait perduré au cours de l'histoire rétrograde du prisme. Cela signifie donc que :

- 1) les zones de cisaillement ne sont pas de plus en plus superficielles vers l'W, elles ont toutes été initiées à des profondeurs comparables
- 2) elles ont cessé de fonctionner à des profondeurs différentes, seul le Moine présente une histoire de BT superposée au jeu HT,
- 3) les zones de cisaillement de Ben Hope et Naver ne constituaient pas ou plus des hétérogénéités suffisantes après leur jeu ductile pour localiser la déformation plus superficielle et plus froide.

Cela est-il dû à des quantités finies de déformation effectivement faibles ou à une restauration post-tectonique partielle de la résistance des roches (par des mécanismes de recristallisation par exemple) ? Aucun des examens préliminaires des textures effectués dans la présente étude ne permet de trancher. Une étude systématique des fabriques du quartz associées à des mesures du Ti dans le quartz par exemple, le long de transects de haute résolution pourrait sans doute faire avancer cette problématique.

# Chapitre 7

## $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Dating

### 7.1 Introduction

The benefit of  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  dating on muscovite and biotite lies in its sensitivity to both temperature and deformation to close the isotopic system. Unfortunately, the  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  data available so far did not allow to precisely determine the shortening sequence in the Caledonian wedge, since the main result was the evidence of disturbance and inversion of the thermochronological data near the thrusts (Dallmeyer *et al.*, 2001). One of the reasons for this might be the spatial resolution of the data set near the major thrusts zones. Here, on the contrary, we propose a two scale approach to better constrain the localization of deformation at temperature around  $\pm 500^\circ\text{C}$  and the cooling pattern within the wedge. The samples are mainly from the Moine metasediments in the Moine and Ben Hope units, and from migmatites in the Naver and Skinsdale units. Thus, lithologies do not differ considerably. All of the dated samples are located on Fig. 7.1.1. A large transect at the scale of the entire wedge has been completed as well as two shorter transects across the Ben Hope and the Naver thrust/shear zones.

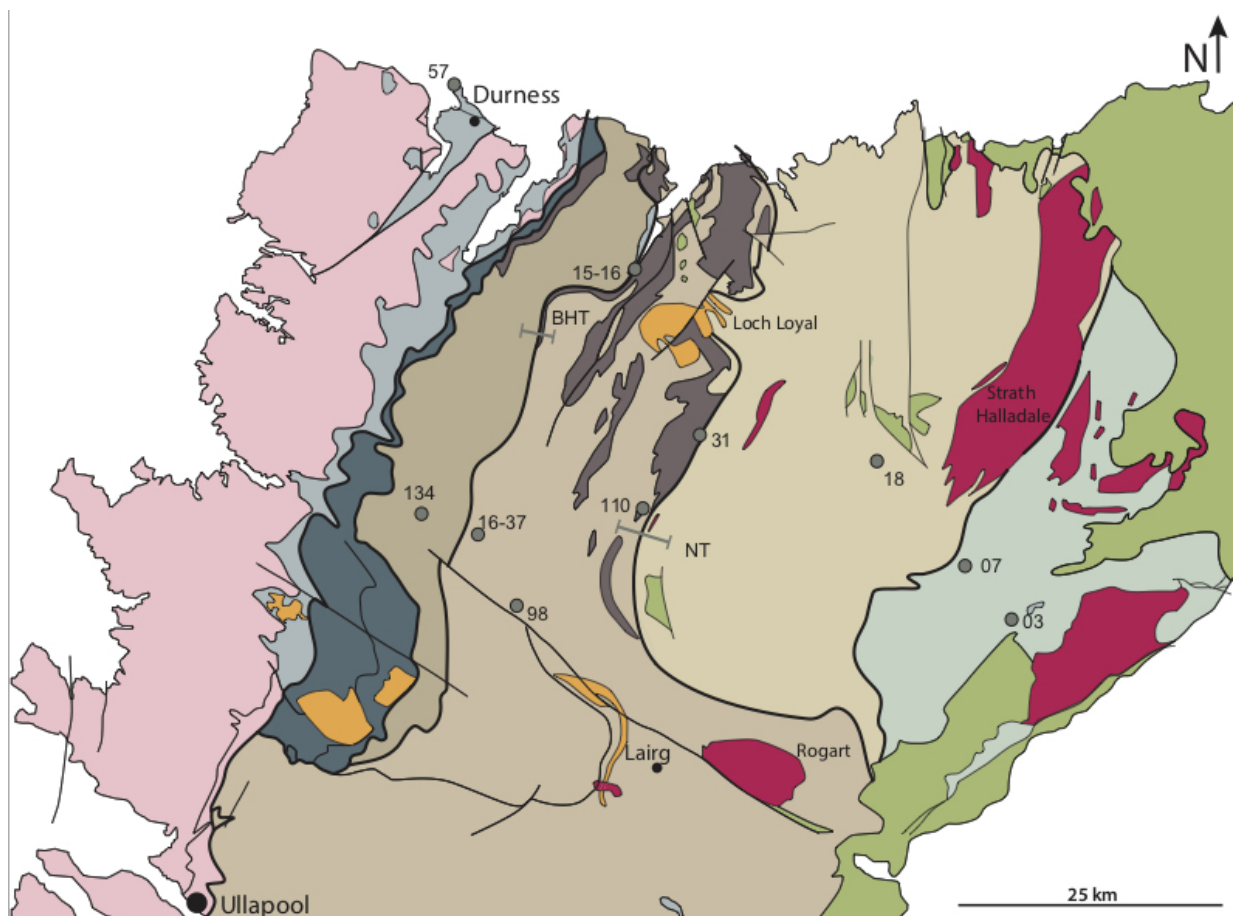


FIGURE 7.1.1 – Map of the Northern Highlands showing the locality of the samples dated by  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ . The two gray arrows show the location of the smaller transects : BHT : Ben Hope Thrust, NT : Naver Thrust

## 7.2 Wedge-scale transect

### 7.2.1 Chemical compositions of dated micas

Fig. 7.2.1 shows the variation in  $\text{Fe}/\text{Fe}+\text{Mg}$  versus Si pfu in the samples for the large transect. All of the samples values range from 0.43 to 0.76 in  $\text{Fe}/\text{Fe}+\text{Mg}$  (Fig. 7.2.1). The Si (p.f.u) values range from 3 to 3.42 (Fig. 7.2.1). There is no clear trend related to the spatial distribution between the units. However, the samples with compositional trends (SC-16-03, SC-16-07, SC-16-31, SC-16-134, Fig. 7.2.2) are mainly located far from the main shear

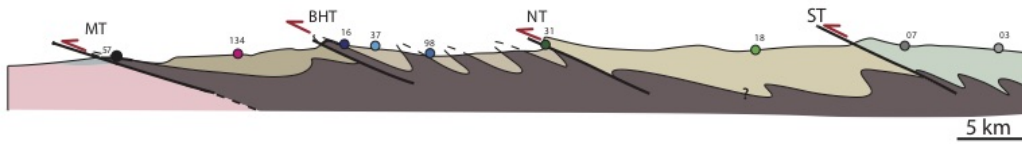


FIGURE 7.1.2 – Cross section of the Northern Highlands showing the locality of the dated sample. MT : Moine thrust, BHT : Ben Hope Thrust, NT : Naver Thrust. The colors on the samples refers to the chemical graph in Fig. 7.2.1 and Fig. 7.2.2

zones and samples with homogeneous composition varying around a mean value tend to be located closer to shear zones.

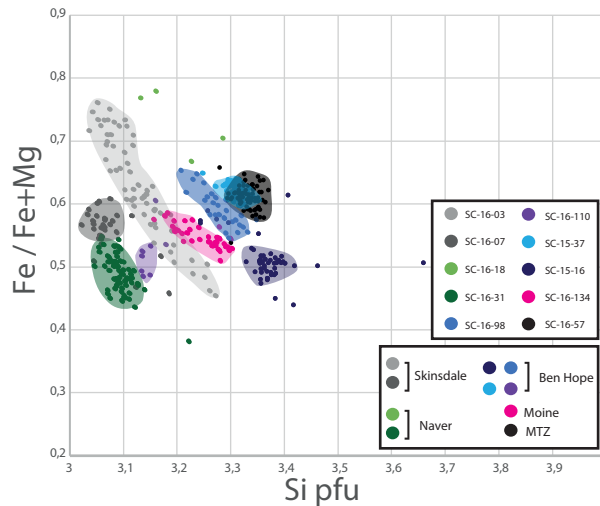


FIGURE 7.2.1 – Chemical composition ( $Fe/Fe+Mg$  versus  $Si$  (pfu)) of muscovites in the different units of the wedge. Grey : Skinsdale, green : Naver, blue : Ben Hope, pink : Moine, and black =MTZ

Two decompositions of the muscovites chemistries between the three different poles are presented in Fig. 7.2.2. White micas trend along the Tschermack substitution edge between Mu and Cel, with limited Di-Tri substitution for the most phengitic compositions. The Prl content remains low (Fig. 7.2.2b) ruling out any significant alteration of micas. At the first order, we can see two groups of chemical composition. The samples that display a relatively high Xcel ( $> 0.35$ ) and those with a significantly lower Xcel proportion ( $Xcel < 0.35$ ) (Fig. 7.2.2a). Moreover, muscovites with high Xcel

proportion (group 1 : SC-15-16, S-15-37 et SC-16-98, SC-16-57) have a much more homogeneous composition than those with low Xcel proportion (group 2 : SC-16-31, SC-16-03, SC-16-07). Indeed, samples from the group 2 display a wide trend from 0.1 to 0.35 values (Fig. 7.2.2a). Thus, the samples from the first group probably record a relatively higher metamorphic grade recrystallisation, responsible for a pervasive homogenisation of compositions while the samples from the second group underwent lower grade and partial recrystallization. The group 1 micas are located around the Ben Hope shear zone and just above the Moine Thrust, so in the lower wedge levels and close to shear zones. The group 2 micas are from the Naver and Skinsdale nappe, and away from contacts.

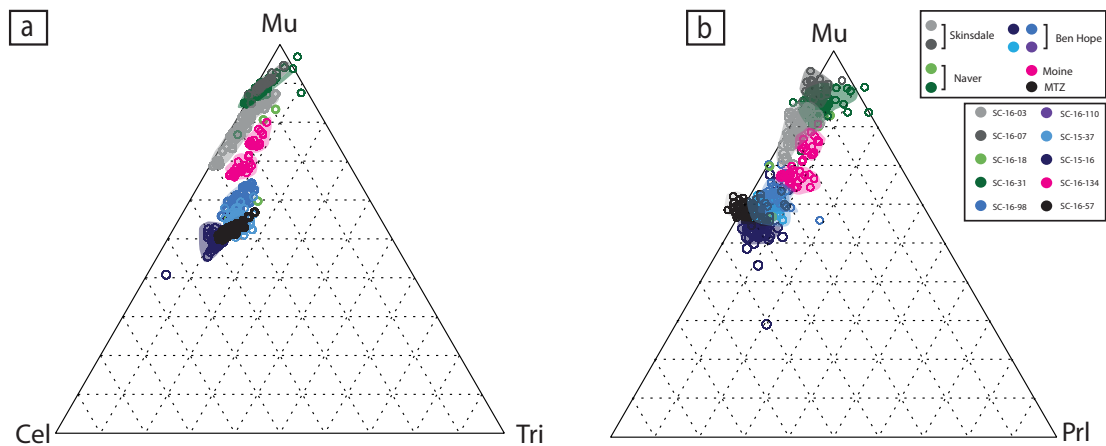


FIGURE 7.2.2 – Chemical composition of white micas plotted on two ternary diagrams between three end-members, Mu : muscovite Cel : celadonite Prl : pyrophyllite and tri : tri-octahedral

The sample SC-16-134 (Fig. 7.2.3) from the Moine Nappe somehow belongs to both groups, or does not fit in the group logics. Furthermore, this sample clearly displays two different textures of micas as shown in Fig. 7.2.3. The main population defines the pervasive foliation visible at micro-scale (Fig. 6.2.3). The second population seems to postdate the previous micas since they cross-cut the foliation, are not aligned in the foliation and are also located in pressure shadows (Fig. 7.2.3). The textural difference corresponds to the chemical signature : the micas from the main population (blue) are



higher grade than those from the second group (red) (Fig. 7.2.3, or pink in Fig. 7.2.2), that would then represent a retrogression assemblage. The micas from the main population represent about 98-99 % of the thin section.

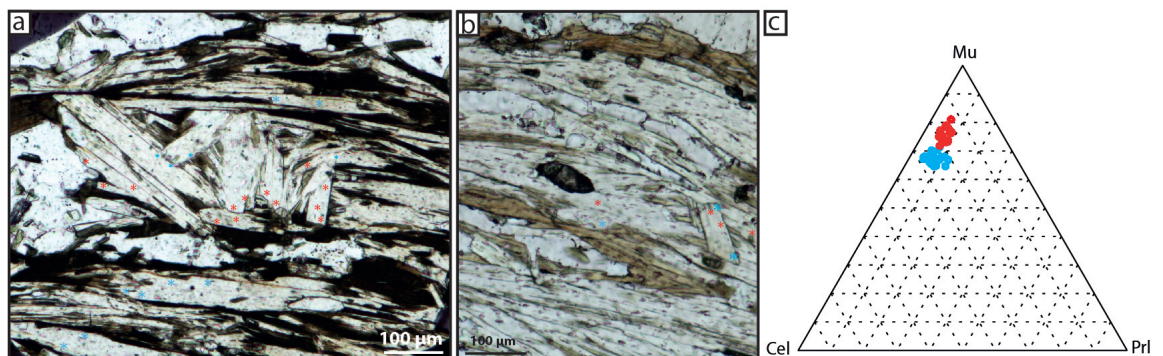


FIGURE 7.2.3 – Sample SC-16-134 from the Moine Nappe showing textural relationships and compositional trends of two distinct populations. Blues (resp. red) dots on b and c represent an early and higher grade (resp. late and lower grade) paragenesis.

The chemistry from the main high grade micas population in sample SC-16-134 is similar to the group 1 of the large transect (Fig 7.2.2). Likewise, the micas from the second generation correspond to the micas from the second group in the large transect (Fig. 7.2.2, pink).

## 7.2.2 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Dating Results

### Muscovite dating

For the wedge scale transect, the ages we obtained are presented in Fig. 7.2.4 and in Fig. ???. All of the spectra of this transect are shown in Fig. 7.2.5, Fig.7.2.8 and Fig. 7.2.7. The plateau age were determined using the maximum steps possible to stay within a MSWD reasonable.

The spectra across the wedge are very similar. Out of the 9 samples, six present very stable degassing pattern (Fig. 7.2.5 Fig. 7.2.8a and Fig. 7.2.7a)

and yield plateau ages between 413 and 425.5 Ma. Three other present slightly more disturbed spectra. The sample closest to the Ben Hope thrust (Fig. 7.2.8c, sample SC-15-16) displays many disruptions, with two bumps of older age : one at the beginning of the degasing and another at the very end.

Across-wedge transect muscovite								
Sample	analysis	PA or WMA (Ma)	1 $\sigma$ (Ma)	TGA (Ma)	1 $\sigma$ (Ma)	number of grains	grain size (mm)	distance from MT (km)
SC-16-03	N77	416	0.5	416	0.9	1	1.44	70
SC-16-07	N78	413.8	0.8	413	1.1	2	1.44	63
SC-16-18	N80	413.1	0.6	413	1.1	1	0.86	52
SC-16-31	N105	415.5	0.3	413.7	3.2	1	1.19	36
SC-16-98	N176	413.1	0.3	414.8	0.9	3	0.42	28
SC-15-37	N182	425.5	0.3	438	3.4	9	na	24
SC-15-16	N183	434.6	0.4	441.2	3.6	4	na	22
SC-16-134	N178	423.7	0.5	423.1	1	5	0.83	25
SC-16-57	N180	na	na	455.3	3.6	1	1.21	0

FIGURE 7.2.4 – Table summarizing the muscovite  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  ages (plateaux ages (PA), and Total Gas Age (TGA) in the across-wedge transect .

We propose the following interpretation. The circulation of a fluid rich in  $^{40}\text{Ar}$  could have percolated in the rims of the grains, and therefore be discharged at the lowest (temperature) steps. Four grains were degased at the same time for this sample, so another possibility to explain this pattern is a diversity of grain ages degasing at different times. However, the grain chemistry is rather homogeneous in thin section making this scenario quite unlikely. For this sample it is still possible to calculate a plateau age of  $434,6 \pm 0,4$  Ma with 21 consecutive steps representing more than 20 % of total degased argon, in the spectrum portion where the ages flatten up. This plateau, even though calculated from a limited number of step is probably more significant than a total gas age that would average the different parts of the degasing pattern.

The scatter of sample SC-15-37 age spectrum, (Fig. 7.2.8b) may be explained by the numerous steps required to totally degas the argon and to melt the grain. Nevertheless, a slight aging occurs at the end of the spectra. Even though they do not overlap each other within 1 sigma interval, the central



56 consecutive steps define a plateau age at  $425,5 \pm 0,3$  Ma. The dispersion yields a high MSWD of 2,49.

A more complex degassing pattern is obtained for sample SC-16-57, located just above the Moine Thrust (Fig. 7.2.7b). This spectrum does not allow a plateau age to be calculated. The spectrum is quite bumpy and heterogeneous, but still all the steps are significantly older than the other samples. This age remains difficult to interpret but is most likely older than 450 Ma.

The main trend visible at the regional scale is delineated by the five almost coeval ages in the internal part of the wedge that range from 416 Ma to 413 Ma (Fig. ?? and Fig. 7.2.4). Those samples are spread out over Skinsdale, Naver and the higher part of the Ben Hope nappe. From the Ben Hope to the Moine Thrust Zone, data then start to fluctuate. There is a gradual aging on the westernmost 25 km, ranging from  $423,7 \pm 0,5$  Ma to  $455,3 \pm 3,6$  Ma. It must be emphasized that two of the oldest samples (SC-15-16 and SC-16-57) are located in the northernmost part of the wedge and that significant variations in peak metamorphic temperatures are documented north to south (Thigpen *et al.*, 2013), with lower temperatures in the north.

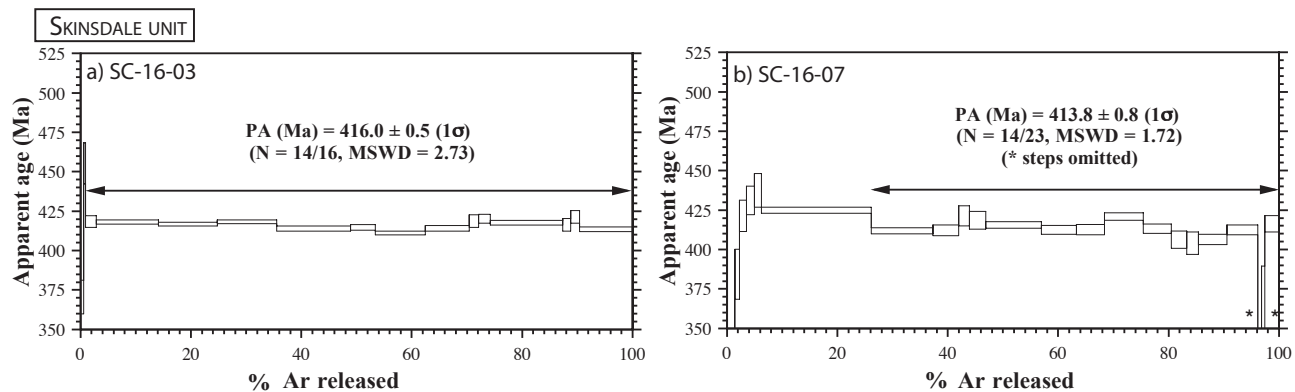


FIGURE 7.2.5 –  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  age on muscovites from samples in the Skinsdale nappe, showing plateau ages across both units

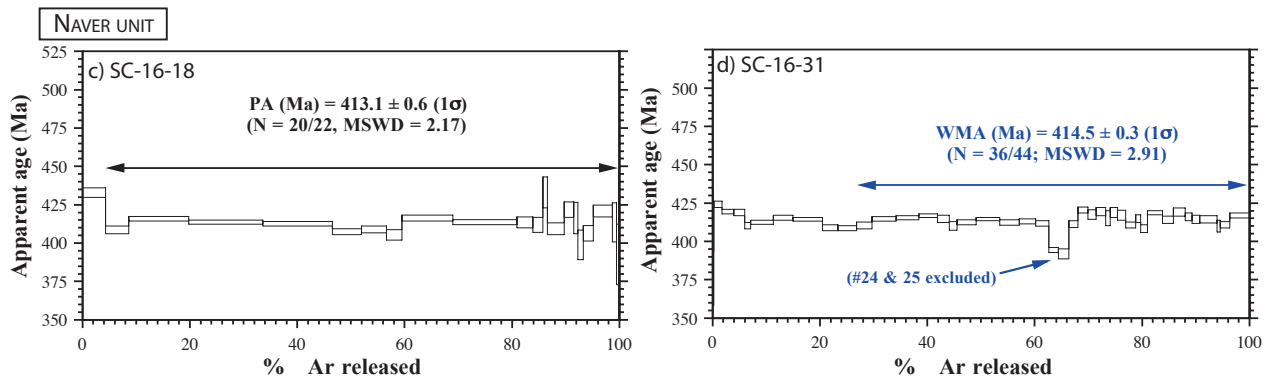


FIGURE 7.2.6 –  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  age spectra (muscovites) from samples in the Naver nappe, showing plateau ages across both units

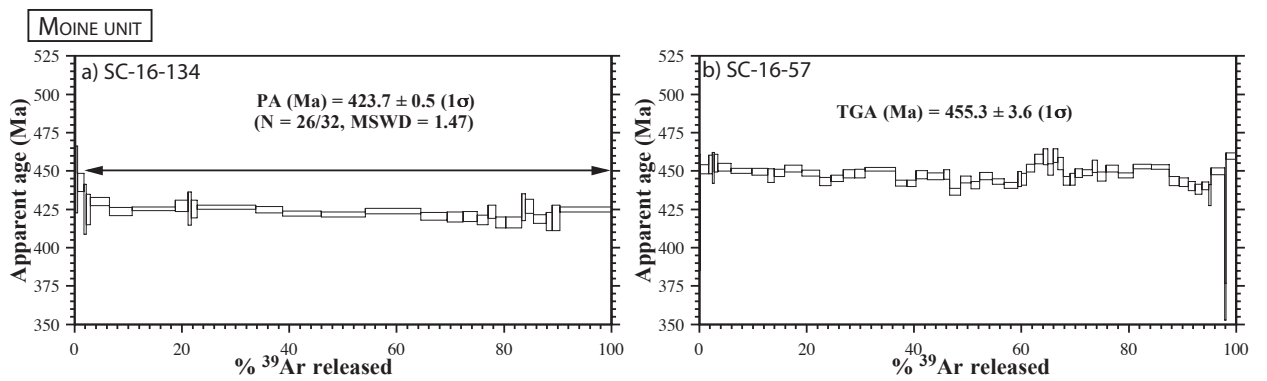


FIGURE 7.2.7 –  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  age on muscovites from samples in the Moine unit  
 a) Sample SC-16-134, plateau age and b, Sample SC-16-57, total gas age

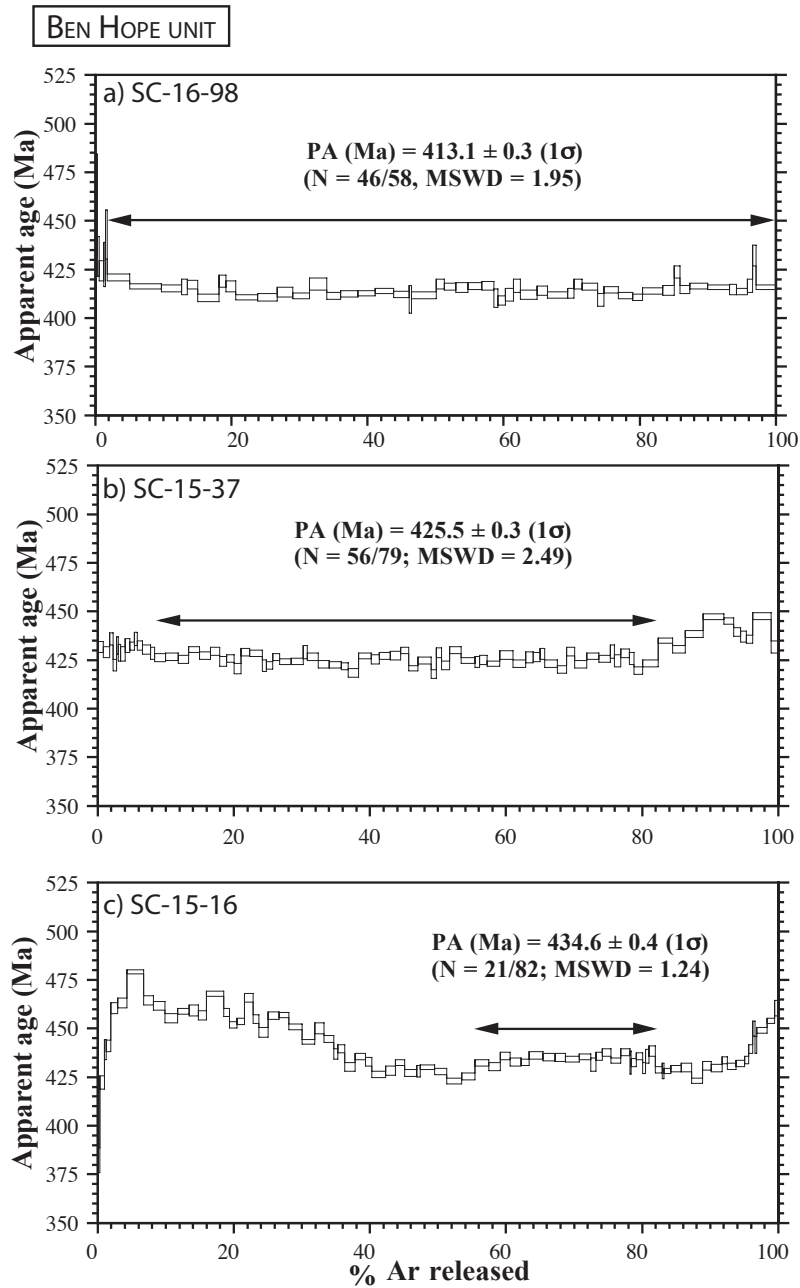


FIGURE 7.2.8 –  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  age on muscovites from the Ben Hope unit. Spectra a and b are quite flat but spectrum c is quite disturbed at low degassing temperature as well as at very high temperature.

## Biotite dating

Four biotite samples were dated by the  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  step heating method : SC-16-110 just below the Naver Thrust, as well as three samples which have also been dated with white micas SC-16-07, SC-16-98 and SC-16-18 (Fig. 7.1.1). Results are listed in Fig. 7.2.9 and on Fig. 7.4.2. Sample SC-16-98 yields an abnormally old age of  $\sim 680$  Ma (TGA). This age does not correlate with any Scandian event. In addition, the "inverse-saddle shape " of its age spectrum (Fig. 7.2.10) suggests to discard this sample from any geological discussion. The three other samples have rather flat age spectra with plateau ages defined by large parts of the total degasing (Fig. 7.2.11).

Across-wedge transect biotite								
Sample	analysis	PA or WMA (Ma)	1 $\sigma$ (Ma)	TGA (Ma)	1 $\sigma$ (Ma)	number of grains	grain size (mm)	distance (km)
SC-16-07	N79	417.1	0.8	416.6	1.1	1	0,65	70
SC-16-18	N81	420.3	9.9	416.7	1.3	2	0,62	60
SC-16-110	N181	439.3	0.4	440.6	3.4	1	0,6	47
SC-16-98	N175	na	na	618.7	1.4	5	0,96	28

FIGURE 7.2.9 – Table summarizing the biotite ages. PA, plateaux ages, WMA, weighted mean age, TGA, total gas age

On the cross section three biotites ages are presented (Fig. 7.4.2). The main result is that the two easternmost out of the three samples yield ages which are very similar to the muscovite ages (samples SC-16-18 and SC-16-07). On the contrary, the sample in the Ben Hope nappe yields a significantly older age than the muscovite ones. It actually corresponds to the oldest muscovites ages near the Ben Hope thrust.

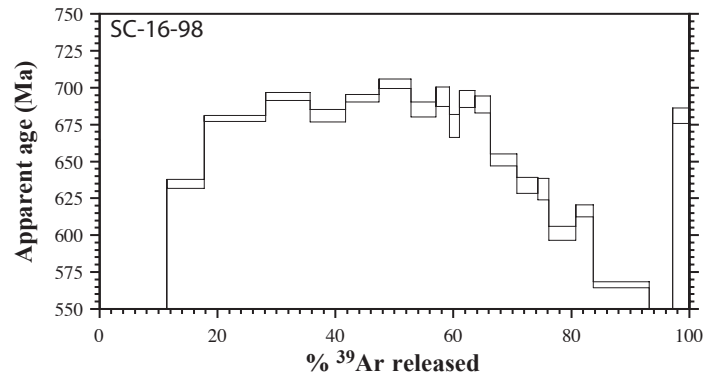


FIGURE 7.2.10 –  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  ages spectrum of sample SC-16-98

All of the  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  biotite data are older than the muscovite data, which is surprising since their closure temperature is expected to be lower (Hodges, 2014). Such apparent discrepancy can be interpreted in at least three ways :

- 1- Difference in age between muscovites and biotites in the eastern part of the transect are not significant, or the analytical error is underestimated, and biotites and muscovites are actually registering the same fast cooling event.
- 2- Not all ages are cooling, biotites ages are proper cooling ages at low temperature, and muscovites ages are crystallization ages at lower conditions
- 3- Biotites and muscovites both recorded crystallization ages.

The discussion of these three hypothesis will be elaborated on further down.

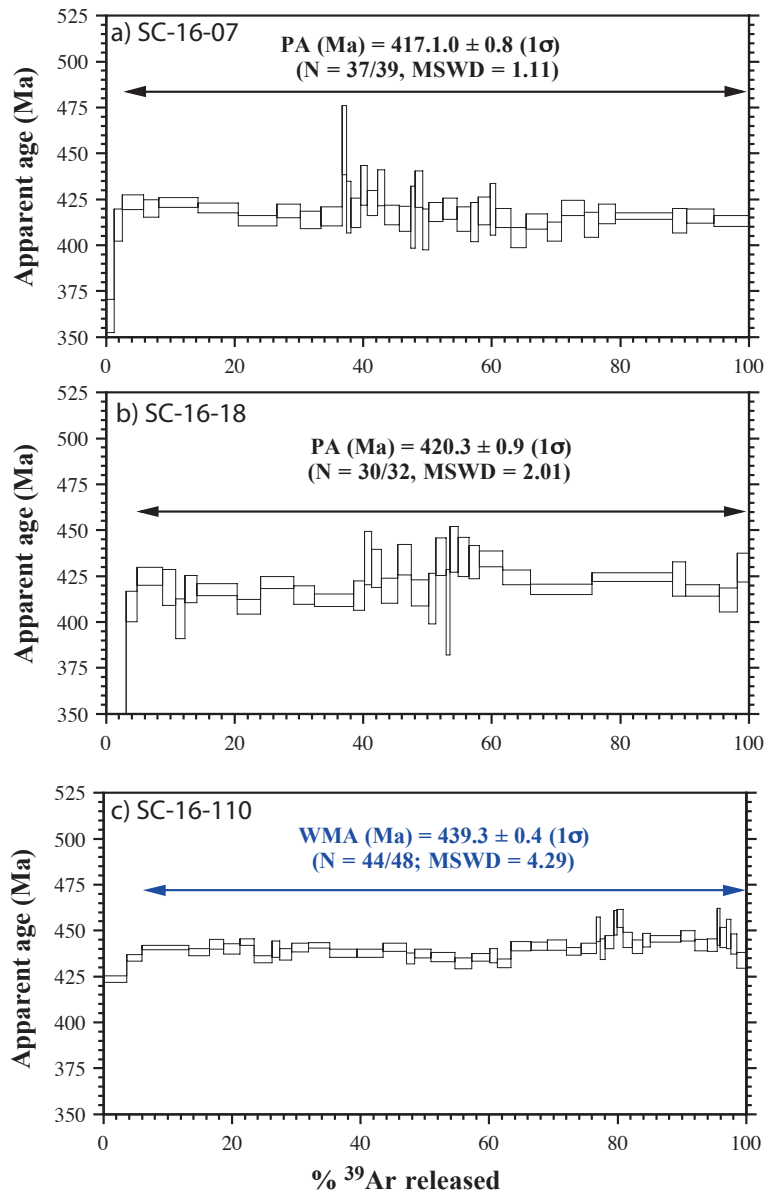


FIGURE 7.2.11 –  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  biotite ages spectra from samples SC-16-07, SC-16-18 and SC-16-110

## **7.3 Age transect across the Ben Hope shear zone**

The main feature of the large scale transect is the increase of ages near the Ben Hope and the Moine basal thrust zone. Since this large scale transect did not allow to identify clearly when the main shear zones were active, higher resolution transects were documented across the shear zones to understand how the ages possibly reflect the deformation history.

### **7.3.1 Chemical composition of dated muscovites in the Ben Hope shear Zone**

The chemistry of the dated muscovites is presented in Fig. 7.3.1. Different micas composition first reflect the different lithologies. The samples derived from sediments from the Moine nappe, above and under the Ben Hope shear zone, show quite homogeneous, highly substituted phengites (up to above 3.4 Si apfu), while the basement sample SC-16-72 and the amphibolite body sample SC-16-73 actually plot closer to the muscovite end-member with significant trioctahedral mica and pyrophyllite component, testifying for complex chemistry and substantial weathering (Fig. 7.3.1).

### **7.3.2 Dating results along the Ben Hope shear zone transect**

The transect in the Ben Hope shear zone is 1 km long, and displays 3 main types of lithologies. Above and under the main deformation zone are the Moine metasediments, mainly derived from psammites. The basement as well as an amphibolite layer are exposed in the middle part of the transect. The location of the main shear zone is quite surely defined up north where the basement crops out over a wider zone. Where we did our transect, the basement outcrop is narrower, making the location of the main shear zone slightly more speculative. The dating results are shown on Fig. 7.3.2 and Fig. 7.3.3.

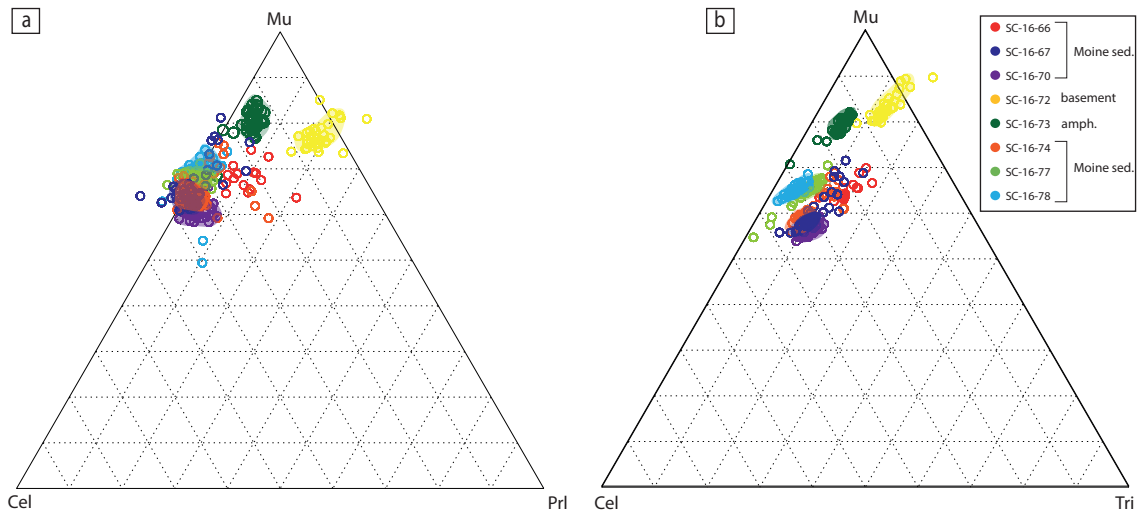


FIGURE 7.3.1 – Chemical data from the muscovite sampled along the Ben Hope Shear Zone transect

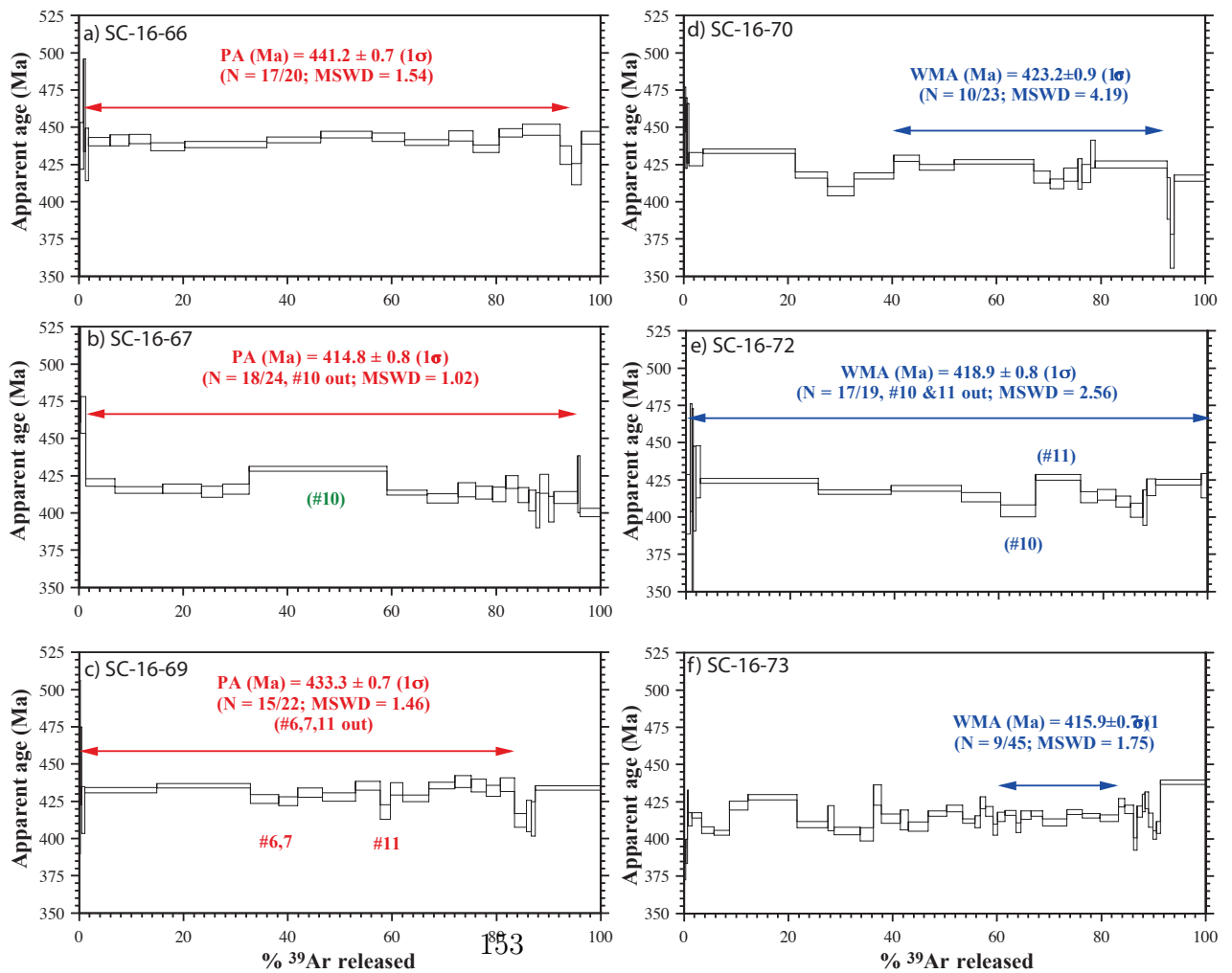


FIGURE 7.3.2 –  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  ages from the Ben Hope transect muscovites. PA : plateau age, WMA : weighted mean age



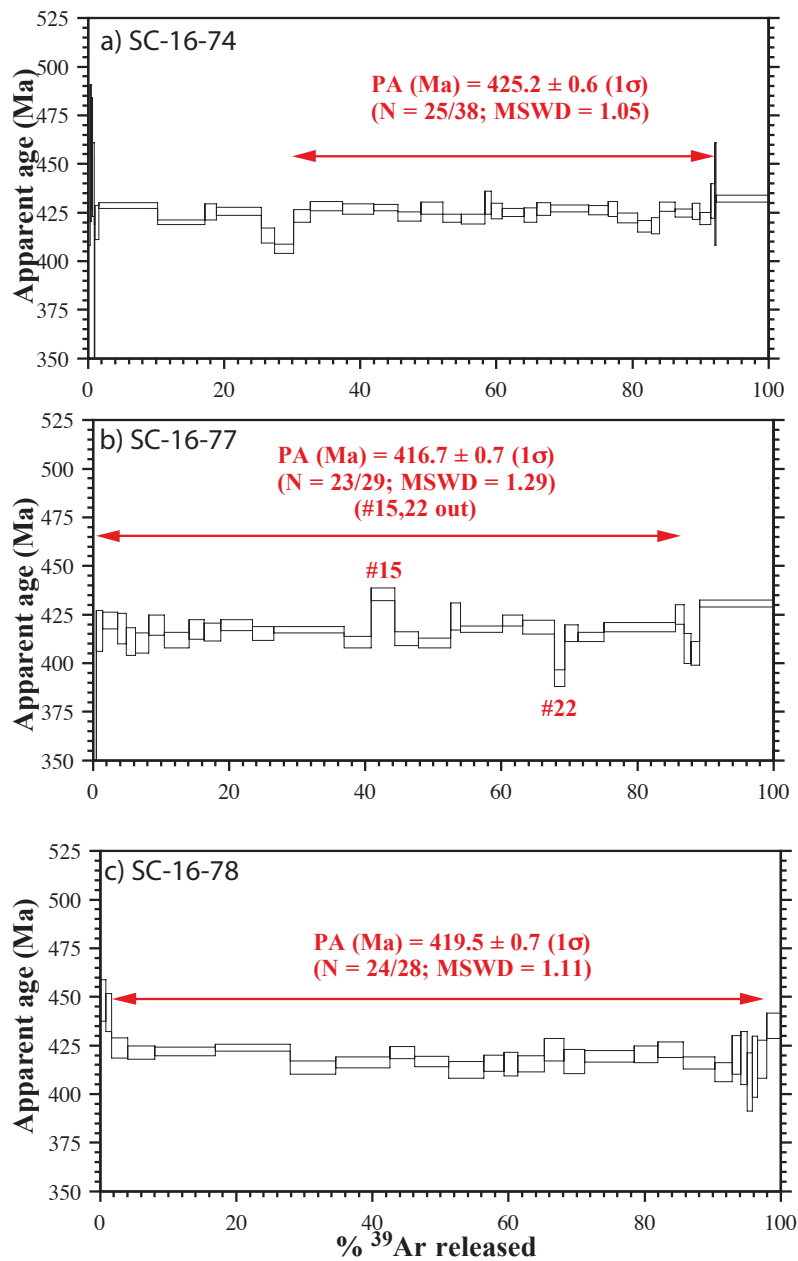


FIGURE 7.3.3 – (suite)  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  ages from the Ben Hope transect muscovites  
 PA : Plateau age

The spectra from this Ben Hope transect yield widespread data, that range from  $441.2 \pm 0.7$  Ma to  $415.9 \pm 0.7$  Ma. This represents almost the same span in age than on the large scale transect. Out of the nine samples, six yielded

Transect Ben Hope									
sample	analysis	PA or MWA (Ma)	1 $\sigma$ (Ma)	TGA (Ma)	1 $\sigma$ (Ma)	nb of grain	grain size (mm)	distance from 1st sample (m)	point gps
SC-16-66	N111	441.2	0.7	440.9	3.4	2	0.53	365	290
SC-16-67	N106	414.8	0.8	419.1	3.3	3	0.53	582	291
SC-16-69	N112	433.3	0.7	431.7	4	1	0.7	725m	293
SC-16-70	N107	423.2	0.9	423.5	3.3	1	0.74	772m	294
SC-16-72	N114	418.9	0.8	425.2	5	1	0.61	843m	296
SC-16-73	N108	415.9	0.7	417	3.2	2	1.07	866m	297
SC-16-74	N113	425.2	0.6	425.2	5	1	0.75	905m	298
SC-16-77	N115	416.7	0.7	417.8	5	1	0.74	1250	302
SC-16-78	N109	419.5	0.7	419.5	1.5	1	0.63	1350	304

FIGURE 7.3.4 – Table summarizing the muscovite ages along the Ben Hope transect. PA, plateau age, MWA, mean weighted average, TGA, total gas age

plateau ages from significant parts of their spectra, all showing very stable degassing patterns. Two samples presented more disrupted age sequences (Fig. 7.3.2d, e and f). Those spectra were defined by more scattered steps but none of those samples show clear monotonous aging or younging trends. Moreover, at the transect scale, ages do not define any spatial trend, nor do they correlate with strain intensity. The oldest age is below the main shear zone and the three younger ages are located on both sides of the shear zone (Fig. 7.3.2b, f and Fig. 7.3.3b). Those younger ages are almost coeval with the baseline formed by ages in the more internal part of the wedge (about 2 to 3 Ma younger).

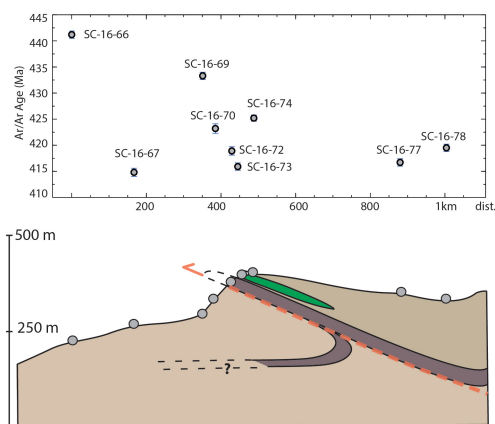


FIGURE 7.3.5 –  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  data across the Ben Hope shear zone

## 7.4 Transect from the Naver shear zone

Three muscovites from the Naver shear zone have been dated. Four other biotites from the Naver shear zone have been prepared and irradiated but were not dated yet because of lack of time. The results are shown in Fig. 7.4.1. Those spectra display very variable degassing patterns. Plateau age estimates are not possible because of the broad dispersion of the steps, but Weighted Mean Ages (WMA) are surprisingly similar (414,5 Ma with uncertainties between 0,6 and 0,9 Ma) and must be significant. They also match the youngest ages in the Ben Hope transect and in the large scale transect.

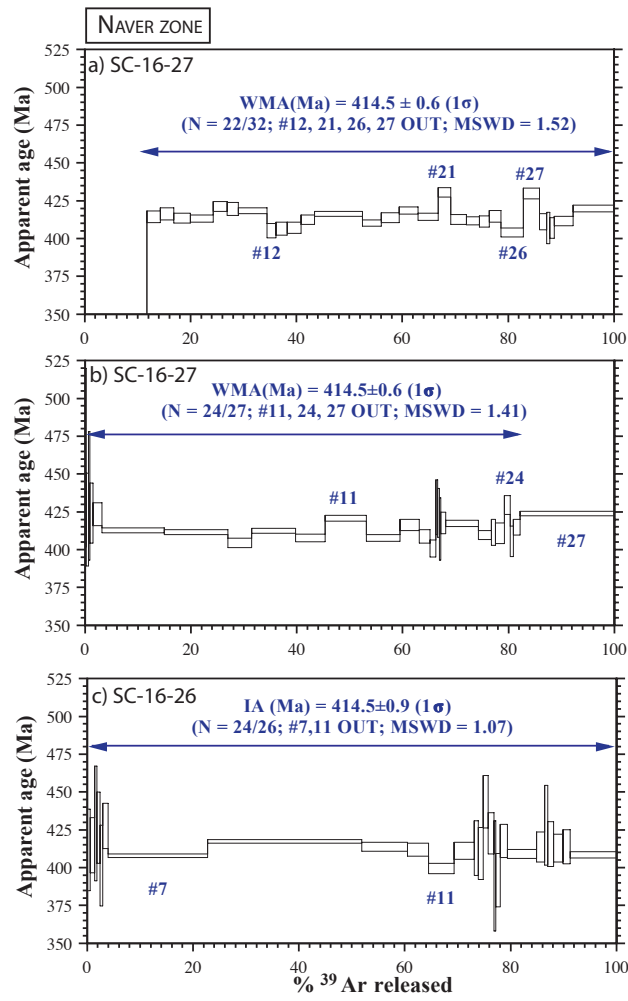


FIGURE 7.4.1 –  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  ages from the Naver transect muscovites

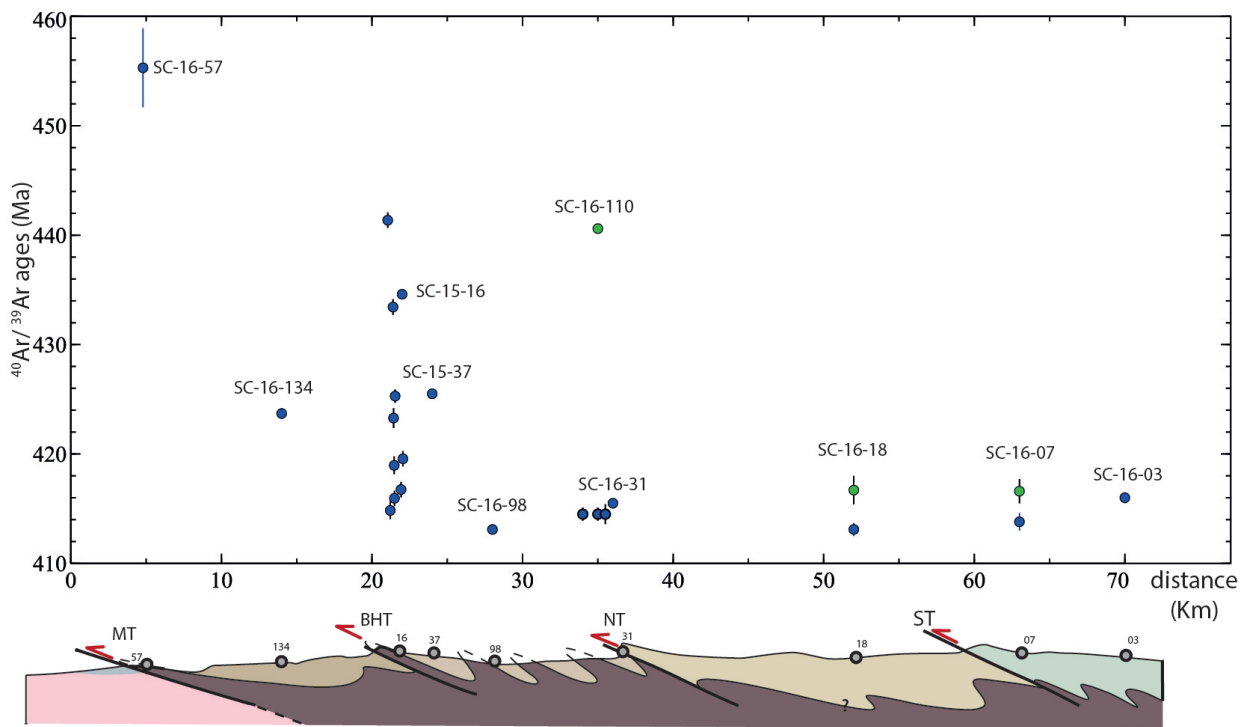


FIGURE 7.4.2 –  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  ages from the high resolution transects in the Ben Hope and the Naver, and the wedge scale transect (blue : muscovite, green : biotite)

## 7.5 Interpretation of Ar/Ar ages

## 7.6 Plateau age definition

The criteria to identify of plateau pattern of degassing can be somewhat subjectif. Usually to reduce the degree of subjectivity, a few rules and definitions are established. A plateau is a part of a age spectrum diagram composed of contiguous gas fraction that should represent at least 50 % of the total  $^{39}\text{Ar}$  released from the sample (Fleck *et al.*, 1977). The age difference within the plateau between any of the steps should not exceed 2sigma (Fleck *et al.*, 1977). As a consequence, a way of "cleaning" the spectrum is to only consider steps of more than 3% of the total  $^{39}\text{Ar}$  is released. In our cases, most of the samples yield relatively undisturbed spetrums, but the second criteria is not always respected. Since the spectrometer was significantly too sensitive,

and that the sample had an important amount of Ar, most of our sample are degased with a very large number of steps (between 16 and 83 steps). Thoses numerous steps don't always represent at least 3% of the total degasing, and they are often slightly discordant. The very large number of steps in a very narrow age distribution was be considered as a plateau age even if a couple of steps were discordant as, it was not relevant to separe those ages. The very undistrubed age spectrums are considered as plateau-like age, in the sense that they represent the most significant age to use. It is also notable that even if the sample are highly deformed and metamorphises rock, all of the samples yield relatively undisturbed spectrums.

### 7.6.1 Closure temperature estimates

The closure temperature in white micas can be calculated with Dodson's formula and experimentally determined parameters (Dodson, 1973b; Hames et Bowring, 1994). In Dodson's formula, the closure temperature is controlled by the diffusion volume domain, usually approximated by the grain size. The smaller the diffusion domain, the lower the closure temperature. Likewise, the rate of cooling also affects the closure temperature : the faster the cooling, the higher the closure temperature. Fig. 8.1.2 shows the range of closure temperatures as a function of the grain size and the cooling rate. The grain sizes of the dated micas were measured prior to their step heating and are most of the time close to 1 mm (Fig. 7.2.4). Cooling rate is much more difficult to estimate a priori in the Northern Highlands because of the lack of thermochronology data regarding cooling. The use of modern collisional systems can help bracket a reasonable value. For example, a cooling rate of about 25 °C/Ma were estimated in the Mont Blanc massif (Boutoux *et al.*, 2016)) while it can reach 100°C/Ma in the Himalaya (Viskopic *et al.*, 2005). So, it is reasonable to consider that the Caledonian wedge, with a size between those two examples suffered a cooling rate between 10 and 100°C/Ma. In our case, this yields a Tc range between 460 °C to 515 °C for 100°C/Ma and 10 °C/Ma, and for a grain size of about 1 mm (shaded area in Fig. 8.1.2, and Fig. 7.2.4)

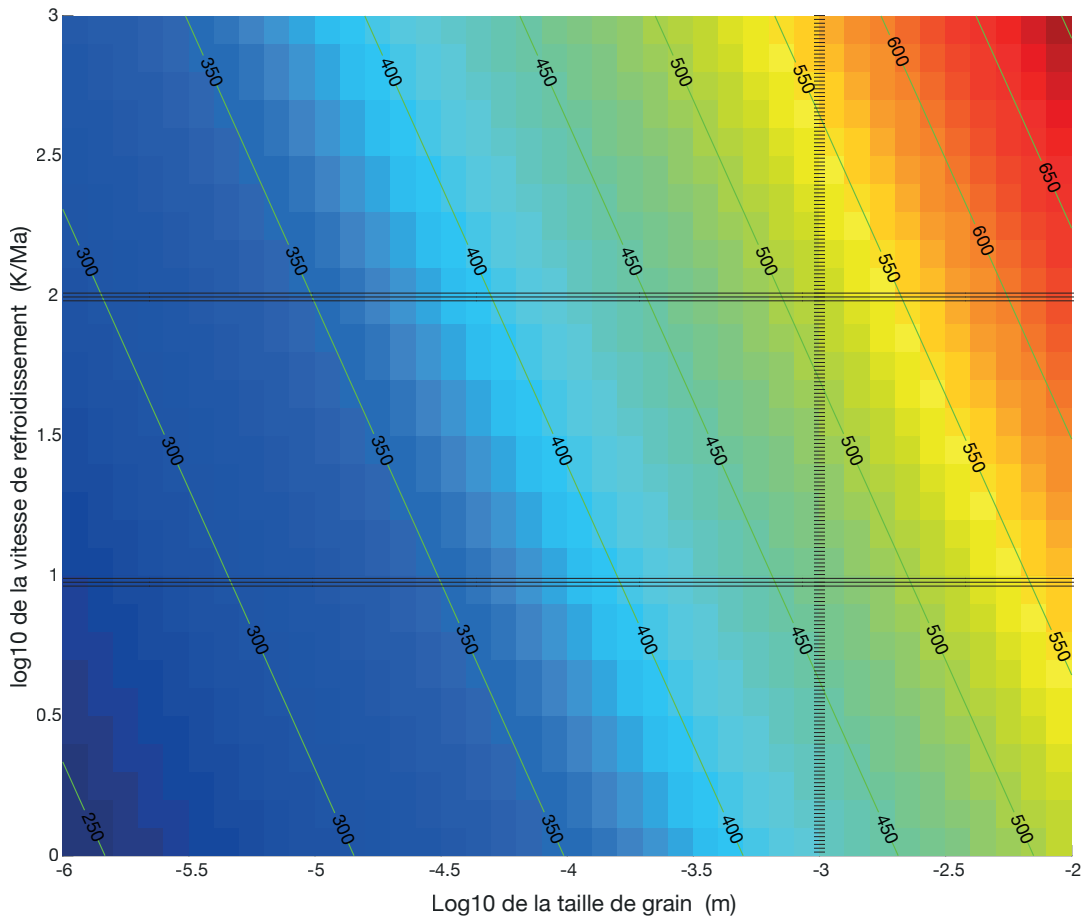


FIGURE 7.6.1 – Closure temperature for white micas for argon diffusion computed with Dodson's equation and Hames et al., 1994 diffusion data. Lignes show the expected temperature range for a grain-size and cooling range bracket reasonable for the rocks studied here.

## 7.6.2 Temperature reached in the nappes

As stated earlier, temperature and pressure conditions reached in the wedge are relatively hardious to estimate precisely since the scarcity of the mineral assemblage. However, estimating the temperature that the sample reached is necessary to interpret the argon data as cooling ages. To do so, the temperature reached in the unit must have exceeded the closure temperature of the isotopic system. In the case of argon, the closure temperature ranges from 460 °C to 515 °C (Fig. 8.1.2). the P-T conditions in the Moine, Ben

Hope and Naver unit are shown on fig. 7.6.2. The temperature in the Ben Hope are close to 650 °C at 8 kbars, and close to 750 °C in the Naver unit (Fig. 7.6.2b, c). These suggest that any muscovite crystallised prior to the scandian metamorphic peak would be reset, and that metamorphic muscovite generated in those conditions would satisfy the dodson formula. In the Moine unit, two estimates are shown (Fig. 7.6.2a). The upper unit estimates are close to the upper closure temperature estimated. In the lower part of the unit the temperatures reached about 450-500°C. There is an ambiguity if the PT conditions really exceeded the closure temperature or not. The P-T conditions in the Skinsdale nappe are not known but are supposed similar as the Naver unit as metamorphic grade increase to the east.

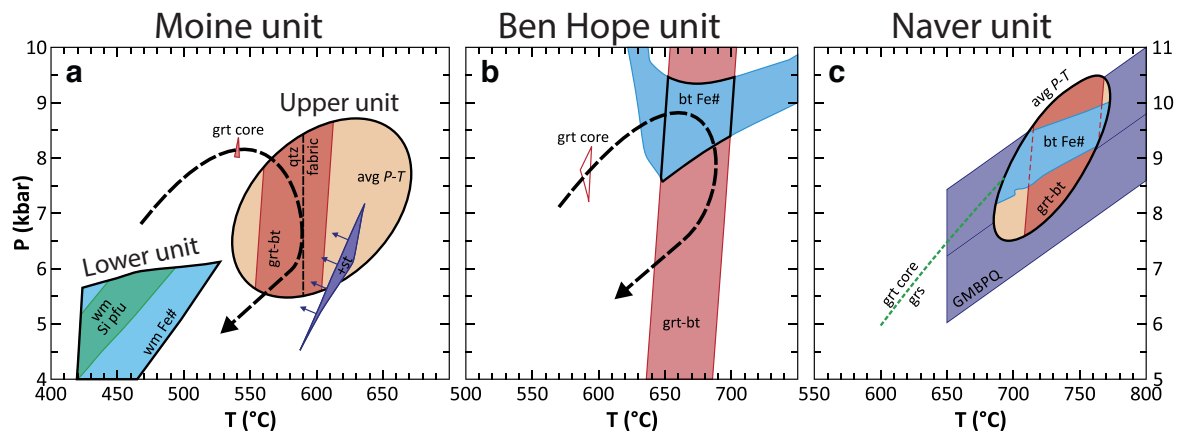


FIGURE 7.6.2 – Prograde and peak thermobarometric constraints for 3 samples in the Moine unit (a), the Ben Hope unit (b) and the Naver unit (c) (Ashley *et al.*, 2015)



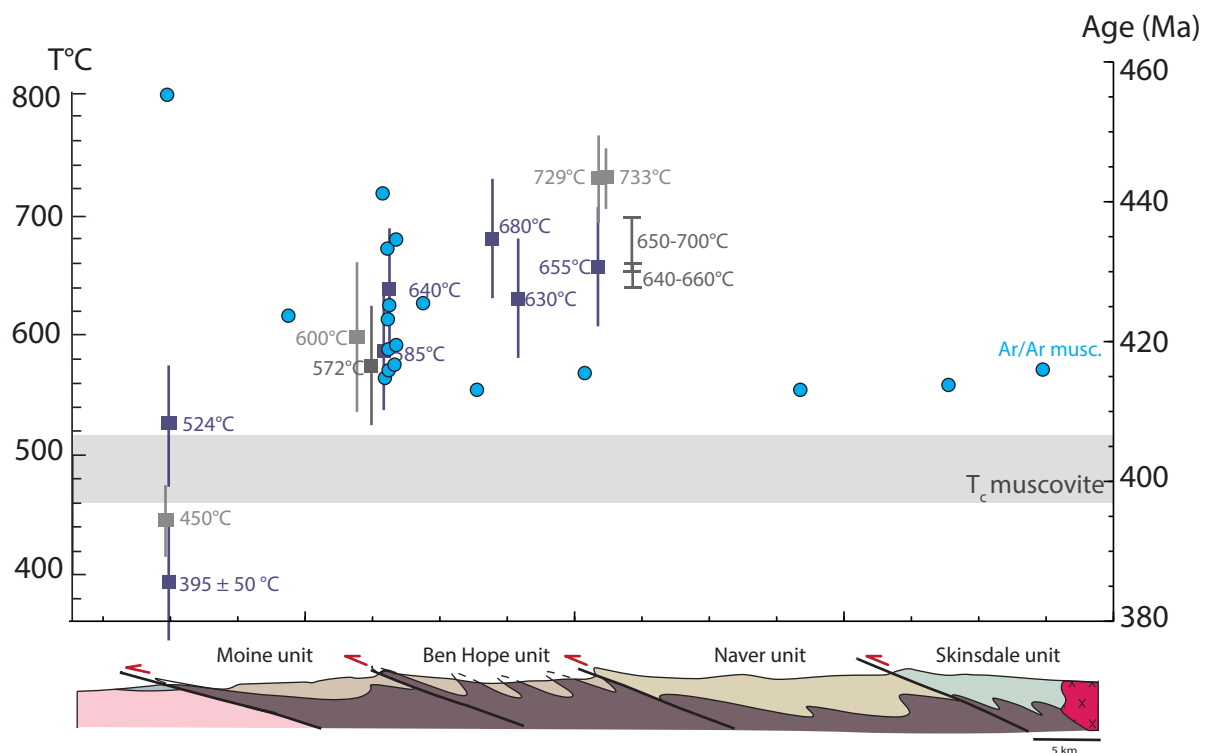


FIGURE 7.7.1 – Cross section with the peak temperature estimates along the wedge, the closure temperature of Ar in muscovite and the  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  ages on muscovites

## 7.7 Could these data be linked to a cooling or recrystallisation event ?

### 7.7.1 In the Ben Hope shear zone : cooling or deformation ages ?

The data across the Ben Hope shear zone are very widespread, ranging from  $441.2 \pm 0.7$  Ma to  $414.8 \pm 0.8$  Ma. This variation of almost 30 Ma is recorded across shear zone of about 1 km. This pattern of age, with a "vertical" spread cannot be linked to cooling, as cooling occurs on a larger scale than the one studied with this transect. More over there is no geological contact to explain this random variation in age. Those highly fluctuating ages of 30 Ma do not exclude the possible interpretation as deformation age.

Since this zone is supposed to have reached temperature largely above the closure temperature of argon in muscovite (Fig. 7.7.1), these data probably don't represent a partial reset age from an older thermal event. Another possibility is that those ages represent deformation along the Ben Hope shear zone. In this hypothesis, the micas were deformed enough to reorganise their mineral structure and reset their isotopic ratios. Deformation along side with (re) crystallisation seems to be happening in the micas of the shear zone as the Xcel content fluctuates from 0 to 0.3 (Fig. 7.7.2, bright blue). This could suggest that those  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  ages are linked to deformation and thus record the activity of the Ben Hope. If this is the case deformation is recorded from 440 Ma to 415 Ma.

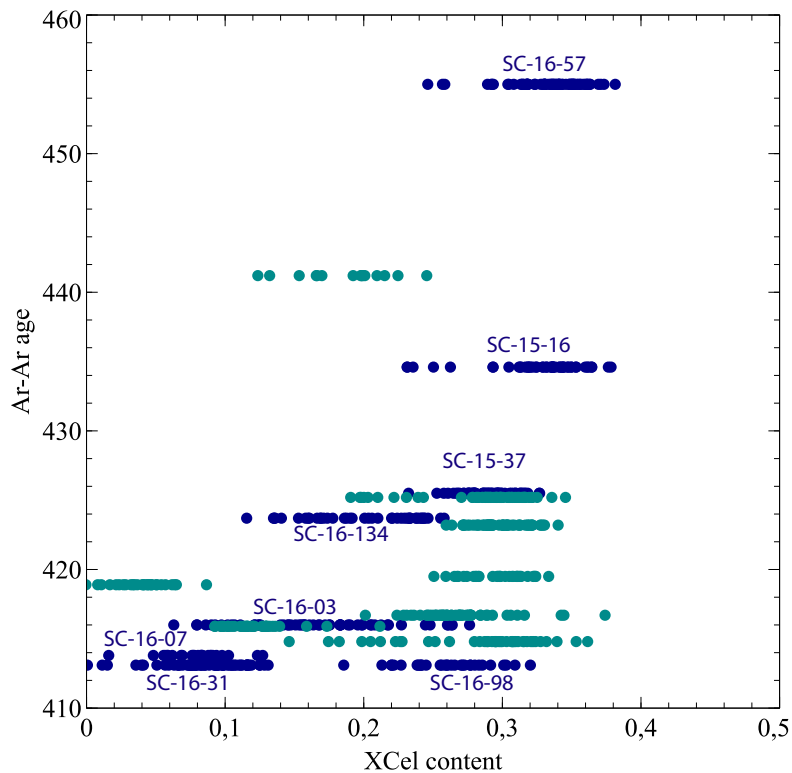


FIGURE 7.7.2 – Diagramm showing the Xcel content of the dated micas and their Ar-Ar age. dark blue : large transect, light blue : Ben Hope shear zone

### 7.7.2 Across the entire wedge : Passive exhumation or retrograde recrystallisation ?

The very narrow variation of ages (near 414 Ma) in the internal part of the wedge can be linked to cooling as the maximum of temperature largely exceeded the closure temperature. Thus, the very narrow variation could be linked to a homogeneous cooling through the closure temperature of argon in muscovite at the scale of three nappes : Ben Hope, Naver and Skinsdale. If so, the cooling of the wedge in the internal part is younger than the deformation ages along the Ben Hope thrust. This is supported by the large variation in Xcel seen in sample SC-16-07, SC-16-98, SC-16-31 and SC-16-03 (Fig. 7.7.2, dark blue). No matter the variation of Xcel content, the age is always around 414 Ma (Fig. 7.7.2, dark blue). This would suggest that no matter at what point in the PT path the micas crystallised or deformed, the age is always 414 Ma. This means that the age does not represent crystallisation but cooling through a closure temperature.

Another way to explain this pattern of age is to suggest that those ages might represent deformation within the wedge and at the scale of the wedge near 414 Ma. Moreover, the Xcel content of the ages in the Naver and Skinsdale nappe are relatively low ( $< 0.2$ , samples SC-16-3, SC-16-03 and SC-16-07, Fig. 7.7.3 red and orange), and might represent a deformation event at lower temperature than the peak PT conditions paragenesis.

To conclude, we can borrow to the two interpretations to assemble an evolution of the Scottish wedge. The regional 415-410 age baseline visible both in the muscovite and biotite, whatever their grade (Fig. 7.4.2) could be a cooling signal. The whole wedge was exhumed and cooled below 450-500°C in the hanging-wall of the frontal brittle-ductile Moine thrust, which is the only one to have an activity spanning down to low grade conditions. This is in agreement with the U-Pb on apatites ages obtained in the previous chapter. This also implies that the systematic difference between the low uncertainty of biotite-derived and muscovite-derived ages has no direct geological meaning. The older ages in the shear zones, that show a relationship with grade of micas, are crystallization ages, and record continuous strain relocalization

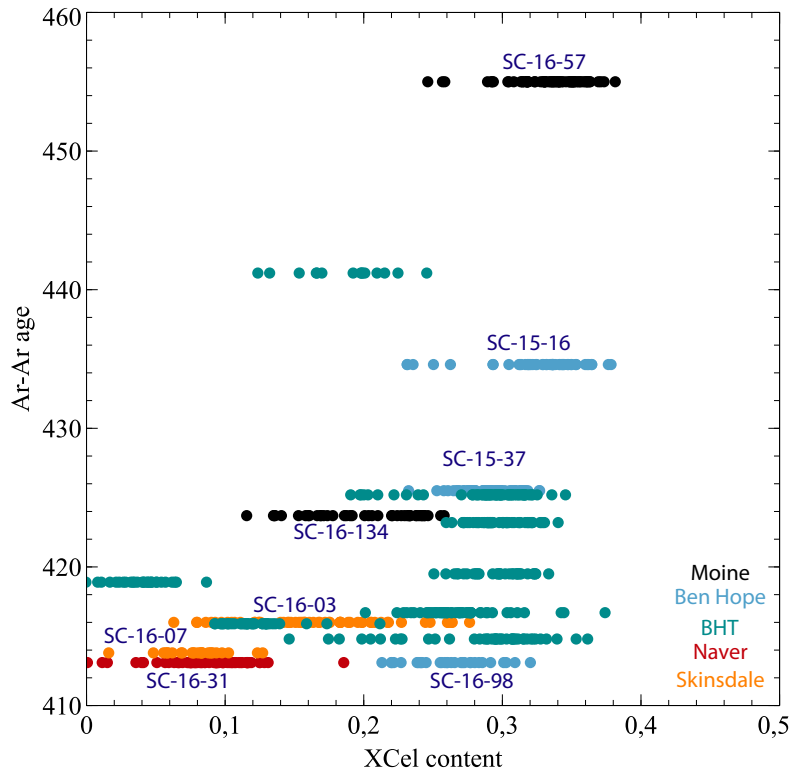


FIGURE 7.7.3 – Diagramm showing the Xcel content of the dated micas and their Ar-Ar age related to their units

in discrete zones of the broad ductile shear zones. Surprisingly, these ages are older than the regional cooling pattern, implying that micas crystallized in the shear zones and preserved from subsequent retrogression have been able to retain their radiogenic argon even above the predicted  $T_c$ . It seems that cooling below  $T_c$  indeed controls the Ar diffusion away from contacts, ie when strain is a second order control on diffusion, while strain is the first order control in shear zones, whatever the temperature (at least in the present T range). A speculative link with fluids could explain this puzzling conclusion. Low strain zones preserved their fluid content, and therefore a diffusion effective down to low T, while strained zones were drained out and were left dry and closed to diffusion after strain occurred. This drying behavior of strain has already been mentioned as a possible cause for widening of mylonite zones (Finch *et al.*, 2016), which would actually also occur in the

high temperature shear zones studied here, which seem to be especially wide without significant strain-weakening that could lead to strain localization. The poorly organized age pattern within the Ben Hope also could relate to this process. This speculation would for instance deserve FTIR estimates of water content in quartz in and outside the BH shear zone to be further investigated. About the activation sequence of the Ben Hope, Naver and Skinsdale shear zones the main conclusion derived from  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  is that the Skinsdale and the Naver shear zones seem to have stop functioning at 415-410 Ma at the latest, a major isotopic disturbance is visible in the BHT transect, suggesting the activity of the Ben Hope shear zone from about 440 to 415 Ma and eventually an early deformation along the Moine is solely suggested by one age at about 455 Ma.

# Chapitre 8

## Discussion

### 8.1 Refroidissement à l'échelle du prisme

#### 8.1.1 Le refroidissement contraint par les données U-Pb sur apatite

Les données U-Pb sur apatite sont classiquement interprétées comme documentant un refroidissement à travers une température de fermeture calculable avec l'équation de Dodson (Dodson, 1986). La taille des grains des apatites de l'ensemble des échantillons étudiés ici est de l'ordre de grandeur de 100 à 500  $\mu\text{m}$ . La figure 8.1.1 présente la variation de température de fermeture théorique possible pour cette gamme de taille de grains. Pour des vitesses de refroidissement entre 10°C/Ma et 100°C/Ma, les températures de fermeture passent de 465°C à 510°C (Fig. 8.1.1). Les données U-Pb sur apatites attestent donc d'un refroidissement sous 465-515°C à l'échelle du prisme entre  $426,6 \pm 16$  Ma et  $396,3 \pm 9,6$  Ma (Fig. 3.5.2). Au sein de l'unité de Ben Hope, le même refroidissement est mieux contraint entre  $419,7 \pm 8,8$  Ma et  $408,5 \pm 2,2$  Ma (Fig. 3.5.2). Quelques âges étonnamment jeunes, < 400 Ma c'est à dire post-scandiens, sont tous localisés dans des zones de déformation importante, au sein des accidents majeurs (Moine et Naver). Ils peuvent documenter des réouvertures de système lors de la réactivation (en faille normale?, Wilson *et al.* (2010)) des chevauchements et des circulations de fluides associées, susceptibles de recristalliser les apatites sous leur tempé-

rature de fermeture. Ces événements post-scandiens ne seront pas considérés plus avant. L'ensemble du prisme calédonien semble donc se refroidir sous la température de fermeture du système U-Pb sur apatite vers  $407 \pm 7$  Ma.

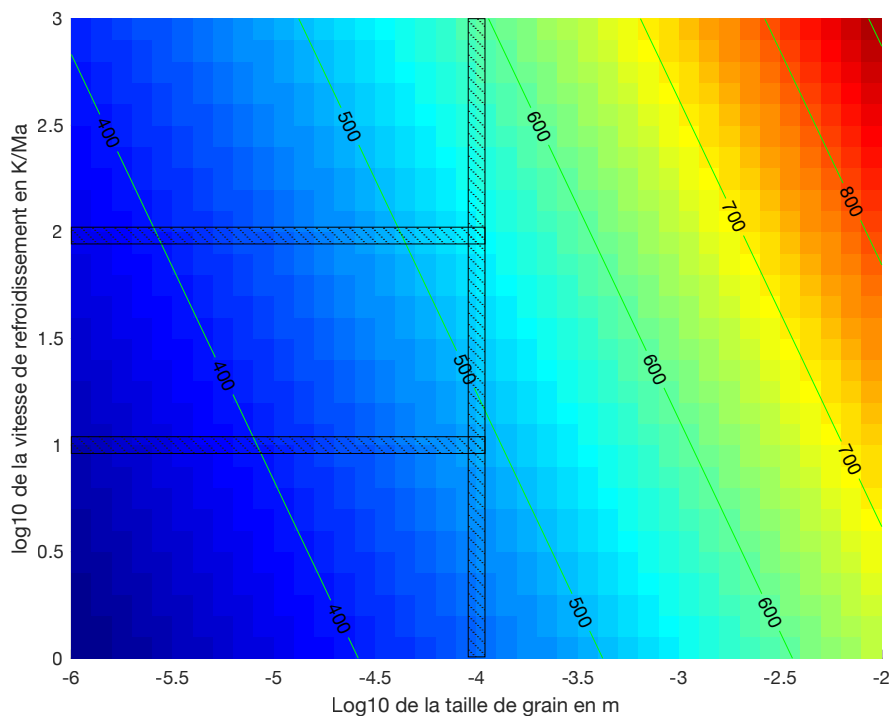


FIGURE 8.1.1 – Température de fermeture calculée d’après la formule de Dodson pour le Pb dans les apatites (Dodson, 1973a) et les données expérimentales de Cherniak *et al.* (1991). Les bandes hachurées correspondent à la taille de grains pour les unités du prisme Calédonien et à deux extréma de vitesse de refroidissement

### 8.1.2 Le refroidissement contraint par les données $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ sur muscovite

La température de fermeture du système isotopique K/Ar dans la muscovite est présentée sur la figure 8.1.2. Pour les tailles de grains considérées dans cette étude et pour des vitesses de refroidissement allant de  $10^\circ\text{C}/\text{Ma}$  à  $100^\circ\text{C}/\text{Ma}$ , la température de fermeture varie de  $460^\circ\text{C}$  à  $520^\circ\text{C}$ .

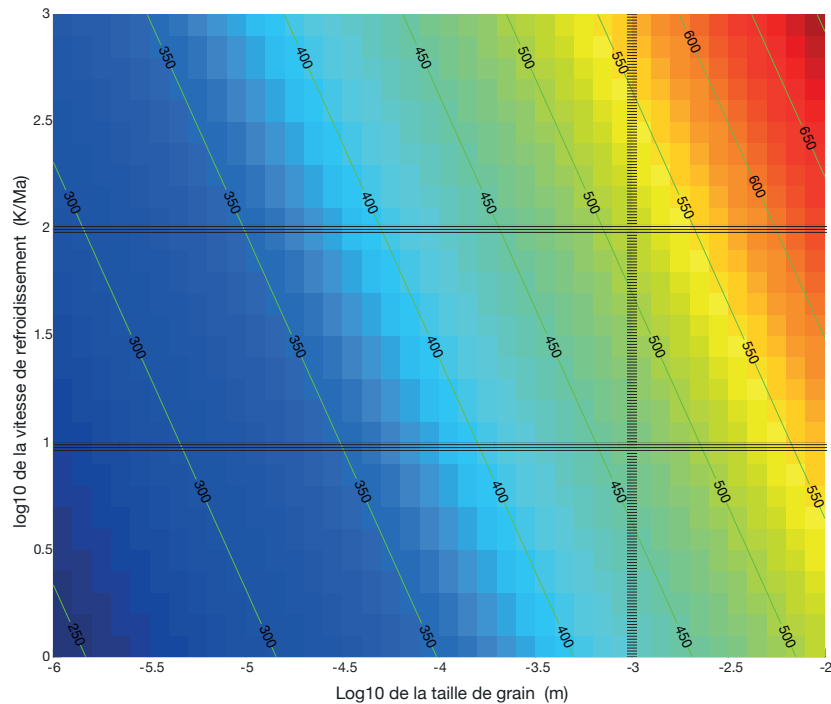


FIGURE 8.1.2 – Température de fermeture calculée d’après la formule de Dodson (Dodson, 1973b) pour la diffusion de l’argon dans les micas blancs et les données expérimentales de Hames et al., 1994. Les lignes hachurées montrent les températures attendues pour les tailles de grains et les vitesses de refroidissement dans cette étude

La différence entre les âges obtenus par les méthodes  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  sur muscovite et U-Pb sur apatite est probablement due à de très faibles différences de température de fermeture et à une sous évaluation de l’incertitude des données expérimentales (Fig. 8.1.1 et Fig. 8.1.2). De plus, les âges  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  sur biotites, qui possèdent aussi une température de fermeture proche (350-400°C, Grove et Harrison (1996)) sont également dans cet ordre de grandeur (417-420 Ma, bien que les plateaux ne soient pas aussi bien définis). Au premier ordre, les données géochronologiques sont donc cohérentes et l’ensemble des données semblent donc attester d’un refroidissement synchrone entre 407 et 413 Ma environ dans les unités de Skinsdale, Naver et la partie sommitale de l’unité de Ben Hope sous les températures de 460 °C à 520 °C. Même si les âges  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  représentent de la recristallisation pendant la déformation ou lors d’une réaction métamorphique retrograde, le refroidissement est attesté



par les données U-Pb sur apatite.

## 8.2 Les données géochronologiques loin des zones de cisaillement

Dans l'ensemble de la littérature disponible dans la région des Highlands, plusieurs type de datations sont associées directement ou indirectement à des épisodes de déformation.

Les migmatites de l'unité de Naver produisent des âges U-Pb sur monazite à  $431 \pm 10$  Ma (Kinny *et al.*, 1999b). Cet âge, significativement postérieur à la fusion partielle (vers 460 Ma) pourrait être le résultat de déformation et métamorphisme postérieur. Au vu de la température de fermeture haute (environs 700 °C) du système isotopique U-Pb dans la monazite (Cherniak *et al.*, 2004), et des données de refroidissement issus des apatites et des muscovite, il semble que cette âge U-Pb sur monazite pourrait plutôt associé à des déformations scandiennes qu'au refroidissement.

Plusieurs autres datations sont associées à des (petits) métagranites décrits comme dans les unités de Ben Hope et du Moine. Deux unités granitiques sont datées proche de la zone de cisaillement de Naver. Un coeur de pli à  $424 \pm 8$  Ma (U-Pb zircon, Vagastie Bridge), et une intrusion granitique  $420 \pm 6$  Ma (U-Pb zircon, Ben Kilbreck) (Kinny *et al.*, 2003) qui semblent dater leur emplacement. Ces deux unités granitiques sont respectivement daté à  $416 \pm 3$  Ma et  $413 \pm 3$  par U-Pb sur titanite. Les titanites ayant une température de fermeture de l'ordre de 550-650 °C, il est aussi possible qu'ils représentent des âges de déformations et non du refroidissement post-orogénique comme précédemment proposé (Kinny *et al.*, 2003). Des déformations se produisant jusqu'au moins 415 Ma sont aussi attesté dans l'unité du Moine, où un métagranite syn-D2 produit un âges de  $415 \pm 5$  Ma (Alsop *et al.*, 2010).

L'ensemble de ces trois âges (U-Pb sur titanite et U-Pb sur zircon) indiquent donc des déformations relativement continues entre 431 et 415 Ma. Cette phase de déformation est donc longue et se produit à haute température (>550 °C). Il n'y a plus d'évidence de déformation au sein du prisme après l'exhumation vers 407 Ma. Enfin, le fait que la structure thermique

de l'ensemble du prisme soit préservée sans réel saut de température suppose également des déformations diffuses à l'échelle du prisme, sans qu'un ou plusieurs accidents accommodent significativement la déformation.

### 8.3 Les données d'âge des zones de cisaillement

On peut distinguer les zones de cisaillement de haut grade et dominées par des processus ductiles et les chevauchements de plus bas grade et cassants visibles au sein de la Moine Thrust Zone (MTZ).

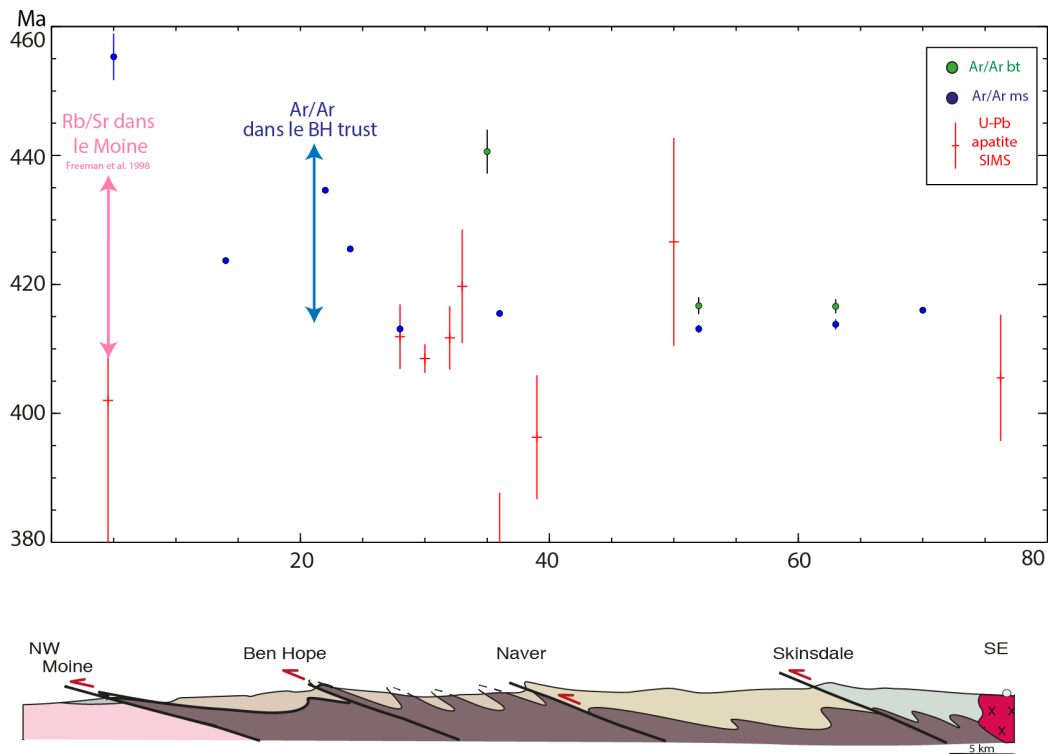


FIGURE 8.3.1 – Synthèse des différentes données thermochronologiques obtenues dans la présente étude ( $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$  et U-Pb apatite) et de Freeman *et al.* (1998) (Rb/Sr dans les mylonites du Moine)

La zone de cisaillement basale de l'unité de **Naver** (Naver "thrust") superpose l'unité migmatitique de Naver sur des unités non migmatitiques (e.g., unité du Ben Hope). La fusion partielle de l'unité est datée par la surcroissance de zircons de 461 à 467 Ma (Kinny *et al.*, 1999a). L'âge de l'activité de la zone de cisaillement de Naver n'est pas directement contrainte. Les données U-Pb sur apatite ne permettent malheureusement pas de contraindre correctement le refroidissement dans cette nappe. En effet, deux âges relativement différents sont obtenus pour cette unité :  $426,6 \pm 16,1$  Ma et  $396,3 \pm 9,6$  Ma (Fig. 8.3.1). Une grande incertitude est également associée à ces âges. Ceci étant le refroidissement de l'unité de Naver a dû se produire vers 407-413 Ma (comme les autres unités).

Les données  $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$  sur muscovites nous permettent toutefois de mieux contraindre la chronologie et les conditions de l'activité de cette zone de cisaillement. Puisqu'on ne retrouve pas de saut d'âge  $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$  sur muscovite de part et d'autre du cisaillement de Naver, cela suggère qu'il n'est pas responsable de refroidissement et donc n'accommodé pas d'exhumation différentielle entre son toit et son mur à la température de fermeture du système K-Ar dans la muscovite. Cela indique donc que l'activité du chevauchement de Naver fut cantonnée à des conditions de plus haut grade (au-dessus de  $500^\circ\text{C}$ ) et qu'elle a cessé avant l'âge obtenu de part et d'autre, environ 414 Ma. C'est donc probablement la première zone de cisaillement active (parmi celles qui affleurent encore) dans le prisme calédonien d'Écosse. L'activité de cette zone de cisaillement est donc contrainte entre l'âge de migmatitisation (467-461 Ma) et environ 414 Ma, le moment où les unités juxtaposées se refroidissent. Le Naver thrust est une zone de cisaillement précoce dans l'histoire calédonienne du prisme dont l'activité est restreinte aux conditions chaudes et profondes.

La zone de cisaillement de **Skinsdale** (ST) est encore moins connue que celle de Naver. Le seul âge disponible est un âge U-Pb sur monazite à  $426 \pm 2$  Ma, dans le pluton de Strath Halladale (Kocks *et al.*, 2006). Ce pluton présente de nombreux indices texturaux de déformation de haute température ( $700\text{-}600^\circ\text{C}$ ) c'est-à-dire proche de la température de fermeture du système U-Pb dans la monazite (Cherniak *et al.*, 2004). De plus, les sens de cisaille-

ment dans le pluton vers le NW sont cohérents avec ceux observés dans la zone de cisaillement de Skinsdale ce qui tend à le considérer comme anté à qyn-tectonique. Cet âge monazite, interprété comme de la cristallisation (Kocks *et al.*, 2006), est donc une borne supérieur pour l'activité de la zone de cisaillement à la base de l'unité de Skinsdale. Il n'est pas possible de savoir si les chevauchements de Naver et de Skinsdale ont joué de manière synchrone ou bien en séquence, mais dans tous les cas, ces deux zones de cisaillement ont joué de manière précoce, avant 415 Ma.

Dans la portion plus externe du prisme, les âges U-Pb sur apatites montrent dans **la nappe de Ben Hope**, un refroidissement homogène dans l'unité entre  $419,7 \pm 8,8$  Ma et  $408,5 \pm 2,2$  Ma (Fig. 3.5.2). Les âges  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  sur muscovite dans cette même unité sont compris entre  $415,5 \pm 0,3$  Ma et  $413,1 \pm 0,3$  Ma (Fig. 8.3.1). Cependant, plus bas structuralement, dans la zone de cisaillement de Ben Hope, les âges augmentent jusqu'à  $434,6 \pm 0,4$  Ma (Fig. 8.3.1, points bleus). Le transect de plus petite échelle à travers la zone de cisaillement de Ben Hope ( Fig. 7.3.5) permet de contraindre l'ordre de grandeur de la durée d'activité de la zone de cisaillement. Au sein de cette zone de déformation, les âges sont hétérogènes et varient de  $\sim 441$  Ma à  $413,1$  Ma. Les âges jeunes (vers 413 Ma) correspondent aux âges plus à l'Est, dans la nappe de Naver et de Skinsdale. Cette grande variation des âges sur une petite échelle spatiale, et la préservation de micas blancs substitués mènent à interpréter ces âges comme des âges de recristallisation syn-tectonique. Si tel est le cas, ces âges indiquent la préservation d'âges acquis lors d'une déformation au dessus de la température de fermeture, telle que donnée par l'équation de Dodson. Une façon de réconcilier cette observations et le modèle de Dodson serait d'imaginer que les roches de la zone de cisaillement ont des températures de fermeture plus hautes que les roches moins déformées. D'après les données de Hames et Bowring (1994) une différence de température de  $100^\circ\text{C}$  implique soit une augmentation de la taille de grain d'un ordre de grandeur soit une augmentation de la vitesse de refroidissement de plus de deux ordres de grandeur. Une baisse drastique de la teneur en fluide aurait le même effet. Aucune évidence de variation de la taille de grain avec l'âge ne nous est apparue. Un ralentissement progressif de l'activité de la zone de

cisaillement et une diminution de la vitesse de refroidissement des roches sont fort probables, puisqu'on a la preuve que le cisaillement cesse complètement à 413 Ma et que la phase finale de refroidissement est régionale. Il est donc possible que les âges vieux dans les micas substitués de la zone de cisaillement de Ben Hope représentent les épisodes de fonctionnement rapides (associés à un refroidissement rapide). La préservation des phengites substituées signifie l'absence de réactions rétrogrades, sans doute empêchées par l'absence de fluides, laquelle peut aussi impliquer des températures de fermeture hautes (Villa, 2016) Celle-ci pourrait aussi limiter la diffusion de l'argon et hausser la température effective de blocage du chronomètre. En quelques sortes, la zone de cisaillement de Ben Hope pourrait être vue comme une zone de cristallisation et d'expulsion de fluides gardant la trace d'épisodes de déformation chaude (et sèche?). En conclusion, la combinaison d'une diminution progressive de la vitesse de refroidissement et d'un changement de régime des fluides pourrait expliquer les âges plus anciens dans la zone de cisaillement. Quoiqu'il en soit le début de l'activité du Ben Hope peut être approchée par les âges les plus vieux dans le transect soit  $441,2 \pm 0,7$  Ma. La déformation cesse vers 415 Ma. L'activité du Ben Hope est donc longue, de 441 Ma à 415 Ma. La borne haute est même plus vieille que le début de l'épisode scandien souvent admis. Cet accident est la perturbation la plus visible à l'échelle du prisme dans nos données.

Les données contraignant l'activité et la déformation le long du **chevauchement du Moine** sont moins nombreuses. Les échantillons datés par U-Pb sur apatites produisent des âges relativement incertains et jeunes : 402 Ma  $\pm$  25 Ma et 326,9  $\pm$  12,5 Ma (Fig. 8.3.1). Une de nos données  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  sur muscovite donne 455,3  $\pm$  3,6 Ma juste au front de la chaîne. Cet âge vieux, est à mettre en relation avec les données qui représentent le plus probablement le moment de la déformation sur la zone de cisaillement du Moine sont celles obtenues par Freeman *et al.* (1998). En effet, les âges Rb/Sr sur micas, qui varient de 437 Ma à 408 Ma, sont considérés comme des âges de cristallisation syn-tectonique. Freeman *et al.* (1998) montre donc des âges de cristallisation syn-tectonique plus vieux que les âges obtenus loin du chevauchement du Moine (Dallmeyer *et al.*, 2001), ce que nos données reproduisent. De plus,

les estimations de températures juste au dessus du chevauchement du Moine, au Nord, de 395 °C d'après l'ouverture de l'axe c du quartz, (Thigpen *et al.*, 2013) paraissent trop faibles pour supposer un âge de refroidissement, si on fait l'hypothèse raisonnable que les quartz et les muscovites ont recristallisé ensemble. Cet âge à 455 Ma pourrait donc bien être un âge de cristallisation, qui correspond au début des déformations sur le Moine, dès 455 Ma. Enfin, cet âge peut être une combinaison entre un âge hérité d'une phase bien plus ancienne et un reset partiel au scandien. Son âge n'aurait donc pas de valeur géologique. Ceci étant la bonne qualité du spectre n'incite pas à cette interprétation. Il semble donc plus probable que cet âge soit un âge de cristallisation représentant la déformation dans cette zone du Moine Thrust.

Les âges interprétés comme de la cristallisation syn-tectonique le long de la zone de cisaillement du Moine, sont issus de micas de même compositions chimiques. Les teneur en Si des micas est similaire entre les micas datés à 440 et ceux à 408 Ma (Freeman *et al.*, 1998). Cela suggère que l'activité de la zone de cisaillement n'est pas associée à une exhumation significative par dénudation dans le toit de la faille, qui exhumerait des micas de compositions variables. Une autre possibilité est que l'exhumation soit assez rapide et limitée pour que les isothermes soient advectées avec les unités charriées et que la rétro-morphose (dans l'unité supérieure) et la rééquilibration prograde (dans l'unité inférieure) s'en trouve limitée. Une étape de déformation sans exhumation précéderait ainsi une période d'exhumation forte de l'ensemble du prisme.

Une chronologie se dégage donc à propos de l'activité des différentes zones de cisaillement. Les deux zones de cisaillement les plus anciennes sont celle de Naver et de Skinsdale. Le moment du jeu de Naver n'est pas connu mais puisqu'il est invisible dans le jeu de données de géo/thermochronologie, il est supposé avoir lieu à plus haute température et donc est supposé le plus ancien. La zone de cisaillement de Skinsdale semble active vers  $426 \pm 2$  Ma. Un jeu hors séquence du Skinsdale par rapport au Naver est surprenant. Cet âge pourrait aussi être représentatif d'une déformation distribuée enregistrée dans ce pluton au moment de sa cristallisation. La seconde phase de

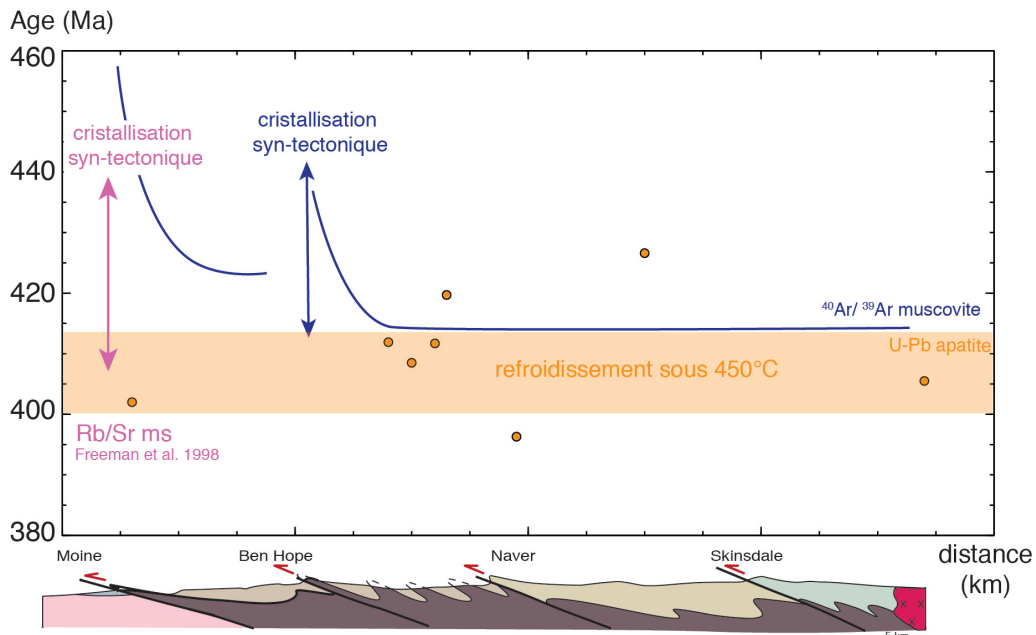


FIGURE 8.3.2 – Schémas des différentes données themochronologiques disponibles.

déformation comprend l'activité synchrone du chevauchement de Ben Hope et de celui du Moine, et ce à partir de 440 Ma environ. Le mouvement sur le chevauchement de Ben Hope semble commencer légèrement avant celui sur le Moine mais cela doit être confirmé. Il semble se terminer avant le Moine, mais là aussi, cela doit être confirmé. Ainsi au premier ordre les 2 zones de cisaillement sont actives en même temps entre 440 Ma et 415-410 Ma. Cette cessation d'activité est postérieure à tous les autres âges disponibles dans les zones internes.

Enfin, la question de l'exhumation le long de ces zones de cisaillement se pose. Les chevauchements du Naver, du Skinsdale et du Ben Hope, ne semblent pas avoir une grande influence sur l'exhumation. En effet, l'activité du Ben Hope ne semble pas être responsable d'une exhumation différentielle significative, car les données  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  sont similaires de part et d'autre de celui-ci. Pourtant son activité est longue (environ 30 Ma). Le chevauchement de Naver est responsable de l'exhumation de l'unité migmatitique mais il n'y a pas de réel saut de température entre le le sommet de l'unité de Ben Hope et la base

de celle de Naver, juste un saut de pression de 12 kbar à 9 kbars soit d'une dizaine de kilomètres. L'essentiel de l'exhumation se fait donc en fait le long du chevauchement le plus frontal du Moine. L'activité sur celui-ci est limitée à entre 438 et 408 Ma (Freeman *et al.*, 1998). Or le refroidissement n'est pas documenté avant 407 Ma. Il y a donc toute une période de déformation à relativement haute température dans la zone de cisaillement du Moine qui ne conduit pas à de l'exhumation.

La figure 8.3.3 récapitule la chronologie et les déformations qui ont lieu le long des zones de cisaillement principales. Sur cette figure est représentée l'activité à haute température de l'activité de Naver (Fig. 8.3.3, rouge > 500 °C), puis l'activité d'une large zone de déformation diffuse entre la zone de cisaillement du Moine et celle de Ben Hope (Fig. 8.3.3, vert). Enfin, la zone de cisaillement du Moine permet à partir de 407 Ma d'exhumer l'ensemble du prime (Fig. 8.3.3, bleu).

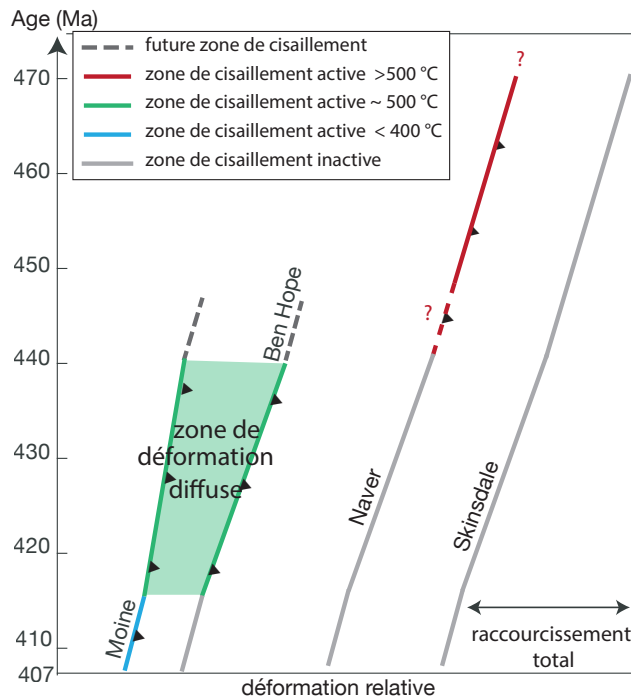


FIGURE 8.3.3 – Chronologie de l'activité des différentes zones de cisaillement. Les zones de cisaillement actives sont en couleurs en fonction de leur températures (rouge > 500 °C, verte vers 500 °C, et bleue sous 450 °C)



## 8.4 Chronologie du chemin PT

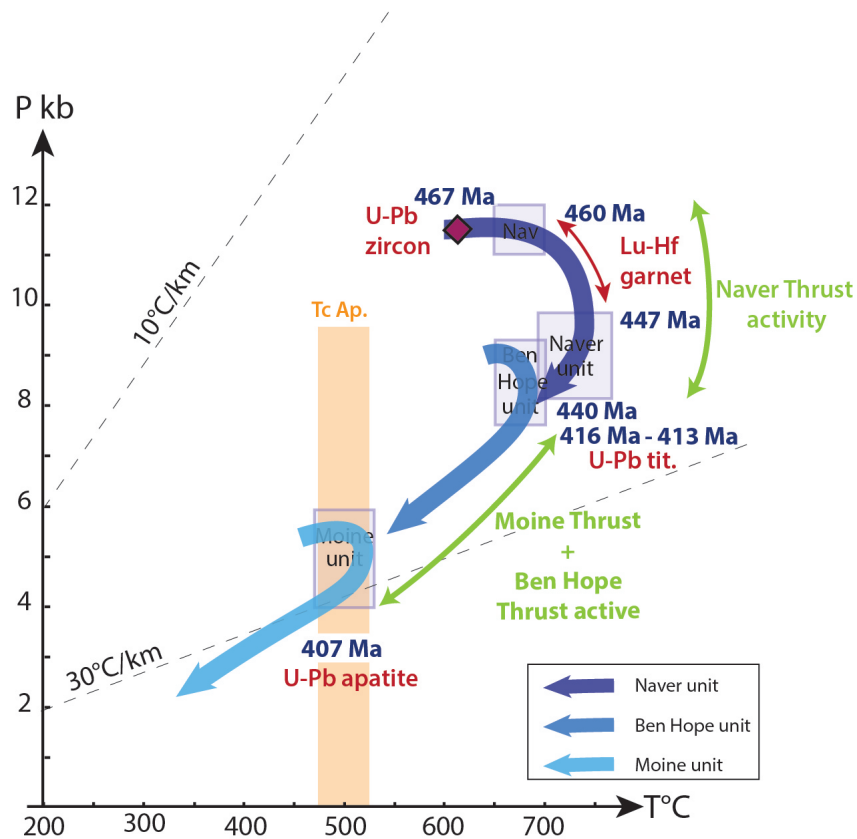


FIGURE 8.4.1 – Chemin PT des trois unités du prisme

### 8.4.1 L'unité de Naver

Le chemin PT de l'unité de Naver est contraint en temps par 3 données importantes :

1) La datation de l'événement de fusion partielle entre 467 Ma et 461 Ma (U-Pb sur zircon, Fig. 8.4.1, losange rouge (Kinny *et al.*, 1999a)),

2) Les grenats prograde à syn- pic de température entre 460 Ma et 447 Ma (Fig. 8.4.1, Lu-Hf sur grenat (Bird *et al.*, 2013). En effet, la température de fermeture du système Lu-Hf dans les grenats dépassant les 700 °C (Scherer

*et al.*, 2000) et les grenats faisant partie de la paragenèse du pic, ces données doivent représenter les conditions métamorphiques proches du pic de température dans la nappe. Par ailleurs, le motif d'intégration du lutétium dans les grenats renseigne sur la nature de l'événement daté par cette méthode. Dans le cas des grenats écossais, deux types de motifs sont retrouvés. Lorsque l'essentiel du lutétium se trouve dans les coeurs des grenats, l'âge obtenu représente la phase prograde croissance. Lorsque le profil est plat, l'âge moyenne toute la période de croissance, y compris le pic Fig. 8.4.2, respectivement A et B).. La fourchette d'âge entre 460 et 447 Ma représente donc le chemin de l'unité de Naver, de sa partie prograde jusqu'à son pic de PT (Fig. 8.4.1).

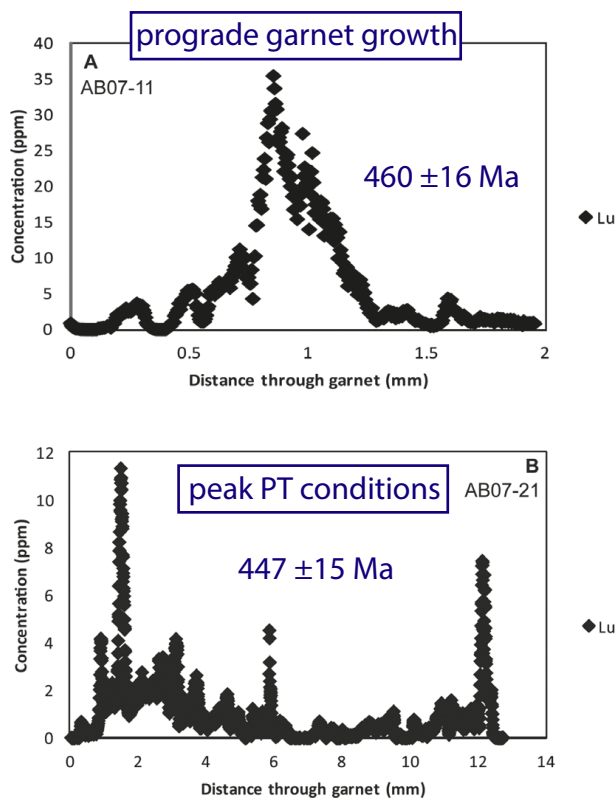


FIGURE 8.4.2 – Exemple des profils d'incorporation du lutétium dans les grenats dans la nappe de Naver (Bird *et al.*, 2013)

3) La jonction des chemins de la nappe de Naver et celui de la nappe de Ben Hope a lieu sous les 450-500 °C et avant 415 Ma, puisque les âges

$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  sur muscovite sont les mêmes de part et d'autre de la zone de cisaillement de Naver. La partie rétrograde de l'histoire PT de l'unité de Naver n'est pas directement contrainte, mais leurs amalgamation avant 415 Ma implique qu'elle partage le chemin rétrograde de l'unité de Ben Hope.

4) L'activité du chevauchement de Naver n'a lieu qu'à haute température ( $>500\text{ }^\circ\text{C}$ ) et probablement avant 440 Ma, puisque les données  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  n'enregistrent pas cette activité (Fig. 8.4.1 flèche verte). Il est responsable de la surperposition d'une unité migmatitique (Naver) sur une unité non migmatitique (Ben Hope).

5) L'enfouissement de cette unité n'est pas documenté explicitement, mais un chevauchement plus interne et aujourd'hui érodé doit en être responsable.

## 8.4.2 L'unité de Ben Hope

Le chemin de l'unité de Ben Hope est décrit par deux données :

1) Le pic de PT dans l'unité de Ben Hope atteint des températures de plus bas grade que dans la nappe de Naver. La partie rétrograde de l'histoire PT des l'unité de Ben Hope, n'est pas contrainte, mais l'amalgamation de cette unité et celle du Moine implique qu'elles partagent le même chemin rétrograde. L'ensemble de l'unité se refroidit à  $407 \pm 7\text{ Ma}$

2) L'activité de la zone de cisaillement de Ben Hope est attesté à partir de 440 Ma et probablement jusqu'à 415 Ma, en effet, les données  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  dans la zone de cisaillement varient entre 440 Ma et 415 Ma (Fig. 8.4.1 flèche verte).

## 8.4.3 L'unité du Moine

Le chemin de l'unité du Moine est moins bien contraint. Le pic de métamorphisme est proche de la température de fermeture des deux systèmes isotopique utilisés (U-Pb sur apatite et  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  sur muscovite).

1) Les conditions de pic de métamorphisme dans l'essentiel de l'unité sont de l'ordre de 450°C (Ashley *et al.*, 2015). Le sommet de l'unité, préservé sous la zone de cisaillement du Ben Hope, montrent des températures de pic de l'ordre de 600 °C (Ashley *et al.*, 2015). Cette relation entre le chemin PT et la position structurale est la seule clair au premier ordre, ce qui fait dire à Ashley *et al.* (2017) que la zone de cisaillement de Ben Hope est la discontinuité thermique et chimique majeur à l'échelle du prisme. L'ensemble de la nappe se refroidie à 407 Ma.

2) L'activité le long du chevauchement du Moine est attestée par les données Rb/Sr sur les micas blancs qui varient de 437 à 408 Ma (Freeman *et al.*, 1998). Cette activité longue, de l'ordre de 30 Ma est synchrone de l'activité de la zone de cisaillement du Ben Hope

Les déformations dans l'ensemble du prisme écossais sont attestées au premier ordre. Dans un premier temps la zone de cisaillement de Naver joue à haute température et tôt dans l'histoire collisionnel. Dans un second temps, des déformations synchrone, le long des zones de cisaillement de Ben Hope et du Moine ont lieu entre 440 Ma et 415 Ma. Cette épisode de déformation se produit sur l'ensemble de l'unité du Moine bordé à son sommet par la zone de cisaillement du Ben Hope, qui est la discontinuité majeur à l'échelle du prisme, et à sa base par la zone de cisaillement du Moine. C'est sur cette zone de cisaillement du Moine, que la localisation de la déformation se produit lors de l'étape suivante qui consiste en le refroidissement de l'ensemble du prisme de façon synchrone à  $407 \pm$  Ma.

## 8.5 Une réelle phase grampienne dans les Highlands ?

L'ensemble de nos données  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  sur muscovite et U-Pb sur apatite montrent la durée de la phase collisionnelle est beaucoup plus longue que précédemment supposé. Les précédentes estimations de durée de la phase scandienne était de l'ordre de 20-15 Ma, entre environ 430 Ma et 405 Ma. Les âges  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  de Dallmeyer *et al.* (2001) étaient interprétés comme du

refroidissement pendant l'exhumation passive post-tectonique. À partir de là, les âges similaires d'U-Pb sur titanite à 413 et 416 Ma dans la région du cisaillement de Naver (Kinny *et al.*, 2003) ont aussi été interprétés comme du refroidissement post-tectonique, en relation aux âges  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ . Cette vision d'un épisode scandien succinct ( $< 18$  Ma) pose des soucis dans la modélisation des températures atteintes de plus de 700 °C dans les parties internes du prisme (Johnson et Strachan, 2006). De plus, les différences de température entre les murs et les toits des cisaillements majeurs sont faibles (maximum 100°C) ce qui suppose qu'il ne sont pas responsables de leur enfouissement. C'est suite à ce problème que Johnson et Strachan (2006) propose que les unités soient déjà relativement chaudes, pour qu'un faible incrément de température permettent de produire l'empreinte thermique visible aujourd'hui. La source de cet héritage thermique est ainsi proposé à travers une phase grampienne distincte de l'épisode scandien mais qui permet au prisme de retenir sa chaleur, en restant en profondeur (Johnson et Strachan, 2006)

Dans notre cas, l'interprétation des données d'argon comme des âges de cristallisation depuis 440 Ma et les données U-Pb sur apatite comme refroidissement vers 407 Ma permet de rallonger considérablement l'épisode scandien au sens large à 35 Ma.

De plus, les chemins PT proposés plus tôt n'attestent pas de deux boucles distinctes entre 467 Ma et 440-430 Ma. Dans notre interprétation, l'épisode de fusion partielle et les conditions de 12 kbar à 650-700 °C, n'est qu'une phase précoce d'une phase collisionnelle scandienne (s. l.). Les autres conditions PT disponibles, notamment dans Ashley *et al.* (2015) ne sont pas clairement associables à un âge ou une phase de déformation. La répartition des âges des grenats progrades (Bird *et al.*, 2013) atteste bien qu'il y a une certaine continuité entre 467 Ma et 408 Ma, entre la fusion partielle, les âges de déformation le long des zones de cisaillement majeurs et le refroidissement de l'ensemble du prisme.

## 8.6 Bilan des informations géochronologiques disponibles

On sait donc que la construction du prisme écossais se produit entre 470 Ma et 400 Ma. Les premières étapes de la collision impliquent la migmatitisation de l'unité de Naver vers 460 Ma. L'ensemble des déformations ont eu lieu au sein du prisme entre 431 et 415 Ma à haute température au moins au dessus de 500 °C. Le cisaillement de Naver est le premier à jouer, à haute température (>500 °C) et avant 440 Ma. Puis les zones de cisaillement du Ben Hope et du Moine sont actives entre 440 et 415 Ma, et le prisme se refroidit vers 407 Ma. L'ensemble du raccourcissement accommodé dans le prisme est difficile à estimer, mais semble être de l'ordre de 100 à 200 km (Butler, 1986). Au moins une centaine de km de raccourcissement aurait eu lieu le long du chevauchement du Moine (Butler, 1986). Par ailleurs, 50 km de raccourcissement sont estimés dans les sédiments au front du prisme, l'âge de ces déformations ne sont pas contraintes (Butler et Coward, 1984).

Sur la figure 8.6.1 sont représentés l'ensemble des âges disponibles dans le prisme de Highlands. Les étoiles sur la figure représente les âges associés à un événement de déformation. Le pic d'âge le plus significatif est celui des âges de cristallisation des plutons syn-orogénique vers 430 Ma (Fig. 8.6.1 courbe bleu foncé). L'ensemble des âges sont regroupés entre 435 Ma et 410 Ma. Il est donc aussi visible ici que la dispersion des données suggèrent une phase principale entre 460 et 400 Ma et que la séparation d'un événement de fusion partielle au début de l'histoire n'est pas pertinente.

## 8.7 Implication structurales

L'ensemble de ces commentaires sur les implications structurales issues des données géochronologiques permettent de trancher entre certains éléments des deux coupes classiques des Calédonides d'Ecosse.

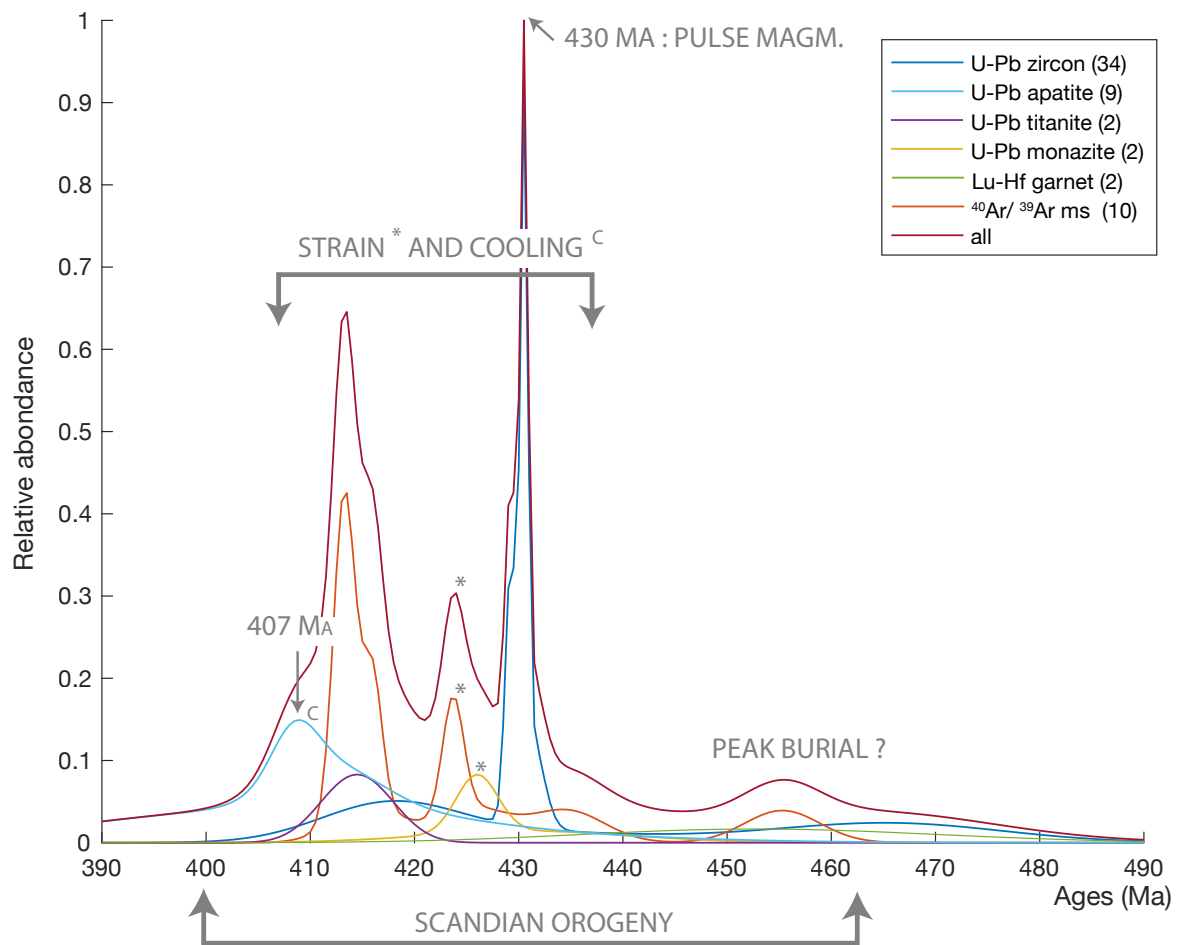


FIGURE 8.6.1 – Synthèses des âges géochronologiques et thermochronologiques, et des données issus de cette thèse

### 8.7.1 Coupe proposée par Soper et Barber (1982)

Cette première coupe dans les Highlands proposée par Soper et Barber (1982) propose un enracinement du chevauchement du Moine à la base de la croûte.

### 8.7.2 Coupe proposée par Butler (2010)

La coupe proposée par Butler (2010) est rappelée sur la figure 8.7.2. Dans cette coupe, les 50 km de raccourcissement non pris en compte par Soper

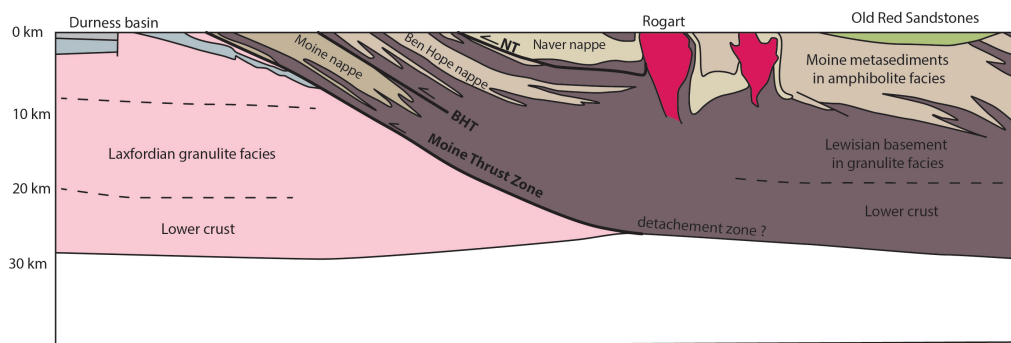


FIGURE 8.7.1 – Coupe des Highlands proposé par Soper et Barber (1982)

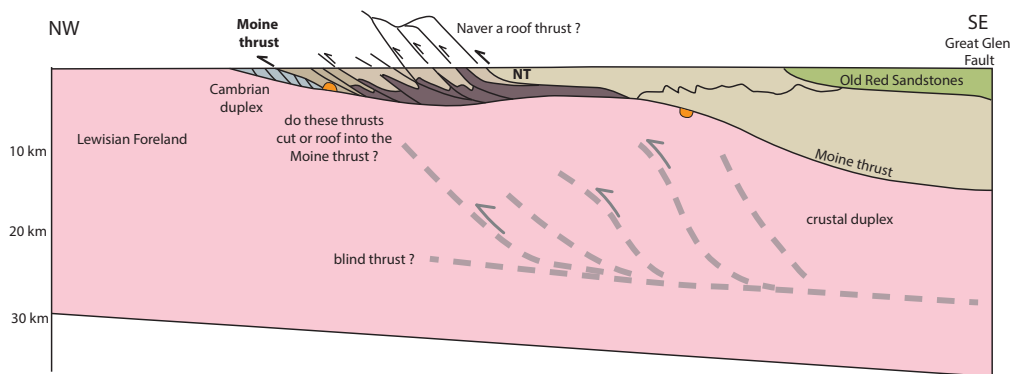


FIGURE 8.7.2 – Coupes de Highlands proposé par Butler (2010)

et Barber (1982) sont accommodés par le Moine qui décolle les sédiments autochtone (point orange sur la Fig. 8.7.2). On peut s'étonner que la déformation pénétrative qui affectent socle et couverture, soit cantonnée à une épaisseur pelliculaire (environ 10 km) sur un flèche de plus de 50 km. En effet, une grande quantité de raccourcissement est probablement accommodée par la déformation ductile (bien qu'aucune estimation ne soit disponible), il est donc étonnant qu'une structure localisée soit développée à sa base. Cela impliquerait aussi deux types de déformations, distribuée et localisé quasiment synchrone. Cette géométrie est difficile à concevoir d'un point de vue du comportement mécanique des roches.



## 8.8 Coupes évolutives du prisme

**Fig. 4.0.3 : Etape 1) 470 Ma** La nappe de Naver est en cours d'enfouissement, et va atteindre son pic de température et de pression. Les conditions sont estimées à 650-700 °C et 12 kbar (Friend *et al.*, 2000) (Fig. 4.0.3, point 1 à l'étape 1). Vers 467 Ma, la fusion partielle se produit et la nappe acquiert son caractère migmatitique. L'enfouissement de cette nappe se fait probablement par un chevauchement plus interne, aujourd'hui entièrement érodé.

**Fig. 4.0.3 : Etape 2) 450 Ma** On sait que le chevauchement de Naver joue à haute température et avant 440 Ma. Il devrait donc être actif vers 450 Ma. Le marqueur a atteint son maximum de pression et commence à être exhumé. Dans notre hypothèse, c'est lui qui est responsable du raccourcissement des sédiments du socle Lewisien autochtone. Ces sédiments sont décollés de leur socle et accretés par le chevauchement de Naver (les sédiments bleus clairs). Le socle lui est charrié sous le prisme.

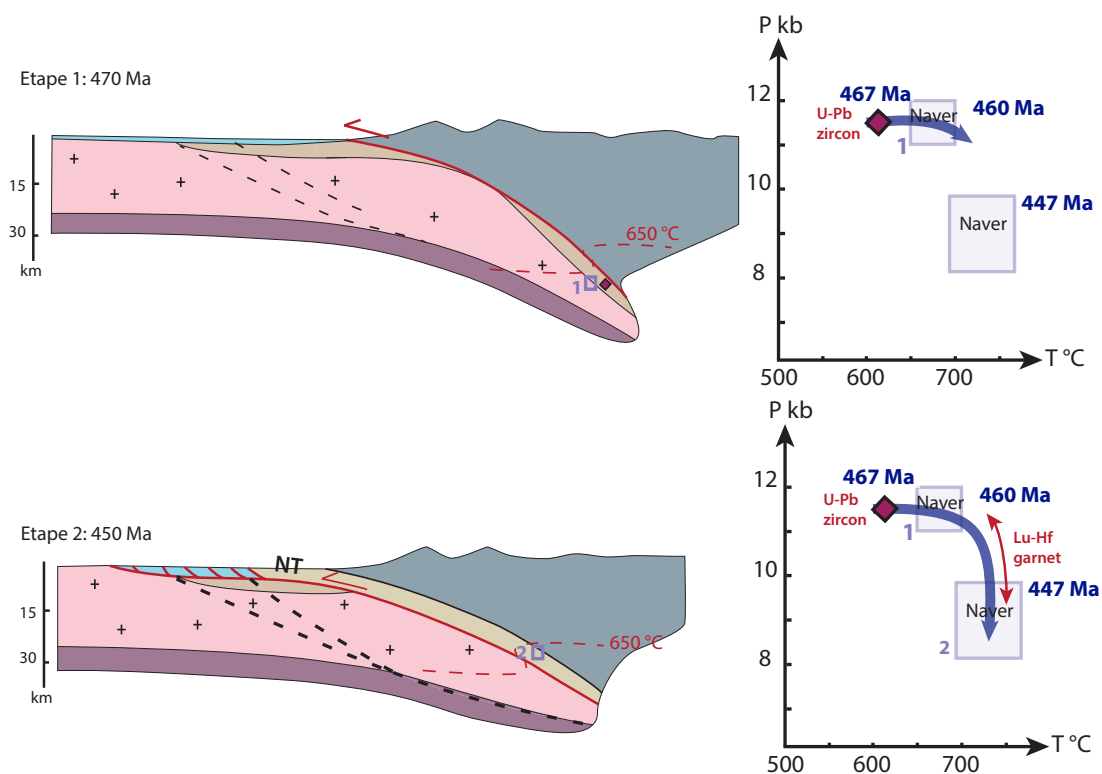


FIGURE 8.8.1 – Coupes évolutives et chemin PT du prisme des Highlands entre 470 Ma (étape 1) et 450 Ma (étape 2). NT : zone de cisaillement de Naver. Les pointillés montrent le lieu des futurs chevauchements majeurs. Le marqueur 1 dans les coupes renvoie aux contraintes dans le chemin PT

**Fig. 4.0.3 : Etape 3) 440-415 Ma** Le chevauchement de Naver n'est plus actif, et est déformé par le jeu des chevauchement du Moine et de Ben Hope maintenant actifs. Le chevauchement du Moine s'enracine possiblement à la base de la croûte moyenne ou dans la croûte inférieure. Les pics de conditions PT sont atteinte dans les unités de Ben Hope et du Moine (Fig. 4.0.3 point 2 et 3 à l'étape 3). Cette élévation des conditions PT est causé par l'enfouissement sous une nappe allochtone aujourd'hui érodé et par l'unité de Naver. Ces sédiments autochtone (bleu) sont décollé de leur socle et accreté par le chevauchement du Moine. Le socle lui est sous chariés sous le prisme. À la fin de cette étape vers 420 et jusqu'à 415 Ma, de nombreux indices de déformations sont enregistrés notamment dans la nappe de Ben Hope et du Moine (Alsop *et al.*, 2010; Kocks *et al.*, 2006; Kinny *et al.*, 2003). De

plus, les températures du pic de température sont similaires aux températures de déformations dans les nappes de Ben Hope et du Moine, suggérant que les déformations ont bien lieu vers 430-420 Ma (Thigpen *et al.*, 2010).

**Fig. 4.0.3 : Etape 4) 415-410 Ma** À partir de 415 Ma, le prisme semble ne plus se déformer et se refroidit de manière homogène. Ce refroidissement, documenté par les âges U-Pb sur apatite, est essentiellement expliqué par l'activité des chevauchements du Moine et de Ben Hope. Les sédiments autochtones sont enfouis sous le prisme en acquérant leur température maximale de 280 °C (Johnson *et al.*, 1985).

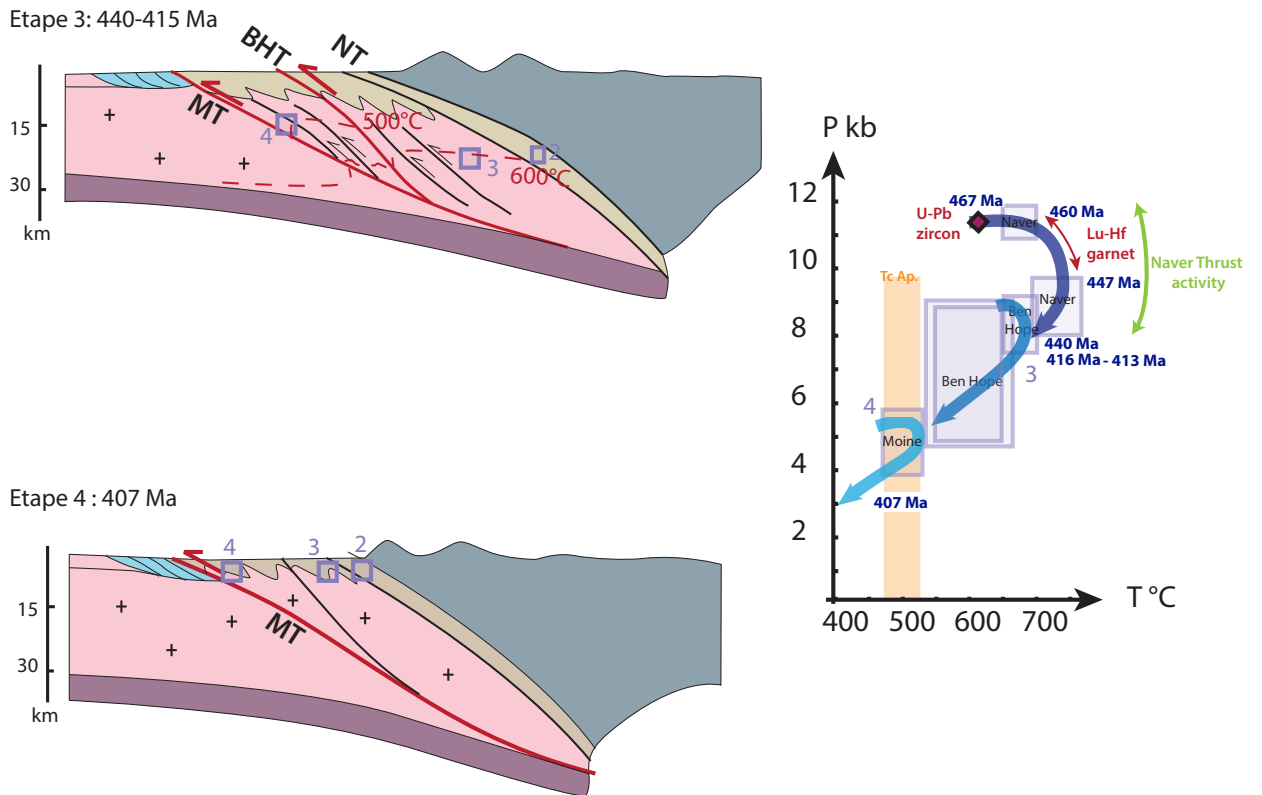


FIGURE 8.8.2 – Coupes évolutives du prisme des Highlands. NT : zone de cisaillement de Naver, BHT : zone de cisaillement de Ben Hope, MT : zone de cisaillement du Moine. Les cadres 2, 3 et 4 renvoient aux contraintes P-T dans le chemin P-T.

## 8.9 Comparaison avec les modèles précédents

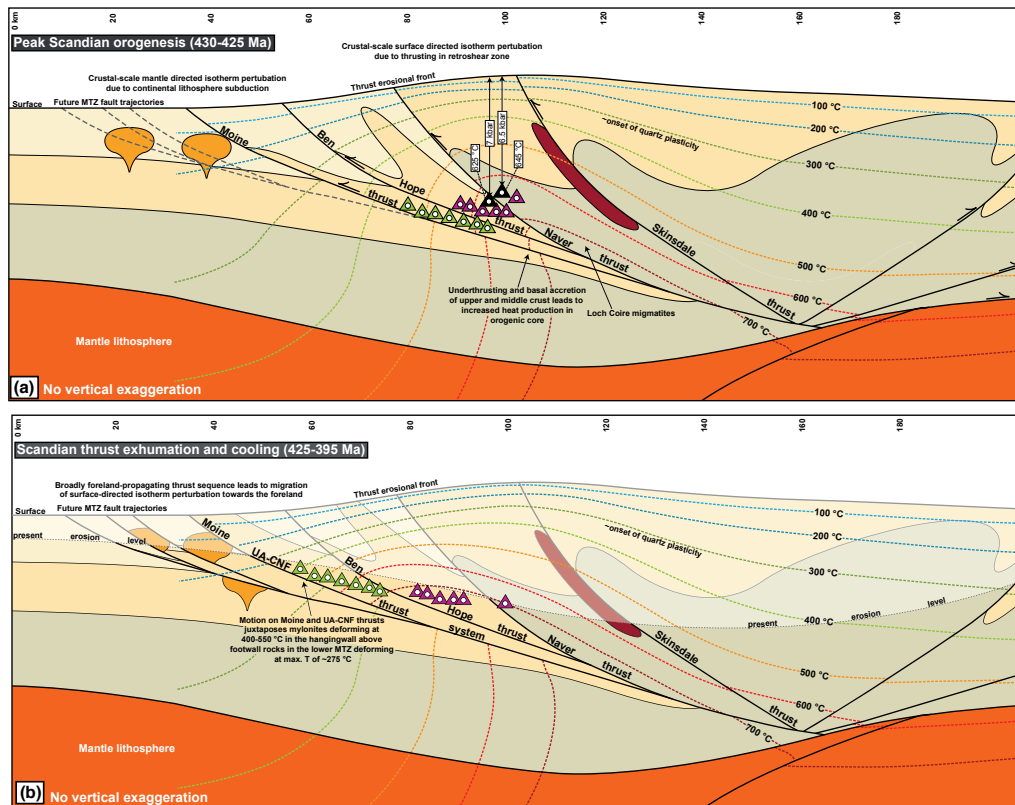


FIGURE 8.9.1 – Schémas de l'accrétion des différentes unités a) au pic de métamorphisme (430-425 Ma) et b) pendant l'exhumation (424-395 Ma) d'après Thigpen *et al.* (2013)

Le modèle proposé par Thigpen *et al.* (2013) diffère de nos interprétations plusieurs points :

- 1) Les chevauchements semblent jouer en séquence (Fig. 8.9.1) uniquement.
- 2) La localisation des chevauchements principaux semble aléatoire, puisqu'elle n'est pas là où le maximum de la déformation est illustré (Fig. 8.9.1a, dans la nappe de Ben Hope par exemple).

3) À 425 Ma (Fig. 8.9.1 (a)), les quatre zones de cisaillement sont actives : le Moine, le Ben Hope, le Naver et le Skinsdale. Or nos données  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  montrent clairement que les cisaillements de Naver et Skinsdale ne jouent ni

vers 425 Ma ni synchrone avec le Ben Hope.

La phase finale de la construction du prisme consiste en la localisation de la déformation sur le chevauchement du Moine et la mise en place de l'ensemble du prisme ductile sur la zone de la MTZ et l'autochtone. Cela est la même interprétation que la nôtre.

## 8.10 Conclusions

L'ensemble de ces résultats permet de repenser quelques caractéristiques des prismes orogéniques :

**Déformation distribuée vs déformation localisée** Pendant la construction du prisme écossais plusieurs phases de déformation localisée et distribuée se succèdent. Dans un premier temps les premières déformations enregistrées semblent être localisées sur le chevauchement de Naver. Cela a lieu à haute température, et avant 440 Ma. Puis une phase de délocalisation de la déformation a lieu avec une grande zone de déformation entre le Moine et le Ben Hope pendant environ 30 Ma. Enfin, la déformation et l'exhumation se relocalisent le long du Moine.

**Exhumation et enfouissement** De plus, les déformations le long des zones de cisaillement ne sont pas forcément liées à l'exhumation. Les déformations au sein du prisme sont plutôt des déformations qui accommodent le raccourcissement mais sans être réellement traduites par de l'épaississement. Par ailleurs, nos méthodes de datation ne permettent pas d'étudier la part d'enfouissement dont sont responsables ces chevauchements. C'est uniquement leur influence sur le refroidissement qui est enregistrée dans notre cas.

**Thin-skin vs thick-skin** Dans ce prisme écossais les divisions entre déformation thin-skinned et thick-skinned renseignent peu. En effet, l'interface entre la couverture et le socle cristallin n'agit pas comme limite rhéologique, et l'ensemble est plissé et déformé dans l'ensemble des unités.

# Chapitre 9

## Bilan

Dans un premier temps, nous avons mis en place une méthode innovante de datation U-Pb sur apatite. À l'opposé des techniques actuelles qui consistent en l'utilisation d'ICPMS couplée à une ablation LASER, il a été développé une technique de datation à la sonde ionique (SIMS) au CRPG de Nancy. Cette technique permet la mesure précise de l'isotope  $^{204}\text{Pb}$  du plomb, pour pouvoir ensuite corriger chaque âge obtenu. La manipulation de ces âges  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  corrigés permet de séparer correctement les événements thermique entre eux dans des terrains polymétamorphiques tels que ceux du prisme du Moine. Ces données U-Pb ont été interprétés comme des données de refroidissement des unités constitutives du prisme. Ce refroidissement sous 450-400°C est enregistré à l'échelle du prisme vers 410-400 Ma. Quelques âges plus jeunes sont également documentés au front de la chaîne et dans les chevauchements majeurs. Cette nouvelle étude géochronologique a été confrontée à une seconde datation LA-ICPMS au Trinity College à Dublin. L'essentiel des âges est similaire et ils confirment le refroidissement homogène à l'échelle du prisme. Quelques échantillons soulèvent cependant des questions quant aux bénéfices relatifs des âges Tera-Wasserburg "ancrés" issu de LA-ICPMS et des âges corrigés moyens issus de la SIMS.

Dans un second temps, deux transects à l'échelle du prisme et à l'échelle des chevauchements ductiles ont été réalisés dans le but de contraindre le mouvement le long des zones de cisaillements de Naver et du Ben Hope et

de contraindre l'exhumation du prime. Le système  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  a été choisi en raison de sa température de fermeture dans les micas, proches de la température de déformation estimée. De plus, la sensibilité de ce système à la déformation est plus grande que pour les apatites ce qui permet (en partie) de déconvoluer le refroidissement de l'influence de la déformation.

A l'échelle du prisme, les données  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  montrent des âges relativement constants vers 415 Ma dans les nappes internes de Naver et Skinsdale. Ces âges sont interprétés comme représentant un refroidissement synchrone de ces nappes. A l'inverse, dans les nappes du Moine et de Ben Hope, les âges sont plus dispersés et sont plus vieux. Les transects d'âges à travers les zones de cisaillement renseignent également sur la déformation. Le signal isotopique dans les accidents majeurs consiste en un vieillissement jusqu'à 440 Ma jusqu'à 415 Ma. Ce pattern d'âge avec des chevauchements vieux et un refroidissement régional synchrone et tardif est à l'envers du motif "classique" où les chevauchements enregistrent des âges de cristallisation plus jeunes que le plateau régional de refroidissement, et traduisent les phénomènes de localisation de la déformation dans les zones de chevauchements. Ces données montrent dans le détail que (i) le chevauchement ductile de Ben Hope est actif d'environ 440 Ma à 415 Ma et (ii) le refroidissement à l'échelle du prisme se produit vers 415 Ma. Ces données représentent un cas complexe qui montre les limites de l'interprétation des âges  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  à travers le prisme de l'équation de Dodson, c'est à dire en faisant de la température le paramètre de premier ordre de contrôle de la diffusion de l'argon dans les réseaux cristallins. En effet, il semble possible dans certaines conditions de préserver des événements vieux, enregistrés dans des micas au-dessus de leur température de fermeture théorique. Le caractère thermochronologique de la méthode  $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$  est donc à moduler avec son caractère pétro-chronologique.

L'ensemble de ces travaux permettent in fine de proposer un scénario d'évolution thermique et déformationnelle dans les Calédonides d'Ecosse. Dans un premier temps les déformations sont diffuses, à haute température vers 470-460 Ma. Ce moment correspond à l'enfouissement et la migmatitisation des roches de Naver. A partir de 440 Ma les déformations sont propagées vers l'ouest, sur les accidents de Ben Hope et du Moine, de façon relativement

distribuée. Le raccourcissement horizontal n'est dans un premier temps associés à aucune exhumation. L'exhumation, reliée au refroidissement enregistré dans l'ensemble du prisme se produit vers 415-410 Ma. Elle suit la localisation de la déformation sur le chevauchement frontal du Moine qui est responsable de l'exhumation des unités plus internes et de leurs contacts alors fossilisés. Afin de mieux relier la déformation avec la température, il serait peut être judicieux de dater des monazites dans des contextes texturaux précis. Cela pourrait peut-être permettre de dater le pic de métamorphisme diachrone dans les différentes unités. La suite de ce travail pourrait également contenir une partie d'analyse Ar/Ar mais in-situ pour vraiment avoir un contrôle textural de la signification des âges. Cependant la monotonie des textures ne permettra peut être pas de séparer deux épisodes de déformation. Enfin, les futures données hélium sur zircon pourront peut être renseigner sur la fin de l'histoire thermique bien que l'essentiel de la localisation et du raccourcissement semblent avoir déjà eu lieu vers 500 °C et vers 415 Ma.



# Bibliographie

- ALSOP, G. I., CHEER, D. A., STRACHAN, R. A., KRABBENDAM, M., KINNY, P. D., HOLDSWORTH, R. E. et LESLIE, A. G. : Progressive fold and fabric evolution associated with regional strain gradients : a case study from across a Scandian ductile thrust nappe, Scottish Caledonides. *Geological Society, London, Special Publications*, 335(1):255–274, 2010.
- ASHLEY, K. T., LAW, R. D. et THIGPEN, J. R. : Garnet morphology distribution in the northern part of the Moine Supergroup, Scottish Caledonides. *Journal of Metamorphic Geology*, 35(1):77–94, 2017.
- ASHLEY, K. T., THIGPEN, J. R. et LAW, R. D. : Prograde evolution of the Scottish Caledonides and tectonic implications. *Lithos*, 224-225:160–178, 2015.
- BARR, D., HOLDSWORTH, R. E. et ROBERTS, A. M. : Caledonian ductile thrusting in a Precambrian metamorphic complex : The Moine of north-western Scotland. *Geological Society of America Bulletin*, 97(6):754–764, 1986.
- BAXTER, E. F., AGUE, J. A. Y. J. et DEPAOLO, D. J. : Prograde temperature–time evolution in the Barrovian type locality constrained by Sm/Nd garnet ages from Glen Clova, Scotland. *Journal of the Geological Society*, 159(1):71–82, 2002.
- BEYSSAC, O., GOFFÉ, B., CHOPIN, C. et ROUZAUD, J. N. : Raman spectra of carbonaceous material in metasediments : A new geothermometer. *Journal of Metamorphic Geology*, 20(9):859–871, 2002.

- BIRD, A. F., THIRLWALL, M. F., STRACHAN, R. A. et MANNING, C. J. : Lu-Hf and Sm-Nd dating of metamorphic garnet : evidence for multiple accretion events during the Caledonian orogeny in Scotland. *Journal of the Geological Society*, 170(2):301–317, 2013.
- BIRD, A. F. : *Age resolution of peak metamorphism within the Caledonides of Northern Scotland and Shetland*. Thèse de doctorat, Royal Holloway University of London, 2011.
- BOUTOUX, A., BELLAHSEN, N., NANNI, U., PIK, R., VERLAGUET, A., ROLLAND, Y. et LACOMBE, O. : Thermal and structural evolution of the external Western Alps : Insights from (U-Th-Sm)/He thermochronology and RSCM thermometry in the Aiguilles Rouges/Mont Blanc massifs. *Tectonophysics*, 683:109–123, 2016.
- BOVEN, A., PASTEELS, P., KELLEY, S. P., PUNZALAN, L., BINGEN, B. et DEMAÏFFE, D. : Arr 39 Ar study of plagioclases from the Rogaland anorthosite complex (SW Norway) : an attempt to understand argon ages in plutonic plagioclase. *Chemical Geology*, 176:105–135, 2001.
- BUTLER, R. W. H. : The role of thrust tectonic models in understanding structural evolution in NW Scotland. *Geological Society, London, Special Publications*, 335(1):293–320, 2010.
- BUTLER, R. W. H. et COWARD, M. P. : Geological constraints, structural evolution, and deep geology of the Northwest Scottish Caledonides. *Tectonics*, 3(3):347–365, 1984.
- BUTLER, R. W. : Structural evolution in the Moine of northwest Scotland : a Caledonian linked thrust system ? *Geological Magazine*, 123(1):1–11, 1986.
- CAWOOD, P. A., NEMCHIN, A. A., STRACHAN, R. A., KINNY, P. et LOEWY, S. L. : Laurentia provenance and an intracratonic tectonic setting for the Moine Supergroup, Scotland, constrained by detrital zircons from the Loch Eil and Glen Urquhart successions. *Journal of the Geological Society*, 161:861–874, 2004.

- CHAMBERLAIN, K. R. et BOWRING, S. A. : Apatite-feldspar U-Pb thermochronometer : a reliable, mid-range (450 C) , diffusion-controlled system. *Rap. tech.*, 2000.
- CHERNIAK, D. J., LANFORD, W. A. et RYERSON, F. J. : Lead diffusion in apatite and zircon using ion implantation and Rutherford Backscattering techniques. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 55:1663–1673, 1991.
- CHERNIAK, D. J. et WATSON, E. B. : Pb diffusion in zircon. *Chemical Geology*, 172:5–24, 2000.
- CHERNIAK, D. J., WATSON, E. B., GROVE, M. et HARRISON, T. M. : Pb diffusion in monazite : A combined RBS/SIMS study. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2004.
- CHEW, D. M., PETRUS, J. A. et KAMBER, B. S. : U–Pb LA–ICPMS dating using accessory mineral standards with variable common Pb. *Chemical Geology*, 363:185–199, 2014.
- CHEW, D. M., SYLVESTER, P. J. et TUBRETT, M. N. : U–Pb and Th–Pb dating of apatite by LA–ICPMS. *Chemical Geology*, 280(1-2):200–216, 2011a.
- CHEW, D. M., SYLVESTER, P. J. et TUBRETT, M. N. : U–Pb and Th–Pb dating of apatite by LA–ICPMS. *Chemical Geology*, 280:200–216, 2011b.
- CHEW, D., DALY, J. S., PAGE, L. M. et KENNEDY, M. J. : Grampian orogenesis and the development of blueschist-facies metamorphism in western Ireland. *Journal of the Geological Society*, 160:911–924, 2003.
- CORFU, F., ANDERSEN, T. B. et GASSER, D. : The Scandinavian Caledonides : main features, conceptual advances and critical questions. *Geological Society, London, Special Publications*, 390(1):9–43, 2014.
- CORFU, F., GERBER, M., ANDERSEN, T. B., TORSVIK, T. H. et ASHWAL, L. D. : Age and significance of Grenvillian and Silurian orogenic events in the Finnmarkian Caledonides, northern Norway. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 48(2):419–440, 2011.

- CORFU, F., HEAMAN, L. M. et ROGERS, G. : Polymetamorphic evolution of the Lewisian complex, NW Scotland, as recorded by U-Pb isotopic compositions of zircon, titanite and rutile. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 117:215–228, 1994.
- COWARD, M. P., ENFIELD, M. A. et FISCHER, M. W. : Devonian basins of Northern Scotland : extension and inversion related to Late Caledonian-Variscan tectonics. *Geological Society Special Publication*, 44:275–308, 1989.
- CUTTS, K. A., KINNY, P. D., STRACHAN, R. A., HAND, M., KELSEY, D. E., EMERY, M., FRIEND, C. R. et LESLIE, A. G. : Three metamorphic events recorded in a single garnet : Integrated phase modelling, in situ LA-ICPMS and SIMS geochronology from the Moine Supergroup, NW Scotland. *Journal of Metamorphic Geology*, 28(3):249–267, 2010.
- DAHL, P. S. : The effects of composition on retentivity of argon and oxygen in hornblende and related amphiboles : A field-tested empirical model. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60(19):3687–3700, 1996.
- DALLMEYER, R. D., ANDRÉASSON, P. G. et SVENNINGSSEN, O. : Initial tectonothermal evolution within the Scandinavian Caledonide Accretionary Prism : constraints from  $^{40}\text{Ar} / ^{39}\text{Ar}$  mineral ages within the Seve Nappe Complex , Sarek Mountains, Sweden. *Journal of Metamorphic Geology*, 9:203–218, 1991.
- DALLMEYER, R. D. et GEE, D. G. :  $^{40}\text{Ar} / ^{39}\text{Ar}$  mineral dates from retrogressed eclogites within the Baltoscandian miogeocline : Implications for a polyphase Caledonian orogenic evolution. *Geological Society of America Bulletin*, 97:26–34, 1986.
- DALLMEYER, R. D., STRACHAN, R. A., ROGERS, G., WATT, G. R. et FRIEND, C. R. L. : Dating deformation and cooling in the Caledonian thrust nappes of north Sutherland, Scotland : insights from  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  and Rb-Sr chronology. *Journal of the Geological Society, London*, 158 (3):501–512, 2001.

- DEMPSTER, T. J., ROGERS, G., TANNER, P. W. G., BLUCK, B. J., MUIR, R. J., REDWOOD, S. D., IRELAND, T. R. et PATERSON, B. A. : Timing of deposition, orogenesis and glaciation within the Dalradian rocks of Scotland : constraints from U-Pb zircon ages. *Journal of the Geological Society*, 159:83–94, 2002.
- DEWEY, J. F. et STRACHAN, R. A. : Changing Silurian–Devonian relative plate motion in the Caledonides : sinistral transpression to sinistral trans-tension. *Journal of the Geological Society*, 160(2):219–229, 2003.
- DEWEY, J. F., DALZIEL, I. W. D., REAVY, R. J. et STRACHAN, R. A. : The Neoproterozoic to Mid-Devonian evolution of Scotland : a review and un-resolved issues. *Scottish Journal of Geology*, 51:5–30, 2015.
- DODSON, M. H. : Closure Profiles in Cooling Systems. *Materials Science Forum*, 7:145–154, 1986.
- DODSON, M. : Closure Temperature in Cooling Geochronological and Petro-logical Systems. *Contr. Mineral. and Petrol*, 40:259–274, 1973a.
- DODSON, M. : Closure Temperature in Cooling Geochronological and Petro-logical Systems. *Contr. Mineral. and Petrol*, 40:259–274, 1973b.
- DUNNING, G. et FURNES, H. : A U/Pb age for the Sulitjelma Gabbro, North Norway : Further evidence for the development of a Caledonian marginal basin in Ashgill–Llandovery time. *Geological Magazine*, 128:141–153, 1991.
- FINCH, M. A., WEINBERG, R. F. et HUNTER, N. J. R. : Water loss and the origin of thick ultramylonites. *Geology*, 44, 2016.
- FLECK, R. J., SUTTER, J. F. et ELLIOT, D. H. : Interpretation of discordant  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  age-spectra of Mesozoic tholeiites from Antarctica. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 41:15–32, 1977.
- FOSSEN, H. : Extensional tectonics in the North Atlantic Caledonides : a regional view. *Geological Society, London, Special Publications*, 335(1): 767–793, 2010.

- FREEMAN, S. R., BUTLER, R. W. H., CLIFF, R. a. et REX, D. C. : Direct dating of mylonite evolution : a multi-disciplinary geochronological study from the Moine Thrust Zone, NW Scotland. *Journal of the Geological Society*, 155(5):745–758, 1998.
- FRIEND, C. R., JONES, K. A. et BURNS, I. M. : New high-pressure granulite event in the Moine Supergroup, Northern Scotland : Implications for Taconic (early Caledonian) crustal evolution. *Geology*, 28(6i):543–546, 2000.
- FRIEND, C. R. et KINNY, P. D. : A reappraisal of the Lewisian Gneiss Complex : Geochronological evidence for its tectonic assembly from disparate terranes in the Proterozoic. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 142(2):198–218, 2001.
- FRIEND, C., STRACHAN, R. et KINNY, P. : U-Pb zircon dating of basement inliers within the Moine Supergroup, Scottish Caledonides : implications of Archaean protolith ages. *Journal of the Geological Society*, 165(4):807–815, 2008.
- FRIEND, C., STRACHAN, R., KINNY, P. et WATT, G. : Provenance of the Moine Supergroup of NW Scotland : evidence from geochronology of detrital and inherited zircons from (meta)sedimentary rocks, granites and migmatites. *Journal of the Geological Society, London*, 160(2):247–257, 2003.
- GILOTTI, J., NUTMAN, A. P. et BRUECKNER, H. K. : Devonian to Carboniferous collision in the Greenland Caledonides : U-Pb zircon and Sm-Nd ages of high-pressure and ultrahigh-pressure metamorphism. *Contr. Mineral. and Petrol*, 148:216–235, 2004.
- GOODENOUGH, K. M., EVANS, J. A. et KRABBENDAM, M. : Constraining the maximum age of movements in the Moine Thrust Belt : dating the Canisp Porphyry. *Scottish Journal of Geology*, 42(1):77–81, 2006.
- GOODENOUGH, K. M., MILLAR, I., STRACHAN, R. A., KRABBENDAM, M. et EVANS, J. A. : Timing of regional deformation and development of the

- Moine Thrust Zone in the Scottish Caledonides : constraints from the U-Pb geochronology of alkaline intrusions. *Journal of the Geological Society*, 168(1):99–114, 2011.
- GOODENOUGH, K. M., YOUNG, B. N. et PARSONS, I. : The minor intrusions of Assynt, NW Scotland : early development of magmatism along the Caledonian Front. *Mineralogical Magazine*, 68:541–559, 2004.
- GROVE, M. et HARRISON, T. M. : 40 Ar\* diffusion in Fe-rich biotite. *American Mineralogist*, 81:940–951, 1996.
- HAMES, W. E. et BOWRING, S. A. : An empirical evaluation of the argon diffusion geometry in muscovite. *Earth and Planetary Science Letters*, 124:161–167, 1994.
- HANSMA, J., TOHVER, E., SCHRANK, C., JOURDAN, F. et ADAMS, D. : The timing of the Cape Orogeny : New 40 Ar / 39 Ar age constraints on deformation and cooling of the Cape Fold Belt , South Africa. *Gondwana Research*, 32:122–137, 2016.
- HARLEY, S. L. et KELLY, N. M. : Zircon Tiny but Timely. *Elements*, 2007.
- HARRISON, T. M., CÉLÉRIER, J., AIKMAN, A. B., HERMANN, J. et HEIZLER, M. T. : Diffusion of 40Ar in muscovite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 73(4):1039–1051, 2009.
- HARRISON, T. M., HEIZLER, M. T., LOVERA, O. M., WENJI, C. et GROVE, M. : A chlorine disinfectant for excess argon released from K-feldspar during step heating. *Earth and Planetary Science Letters*, 123:95–104, 1994.
- HARTE, B., BOOTH, J. E., DEMPSTER, T. J., FETTES, D. J., MENDUM, J. R. et WATTS, D. : Aspects of the post-depositional evolution of Dalradian and Highland Border Complex rocks in the Southern Highlands of Scotland. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh : Earth Sciences*, 75(2):151–163, 1984.

- HODGES, K. V. : 4.8 Thermochronology in Orogenic Systems. p. 281–308, 2014.
- HOLDSWORTH, R. E. et GRANT, C. J. : Convergence-related ‘dynamic spreading’ in a mid-crustal ductile thrust zone : a possible orogenic wedge model. *Geological Society, London, Special Publications*, 54(1):491–500, 1990.
- HOLMES, A. et LAWSON, R. W. : Factors Involved in the Calculation of the Ages of Radioactive Materials. *American Journal of Science*, 13:327–344, 1927.
- HYSOP, E. K. : *Strain-induced metamorphism and pegmatite development in the Moine rocks of Scotland*. Thèse de doctorat, University of Hull, 1992.
- JOHNSON, M. R. W., KELLEY, S. P., OLIVER, G. J. H. et WINTER, D. A. : Thermal effects and timing of thrusting in the Moine Thrust zone. *Journal of the Geological Society*, 142(5):863–873, sep 1985.
- JOHNSON, M. R. W. et STRACHAN, R. A. : A discussion of possible heat sources during nappe stacking : the origin of Barrovian metamorphism within the Caledonian thrust sheets of NW Scotland. *Journal of the Geological Society*, 163:579–582, 2006.
- KELLEY, S. P. et POWELL, D. : Relationships between marginal thrusting and movement on major, internal shear zones in the Northern Highland Caledonides, Scotland. *Journal of Structural Geology*, 7(2):161–174, 1985.
- KETCHAM, R. A., GAUTHERON, C. et TASSAN-GOT, L. : Accounting for long alpha-particle stopping distances in (U-Th-Sm)/He geochronology : Refinement of the baseline case. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 75 (24):7779–7791, 2011.
- KINNY, P. D., FRIEND, C. R. L., STRACHAN, R. a., WATT, G. R. et BURNS, I. M. : U-Pb geochronology of regional migmatites in East Sutherland, Scotland : evidence for crustal melting during the Caledonian orogeny. *Journal of the Geological Society*, 156(6):1143–1152, 1999a.



- KINNY, P. D., FRIEND, C. R. L., STRACHAN, R. a., WATT, G. R. et BURNS, I. M. : U-Pb geochronology of regional migmatites in East Sutherland, Scotland : evidence for crustal melting during the Caledonian orogeny. *Journal of the Geological Society*, 156(6):1143–1152, 1999b.
- KINNY, P. D., STRACHAN, R. A., FRIEND, C. R. L., KOCKS, H., ROGERS, G. et PATERSON, B. A. : U-Pb geochronology of deformed metagranites in central Sutherland, Scotland : evidence for widespread late Silurian metamorphism and ductile deformation of the Moine Supergroup during the Caledonian orogeny. *Journal of the Geological Society, London*, 160:259–269, 2003.
- KINNY, P., FRIEND, C. et LOVE, G. : Proposal for a terrane-based nomenclature for the Lewisian Gneiss Complex of NW Scotland. *Journal of the Geological Society*, 162(January):175–186, 2005.
- KIRKLAND, C. L., DALY, J. S., CHEW, D. M. et PAGE, L. M. : The Finnmarkian Orogeny revisited : An isotopic investigation in eastern Finnmark, Arctic Norway. *Tectonophysics*, 460(1-4):158–177, 2008.
- KIRKLAND, C. L., WHITEHOUSE, M. J. et SLAGSTAD, T. : Fluid-assisted zircon and monazite growth within a shear zone : A case study from Finnmark, Arctic Norway. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 158(5):637–657, 2009.
- KOCKS, H. : *Structural setting and petrogenesis of Silurian granites in the Caledonides of northern Scotland*. Thèse de doctorat, 2002.
- KOCKS, H., STRACHAN, R. et EVANS, J. : Heterogeneous reworking of Grampian metamorphic complexes during Scandian thrusting in the Scottish Caledonides : insights from the structural setting and U–Pb geochronology of the Strath Halladale Granite. *Journal of the Geological Society, London*, 163(January 2010):525–538, 2006.
- KOCKS, H., STRACHAN, R. A., EVANS, J. A. et FOWLER, M. : Contrasting magma emplacement mechanisms within the Rogart igneous complex, NW Scotland, record the switch from regional contraction to

- strike-slip during the Caledonian orogeny. *Geological Magazine*, 151(05): 899–915, 2014.
- KONSTANTINOVSKAYA, E. et MALAVIEILLE, J. : Thrust wedges with décollement levels and syntectonic erosion : A view from analog models. *Tectonophysics*, 2011.
- KRABBENDAM, M., PRAVE, T. et CHEER, D. : A fluvial origin for the Neoproterozoic Morar Group, NW Scotland; implications for Torridon-Morar Group correlation and the Grenville Orogen foreland basin. *Journal of the Geological Society*, 165:379, 2008.
- LABROUSSE, L., HETÉNNYI, G., RAIMBOURG, H., JOLIVET, L. et ANDERSEN, T. B. : Initiation of crustal-scale thrusts triggered by metamorphic reactions at depth : Insights from a comparison between the Himalayas and Scandinavian Caledonides. *Tectonics*, 29(5):1–14, 2010.
- LAHFID, A., BEYSSAC, O., DEVILLE, E., NEGRO, F., CHOPIN, C. et GOFFÉ, B. : Evolution of the Raman spectrum of carbonaceous material in low-grade metasediments of the Glarus Alps (Switzerland). *Terra Nova*, 22: 354–360, 2010.
- LAW, R. D., BUTLER, R. W. H., HOLDSWORTH, R. E., KRABBENDAM, M. et STRACHAN, R. A. : Continental tectonics and mountain building. The legacy of Peach and Horne : an introduction. *Geological Society, London, Special Publications*, 2010.
- LESLIE, A. G., KRABBENDAM, M., KIMBELL, G. S. et STRACHAN, R. A. : Regional-scale lateral variation and linkage in ductile thrust architecture : the Oykel Transverse Zone, and mullions, in the Moine Nappe, NW Scotland. *Geological Society, London, Special Publications*, 335(1):359–381, 2010.
- MARK, C., COGNÉ, N. et CHEW, D. : Tracking exhumation and drainage divide migration of the Western Alps : A test of the apatite U-Pb thermochronometer as a detrital provenance tool. *Bulletin of the Geological Society of America*, 128(9-10):1439–1460, 2016.

- MARK HARRISON, T. : Diffusion of  $^{40}\text{Ar}$  in hornblende. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 78(3):324–331, 1981.
- MARK HARRISON, T., DUNCAN, I. et MCDUGALL, I. : Diffusion of  $^{40}\text{Ar}$  in biotite : Temperature, pressure and compositional effects. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 49:2461–2468, 1985.
- MCDUGALL, I & HARRISON, T. : . *Geochronology and Thermochronology by the  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  method*. Oxford University Press, Oxford, New York. 1988.
- MORK, E., KULLERUD, K. et STABEL, A. : Contributions to Mineralogy and Petrology Sm-Nd dating of Svecofennian eclogites, Norrbotten, Sweden-Evidence for early Caledonian (505 Ma) subduction. *Contr. Mineral. and Petrol.*, 99:344–351, 1988.
- MOUTHEREAU, F., TENSI, J., BELLAHSEN, N., LACOMBE, O., DE BOISGROLLIER, T. et KARGAR, S. : Tertiary sequence of deformation in a thin-skinned/thick-skinned collision belt : The Zagros Folded Belt (Fars, Iran). *Tectonics*, 26(5), 2007.
- MULCH, A. : Recrystallization or cooling ages : in situ UV-laser  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  geochronology of muscovite in mylonitic rocks. *Journal of the Geological Society, London*, 161:573–582, 2004.
- NIER, A. O. : The Isotopic Constitution of Radiogenic Leads and the Measurement of Geological Time. II. *Physical Review*, 55(2):153–163, jan 1939.
- OLIVER, G. J. H., CHEN, F., BUCHWALDT, R. et HEGNER, E. : Fast tectonometamorphism and exhumation in the type area of the Barrovian and Buchan zones. *Geology*, 28(5):459–462, 2000.
- O’SULLIVAN, G. J., CHEW, D. M., MORTON, A. C., MARK, C. et HENRICH, I. A. : An Integrated Apatite Geochronology and Geochemistry Tool for Sedimentary Provenance Analysis. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, p. 1309–1326, 2018.

- REINERS, P. W., SPELL, T. L., NICOLESCU, S. et ZANETTI, K. A. : Zircon (U-Th)/He thermochronometry : He diffusion and comparisons with  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  dating. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68(4):1857–1887, 2004.
- ROBERTS, D. : The Scandinavian Caledonides : Event chronology, palaeogeographic settings and likely modern analogues. *Tectonophysics*, 365(1-4):283–299, 2003.
- ROBERTS, D., WALKER, N., SLAGSTAD, T., SOLLI, A., ROBERTS, A. K., SLAGSTAD, D., SOLLI, T. et KRILL, A. &. : U-Pb zircon ages from the Bymarka ophiolite, near Trondheim, Central Norwegian Caledonides, and regional implications. *Norwegian Journal Of Geology*, 82:19–30, 2002.
- ROBERTS, M. P. et FINGER, F. : Do U-Pb zircon ages from granulite reflect peak metamorphic conditions? *Geology*, 25:319–322, 1997.
- ROGERS, G., HYSLOP, E. K., STRACHAN, R. A., PATERSON, B. A. et HOLDSWORTH, R. E. : The structural setting and U-Pb geochronology of Knoydartian pegmatites in W Inverness-shire : evidence for Neoproterozoic tectonothermal events in the Moine of NW Scotland. *Journal of the Geological Society*, 155:685–696, 1998.
- ROGERS, G., KINNY, P. D., STRACHAN, R. A., FRIEND, C. R. L. et PATERSON, B. A. : U-Pb geochronology of the Fort Augustus granite gneiss : Constraints on the timing of Neoproterozoic and Palaeozoic tectonothermal events in the NW Highlands of Scotland. *Journal of the Geological Society*, 158(1):7–14, 2001.
- RUBATTO, D. : Zircon trace element geochemistry : partitioning with garnet and the link between U-Pb ages and metamorphism.
- RUBATTO, D., WILLIAMS, I. S. et BUICK, I. S. : Zircon and monazite response to prograde metamorphism in the Reynolds Range, central Australia. *Contr. Mineral. and Petrol*, 140:458–468, 2001.
- SCHERER, E. E., CAMERON, K. L. et BLICHERT-TOFT, J. : Lu-Hf garnet geochronology : Closure temperature relative to the Sm-Nd system and

- the effects of trace mineral inclusions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(19):3413–3431, 2000.
- SCHNEIDER, S., HAMMERSCHMIDT, K., ROSENBERG, C. L., GERDES, A., FREI, D. et BERTRAND, A. : U-Pb ages of apatite in the western Tauern Window (Eastern Alps) : Tracing the onset of collision-related exhumation in the European plate. *Earth and Planetary Science Letters*, 418:53–65, 2015.
- SCHOENE, B. : U–Th–Pb Geochronology. *In Treatise on Geochemistry*, vol. 4, p. 341–378. Elsevier, 2014.
- SCHOENE, B. et BAXTER, E. F. : Petrochronology and TIMS. *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*, 83:231–260, 2017.
- SOPER, N. J. et BARBER, A. J. : A model for the deep structure of the Moine thrust zone. *Journal of the Geological Society, London*, 139:127–138, 1982.
- SOPER, N. J., RYAN, P. D. et DEWEY, J. F. : Age of the Grampian orogeny in Scotland and Ireland. *Journal of the Geological Society*, 156(1971):1231–1236, 1999.
- STACEY, J. S. et KRAMERS, J. D. : Approximation of terrestrial lead isotope evolution by a two stage model. *Earth and Planetary Science Letters*, 26:207–221, 1975.
- STEIGER, R. H. et JAGER, E. : Subcommission on geochronology : conventions on the use of decay constants in geo- and cosmochronology. *Earth and Planetary Science Letters*, 36:359, 1977.
- STRACHAN, R. a. et HOLDSWORTH, R. E. : Basement-cover relationships and structure within the Moine rocks of central and southeast Sutherland. *Journal of the Geological Society*, 145(1):23–36, 1988.
- STRACHAN, R. A., HOLDSWORTH, R. E., KRABBENDAM, M., ALSOP, G. I., ROAD, B. et PO, P. : The Moine Supergroup of NW Scotland : insights into the analysis of polyorogenic supracrustal sequences. *Geological Society Special Publication*, 335:233–254, 2010.

- STRACHAN, R. A. : Shallow marine sedimentation in the Proterozoic Moine succession, northern Scotland. *Precambrian Research*, 32(1):17–33, 1986.
- STRASSER, M., MOORE, G. F., KIMURA, G., KITAMURA, Y., KOPF, A. J., LALLEMANT, S., PARK, J.-O., SCREATON, E. J., SU, X., UNDERWOOD, M. B. et ZHAO, X. : Origin and evolution of a splay fault in the Nankai accretionary wedge. *Nature Geoscience*, 2009.
- STREULE, M. J., STRACHAN, R. A., SEARLE, M. P. et LAW, R. D. : Comparing Tibet-Himalayan and Caledonian crustal architecture, evolution and mountain building processes. *Geological Society, London, Special Publications*, 335(1):207–232, 2010.
- THIGPEN, J. R., LAW, R. D., LOEHN, C. L., STRACHAN, R. A., TRACY, R. J., LLOYD, G. E., ROTH, B. L. et BROWN, S. J. : Thermal structure and tectonic evolution of the Scandian orogenic wedge, Scottish Caledonides : integrating geothermometry, deformation temperatures and conceptual kinematic-thermal models. *Journal of Metamorphic Geology*, 31(8):813–842, 2013.
- THIGPEN, J. R., LAW, R. D., LLOYD, G. E. et BROWN, S. J. : Deformation temperatures, vorticity of flow, and strain in the Moine thrust zone and Moine nappe : Reassessing the tectonic evolution of the Scandian foreland-hinterland transition zone. *Journal of Structural Geology*, 2010.
- TORSVIK, T. H., LOVLIE, R. et STORETVEDT, K. M. : Multicomponent magnetization in the helmsdale granite, north Scotland; geotectonic implication. *Tectonophysics*, 1983.
- TRIBE, I. R. et D'LEMONS, R. S. : Significance of a hiatus in down-temperature fabric development within syn-tectonic quartz diorite complexes, Channel Islands, UK. *Journal of the Geological Society*, 153(1):127–138, jan 1996.
- TRUMPY, R. et LEMOINE, M. : Les nappes de charriage et le cycle orogénique. *Compte rendu de l'Académie des Sciences*, 1998.
- UUNK, B., BROUWER, F. et WIJBRANS, J. : Understanding phengite argon closure using single grain fusion age distributions in the Cycladic Blueschist

- Unit on Syros, Greece. *Earth and Planetary Science Letters*, 484:192–203, 2018.
- VILLA, I. M. : Diffusion in mineral geochronometers : Present and absent. *Chemical Geology*, 420:1–10, 2016.
- VISKUPIC, K., HODGES, K. V. et BOWRING, S. A. : Timescales of melt generation and the thermal evolution of the Himalayan metamorphic core, Everest region, eastern Nepal. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2005.
- WILDE, S. A., VALLEY, J. W., PECK, W. H. et GRAHAM, C. M. : Evidence from detrital zircons for the existence of continental crust and oceans on the Earth 4.4 Gyr ago. *Nature*, 249, 2001.
- WILLIAMS, M. L., JERCINOVIC, M. J. et TERRY, M. P. : Age mapping and dating of monazite on the electron microprobe : Deconvolution of multistage tectonic histories. *Geology*, 27(11), 1999.
- WILSON, R. W., HOLDSWORTH, R. E., WILD, L. E., MCCAFFREY, K. J. W., ENGLAND, R. W., IMBER, J. et STRACHAN, R. A. : Basement-influenced rifting and basin development : a reappraisal of post-Caledonian faulting patterns from the North Coast Transfer Zone, Scotland. *Geological Society, London, Special Publications*, 335(1):795–826, 2010.
- YOSHINOBU, A. S., BARNES, C. G., NORDGULEN, O., PRESTVIK, T., FANNING, M. et PEDERSEN, R. B. : Ordovician magmatism, deformation, and exhumation in the Caledonides of central Norway : An orphan of the Taconic orogeny? *Geology*, (10):883, 2002.

# Annexes



Localité	Aut	MTZ	Moine	Ben Hope	Naver	Skinsdale	"sgurr beag unit"	référence	
Loch Allìsh Loch Borrallan (early) Loch Borrallan (late) Canips Porphyry Glen Dessary pluton Loch Loyal Vagastie Bridge granite Ben Kilbreck granite StrathNaver granite Rogart pluton Betty hill, Naver nappe Kirtomy nappe (naver unit) granite syn D2		430,6	0,3					Goodenough et al. 2001	
		431,1	1,2						
		429,2	0,5						
		430,4	0,4				447,9 2,9		
				425	8	420	6		
				424	8	429	11		
				425	1	461	13		
						467	10		
				415	6				
U-Pb zircon									
U-Pb titanite									
					413	3		Kinny 2003	
					416	3			
U-Pb monazite									
					431	10		Kinny et al. 1999 Kocks ?	
					426	2			
Lu/Hf et Sm/Nd grenat									
								Bird et al. 2013	
15			448,1	7,4	447,3	1,7	531,4		7
15			456	7,4			447		15
17							432,8		2,5
21									
Ar/Ar amphiboles									
								Dallmeyer et al. 2001	
19					404	0,4			
21					412,8	0,5			
22					410,2	0,5			
18					414,5				
14					416,9	0,5			
13					421,4	0,4			
6				446		0,3			
Ar/Ar muscovite									
								Dallmeyer et al. 2001	
20					418,3	0,2			
17					423	0,2			
16					419,3	0,2			
15					417,9	0,2			
12					419,2	0,2			
11					418	0,2			
5					416,4	0,2			
9			430	0,2					

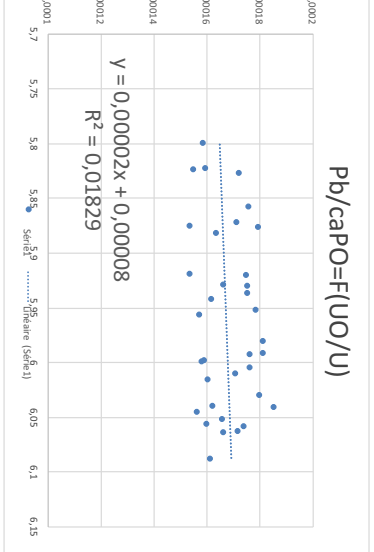
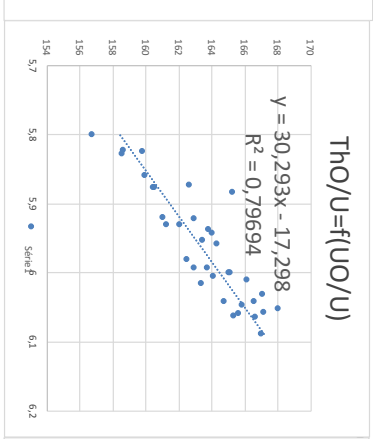
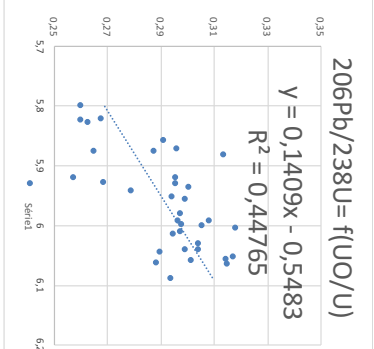
## U-Pb apatite, SIMS

feuilles "std" et "samples"  
Calcul des rapports Pb/U vrais et des ages U-Pb

Spread sheet: Spread sheet for Spread of Spread the Spread the Spread  
Circ-CMS, Fev 2001

Standard Madagascar		
20/7/206Pb	0,0572	Age (Ma)
20/6/206Pb		U
20/7b/238U	0,6013	Pb
20/6b/238U	0,0762	Th
238U/235U	137,88	238U
	0,37	206Pb
208Pb/232Th	0,0237	0,0237
1238U	1,55E+10	1235U
		1232Th

**1) Insérer les données mesurées sur le stan  
Madagascar dans la feuille Std**



t for U/Pb data f

Nb. gteks	file name	X	Y	ip (na)	Ie_CaPbO2	Ie_CaPbO3	Ie_206Pb	IR	207Pb/206Pb	STDEV	204Pb/206Pb	STDEV	208Pb/206Pb	STDEV	209Pb/206Pb	STDEV	U/U1	STDEV	ThO/U	STDEV	208Pb/ThO	STDEV	206Pb/232Th	STDEV
20	B3-mad@1	647	1823	22	22323	647	0,0000	0,2255	0,0235	0,0121	0,0018	0,0056	6,1655	0,2944	0,2835	0,0207	4,8979	0,0718	134,316	2,2392	0,0116	0,0006	0,000180	0,0000
20	B3-mad@2	610	1738	22	22543	605	0,0000	0,2131	0,0116	0,0017	0,0011	0,0056	6,5266	0,2944	0,2858	0,0171	5,1127	0,0614	141,752	1,5967	0,0136	0,0005	0,000180	0,0000
20	B3-mad@3	474	1742	23	24776	586	0,0000	0,2688	0,0192	0,0124	0,0017	0,0056	6,9934	0,2756	0,2859	0,0142	5,1187	0,0642	140,885	1,5447	0,0123	0,0005	0,000168	0,0000
20	B3-mad@4	324	1638	23	23744	523	0,0000	0,2534	0,0219	0,0109	0,0014	0,0056	6,5951	0,3188	0,2411	0,0190	4,5284	0,0662	126,268	1,9367	0,0117	0,0005	0,000178	0,0000
20	B3-mad@5	426	1738	24	245720	576	0,0000	0,2070	0,0122	0,0094	0,0012	0,0056	6,2789	0,2354	0,2260	0,0172	4,5669	0,0411	128,679	1,3327	0,0126	0,0006	0,000181	0,0000
20	B3-mad@6	410	1694	25	249750	539	0,0000	0,1952	0,0148	0,0088	0,0013	0,0056	5,9581	0,2302	0,2210	0,0150	4,8369	0,0657	126,3813	1,9336	0,0112	0,0007	0,000178	0,0000
20	B3-mad@7	396	1651	26	260760	564	0,0000	0,1636	0,0130	0,0089	0,0016	0,0056	6,3661	0,1758	0,2276	0,0089	4,3719	0,0506	123,5849	1,4077	0,0111	0,0007	0,000163	0,0000
20	B3-mad@8	425	1630	27	294668	700	0,0000	0,1323	0,0071	0,0085	0,0005	0,0056	6,9866	0,1445	0,2274	0,0089	4,7060	0,0441	134,670	0,9345	0,0143	0,0001	0,000171	0,0000
20	B3-mad@9	583	1694	27	273150	602	0,0000	0,2013	0,0198	0,0080	0,0010	0,0056	6,3038	0,1587	0,2298	0,0207	4,4261	0,0743	134,670	0,9345	0,0111	0,0006	0,000184	0,0000
20	B3-mad@10	2512	1593	28	362345	918	0,0000	0,1782	0,0113	0,0089	0,0012	0,0056	6,9959	0,0638	0,3490	0,0059	5,9213	0,0570	162,772	1,8700	0,0118	0,0002	0,000175	0,0000
20	B3-mad@11	2512	1503	29	370299	928	0,0000	0,1782	0,0079	0,0088	0,0012	0,0056	6,9959	0,0638	0,3490	0,0059	5,9213	0,0570	162,772	1,8700	0,0118	0,0002	0,000175	0,0000
20	B3-mad@12	2512	1833	29	370299	942	0,0000	0,1782	0,0079	0,0088	0,0012	0,0056	6,9959	0,0638	0,3490	0,0059	5,9213	0,0570	162,772	1,8700	0,0118	0,0002	0,000175	0,0000
20	B3-mad@13	2512	1803	29	374387	942	0,0000	0,1782	0,0079	0,0088	0,0012	0,0056	6,9959	0,0638	0,3490	0,0059	5,9213	0,0570	162,772	1,8700	0,0118	0,0002	0,000175	0,0000
20	B3-mad@14	2512	1803	29	374387	942	0,0000	0,1782	0,0079	0,0088	0,0012	0,0056	6,9959	0,0638	0,3490	0,0059	5,9213	0,0570	162,772	1,8700	0,0118	0,0002	0,000175	0,0000
20	B3-mad@15	2620	2268	30	362000	934	0,0000	0,1680	0,0080	0,0076	0,0006	0,0056	6,9433	0,1103	0,3460	0,0081	6,0051	0,0574	162,4490	1,3058	0,0154	0,0002	0,000170	0,0000
20	B3-mad@16	2610	2214	30	388066	1003	0,0000	0,1377	0,0051	0,0061	0,0006	0,0056	7,2312	0,0867	0,3460	0,0081	6,0051	0,0574	162,4490	1,3058	0,0154	0,0002	0,000170	0,0000
20	B3-mad@17	2610	2214	31	400922	1010	0,0000	0,1419	0,0074	0,0060	0,0007	0,0056	7,2879	0,1084	0,3411	0,0074	6,0532	0,0402	167,8833	1,1420	0,0153	0,0001	0,000165	0,0000
20	B3-mad@18	2421	2267	30	386925	946	0,0000	0,1379	0,0074	0,0075	0,0009	0,0056	7,3380	0,0620	0,3193	0,0047	6,0412	0,0321	166,3835	1,1021	0,0149	0,0001	0,000161	0,0000
20	B3-mad@19	2416	2235	30	402398	1019	0,0000	0,1205	0,0057	0,0058	0,0009	0,0056	7,2510	0,0648	0,3028	0,0038	6,0464	0,0249	163,8390	1,2118	0,0142	0,0001	0,000156	0,0000
21	B3-mad@10	2425	2178	30	394186	993	0,0000	0,1809	0,0095	0,0089	0,0008	0,0056	6,9544	0,0848	0,3068	0,0070	6,0115	0,0273	165,9677	1,1779	0,0147	0,0001	0,000170	0,0000
20	B3-mad@11	2658	2212	30	373414	918	0,0000	0,1411	0,0066	0,0066	0,0007	0,0056	7,2093	0,0780	0,3008	0,0052	5,8234	0,0423	168,4932	1,3200	0,0137	0,0002	0,000159	0,0000
20	B3-mad@12	2658	2212	30	364744	885	0,0000	0,1464	0,0069	0,0066	0,0007	0,0056	7,2040	0,0845	0,2917	0,0079	5,8784	0,0414	160,3131	1,3300	0,0137	0,0002	0,000158	0,0000
20	B3-mad@13	2670	2267	30	364744	866	0,0000	0,1464	0,0069	0,0066	0,0007	0,0056	7,2040	0,0845	0,2917	0,0079	5,8784	0,0414	160,3131	1,3300	0,0137	0,0002	0,000158	0,0000
20	B3-mad@14	2388	2200	30	393381	1003	0,0000	0,1359	0,0049	0,0053	0,0005	0,0056	7,1647	0,0722	0,2992	0,0041	6,0164	0,0515	163,235	1,1050	0,0146	0,0001	0,000158	0,0000
20	B3-mad@15	2370	2172	30	403329	1025	0,0000	0,1434	0,0049	0,0051	0,0007	0,0056	7,1171	0,0554	0,3334	0,0043	6,0008	0,0488	164,8485	1,1480	0,0143	0,0001	0,000157	0,0000
20	B3-mad@16	2612	2278	30	390182	983	0,0000	0,1424	0,0051	0,0059	0,0008	0,0056	7,2932	0,0641	0,3331	0,0087	5,9981	0,0338	164,9416	1,1645	0,0146	0,0001	0,000158	0,0000
20	B3-mad@17	2678	2167	30	401353	1024	0,0000	0,1233	0,0067	0,0061	0,0008	0,0056	7,2880	0,0715	0,3311	0,0087	5,9981	0,0338	164,9416	1,1645	0,0146	0,0001	0,000158	0,0000
20	B3-mad@18	2710	2166	30	370804	890	0,0000	0,1285	0,0039	0,0052	0,0005	0,0056	7,1592	0,0604	0,2812	0,0104	5,9205	0,0467	160,9963	1,0758	0,0145	0,0001	0,000154	0,0000
20	B3-mad@19	2752	2169	30	370804	890	0,0000	0,1285	0,0039	0,0052	0,0005	0,0056	7,1592	0,0604	0,2812	0,0104	5,9205	0,0467	160,9963	1,0758	0,0145	0,0001	0,000154	0,0000
20	B3-mad@20	2524	2178	30	397058	1011	0,0000	0,1566	0,0076	0,0074	0,0010	0,0056	7,0071	0,0604	0,3460	0,0075	6,0080	0,0317	166,4737	0,7267	0,0147	0,0001	0,000165	0,0000
20	B3-mad@21	2520	1736	30	397058	1009	0,0000	0,1566	0,0076	0,0074	0,0010	0,0056	7,0071	0,0604	0,3460	0,0075	6,0080	0,0317	166,4737	0,7267	0,0147	0,0001	0,000165	0,0000
20	B3-mad@22	2622	2109	30	402556	1035	0,0000	0,1375	0,0040	0,0053	0,0005	0,0056	7,1746	0,0761	0,3368	0,0055	6,0372	0,0305	166,8333	0,8971	0,0147	0,0001	0,000161	0,0000
20	B3-mad@23	2655	159	30	402556	1015	0,0000	0,2026	0,0144	0,0107	0,0010	0,0056	6,8539	0,0461	0,3437	0,0079	6,0372	0,0305	166,8333	0,8971	0,0147	0,0001	0,000161	0,0000
20	B3-mad@24	2655	159	30	385131	955	0,0000	0,2026	0,0144	0,0107	0,0010	0,0056	6,8539	0,0461	0,3437	0,0079	6,0372	0,0305	166,8333	0,8971	0,0147	0,0001	0,000161	0,0000
20	B3-mad@25	2655	159	30	385131	955	0,0000	0,2026	0,0144	0,0107	0,0010	0,0056	6,8539	0,0461	0,3437	0,0079	6,0372	0,0305	166,8333	0,8971	0,0147	0,0001	0,000161	0,0000
20	B3-mad@26	2655	159	30	385131	955	0,0000	0,2026	0,0144	0,0107	0,0010	0,0056	6,8539	0,0461	0,3437	0,0079	6,0372	0,0305	166,8333	0,8971	0,0147	0,0001	0,000161	0,0000
20	B3-mad@27	2655	159	30	385131	955	0,0000	0,2026	0,0144	0,0107	0,0010	0,0056	6,8539	0,0461	0,3437	0,0079	6,0372	0,0305	166,8333	0,8971	0,0147	0,0001	0,000161	0,0000
20	B3-mad@28	2655																						



Ech. SC-15-07

Calcul des neurons Pb

Correction du bruit de fond sur le U-Th

2) Correction du plomb commun :

Rapports Calibrés U/Pb

Age U/Pb et Age Pb/Pb

Terra Wasserburg

Age Th

Row data samples Ech. name	206Pb ppm	207Pb ppm	Age 7/6 non corrigé	calcul		Age Pb 7/6 Pbc		206Pb/238U		207Pb/235U		Age U/Pb et Age Pb/Pb		Terra Wasserburg		Age Th	
				4/6	4/6	4/6	4/6	4/6	4/6	4/6	4/6	4/6	4/6	4/6	4/6	4/6	4/6
				±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±
20 07-1461	17	343	10,7	4464	21	400	0,032	0,032	0,032	0,032	0,032	354	57	0	0	0	0
20 07-1601	14	276	8,03	4257	18	400	0,037	0,037	0,037	0,037	0,037	378	21	0	0	0	0
20 07-2801	15	286	33,3	4071	17	400	0,037	0,037	0,037	0,037	0,037	378	21	0	0	0	0
20 07-1001	20	205	10,3	4071	17	400	0,037	0,037	0,037	0,037	0,037	378	21	0	0	0	0
20 07-401	11	225	11,4	4376	18	400	0,037	0,037	0,037	0,037	0,037	378	21	0	0	0	0
20 07-2901	12	247	12,7	4071	17	400	0,037	0,037	0,037	0,037	0,037	378	21	0	0	0	0
20 07-1801	9	186	16,8	4071	17	400	0,037	0,037	0,037	0,037	0,037	378	21	0	0	0	0
20 07-501	10	247	23,2	4600	16	400	0,037	0,037	0,037	0,037	0,037	378	21	0	0	0	0
20 07-2401	9	157	3,7	4509	16	400	0,037	0,037	0,037	0,037	0,037	378	21	0	0	0	0
20 07-2601	22	398	42,3	3669	16	400	0,037	0,037	0,037	0,037	0,037	378	21	0	0	0	0
20 07-2801	9	170	9,6	4464	19	400	0,038	0,038	0,038	0,038	0,038	402	30	0	0	0	0
20 07-2801	11	195	12,6	4349	13	400	0,038	0,038	0,038	0,038	0,038	402	30	0	0	0	0
20 07-2801	20	365	37,2	4390	27	400	0,040	0,040	0,040	0,040	0,040	408	24	0	0	0	0
20 07-401	11	342	36,6	4390	27	400	0,040	0,040	0,040	0,040	0,040	408	24	0	0	0	0
20 07-401	11	342	36,6	4390	27	400	0,040	0,040	0,040	0,040	0,040	408	24	0	0	0	0
20 07-401	13	211	11,7	4167	13	400	0,038	0,038	0,038	0,038	0,038	413	26	0	0	0	0
20 07-401	13	211	11,7	4065	28	400	0,032	0,032	0,032	0,032	0,032	429	24	0	0	0	0
20 07-401	17	286	6,1	4602	21	400	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035	444	28	0	0	0	0
20 07-401	23	383	20,6	4800	31	400	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035	444	28	0	0	0	0
20 07-401	7	114	1,8	4376	16	400	0,033	0,033	0,033	0,033	0,033	444	28	0	0	0	0
20 07-301	12	181	8,7	4541	15	400	0,033	0,033	0,033	0,033	0,033	444	28	0	0	0	0

Main data table with columns for Sample Name, Zr, Pb, Age, and various correction factors. Includes sub-headers for 'Sample Name', 'Zr (ppm)', 'Pb (ppm)', 'Age (Ma)', and '238U/235U'.



Run	Sample	206Pb/238U	207Pb/235U	206Pb/238U	207Pb/235U	206Pb/238U	207Pb/235U	206Pb/238U	207Pb/235U	206Pb/238U	207Pb/235U	206Pb/238U	207Pb/235U	206Pb/238U	207Pb/235U	206Pb/238U	207Pb/235U	
22	080815-91	119	318	4288	37	0.0213	0.0213	0.0213	0.0213	400	0.036	1.306	0.074	2.410	0.342	0.122	0.0000	7.2881
9	158	158	253	4288	28	0.0210	0.0210	0.0210	0.0210	400	0.031	1.306	0.074	2.410	0.342	0.122	0.0000	7.2881
21	080814-81	156	463	4271	19	0.0210	0.0210	0.0210	0.0210	400	0.025	1.306	0.074	2.410	0.342	0.122	0.0000	7.2881
20	0815-15-34-4	37	2.5	4298	44	0.0213	0.0212	0.0213	0.0213	400	0.023	1.306	0.074	2.410	0.342	0.122	0.0000	7.2881
15	15-34-41	49	5.9	4155	18	0.0206	0.0206	0.0206	0.0206	400	0.019	1.306	0.074	2.410	0.342	0.122	0.0000	7.2881
20	080815-91	143	463	4183	24	0.0217	0.0217	0.0217	0.0217	400	0.022	1.306	0.074	2.410	0.342	0.122	0.0000	7.2881
20	080815-91	130	463	4134	26	0.0217	0.0217	0.0217	0.0217	400	0.025	1.306	0.074	2.410	0.342	0.122	0.0000	7.2881
15	15-34-80	49	142	4617	19	0.0214	0.0214	0.0214	0.0214	400	0.017	1.306	0.074	2.410	0.342	0.122	0.0000	7.2881
15	15-34-37	38	7.6	4635	11	0.0218	0.0218	0.0218	0.0218	400	0.007	1.306	0.074	2.410	0.342	0.122	0.0000	7.2881
20	080814-81	125	26.2	4096	35	0.0210	0.0210	0.0210	0.0210	400	0.020	1.306	0.074	2.410	0.342	0.122	0.0000	7.2881
15	15-34-42	47	7.9	4185	15	0.0212	0.0212	0.0212	0.0212	400	0.020	1.306	0.074	2.410	0.342	0.122	0.0000	7.2881
20	0815-15-34-1	48	13.3	4219	37	0.0217	0.0217	0.0217	0.0217	400	0.016	1.306	0.074	2.410	0.342	0.122	0.0000	7.2881
20	0815-15-34-2	42	14.3	4213	29	0.0218	0.0218	0.0218	0.0218	400	0.008	1.306	0.074	2.410	0.342	0.122	0.0000	7.2881
20	0815-15-34-3	40	5.2	4217	15	0.0218	0.0218	0.0218	0.0218	400	0.017	1.306	0.074	2.410	0.342	0.122	0.0000	7.2881
15	15-34-40	110	96.5	4796	21	0.0216	0.0216	0.0216	0.0216	400	0.020	1.306	0.074	2.410	0.342	0.122	0.0000	7.2881
20	0815-15-34-4	2	2.0	4424	34	0.0218	0.0218	0.0218	0.0218	400	0.028	1.306	0.074	2.410	0.342	0.122	0.0000	7.2881
20	0815-15-34-5	4	2.0	4424	34	0.0218	0.0218	0.0218	0.0218	400	0.028	1.306	0.074	2.410	0.342	0.122	0.0000	7.2881
22	0815-15-34-1	56	14.5	4354	33	0.0214	0.0214	0.0214	0.0214	400	0.122	1.306	0.074	2.410	0.342	0.122	0.0000	7.2881
22	0815-15-34-2	45	16.1	4134	23	0.0212	0.0212	0.0212	0.0212	400	0.098	1.306	0.074	2.410	0.342	0.122	0.0000	7.2881
20	0815-15-34-4	40	10.6	4285	21	0.0219	0.0219	0.0219	0.0219	400	0.132	1.306	0.074	2.410	0.342	0.122	0.0000	7.2881
20	0815-15-34-5	46	10.5	4117	23	0.0211	0.0211	0.0211	0.0211	400	0.056	1.306	0.074	2.410	0.342	0.122	0.0000	7.2881
20	0815-15-34-6	3	8.7	4206	23	0.0217	0.0217	0.0217	0.0217	400	0.307	1.306	0.074	2.410	0.342	0.122	0.0000	7.2881
21	0815-15-34-1	3	4.0	4492	21	0.0219	0.0219	0.0219	0.0219	400	0.130	1.306	0.074	2.410	0.342	0.122	0.0000	7.2881
21	0815-15-34-2	35	2.7	4688	21	0.0219	0.0219	0.0219	0.0219	400	0.141	1.306	0.074	2.410	0.342	0.122	0.0000	7.2881
20	0815-15-34-3	2	3.5	4805	28	0.0213	0.0213	0.0213	0.0213	400	0.238	1.306	0.074	2.410	0.342	0.122	0.0000	7.2881



Cont	U	Pb	Th	Age U/Pb	Age Pb/Pb	U/Pb	Th/U	U/Pb	Age U/Pb	Age Pb/Pb	U/Pb	Th/U	U/Pb	Age U/Pb	Age Pb/Pb	U/Pb	Th/U	U/Pb	Age U/Pb	Age Pb/Pb	U/Pb	Th/U	
1049842	13	255	1483	2130	1740	0.0031	0.0031	400	0.935	0.038	0.326	0.020	0.020	400	0.935	0.038	0.326	0.020	0.020	400	0.935	0.038	0.326
1049843	110	2053	1318	174	174	0.0066	0.0066	400	0.938	0.051	0.326	0.020	0.020	400	0.938	0.051	0.326	0.020	0.020	400	0.938	0.051	0.326
1049844	15	276	2343	2175	21	0.0069	0.0069	400	0.942	0.031	0.326	0.020	0.020	400	0.942	0.031	0.326	0.020	0.020	400	0.942	0.031	0.326
1049845	96	1745	1243	2051	201	0.0055	0.0055	400	0.946	0.041	0.326	0.020	0.020	400	0.946	0.041	0.326	0.020	0.020	400	0.946	0.041	0.326
1049846	38	268	1483	2021	56	0.0079	0.0079	400	0.950	0.031	0.326	0.020	0.020	400	0.950	0.031	0.326	0.020	0.020	400	0.950	0.031	0.326
1049847	15	207	1814	2014	20	0.0059	0.0059	400	0.954	0.041	0.326	0.020	0.020	400	0.954	0.041	0.326	0.020	0.020	400	0.954	0.041	0.326
1049848	115	2029	1584	2048	34	0.0070	0.0070	400	0.958	0.054	0.326	0.020	0.020	400	0.958	0.054	0.326	0.020	0.020	400	0.958	0.054	0.326
1049849	54	236	1573	2112	21	0.0062	0.0062	400	0.962	0.041	0.326	0.020	0.020	400	0.962	0.041	0.326	0.020	0.020	400	0.962	0.041	0.326
1049850	14	974	1043	2120	20	0.0042	0.0042	400	0.966	0.051	0.326	0.020	0.020	400	0.966	0.051	0.326	0.020	0.020	400	0.966	0.051	0.326
1049851	144	2844	1705	2041	28	0.0044	0.0044	400	0.970	0.041	0.326	0.020	0.020	400	0.970	0.041	0.326	0.020	0.020	400	0.970	0.041	0.326
1049852	110	2970	1443	2120	20	0.0062	0.0062	400	0.974	0.051	0.326	0.020	0.020	400	0.974	0.051	0.326	0.020	0.020	400	0.974	0.051	0.326
1049853	11	203	1443	2033	17	0.0082	0.0082	400	0.978	0.041	0.326	0.020	0.020	400	0.978	0.041	0.326	0.020	0.020	400	0.978	0.041	0.326
1049854	25	418	917	2148	36	0.0093	0.0093	400	0.982	0.041	0.326	0.020	0.020	400	0.982	0.041	0.326	0.020	0.020	400	0.982	0.041	0.326
1049855	49	279	1243	2148	36	0.0093	0.0093	400	0.986	0.054	0.326	0.020	0.020	400	0.986	0.054	0.326	0.020	0.020	400	0.986	0.054	0.326
1049856	19	201	1444	2144	36	0.0093	0.0093	400	0.990	0.041	0.326	0.020	0.020	400	0.990	0.041	0.326	0.020	0.020	400	0.990	0.041	0.326
1049857	11	180	740	2026	36	0.0092	0.0092	400	0.994	0.051	0.326	0.020	0.020	400	0.994	0.051	0.326	0.020	0.020	400	0.994	0.051	0.326
1049858	11	195	2343	2142	21	0.0091	0.0091	400	0.998	0.041	0.326	0.020	0.020	400	0.998	0.041	0.326	0.020	0.020	400	0.998	0.041	0.326
1049859	16	279	3148	2024	20	0.0089	0.0089	400	1.002	0.051	0.326	0.020	0.020	400	1.002	0.051	0.326	0.020	0.020	400	1.002	0.051	0.326
1049860	16	279	3148	2024	20	0.0089	0.0089	400	1.006	0.041	0.326	0.020	0.020	400	1.006	0.041	0.326	0.020	0.020	400	1.006	0.041	0.326
1049861	102	2779	780	2018	20	0.0095	0.0095	400	1.010	0.051	0.326	0.020	0.020	400	1.010	0.051	0.326	0.020	0.020	400	1.010	0.051	0.326
1049862	102	2779	780	2018	20	0.0095	0.0095	400	1.014	0.041	0.326	0.020	0.020	400	1.014	0.041	0.326	0.020	0.020	400	1.014	0.041	0.326
1049863	113	3176	2148	2018	20	0.0112	0.0112	400	1.018	0.051	0.326	0.020	0.020	400	1.018	0.051	0.326	0.020	0.020	400	1.018	0.051	0.326
1049864	113	3176	2148	2018	20	0.0112	0.0112	400	1.022	0.041	0.326	0.020	0.020	400	1.022	0.041	0.326	0.020	0.020	400	1.022	0.041	0.326
1049865	7	1604	1240	2024	20	0.0098	0.0098	400	1.026	0.051	0.326	0.020	0.020	400	1.026	0.051	0.326	0.020	0.020	400	1.026	0.051	0.326
1049866	7	1604	1240	2024	20	0.0098	0.0098	400	1.030	0.041	0.326	0.020	0.020	400	1.030	0.041	0.326	0.020	0.020	400	1.030	0.041	0.326
1049867	8.0	1166	1794	2045	41	0.0085	0.0085	400	1.034	0.051	0.326	0.020	0.020	400	1.034	0.051	0.326	0.020	0.020	400	1.034	0.051	0.326
1049868	8.0	1166	1794	2045	41	0.0085	0.0085	400	1.038	0.041	0.326	0.020	0.020	400	1.038	0.041	0.326	0.020	0.020	400	1.038	0.041	0.326
1049869	11.0	1166	1794	2045	41	0.0085	0.0085	400	1.042	0.051	0.326	0.020	0.020	400	1.042	0.051	0.326	0.020	0.020	400	1.042	0.051	0.326
1049870	11.0	1166	1794	2045	41	0.0085	0.0085	400	1.046	0.041	0.326	0.020	0.020	400	1.046	0.041	0.326	0.020	0.020	400	1.046	0.041	0.326
1049871	11.0	1166	1794	2045	41	0.0085	0.0085	400	1.050	0.051	0.326	0.020	0.020	400	1.050	0.051	0.326	0.020	0.020	400	1.050	0.051	0.326
1049872	11.0	1166	1794	2045	41	0.0085	0.0085	400	1.054	0.041	0.326	0.020	0.020	400	1.054	0.041	0.326	0.020	0.020	400	1.054	0.041	0.326
1049873	11.0	1166	1794	2045	41	0.0085	0.0085	400	1.058	0.051	0.326	0.020	0.020	400	1.058	0.051	0.326	0.020	0.020	400	1.058	0.051	0.326
1049874	11.0	1166	1794	2045	41	0.0085	0.0085	400	1.062	0.041	0.326	0.020	0.020	400	1.062	0.041	0.326	0.020	0.020	400	1.062	0.041	0.326
1049875	11.0	1166	1794	2045	41	0.0085	0.0085	400	1.066	0.051	0.326	0.020	0.020	400	1.066	0.051	0.326	0.020	0.020	400	1.066	0.051	0.326
1049876	11.0	1166	1794	2045	41	0.0085	0.0085	400	1.070	0.041	0.326	0.020	0.020	400	1.070	0.041	0.326	0.020	0.020	400	1.070	0.041	0.326
1049877	11.0	1166	1794	2045	41	0.0085	0.0085	400	1.074	0.051	0.326	0.020	0.020	400	1.074	0.051	0.326	0.020	0.020	400	1.074	0.051	0.326
1049878	11.0	1166	1794	2045	41	0.0085	0.0085	400	1.078	0.041	0.326	0.020	0.020	400	1.078	0.041	0.326	0.020	0.020	400	1.078	0.041	0.326
1049879	11.0	1166	1794	2045	41	0.0085	0.0085	400	1.082	0.051	0.326	0.020	0.020	400	1.082	0.051	0.326	0.020	0.020	400	1.082	0.051	0.326
1049880	11.0	1166	1794	2045	41	0.0085	0.0085	400	1.086	0.041	0.326	0.020	0.020	400	1.086	0.041	0.326	0.020	0.020	400	1.086	0.041	0.326
1049881	11.0	1166	1794	2045	41	0.0085	0.0085	400	1.090	0.051	0.326	0.020	0.020	400	1.090	0.051	0.326	0.020	0.020	400	1.090	0.051	0.326
1049882	11.0	1166	1794	2045	41	0.0085	0.0085	400	1.094	0.041	0.326	0.020	0.020	400	1.094	0.041	0.326	0.020	0.020	400	1.094	0.041	0.326
1049883	11.0	1166	1794	2045	41	0.0085	0.0085	400	1.098	0.051	0.326	0.020	0.020	400	1.098	0.051	0.326	0.020	0.020	400	1.098	0.051	0.326
1049884	11.0	1166	1794	2045	41	0.0085	0.0085	400	1.102	0.041	0.326	0.020	0.020	400	1.102	0.041	0.326	0.020	0.020	400	1.102	0.041	0.326
1049885	11.0	1166	1794	2045	41	0.0085	0.0085	400	1.106	0.051	0.326	0.020	0.020	400	1.106	0.051	0.326	0.020	0.020	400	1.106	0.051	0.326
1049886	11.0	1166	1794	2045	41	0.0085	0.0085	400	1.110	0.041	0.326	0.020	0.020	400	1.110	0.041	0.326	0.020	0.020	400	1.110	0.041	0.326
1049887	11.0	1166	1794	2045	41	0.0085	0.0085	400	1.114	0.051	0.326	0.020	0.020	400	1.114	0.051	0.326	0.020	0.020	400	1.114	0.051	0.326
1049888	11.0	1166	1794	2045	41	0.0085	0.0085	400	1.118	0.041	0.326	0.020	0.020	400	1.118	0.041	0.326	0.020	0.020	400	1.118	0.041	0.326
1049889	11.0	1166	1794	2045	41	0.0085	0.0085	400	1.122	0.051	0.326	0.020	0.020	400	1.122	0.051	0.326	0.020	0.020	400	1.122	0.051	0.326
1049890	11.0	1166	1794	2045	41	0.0085	0.0085	400	1.126	0.041	0.326	0.020	0.020	400	1.126	0.041	0.326	0.020	0.020	400	1.126	0.041	0.326
1049891	11.0	1166	1794	2045	41	0.0085	0.0085	400	1.130	0.051	0.326	0.020	0.020	400	1.130	0.051	0.326	0.020	0.020	400	1.130	0.051	0.326
1049892	11.0	1166	1794	2045	41	0.0085	0.0085	40															

Calcul des teneurs Pb, U, Th

No de la teneur	Date	Echantillon	Lithologie	Th (ppm)	U (ppm)	Pb (ppm)	Calcul			Age U/Pb	Age Pb/Pb	Tera-Wasserburg															
							40Ca/46Ca	40Ca/48Ca	40Ca/42Ca																		
36-02-21891	16-02-21891	10	91	4093	4690	13	0.0207	0.0207	0.00177	400	0.112	0.709	1.218	3.475	0.270	0.281	0.6602	0.0176	0.0645	0.2815	-0.29	0.703	0.17	1.40	0.089	0.780	0.005
36-02-14893	16-02-14893	5	97	2382	4430	12	0.0338	0.0338	0.00046	400	0.000	37.550	0.669	0.180	0.295	0.087	0.4965	0.0378	0.0641	0.0670	0.00	37.550	0.00	6.664	0.139	0.517	0.004
36-02-10893	16-02-10893	5	104	138.0	4441	15	0.0349	0.0349	0.00036	400	0.034	0.664	0.368	0.134	0.290	0.039	0.1585	0.0099	0.0685	0.0389	-0.300	0.665	0.05	5.828	0.042	0.515	0.005
36-02-20891	16-02-20891	4	202	726.7	4418	8	0.0368	0.0368	0.00036	400	0.017	0.680	0.177	0.190	0.295	0.044	0.3875	0.0158	0.0620	0.0441	0.139	0.682	0.05	2.721	0.097	0.514	0.003
36-02-1889	16-02-1889	5	84	207.1	4426	35	0.0460	0.0460	0.00103	400	0.025	1.241	0.625	1.844	0.211	0.142	0.4890	0.0198	0.0620	0.0420	0.111	1.249	0.13	4.888	0.044	0.514	0.003
36-02-26892	16-02-26892	5	90	203.0	4434	9	0.0389	0.0389	0.00103	400	-0.009	-1.469	0.585	0.330	0.396	0.046	0.1660	0.0108	0.0625	0.0662	-0.079	1.500	0.03	5.916	0.044	0.510	0.003
36-02-26892	16-02-26892	6	101	179.6	4631	19	0.0382	0.0382	0.00111	400	0.000	1.473	0.521	0.581	0.396	0.072	0.2067	0.0124	0.0638	0.0670	0.172	1.475	0.05	5.899	0.097	0.519	0.008
36-02-26891	16-02-26891	7	110	138.1	4535	15	0.0388	0.0388	0.00043	400	0.049	0.232	0.497	0.150	0.390	0.087	0.1332	0.0026	0.0639	0.0338	0.430	0.24	0.14	7.206	0.049	0.519	0.005
36-02-26891	16-02-26891	6	111	217.5	4421	20	0.0278	0.0278	0.00035	400	0.029	0.158	0.654	0.099	0.330	0.034	0.1288	0.0079	0.0648	0.0276	0.028	0.129	0.10	7.206	0.041	0.519	0.005
36-02-18893	16-02-18893	5	80	138.0	4384	14	0.0344	0.0344	0.00037	400	0.000	0.444	0.595	0.237	0.317	0.059	0.1750	0.0133	0.0654	0.0589	0.358	0.448	0.13	5.779	0.089	0.511	0.005
36-02-18891	16-02-18891	5	91	243.0	4474	11	0.0341	0.0341	0.00105	400	0.042	0.371	0.814	0.233	0.334	0.061	0.1713	0.0167	0.0655	0.0613	0.388	0.376	0.15	5.772	0.095	0.517	0.004
36-02-26892	16-02-26892	4	200	234.8	4278	10	0.0303	0.0303	0.00034	400	0.000	0.129	0.804	0.139	0.337	0.045	0.1445	0.0089	0.0671	0.0448	0.834	0.138	0.13	6.800	0.044	0.513	0.004
36-02-26892	16-02-26892	6	76	234.8	4412	15	0.0217	0.0217	0.00047	400	0.038	0.419	0.949	0.151	0.319	0.045	0.1465	0.0089	0.0671	0.0357	0.350	0.421	0.08	6.800	0.044	0.515	0.005
36-02-21892	16-02-21892	5	118	150.0	4393	24	0.0255	0.0255	0.00031	400	0.028	0.520	0.640	0.143	0.334	0.043	0.1263	0.0127	0.0682	0.0336	0.297	0.524	0.11	7.206	0.048	0.512	0.007
36-02-18892	16-02-18892	5	81	138.6	4289	14	0.0299	0.0299	0.00113	400	0.110	0.247	0.818	0.137	0.338	0.057	0.1203	0.0156	0.0690	0.0714	1.048	0.138	0.36	6.653	0.144	0.516	0.005

Correction du bruit de fond sur le 204

2) Correction du plomb commun : Définir l'âge du Pb (âge moyen de l'échantillon, en Ma).

Rapports Calibrés U/Pb

Age U/Pb et Age Pb/Pb

Tera-Wasserburg









## U-Pb apatite, ICPMS

Integration	Final207_235 op25E	Final207_235_Pr op25E	Final206_238 op25E	Final206_238_Pr _6_38v57_35	Final238_206 op25E	Final207_206 op25E	Final207_206_Pr _38_6v57_6	FinalAge206_23 8_Prop25E	FinalAge206_23 5	FinalAge207_23 5_Prop25E	FinalAge207_23 6	FinalAge207_20 6_Prop25E	FinalAge207_20 corr	FinalAge 207Prb corr Prop25E
SC15_45_1	15.65	0.58	0.1986	0.0059	0.5022	0.5884	0.022	1167.8	34.7	2857.4	105.8	4473.7	166.0	426.2
SC15_45_2	5.71	0.36	0.1155	0.0042	0.2363	0.359	0.016	706.6	25.6	1932.9	121.9	3745.6	166.9	450.0
SC15_45_3	6.17	0.19	0.1142	0.0029	0.5557	0.881	0.0086	697.1	17.7	2000.2	61.6	3863.6	86.6	419.2
SC15_45_4	16.18	0.52	0.1957	0.0048	0.1677	0.593	0.019	1157.2	28.3	2887.5	92.8	4490.9	149.9	408.5
SC15_45_5	9.27	0.32	0.1428	0.0045	0.6070	0.475	0.012	860.5	27.1	2365.1	81.6	4165.4	105.2	428.6
SC15_45_6	5.46	0.12	0.1103	0.0021	0.5793	0.3584	0.0077	674.5	12.8	1894.3	41.6	3743.1	80.4	430.2
SC15_45_7	10.34	0.29	0.1525	0.0039	0.4320	0.489	0.015	912.0	23.4	2465.7	69.2	4208.4	129.1	441.6
SC15_45_8	4.23	0.15	0.0984	0.0027	0.1495	0.312	0.011	605.0	16.6	1679.9	59.6	3530.8	124.5	419.0
SC15_45_9	7.68	0.19	0.1175	0.0039	0.4095	0.432	0.013	771.6	23.7	2194.3	54.3	4024.4	121.1	424.9
SC15_45_10	9.39	0.41	0.1442	0.0035	0.7076	0.688	0.018	868.4	21.1	2376.9	103.8	4143.4	159.4	440.9
SC15_45_11	10.1	0.05	0.1533	0.0049	0.6411	0.48	0.015	919.4	29.4	1580.0	121.0	4180.9	130.7	454.8
SC15_45_12	7.36	0.18	0.1274	0.0022	0.2193	0.416	0.01	773.0	13.3	2156.1	52.7	3967.9	95.4	440.4
SC15_45_13	4.38	0.13	0.0983	0.0021	0.4061	0.367	0.0094	604.4	12.9	1708.6	50.7	3601.7	103.6	407.4
SC15_45_14	5.08	0.15	0.1076	0.0028	0.6732	0.346	0.0083	658.8	17.1	1832.8	54.1	3683.3	88.7	431.1
SC15_45_15	7.4	0.24	0.1262	0.0021	0.3079	0.426	0.013	766.2	12.7	2161.0	70.1	4003.5	122.2	426.4
SC15_45_16	3.74	0.11	0.0937	0.0022	0.4256	0.2889	0.0078	577.4	13.6	1580.0	46.5	3411.7	92.1	415.7
SC15_45_17	3.7	0.12	0.0947	0.0016	0.4354	0.2789	0.0067	583.3	9.9	1571.4	51.0	3356.8	80.6	427.3
SC15_45_18	6.91	0.22	0.1241	0.0035	0.3839	0.407	0.013	754.1	21.3	2099.9	66.9	3935.1	125.7	437.6
SC15_45_19	6.32	0.25	0.1163	0.0029	0.6856	0.399	0.013	705.2	17.7	2021.2	80.0	3905.3	127.2	417.1
SC15_45_20	9.14	0.43	0.1402	0.0037	0.8099	0.472	0.017	845.8	22.3	2352.1	110.7	4156.1	149.7	424.0
SC15_45_1	12.1	0.47	0.1733	0.0051	0.6010	0.503	0.014	1030.3	30.3	2612.2	101.5	4250.0	118.3	484.5
SC15_45_2	9.14	0.25	0.1365	0.0042	0.2295	0.48	0.011	824.8	25.4	2352.1	64.3	4250.0	107.5	441.3
SC15_45_3	7.39	0.2	0.1284	0.0025	0.0844	0.42	0.015	778.7	15.2	2159.8	58.5	3982.3	142.2	439.9
SC15_45_4	10.02	0.3	0.1522	0.0043	0.4878	0.478	0.012	913.3	19.8	2436.6	73.0	4174.8	104.8	453.9
SC15_45_5	8.72	0.34	0.1372	0.0031	0.5107	0.467	0.015	828.8	24.8	2309.2	90.0	4140.3	133.0	420.1
SC15_45_6	5.11	0.11	0.1094	0.0022	0.0223	0.341	0.01	669.3	13.5	1837.8	39.6	3667.3	107.5	441.3
SC15_45_7	9.83	0.26	0.1462	0.003	0.1441	0.344	0.02	879.6	18.0	2419.0	64.0	4193.2	173.3	428.7
SC15_45_8	4.66	0.17	0.1025	0.0025	0.4807	0.314	0.011	629.0	15.3	1723.6	65.7	3540.7	124.0	434.8
SC15_45_9	8.72	0.23	0.1402	0.0032	0.3614	0.453	0.013	845.8	19.3	2309.2	61.3	4095.1	117.5	444.9
SC15_45_10	6.8	0.2	0.1214	0.004	0.9270	0.414	0.015	736.6	24.3	2085.7	61.3	3960.7	143.5	421.4
SC15_45_11	18.94	0.53	0.2301	0.0069	0.5035	0.598	0.015	1333.0	40.0	3038.8	85.0	4503.1	113.0	475.6
SC15_45_12	7.55	0.19	0.1263	0.0026	0.0974	0.436	0.014	766.7	15.8	2178.9	54.8	4038.1	129.7	416.9
SC15_45_13	5.29	0.13	0.109	0.0025	0.0666	0.356	0.011	666.9	15.3	1867.2	45.9	3732.9	115.3	427.1
SC15_45_14	9.25	0.29	0.1421	0.0026	0.3888	0.473	0.014	856.5	15.7	2363.1	74.1	4159.2	123.1	428.7
SC15_45_15	7.46	0.17	0.1249	0.0023	0.2205	0.429	0.011	800.605	14.0	2168.2	49.4	4014.0	102.9	419.1
SC15_45_16	3.27	0.1	0.0966	0.0021	0.5404	0.2601	0.0066	559.1	13.0	1473.9	45.1	3247.3	82.4	422.0
SC15_45_17	10.27	0.42	0.1508	0.0034	0.4157	0.492	0.02	906.4	20.4	2459.4	100.6	4217.4	171.4	433.0
SC15_45_18	8.1	0.37	0.1336	0.004	0.5209	0.441	0.017	808.4	20.6	2242.2	102.4	4055.1	156.3	436.1
SC15_45_19	7.26	0.27	0.1226	0.004	0.6622	0.432	0.015	745.5	24.3	2143.9	79.7	4024.4	139.7	408.4



Integration	Final207_235 op25E	Final207_235_Pr op25E	Final206_238 op25E	Final206_238_Pr _6_38vs7_35	Final238_206 op25E	Final238_206_Pr op25E	Final207_206 op25E	Final207_206_Pr _38_6vs7_6	FinalAge206_23 8_Prop25E	FinalAge206_23 5_Prop25E	FinalAge207_23 5_Prop25E	FinalAge207_23 6_Prop25E	FinalAge207_20 6_Prop25E	FinalAge207_20 corr	FinalAge 2077b corr Prop25E
SC15_07_1	8.73	0.24	0.14	0.0033	7.142857	0.1683673	0.455	0.011	844.7	199	2310.2	63.5	4101.6	99.2	442.0
SC15_07_2	14.51	0.32	0.1875	0.0041	5.333333	0.1166222	0.556	0.013	1078.0	242	2783.7	61.4	4397.0	102.8	446.6
SC15_07_3	13.62	0.3	0.1855	0.005	5.390836	0.1453055	0.53	0.012	1097.0	296	2723.7	60.0	4336.9	98.0	480.1
SC15_07_4	9.54	0.24	0.1416	0.0039	7.062147	0.1945083	0.488	0.015	853.7	23.5	2391.4	60.2	4205.4	129.3	410.5
SC15_07_5	11.23	0.32	0.1573	0.0038	6.357279	0.153577	0.515	0.013	941.8	22.8	2542.4	72.4	4284.7	108.2	423.5
SC15_07_6	11.23	0.3	0.1535	0.0025	6.514658	0.1061019	0.527	0.014	920.6	15.0	2542.4	67.9	4318.6	114.7	398.3
SC15_07_7	14.67	0.39	0.1899	0.0062	5.265929	0.09982805	0.565	0.012	1120.8	21.2	2794.1	74.3	4420.5	93.9	20.5
SC15_07_8	19.93	0.65	0.225	0.0062	4.255319	0.112268	0.617	0.013	1360.7	35.9	3088.0	100.7	4548.6	95.8	448.7
SC15_07_9	10.53	0.28	0.1505	0.0037	6.644518	0.1633536	0.508	0.011	903.8	22.2	2492.6	66.0	4264.6	92.3	413.1
SC15_07_10	10.77	0.27	0.1527	0.0034	6.548788	0.148145	0.51	0.011	916.1	20.4	2503.5	62.8	4270.4	92.1	416.9
SC15_07_11	11.73	0.31	0.1675	0.0051	5.970149	0.1817777	0.517	0.013	986.3	30.4	2583.1	68.3	4290.4	107.9	448.2
SC15_07_12	37	1	0.368	0.011	2.717391	0.08122637	0.71	0.023	2020.0	60.4	3693.5	99.8	4751.1	153.9	440.0
SC15_07_13	20.71	0.63	0.2454	0.0072	4.07498	0.1195593	0.603	0.014	1414.7	41.5	3539.2	95.1	4515.2	104.8	67.9
SC15_07_14	9.27	0.29	0.1384	0.0037	7.225434	0.1931655	0.484	0.011	835.6	22.3	3255.1	74.0	4193.2	95.3	405.3
SC15_07_15	4.57	0.11	0.1034	0.002	9.67118	0.1870634	0.3194	0.0075	634.3	12.3	1743.8	42.0	3566.9	83.8	434.3
SC15_07_16	23.58	0.73	0.261	0.0076	3.831418	0.1133218	0.361	0.013	1495.0	43.5	3251.2	100.7	4601.5	93.5	453.7
SC15_07_17	5.5	0.25	0.1104	0.0026	9.057971	0.2132218	0.64	0.013	675.1	15.9	1900.6	86.4	3754.1	135.2	428.3
SC15_07_18	12.52	0.5	0.1743	0.0058	5.737235	0.190912	0.524	0.016	1035.8	34.5	2644.2	105.6	4310.2	131.6	458.4
SC15_07_19	6.11	0.25	0.1162	0.0032	8.605852	0.2369942	0.381	0.011	708.7	19.5	1991.7	81.5	3835.7	110.7	433.0
SC15_07_1	8.1	0.19	0.1291	0.0028	7.745933	0.1679986	0.4544	0.009	782.7	17.0	2242.2	52.6	4099.7	81.2	407.7
SC15_07_2	9.12	0.26	0.1412	0.0033	7.082153	0.1655177	0.469	0.013	851.4	19.9	2350.1	67.0	4146.6	114.9	430.4
SC15_07_3	14.99	0.38	0.1929	0.0053	5.184033	0.1424333	0.545	0.017	1137.1	31.2	2775.8	73.3	4367.8	136.2	477.0
SC15_07_4	12.45	0.3	0.1666	0.0039	6.002401	0.1405124	0.54	0.015	993.4	23.3	2659.0	63.6	4354.3	121.0	416.2
SC15_07_5	8.46	0.2	0.1357	0.002	7.369197	0.1086101	0.451	0.011	820.3	12.1	2281.6	53.9	4088.5	99.7	432.5
SC15_07_6	10.51	0.25	0.1518	0.0032	6.587615	0.1388694	0.515	0.015	911.0	18.6	2480.8	59.0	4284.7	124.8	408.3
SC15_07_7	10.35	0.24	0.1512	0.0031	6.613757	0.1355995	0.494	0.011	907.7	19.2	2466.6	57.2	4233.4	94.0	431.8
SC15_07_8	14.6	0.35	0.1854	0.004	5.393743	0.1163699	0.567	0.017	1096.4	23.7	2789.5	66.9	4425.6	132.7	424.9
SC15_07_9	13.57	0.37	0.1816	0.0039	5.506608	0.1182587	0.547	0.011	1075.7	23.1	2720.2	74.2	4373.2	87.9	445.0
SC15_07_10	17.45	0.41	0.216	0.0052	4.62963	0.111454	0.589	0.012	1260.7	30.4	2959.9	69.5	4481.1	91.3	460.4
SC15_07_11	8.81	0.32	0.1387	0.0038	7.209805	0.1094167	0.455	0.019	837.3	59.2	2318.5	215.8	4101.6	171.1	437.9
SC15_07_12	9.81	0.32	0.1458	0.0029	6.858711	0.1364215	0.495	0.012	1075.7	23.1	2720.2	74.2	4373.2	87.9	445.0
SC15_07_13	14.54	0.51	0.1877	0.0053	5.327651	0.1504345	0.562	0.014	1108.9	17.5	2417.1	51.7	4226.4	102.5	414.8
SC15_07_14	10.45	0.3	0.1521	0.0034	6.574622	0.1469672	0.491	0.014	912.7	20.4	2475.5	71.1	4214.4	120.2	438.0
SC15_07_15	7.23	0.27	0.1244	0.003	8.038855	0.1393856	0.424	0.011	755.8	18.2	2140.2	79.9	3996.4	103.7	422.2
SC15_07_16	5.01	0.32	0.1052	0.0033	9.505703	0.2981827	0.341	0.013	644.8	20.2	1821.0	116.3	3667.3	139.8	424.4
SC15_07_17	13.92	0.48	0.1805	0.0055	5.540166	0.1688139	0.552	0.017	1069.7	32.6	2744.3	94.6	4386.5	135.1	435.0
SC15_07_18	13.71	0.39	0.1774	0.0048	5.636979	0.1552525	0.562	0.014	1052.8	28.5	2729.9	77.7	4412.7	109.9	412.9
SC15_07_19	21.98	0.66	0.2489	0.0064	4.017678	0.1033071	0.646	0.019	1432.8	36.8	3182.8	95.6	4615.0	135.7	418.4
SC15_07_20	16.35	0.45	0.2014	0.0044	4.965243	0.108476	0.582	0.016	1182.8	25.8	2897.5	79.7	4463.7	122.7	439.0
SC15_07_21	10.2	0.25	0.1516	0.0027	6.596306	0.1174804	0.4927	0.0091	909.9	16.2	2453.1	60.1	4219.5	77.9	434.5

Integration	Final207_235 op25E	Final207_235_Pr op25E	Final206_238 op25E	Final206_238_Pr _6_38ns7_35 ErrorCorrelation	Final238_206 op25E	Final238_206_Pr op25E	Final207_206 op25E	Final207_206_Pr _38_6ns7_6 ErrorCorrelation	FinalAge206_23 8_Prop25E	FinalAge206_23 5_Prop25E	FinalAge207_23 5_Prop25E	FinalAge207_23 6_Prop25E	FinalAge207_20 6_Prop25E	FinalAge207_20 corr	FinalAge207Prb corr Prop25E
SC15_03_1	8.78	0.24	0.1407	0.0025	7.107321	0.126285	0.454	0.013	848.6	15.1	2315.4	63.3	4098.4	117.4	445.4
SC15_03_2	9.07	0.43	0.1418	0.0047	7.052186	0.2337467	0.462	0.2914	854.8	28.3	2345.1	111.2	4124.3	151.8	440.0
SC15_03_3	7.75	0.26	0.1283	0.0037	7.794232	0.2247752	0.436	0.2578	778.2	22.4	2202.4	73.9	4038.1	120.4	423.6
SC15_03_4	12.05	0.3	0.1662	0.0048	6.016847	0.1737718	0.522	0.7091	991.1	28.6	2268.3	64.9	4304.6	131.9	439.0
SC15_03_5	8.16	0.31	0.1317	0.0033	7.593014	0.1902578	0.446	0.4802	797.6	20.0	2248.9	85.4	4071.9	155.2	424.7
SC15_03_6	5.44	0.18	0.1085	0.0026	9.21659	0.2208584	0.364	0.2770	664.0	15.9	1891.2	62.6	3766.6	134.5	418.4
SC15_03_7	10.35	0.38	0.1489	0.0034	6.715917	0.153352	0.508	0.1659	894.8	20.4	2466.6	90.6	4264.6	117.5	408.6
SC15_03_8	11.6	0.43	0.1691	0.0055	5.913661	0.1923426	0.503	0.011	1007.2	32.8	2572.7	95.4	4250.0	92.9	472.4
SC15_03_9	12.35	0.41	0.1736	0.0046	5.760369	0.1526365	0.526	-0.0433	1031.9	27.3	2631.4	87.4	4315.8	123.1	453.7
SC15_03_10	14.49	0.63	0.1914	0.0069	5.22466	0.1883498	0.551	0.0270	1129.0	40.7	2782.3	121.0	4383.8	95.5	463.9
SC15_03_11	9.75	0.26	0.1498	0.0033	6.675567	0.1470586	0.468	0.015	899.8	19.8	2411.4	64.3	4143.4	132.8	458.3
SC15_03_12	8.15	0.22	0.1373	0.0039	7.283321	0.2068824	0.438	0.5411	829.4	23.6	2247.8	60.7	4045.0	101.6	451.6
SC15_03_13	11.67	0.28	0.1645	0.0035	6.079027	0.129341	0.513	0.5410	981.7	20.9	2578.3	61.9	4279.0	100.1	446.1
SC15_03_14	8.38	0.56	0.1349	0.0043	7.412898	0.2362896	0.454	0.025	815.8	26.0	2273.0	151.9	4098.4	225.7	426.7
SC15_03_15	15.1	0.62	0.189	0.0052	5.291005	0.1485726	0.586	-0.2219	1116.0	30.7	2821.6	115.9	4473.7	137.4	404.5
SC15_03_16	8.63	0.23	0.1363	0.0029	7.336757	0.1561012	0.46	-0.6287	1023.1	17.5	2299.7	328.2	4117.9	125.3	424.8
SC15_03_17	13.1	1.6	0.172	0.012	5.813953	0.4056247	0.529	0.022	797.6	71.4	2686.9	61.3	4324.1	179.8	445.3
SC15_03_18	7.99	0.25	0.1317	0.0028	7.593014	0.1614308	0.434	0.012	797.6	17.0	2229.9	69.8	4031.3	111.5	437.0
SC15_03_19	11.88	0.51	0.1627	0.0035	6.146281	0.1322187	0.535	0.5363	971.8	20.9	2595.0	111.4	4340.7	219.1	412.6
SC15_03_20	7.71	0.19	0.1262	0.0031	7.92393	0.1946449	0.442	0.5307	766.2	18.8	2197.8	54.2	4058.5	101.0	410.7
SC15_03_21	8.45	0.31	0.1369	0.0034	7.304602	0.1814145	0.444	0.3207	827.1	20.5	2280.6	83.7	4065.2	146.5	443.9
SC15_03_22	8.94	0.48	0.1406	0.005	7.112376	0.2529294	0.461	-0.2770	848.1	30.2	2331.9	125.2	4121.1	143.0	437.4
SC15_03_23	9.35	0.28	0.1434	0.003	6.973501	0.1458891	0.469	0.01	863.9	18.1	2372.9	71.1	4146.6	88.4	437.2
SC15_03_24	18.2	2.4	0.213	0.019	4.694836	0.4187882	0.589	-0.5539	1244.8	111.0	3000.4	395.7	4481.1	220.6	453.7

Integration	Final207_235 op25E	Final207_235_Pr op25E	Final206_238 op25E	Final206_238_Pr _6_38vs7_35	Final238_206 op25E	Final238_206_Pr op25E	Final207_206 op25E	Final207_206_Pr _38_6vs7_6	FinalAge206_23 8	FinalAge206_23 8_Prop25E	FinalAge207_23 5	FinalAge207_23 5_Prop25E	FinalAge207_23 6	FinalAge207_20 6_Prop25E	FinalAge207_20 corr	FinalAge 207Prb corr Prop25E	FinalAge 207Prb corr Prop25E
SC15_10_1	9.38	0.28	0.1474	0.0031	6.784261	0.1426812	0.466	0.015	0.4955	866.4	18.6	2375.9	70.9	4137.1	133.2	453.1	19.7
SC15_10_2	31.52	0.83	0.3238	0.0089	3.088326	0.08486605	0.709	0.013	0.6133	1808.3	49.7	3535.4	93.1	4749.1	87.1	382.4	37.8
SC15_10_3	2.083	0.068	0.0788	0.0016	12.69036	0.2576722	0.1903	0.0044	-0.0721	489.0	9.9	1143.2	37.3	2744.8	63.5	409.6	8.6
SC15_10_4	1.535	0.053	0.0791	0.0025	12.64223	0.3995646	0.1411	0.0041	0.0281	490.7	15.5	944.5	32.6	2240.8	65.1	440.7	13.9
SC15_10_5	1.347	0.032	0.0748	0.0013	13.36898	0.2323487	0.13	0.0028	0.4507	465.0	8.1	866.3	20.6	2098.0	45.2	422.4	7.4
SC15_10_6	1.321	0.028	0.0733	0.0013	13.64256	0.2419554	0.1301	0.0026	0.4391	456.0	8.1	855.0	18.1	2099.3	42.0	415.0	7.4
SC15_10_7	2.422	0.057	0.0853	0.0018	11.72333	0.2473856	0.2043	0.0049	0.4438	527.7	11.1	1249.1	29.4	2860.9	68.6	433.9	9.6
SC15_10_8	1.578	0.037	0.0753	0.0013	13.28021	0.2292733	0.1541	0.0036	0.3515	468.0	8.1	961.6	22.5	2391.9	55.9	412.4	7.3
SC15_10_9	1.831	0.039	0.0791	0.0012	12.64223	0.191791	0.1682	0.0028	0.0822	490.7	7.4	1056.6	22.5	2539.8	42.3	424.5	6.6
SC15_10_10	2.521	0.053	0.0856	0.0016	11.68224	0.2183597	0.2133	0.0046	0.5014	529.5	9.9	1278.1	26.9	2930.8	63.2	425.5	8.5
SC15_10_11	2.433	0.061	0.0842	0.0016	11.87648	0.2256814	0.2098	0.0038	0.0177	521.1	9.9	1252.4	31.4	2904.0	52.6	424.8	8.3
SC15_10_12	1.933	0.04	0.0801	0.0014	12.48439	0.2182041	0.176	0.0039	0.4321	466.7	8.7	1092.6	22.6	2615.5	58.0	425.0	7.7
SC15_10_13	2.203	0.046	0.0826	0.0022	12.10654	0.3224502	0.1953	0.0048	0.8251	511.6	13.6	1182.0	24.7	2787.3	68.5	426.0	11.6
SC15_10_14	1.773	0.036	0.08	0.0015	12.5	0.234375	0.1621	0.0039	0.5844	466.1	9.3	1035.6	21.0	2477.7	59.6	432.9	8.3
SC15_10_15	1.599	0.057	0.0782	0.0023	12.78772	0.3761095	0.1469	0.0055	0.2006	485.4	14.3	969.8	34.6	2310.1	86.5	432.4	12.9
SC15_10_16	2.171	0.046	0.0833	0.0013	12.0048	0.1873498	0.1733	0.0039	0.3151	515.8	8.0	1171.8	24.8	2734.3	56.4	433.5	7.1
SC15_10_17	1.901	0.039	0.0797	0.0012	12.54705	0.1889142	0.1891	0.0036	0.2232	494.3	7.4	1081.4	22.2	2589.8	53.8	424.6	6.7
SC15_10_18	2.126	0.051	0.0816	0.0018	12.2549	0.2703287	0.1898	0.0033	0.3635	505.7	11.2	1157.3	27.8	2740.4	47.6	424.3	9.4
SC15_10_19	1.679	0.04	0.0762	0.0015	13.12336	0.2583339	0.1605	0.0031	0.3066	473.4	9.3	1000.6	23.8	2460.9	47.5	413.6	8.2
SC15_10_20	1.948	0.037	0.0794	0.0015	12.59446	0.2379306	0.1795	0.0035	0.3979	492.5	9.3	1097.8	20.9	2648.3	51.6	419.2	8.1
SC15_10_21	1.575	0.034	0.0779	0.0017	12.83697	0.2801393	0.1462	0.0032	0.5260	483.6	10.6	960.4	20.7	2301.9	50.4	431.1	9.4
SC15_10_22	2.309	0.038	0.0853	0.002	11.72333	0.2748729	0.1943	0.0058	0.1977	527.7	12.4	1215.1	43.7	2778.9	83.0	440.4	10.8
SC15_10_23	1.583	0.038	0.0772	0.0012	12.95337	0.2013477	0.1497	0.0025	0.0391	479.4	7.5	963.5	23.1	2342.5	39.1	425.3	6.7



Integration	Final207_235	Final207_235_Pr	Final206_238	Final206_238_Pr	Final238_206	Final238_206_Pr	Final207_206	Final207_206_Pr	FinalAge206_23	FinalAge206_23	FinalAge207_23	FinalAge207_23	FinalAge207_20	FinalAge207_20	FinalAge207Prb		
	op25E	op25E	op25E	op25E	op25E	op25E	op25E	op25E	8	8	5	5	6	6	corr		
				6_38vs7_35					8	8	5	5	6	6	corr		
				Correlation					Correlation	Prop25E	Prop25E	Prop25E	Prop25E	Prop25E	corr Prop25E		
SC16_38_1	18.64	0.58	0.2195	0.0066	4.555809	0.1369856	0.629	0.016	0.2314	1279.2	38.5	3033.4	94.1	4576.5	116.4	396.3	30.9
SC16_38_2	17.07	0.36	0.2056	0.0044	4.863813	0.1040894	0.6	0.015	0.5002	1205.3	25.8	2938.8	62.0	4508.0	112.7	416.6	26.5
SC16_38_3	20.59	0.06	0.2384	0.0055	4.194631	0.0967721	0.634	0.02	-0.0885	1378.4	31.8	3119.5	90.9	4557.9	144.7	423.1	38.9
SC16_38_4	4.93	0.12	0.1066	0.0018	9.380863	0.1584011	0.3404	0.0055	0.1264	653.0	11.0	1807.4	44.0	3664.6	59.2	430.5	8.7
SC16_38_5	15.1	1.9	0.19	0.017	5.263158	0.4709141	0.558	0.03	-0.7794	1121.4	100.3	2821.6	355.0	4402.3	236.7	449.7	56.7
SC16_38_6	36.7	2.6	0.383	0.023	2.610966	0.1567943	0.699	0.016	-0.1195	2090.3	125.5	3685.5	261.1	4728.7	108.2	498.8	57.7
SC16_38_7	12.4	1.4	0.17	0.011	5.882353	0.3806228	0.53	0.031	-0.8106	1012.1	65.5	2635.2	297.5	4326.9	253.1	438.6	48.9
SC16_38_8	3.77	0.18	0.0955	0.004	10.4712	0.4385845	0.288	0.011	0.0770	588.0	24.6	1586.4	75.7	3406.8	130.1	424.3	19.2
SC16_38_9	3.94	0.41	0.094	0.0043	10.6383	0.4866455	0.302	0.019	-0.6922	579.2	26.5	1621.9	168.8	3480.5	219.0	407.5	22.8
SC16_38_10	34.47	0.9	0.36	0.0082	2.777778	0.08487654	0.7	0.013	0.4411	1982.2	60.6	3623.6	94.6	4730.7	87.9	460.9	42.1
SC16_38_11	31.24	0.69	0.326	0.0088	3.067485	0.08280327	0.701	0.018	0.5708	1819.0	49.1	3526.6	77.9	4732.8	121.5	408.4	48.8
SC16_38_12	35.7	1.2	0.358	0.01	2.793296	0.07802503	0.72	0.017	0.3364	1972.7	55.1	3638.2	123.0	4771.2	112.7	393.9	51.3
SC16_38_13	30.7	1	0.3191	0.0082	3.133814	0.08053047	0.693	0.02	-0.0781	1785.3	45.9	3509.5	114.3	4716.3	136.1	421.0	52.1
SC16_38_14	35.1	1.2	0.348	0.01	2.873563	0.08257366	0.726	0.017	0.0508	1925.0	55.3	3641.5	124.5	4783.1	112.0	362.2	50.1
SC16_38_15	8.1	1.3	0.134	0.013	7.462687	0.723992	0.439	0.026	-0.6592	810.6	78.6	2242.2	359.9	4048.4	239.8	439.5	49.5
SC16_38_16	6.19	0.1126	0.1126	0.0067	8.880995	0.5284428	0.397	0.025	-0.7927	687.8	40.9	2003.0	249.2	3897.8	245.5	405.5	32.0
SC16_38_17	24.1	2	0.27	0.017	3.703704	0.2331962	0.643	0.024	-0.5058	1540.8	97.0	3272.4	271.6	4608.3	172.0	464.0	57.8
SC16_38_18	38.1	1.9	0.376	0.012	2.659574	0.08488004	0.727	0.018	-0.4696	2057.6	65.7	3722.5	185.6	4785.0	118.5	393.2	56.7
SC16_38_19	43.9	0.82	0.4414	0.0093	2.265519	0.04773295	0.729	0.015	0.4022	2356.9	49.7	3863.0	72.2	4789.0	98.5	468.3	55.9
SC16_38_20	5	0.33	0.1082	0.0023	9.242144	0.1964596	0.332	0.017	-0.3307	662.3	14.1	1819.3	120.1	3626.3	185.7	444.0	16.8
SC16_38_21	17.79	0.58	0.2117	0.0052	4.723666	0.1160277	0.603	0.014	0.1623	1237.9	30.4	2978.4	97.1	4515.2	104.8	426.6	26.3
SC16_38_22	12.95	0.54	0.1704	0.0043	5.868545	0.1480912	0.547	0.013	-0.2658	1014.3	25.6	2676.0	111.6	4373.2	103.9	416.5	20.8
SC16_38_23	3.28	0.083	0.0912	0.0018	10.96491	0.2164127	0.2631	0.006	0.2109	562.6	11.1	1476.3	37.4	3265.4	74.5	422.7	9.3
SC16_38_24	3.47	0.1	0.0919	0.0021	10.88139	0.2486499	0.2728	0.0079	0.2495	566.8	13.0	1520.4	43.8	3322.2	96.2	419.1	11.0
SC16_38_25	5.76	0.79	0.1083	0.0065	9.23361	0.5541871	0.357	0.026	-0.8030	662.9	39.8	1940.4	266.1	3737.1	272.2	423.5	32.9
SC16_38_26	24.01	0.73	0.2713	0.0074	3.685957	0.1005384	0.637	0.017	0.2976	1547.4	42.2	3268.8	99.4	4594.8	122.6	480.1	38.9
SC16_38_27	28.78	0.78	0.3048	0.0075	3.28084	0.08072933	0.685	0.014	0.2265	1715.1	42.2	3446.0	93.4	4699.6	96.0	420.9	37.2
SC16_38_28	24.2	1.1	0.261	0.011	3.834418	0.1614774	0.655	0.02	-0.8021	1495.0	63.0	3276.5	148.9	4635.0	141.5	420.8	44.9
SC16_38_29	19.3	3.5	0.226	0.028	4.424779	0.5482027	0.573	0.045	-0.9093	1313.5	162.7	3056.9	554.4	4441.0	348.8	512.4	98.3

sample	Final207_235	Final207_235_ProprFinal206_238	Final206_238_ProprFinal207_206	Final238_206_ProprFinal207_206	Final207_206_ProprFinal206_238	FinalAge206_238	FinalAge207_235	FinalAge207_235_ProprFinal206_238	FinalAge207_206	FinalAge207b-corFinalAge_207b-cor										
SC_15_41_1	3.29	0.25	0.0892	0.0025	0.9841	11.21076	0.266	0.013	-0.8796	550.8	14.787	11.24	3588.9	160.4	411.5	160.4	411.5	14.7	428.8	47.4
SC_15_41_2	6.1	1.123	0.0986	0.0098	0.9636	8.90472	0.369	0.035	-0.8961	489.0	1690.2	403	2971.7	359.2	2991.7	359.2	2991.7	6.8	415.7	6.0
SC_15_41_3	1.883	0.037	0.0788	0.0011	0.4136	12.69036	0.1735	0.0028	0.2351	736.3	1075.1	21.1	2591.7	107.1	2608.4	107.1	2608.4	9.7	407.3	9.5
SC_15_41_4	7.12	0.11	0.121	0.0016	0.2653	8.264463	0.4274	0.0043	0.4689	532.7	2126.5	32.9	4008.4	71.3	4008.4	71.3	4008.4	4.8	407.3	4.8
SC_15_41_5	2.854	0.051	0.08615	0.00078	0.4385	11.60766	0.2426	0.0011	-0.4014	698.3	1389.9	24.5	3137.1	108.2	3899.0	108.2	3899.0	9.2	413.0	5.6
SC_15_41_6	6.24	0.19	0.1144	0.0015	0.8990	8.741259	0.3966	0.011	-0.4014	602.1	2010.1	61.2	3899.0	170.8	3899.0	170.8	3899.0	17.2	412.9	11.4
SC_15_41_7	4.36	0.32	0.0979	0.0028	0.9261	10.2145	0.321	0.016	-0.7513	598.6	1704.8	125.1	3477.6	125.1	3477.6	125.1	3477.6	5.7	410.1	16.7
SC_15_41_8	4.057	0.092	0.0973	0.0093	0.8058	10.27749	0.0051	0.3034	-0.4536	1089.9	1645.7	37.3	3877.7	164.7	3877.7	164.7	3877.7	5.7	420.7	5.8
SC_15_41_9	14.05	0.4	0.1787	0.004	0.7931	5.95971	0.574	0.013	0.1743	1059.9	2753.1	78.4	4443.5	1006	4443.5	1006	4443.5	23.7	398.8	21.1
SC_15_41_10	2.653	0.086	0.0868	0.0025	0.8448	11.52074	0.236	0.0047	-0.0060	556.6	1315.5	42.6	3006.8	63.2	3006.8	63.2	3006.8	15.5	426.7	12.5
SC_15_41_11	16.88	0.37	0.2046	0.0041	0.6912	4.887586	0.6	0.015	0.1248	1200.0	1200.0	24.0	2928.0	1127.7	4128.0	1127.7	4128.0	24.0	416.4	26.2
SC_15_41_12	3.293	0.088	0.0898	0.0013	0.6275	11.13566	0.266	0.0045	-0.0414	554.4	1479.4	8.0	382.6	55.5	382.6	55.5	382.6	8.0	414.3	6.8
SC_15_41_13	3.6	0.11	0.093	0.0016	0.7058	10.75269	0.282	0.0076	-0.2237	573.3	1549.5	9.9	3374.0	47.3	3374.0	47.3	3374.0	9.9	417.5	9.0
SC_15_41_14	2.956	0.051	0.0875	0.0012	0.3774	11.42857	0.2461	0.0046	0.4131	540.7	1396.4	24.1	3159.8	59.1	3159.8	59.1	3159.8	7.4	417.1	6.5
SC_15_41_15	1.52	0.053	0.07383	0.00085	-0.0789	13.54463	0.1493	0.0056	0.3098	459.2	3098	5.3	2393.9	32.7	2393.9	32.7	2393.9	5.3	407.2	5.6
SC_15_41_16	2.541	0.072	0.0848	0.0011	0.5627	11.79245	0.2171	0.0054	-0.1168	524.7	1283.9	6.8	36.4	46.4	2959.3	36.4	2959.3	6.8	423.1	6.5
SC_15_41_17	2.151	0.029	0.08031	0.00096	0.2900	12.45175	0.1945	0.0034	0.5185	498.0	1165.4	6.0	1165.4	15.7	2780.6	15.7	2780.6	6.0	418.8	5.4
SC_15_41_18	2.777	0.095	0.0844	0.0025	0.2594	11.84834	0.2337	0.0088	0.1638	522.3	1349.4	15.5	3077.6	46.2	3077.6	46.2	3077.6	15.5	410.4	13.2
SC_15_41_19	1.788	0.45	0.2115	0.0039	0.6932	4.728132	0.614	0.014	0.3453	1236.8	2983.3	22.8	2983.3	75.1	454.5	75.1	454.5	22.8	407.0	25.5
SC_15_41_20	20.18	0.39	0.2328	0.0038	0.7529	4.295533	0.633	0.015	0.5298	1349.2	3100.0	59.9	4856.6	108.7	4856.6	108.7	4856.6	22.0	414.4	29.3
SC_15_41_21	3.054	0.052	0.0891	0.0017	0.4254	11.22334	0.2469	0.005	0.5175	550.2	1421.2	10.5	3165.0	64.1	3165.0	64.1	3165.0	10.5	424.2	8.7
SC_15_41_22	2.023	0.065	0.0776	0.0012	0.7590	12.8866	0.1896	0.0039	-0.3460	481.8	1123.3	7.5	2738.7	56.3	2738.7	56.3	2738.7	7.5	403.9	8.6
SC_15_41_23	2.054	0.082	0.0784	0.0014	0.5145	12.7551	0.1886	0.006	-0.0563	486.6	1133.6	8.7	2730.0	45.3	2730.0	45.3	2730.0	8.7	408.6	6.0
SC_15_41_24	3.91	0.53	0.0915	0.0043	0.8848	10.92986	0.295	0.026	-0.7096	564.4	1615.8	26.5	2190	303.6	3444.2	2190	3444.2	26.5	410.7	25.9
SC_15_41_25	2.966	0.05	0.0866	0.0012	0.3013	11.54734	0.2483	0.0048	0.4360	535.4	1399.0	7.4	3174.0	61.4	3174.0	61.4	3174.0	7.4	411.3	6.6
SC_15_41_26	2.252	0.057	0.0804	0.0014	0.6532	12.49781	0.2035	0.0038	0.0592	498.5	1197.4	8.7	2854.5	53.3	2854.5	53.3	2854.5	8.7	407.7	7.4
SC_15_41_27	1.657	0.043	0.07481	0.00091	0.4406	13.3672	0.1603	0.0041	0.0746	465.1	992.2	5.7	2458.8	62.9	2458.8	62.9	2458.8	5.7	406.3	5.4
SC_15_41_28	2.959	0.077	0.0876	0.0016	0.6562	11.41553	0.2438	0.0056	-0.0216	541.3	1397.2	9.9	3144.9	72.2	3144.9	72.2	3144.9	9.9	419.1	8.5
SC_15_41_29	2.335	0.052	0.0817	0.0017	0.4881	12.2399	0.2074	0.0049	0.3041	506.3	1223.0	27.2	2885.3	68.2	2885.3	68.2	2885.3	27.2	413.8	9.0
SC_15_41_30	1.318	0.31	0.1731	0.0031	0.6831	5.772008	0.5505	0.0085	0.1951	1029.2	2652.6	18.4	4382.5	67.7	4382.5	67.7	4382.5	18.4	413.5	15.0
SC_15_41_31	2.172	0.039	0.0807	0.001	0.262	12.39157	0.1944	0.0039	0.3922	500.3	1172.1	6.2	2779.7	21.0	2779.7	21.0	2779.7	6.2	418.5	5.7
SC_15_41_32	2.83	0.13	0.0849	0.0017	0.6161	11.77856	0.2389	0.0099	-0.2993	525.3	1383.5	10.5	3112.7	1290	3112.7	1290	3112.7	10.5	416.8	5.7
SC_15_41_33	2.106	0.037	0.0796	0.0011	0.2741	12.56281	0.1921	0.0039	0.3418	493.7	1150.8	6.8	2760.2	20.2	2760.2	20.2	2760.2	6.8	409.5	10.3
SC_15_41_34	2.588	0.056	0.0834	0.0017	0.3933	11.99041	0.2221	0.0052	0.0980	516.4	1291.6	10.5	282.0	28.2	2996.0	28.2	2996.0	10.5	412.6	6.1
SC_15_41_35	1.804	0.046	0.0774	0.0011	0.6720	12.9199	0.169	0.0035	-0.1323	480.6	1046.9	6.8	2547.8	57.8	2547.8	57.8	2547.8	6.8	413.0	9.0
SC_15_41_36	2.43	0.14	0.0829	0.0013	0.8580	12.06273	0.1891622	0.211	-0.6420	513.4	1251.5	8.1	2913.2	72.1	2913.2	72.1	2913.2	8.1	417.6	6.2
SC_15_41_37	2.895	0.0852	0.0852	0.0012	0.6852	11.73709	0.1653111	0.247	-0.1097	527.1	1380.6	7.4	3150.8	36.2	3150.8	36.2	3150.8	7.4	407.1	9.0
SC_15_41_38	2.037	0.034	0.07815	0.00092	0.5509	12.79591	0.1879	0.0025	0.1271	485.1	1118.0	5.7	2723.9	18.8	2723.9	18.8	2723.9	5.7	407.7	5.0
SC_15_41_39	2.949	0.072	0.0855	0.0013	0.2861	11.69591	0.2479	0.0062	0.3277	528.9	1394.6	8.0	3171.4	79.3	3171.4	79.3	3171.4	8.0	406.4	7.4
SC_15_41_40	2.392	0.041	0.0812	0.0011	0.3065	12.31527	0.2144	0.0047	0.4030	503.3	1240.2	21.3	2939.1	64.4	2939.1	64.4	2939.1	21.3	407.0	6.2
SC_15_41_41	2.927	0.056	0.0859	0.00094	0.6620	11.64144	0.1272918	0.247	0.1742	531.2	1178.8	5.8	3165.6	26.6	3165.6	26.6	3165.6	5.8	408.9	5.2
SC_15_41_42	3.92	0.14	0.095	0.0019	0.6620	10.52632	0.2983	0.0082	-0.1314	585.0	1617.8	11.7	1888.9	57.8	1888.9	57.8	1888.9	11.7	414.5	10.2
SC_15_41_43	8.1	0.2	0.1287	0.0023	0.5397	7.770008	0.455	0.011	0.0702	780.4	2242.2	13.9	4101.4	99.2	4101.4	99.2	4101.4	13.9	405.8	13.5
SC_15_41_44	2.905	0.053	0.086	0.0013	0.4378	11.62791	0.2462	0.0032	0.3327	531.8	1383.2	8.0	3160.5	25.2	3160.5	25.2	3160.5	8.0	409.9	7.0
SC_15_41_45	1.809	0.037	0.0765	0.0011	0.4240	13.0719	0.1714	0.0032	0.1742	475.2	1048.7	6.8	2571.4	21.4	2571.4	21.4	2571.4	6.8	408.8	6.1
SC_15_41_46	2.193	0.083	0.10805	0.0016	0.7512	12.42236	0.1996	0.0057	-0.2028	499.1	1178.8	9.9	2822.9	44.6	2822.9	44.6	2822.9	9.9	412.6	8.8
SC_15_41_47	5.27	0.1	0.1054	0.0016	0.5511	9.487666	0.3389	0.007	0.2195	646.0	1864.0	9.8	3745.2	35.4	3745.2	35.4	3745.2	9.8	410.6	8.7
SC_15_41_48	2.066	0.066	0.0782	0.001	0.4215	12.78772	0.1903	0.0057	0.0141	485.4	1137.6	6.2	2744.8	36.3	2744.8	36.3	2744.8	6.2	406.5	8.2
SC_15_41_49	2.373	0.057	0.0802	0.0013	0.4798	12.46883	0.2166	0.0052	0.1570	497.3	1234.5	8.1	2955.6	29.7	2955.6	29.7	2955.6	8.1	400.7	7.2
SC_15_41_50	4.8	0.13	0.1024	0.0024	0.7017	9.765625	0.3383	0.0067	0.2152	628.5	1784.9	14.7	3655.1	72.4	3655.1	72.4	3655.1	14.7	415.2	11.1

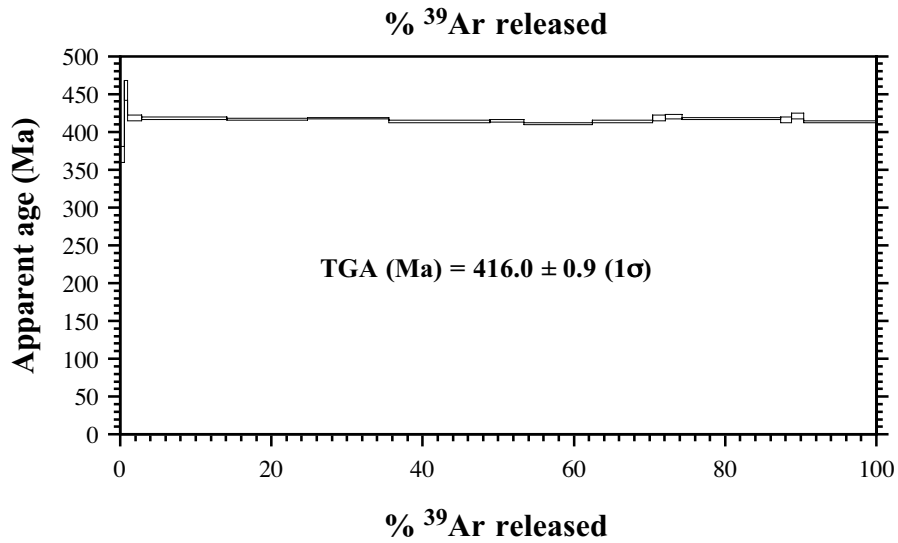
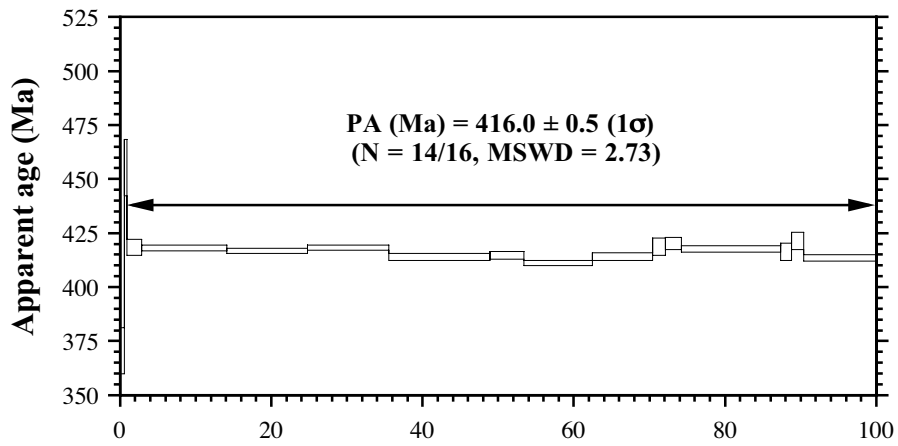
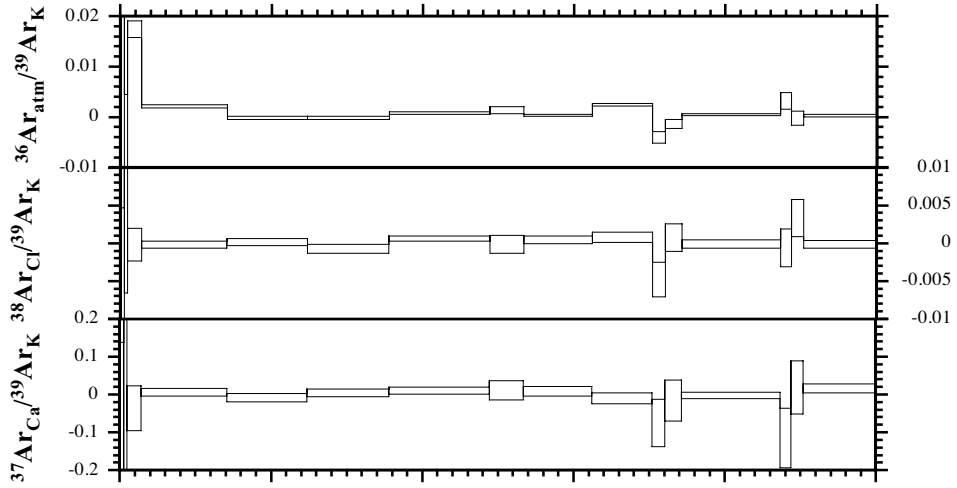
Integration	Final207_235 op25E	Final207_235_Pr op25E	Final206_238 op25E	Final206_238_Pr _6_38x7_35	Final238_206 op25E	Final238_206_Pr op25E	Final207_206 op25E	Final207_206_Pr _38_6x7_6	FinalAge206_23 8	FinalAge206_23 8_Prop25E	FinalAge207_23 5	FinalAge207_23 5_Prop25E	FinalAge207_23 6	FinalAge207_20 6_Prop25E	FinalAge207_20 corr	FinalAge207fb corr Prop25E
SC16_44_1	175	9.1	1.515	0.052	0.7335	0.660066	0.84	0.026	0.1226	15945.4	204.1	5250.0	273.0	4991.1	154.5	27.1
SC16_44_2	506	0.11	0.2552	0.005	0.3389	3.918495	0.1432	0.0038	0.4292	1465.2	28.7	1829.4	39.8	2266.3	60.1	1379.8
SC16_44_3	210.7	9.7	1.767	0.071	0.7041	0.565931	0.883	0.028	0.3651	6560.9	263.6	5437.5	250.3	5061.9	160.5	-3277.3
SC16_44_4	14.6	0.87	0.277	0.01	0.7209	3.610108	0.388	0.016	-0.0826	1576.2	56.9	2799.5	166.2	3863.2	159.3	1028.6
SC16_44_5	21.27	0.96	0.329	0.01	0.8201	3.039814	0.479	0.013	-0.0166	1833.5	55.7	3151.0	142.2	4177.8	113.4	1008.0
SC16_44_6	7.38	0.99	0.1267	0.0048	0.6654	7.89266	0.426	0.019	0.0390	4769.0	29.1	2158.5	114.1	4003.5	178.6	428.1
SC16_44_7	92.5	4.2	0.91	0.038	0.5585	1.098801	0.74	0.024	0.4616	4171.5	174.2	4607.8	209.2	4810.4	156.0	1488.1
SC16_44_8	89	4.7	0.832	0.046	0.8828	1.201923	0.773	0.028	0.2328	3902.7	215.8	4569.0	241.3	4872.8	176.5	683.6
SC16_44_9	1346	0.88	0.289	0.013	0.8912	3.460208	0.339	0.012	-0.4694	1636.5	73.6	2712.5	177.3	3658.3	129.5	1175.7
SC16_44_10	187	1.1	1.579	0.086	0.8639	0.03449326	0.865	0.028	0.3193	6107.3	332.6	5317.0	312.8	5032.7	162.9	-1195.0
SC16_44_11	7.15	0.15	0.325	0.0048	0.7761	3.007519	0.1548	0.0024	-0.0449	1850.5	26.7	2130.3	44.7	2399.6	37.2	1763.1
SC16_44_12	40.4	1.9	0.39	0.013	0.8990	2.564403	0.745	0.022	0.2166	2122.8	70.8	3780.6	177.8	4820.1	142.3	346.6
SC16_44_13	26.6	1.3	0.38	0.013	0.6476	2.631579	0.507	0.018	0.1348	2076.3	71.0	3368.9	164.6	4261.7	151.3	70.3
SC16_44_14	5.83	0.13	0.293	0.0068	0.3327	3.412969	0.07920884	0.0042	0.6436	1656.5	38.4	1950.9	43.5	2278.3	66.4	1576.9
SC16_44_15	109.6	3.1	1.023	0.035	0.6668	0.9775171	0.758	0.02	0.3985	4542.0	155.4	4778.3	135.2	4844.8	127.8	151.6
SC16_44_16	76.2	2.5	0.802	0.023	0.6762	1.246883	0.692	0.017	0.3364	3796.3	108.9	4413.3	144.8	4714.2	115.8	1342.2
SC16_44_17	25.05	0.81	0.432	0.013	0.8241	2.314815	0.417	0.0085	0.0354	2314.7	69.7	3310.2	107.0	3971.5	81.0	1546.5
SC16_44_18	11.07	0.31	0.1588	0.004	0.6483	6.297229	0.503	0.013	0.1863	950.1	23.9	2529.0	70.8	4250.0	109.8	442.8
SC16_44_19	287	1.3	2.48	0.12	0.9162	0.4032258	0.869	0.034	0.3693	8038.9	389.0	5750.1	260.5	5039.3	197.2	-5269.3
SC16_44_20	261	1.2	2.05	0.097	0.7284	0.4878049	0.93	0.031	0.4374	7188.7	340.1	5654.0	260.0	5135.2	171.2	-1758.0
SC16_44_21	6.76	0.32	0.1212	0.0034	0.5363	8.250825	0.395	0.016	0.0598	737.5	20.7	2080.5	98.5	3890.2	157.6	438.6
SC16_44_22	22.8	3.5	0.454	0.03	0.9500	2.202643	0.36	0.033	-0.8482	2413.0	159.5	3218.4	494.1	3749.9	343.7	1810.3
SC16_44_23	97.3	3.4	0.955	0.034	0.6370	1.04712	0.726	0.019	0.4151	4321.6	153.9	4658.6	162.8	4783.1	125.2	1394.8
SC16_44_24	18.3	1.6	0.3	0.013	0.8611	3.333333	0.445	0.025	-0.3489	1691.3	73.3	3005.6	262.8	4006.6	228.6	991.0
SC16_44_25	12.29	0.45	0.3284	0.0086	0.5040	3.045067	0.2768	0.0092	0.0560	1830.6	36.8	2626.8	96.2	3345.0	111.2	1479.2

Integration	Final207_235	Final207_235_Pr	Final206_238	Final206_238_Pr	Final238_206	Final207_206	Final207_206_Pr	FinalAge206_23	FinalAge206_23	FinalAge207_23	FinalAge207_23	FinalAge207_20	FinalAge207_20	FinalAge207Pb	FinalAge207Pb	
	op25E	ErrorCorrelation	op25E	ErrorCorrelation	op25E	op25E	ErrorCorrelation	8	8_Prop25E	5	5_Prop25E	6	6_Prop25E	107.0	corr Prop25E	
SC16_45_1	19.03	0.46	0.2156	0.00046	4.638219	0.638	0.015	0.5250	1258.6	26.9	3043.3	73.6	4597.0	108.1	372.6	27.8
SC16_45_2	24.5	1.2	0.263	0.01	3.802281	0.675	0.03	0.2745	1505.2	57.2	3288.5	161.1	4678.4	207.9	379.6	63.1
SC16_45_3	32.3	1.3	0.32	0.011	3.125	0.735	0.019	0.0937	1789.7	61.5	3559.5	178.9	4800.7	214.1	302.8	51.3
SC16_45_4	19.9	1.1	0.264	0.0099	4.416961	0.642	0.017	-0.0928	1315.6	57.5	3086.5	170.6	4606.1	122.0	385.2	35.3
SC16_45_5	16.17	0.53	0.188	0.0042	5.319149	0.625	0.019	0.3183	1105.5	24.8	2886.9	94.6	4567.2	138.8	342.2	29.7
SC16_45_6	13.36	0.52	0.1688	0.0066	5.924171	0.571	0.017	0.4279	1005.5	39.3	2705.4	105.3	4435.9	132.1	379.8	27.2
SC16_45_7	27.72	0.87	0.2926	0.0076	3.417635	0.684	0.016	0.1352	1654.5	43.0	3409.2	107.0	4697.5	109.9	404.6	39.9
SC16_45_8	28.27	0.56	0.2833	0.0075	3.529827	0.726	0.02	0.3638	1608.0	42.6	3428.5	67.9	4783.1	131.8	286.2	47.2
SC16_45_9	24.63	0.6	0.2661	0.006	3.757986	0.692	0.018	0.1952	1521.0	26.3	3299.7	80.2	4714.2	122.6	345.7	40.0
SC16_45_10	19.01	0.44	0.2119	0.0045	4.719207	0.646	0.016	0.5096	1238.9	34.3	3042.3	70.4	4615.0	114.3	351.6	28.9
SC16_45_11	59.2	5.7	0.564	0.054	1.77305	0.76	0.024	0.0822	2883.1	276.0	4160.7	400.6	4848.6	153.1	463.3	115.0
SC16_45_12	22.9	1.2	0.246	0.013	4.065041	0.672	0.024	0.1176	1417.8	74.9	3222.7	168.9	4672.0	166.9	359.1	50.4
SC16_45_13	21.9	2.1	0.242	0.02	4.132231	0.664	0.022	-0.3879	1397.1	115.5	3179.3	304.9	4654.7	154.2	369.1	34.7
SC16_45_14	12.91	0.57	0.1707	0.0058	5.858231	0.545	0.024	0.4033	1016.0	34.5	2673.1	118.0	4367.8	192.3	420.0	51.9
SC16_45_15	9.87	0.35	0.1473	0.0041	6.788866	0.483	0.02	0.3105	885.8	24.7	2422.7	85.9	4190.1	173.5	433.2	25.7
SC16_45_16	19.19	0.38	0.2174	0.0052	4.599816	0.641	0.014	0.6452	1268.1	30.3	3051.4	60.4	4603.8	100.6	370.5	26.9
SC16_45_17	26.4	1.6	0.28	0.018	3.571429	0.684	0.018	0.3732	1591.4	102.3	3361.5	203.7	4697.5	123.6	385.2	47.6
SC16_45_18	25.77	0.88	0.268	0.0086	3.731343	0.694	0.015	0.1039	1500.6	49.1	3337.9	114.0	4718.3	102.0	343.8	35.6
SC16_45_19	28.28	0.7	0.287	0.0063	3.484321	0.711	0.017	0.3389	1626.5	35.7	3428.9	84.9	4753.1	113.6	328.4	41.2
SC16_45_20	31.28	0.53	0.3205	0.0071	3.120125	0.711	0.016	0.6557	1792.2	39.7	3527.9	59.8	4753.1	107.0	372.2	43.5

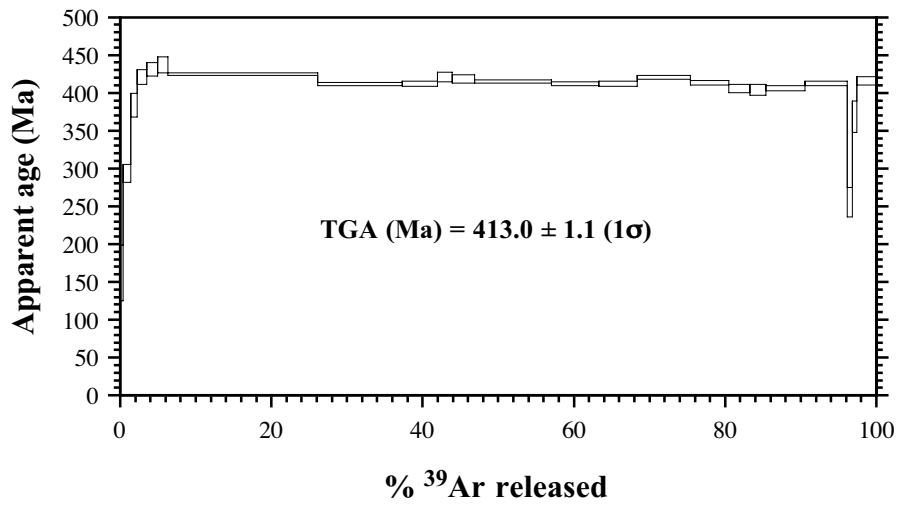
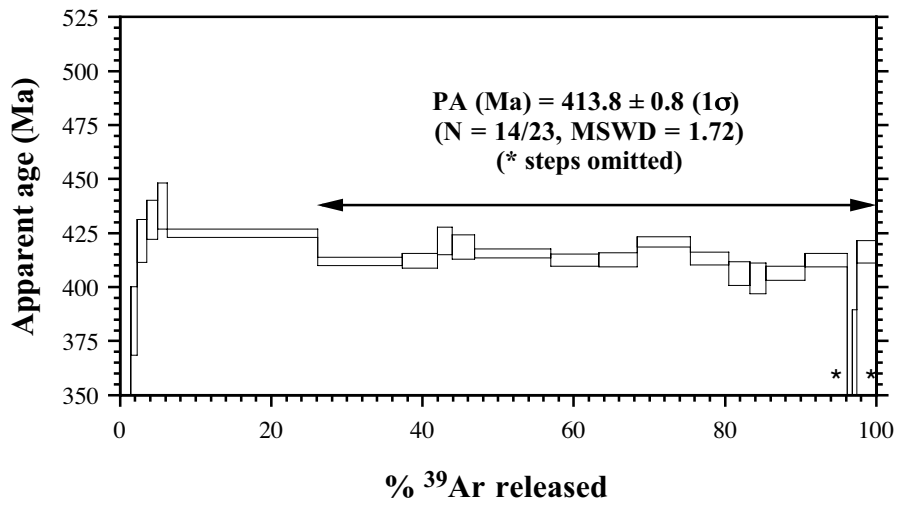
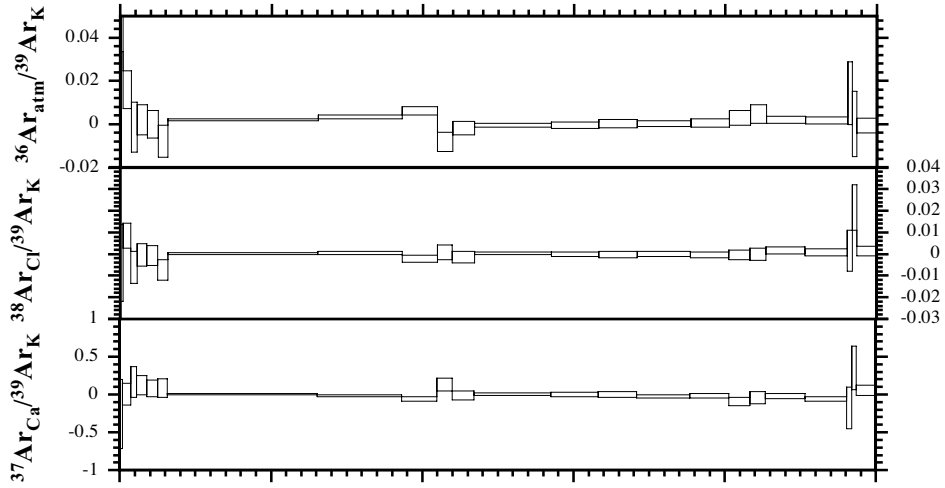


$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  muscovite et biotites

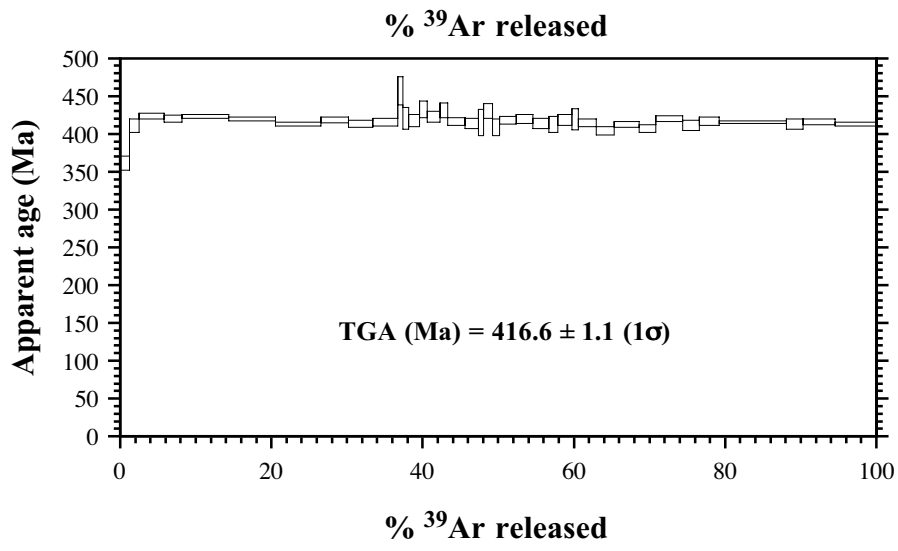
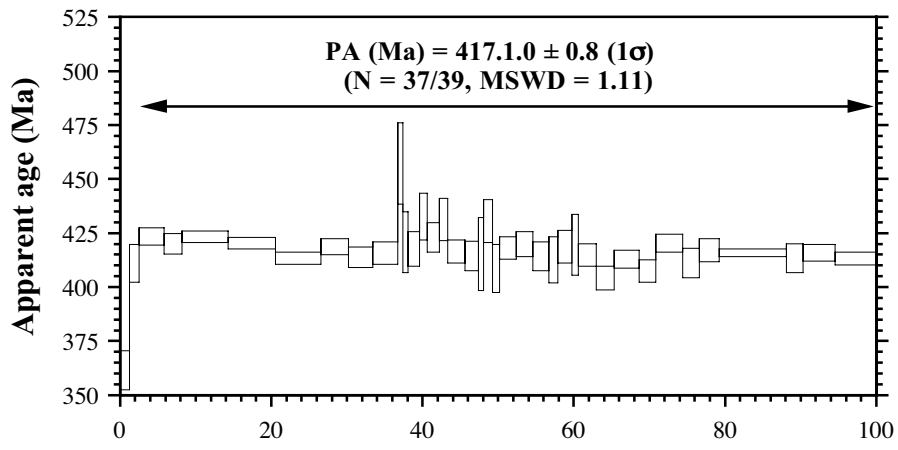
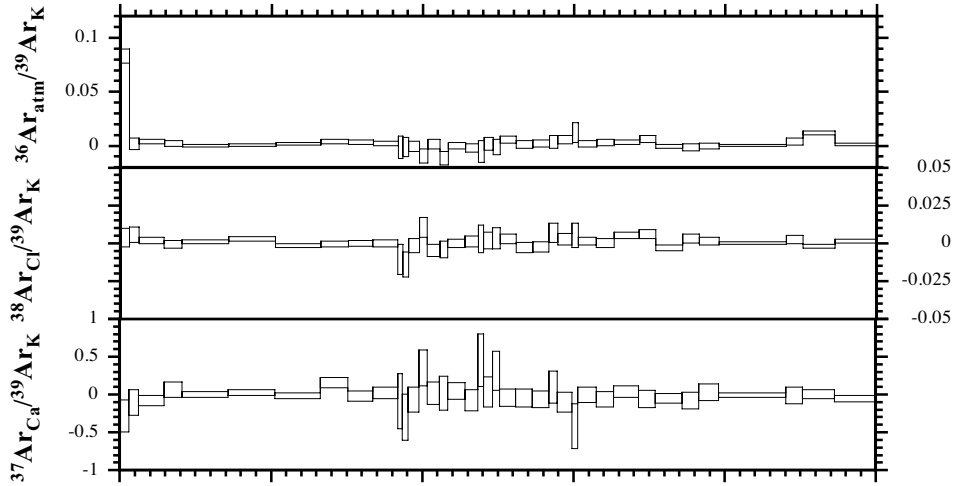
### N77.MS3 (SC-16-03 mus)



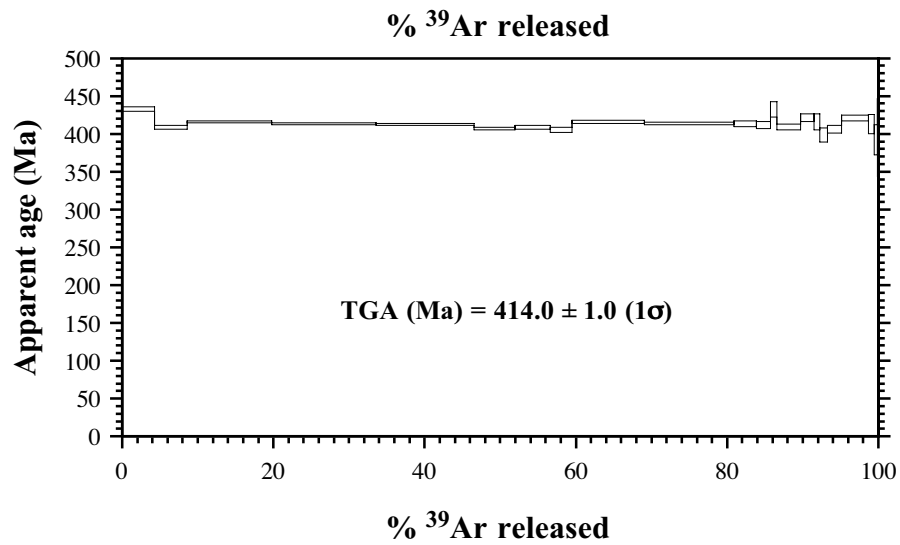
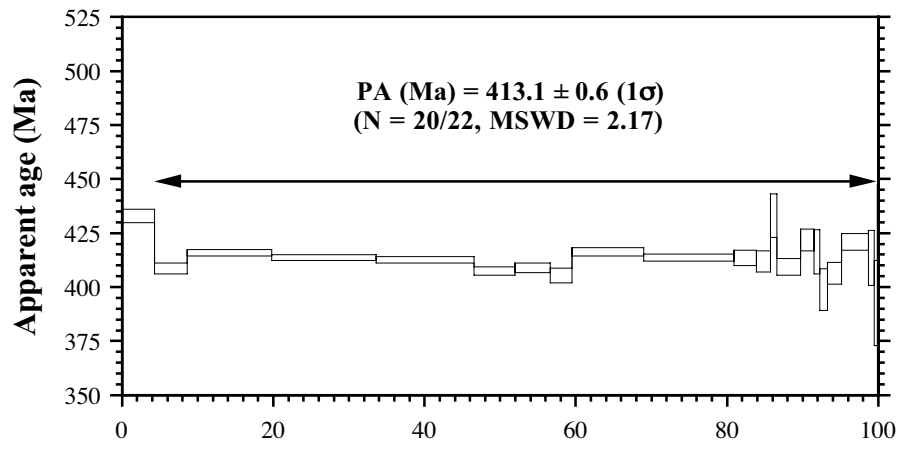
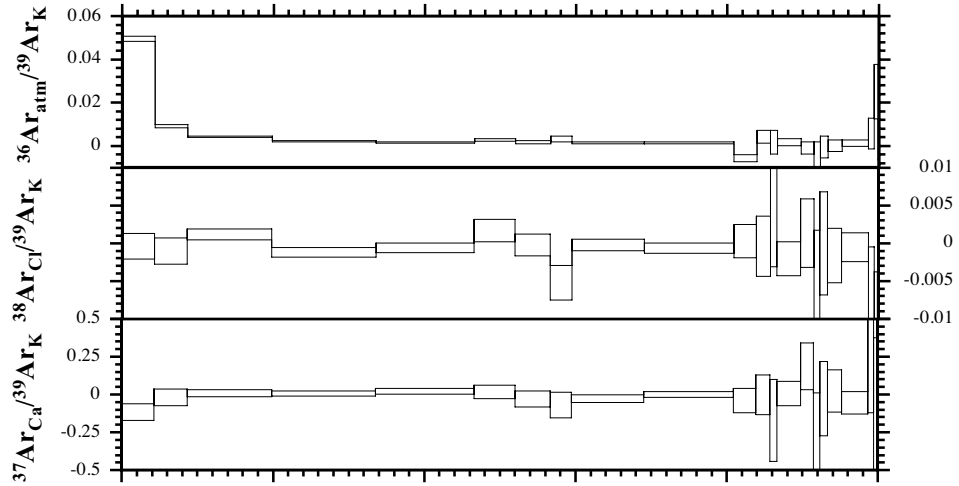
**N78.MS3 (SC-16-07 mus)**



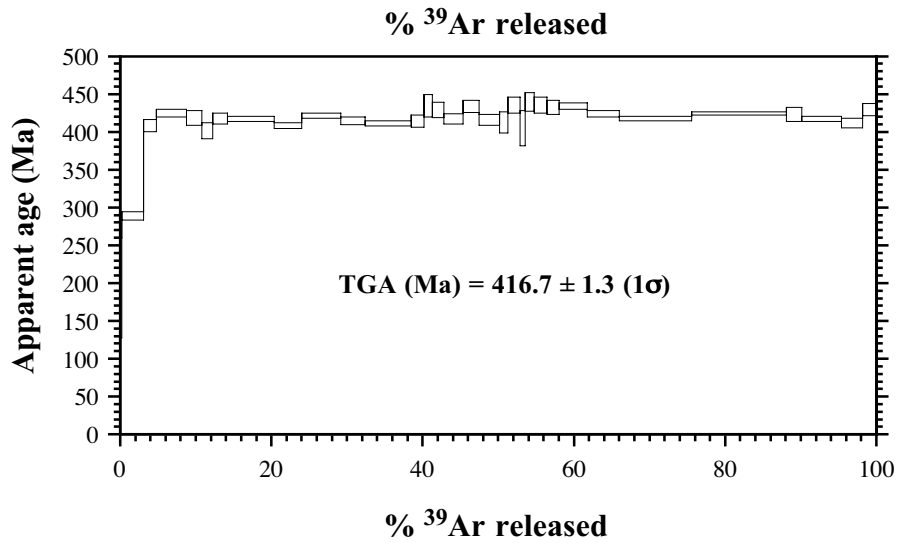
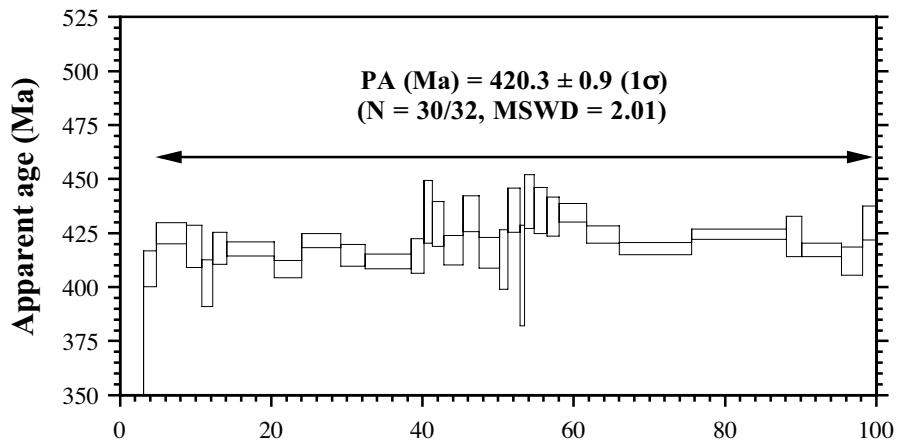
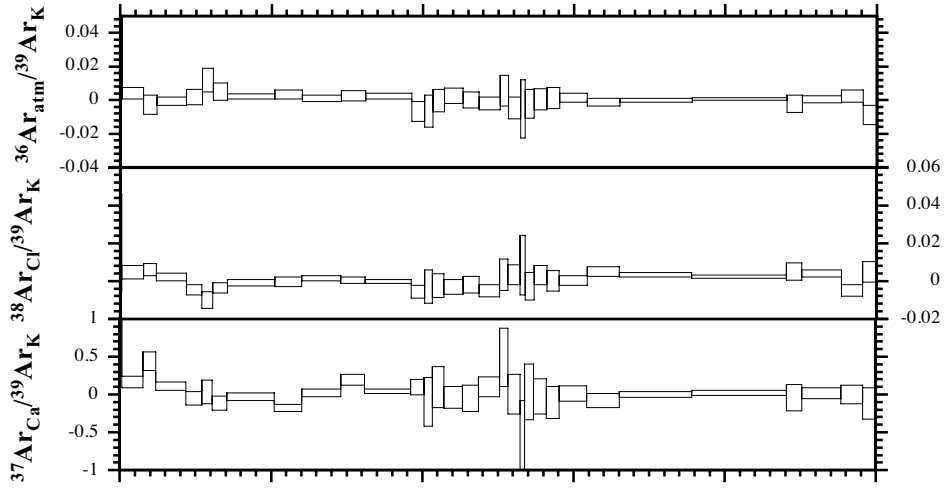
**N79.MS3 (SC-16-07 bio)**



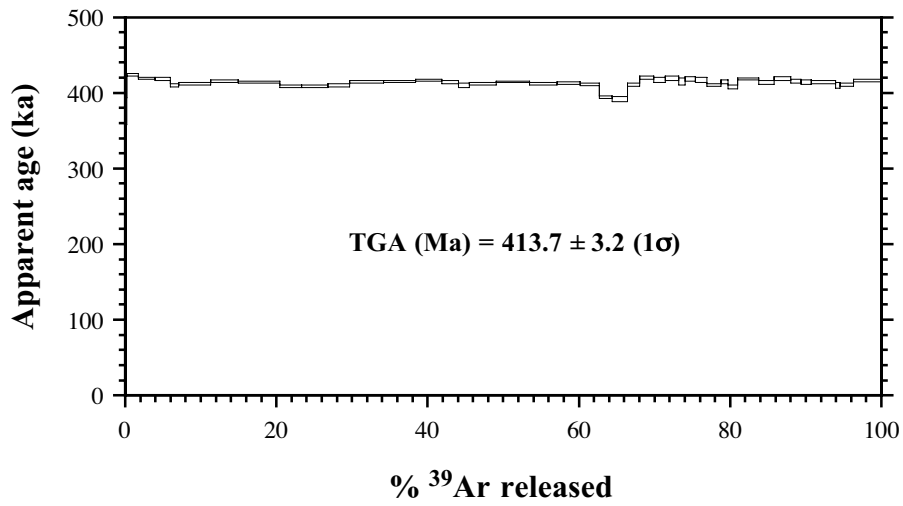
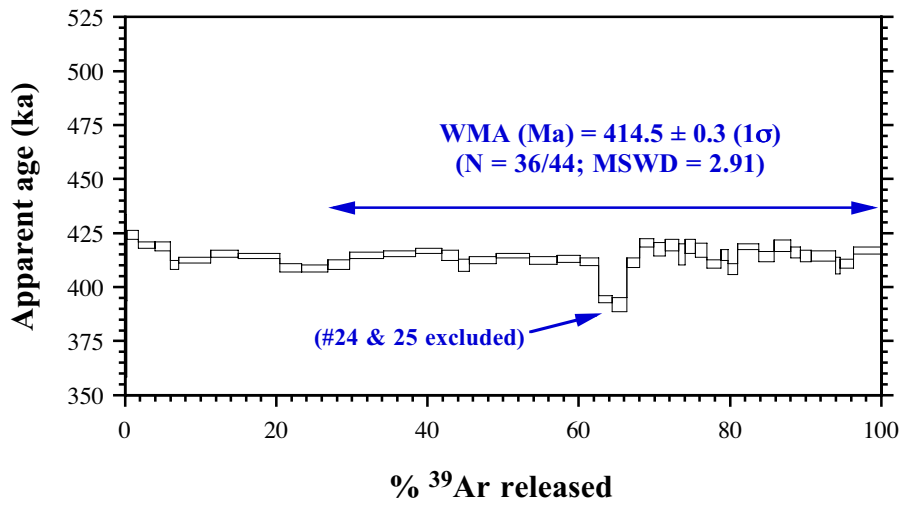
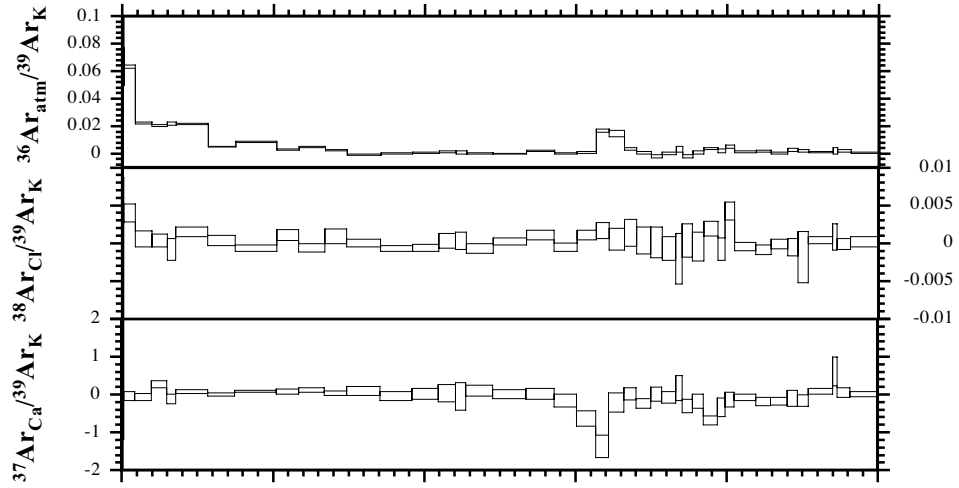
**N80.MS3 (SC-16-18, mus)**



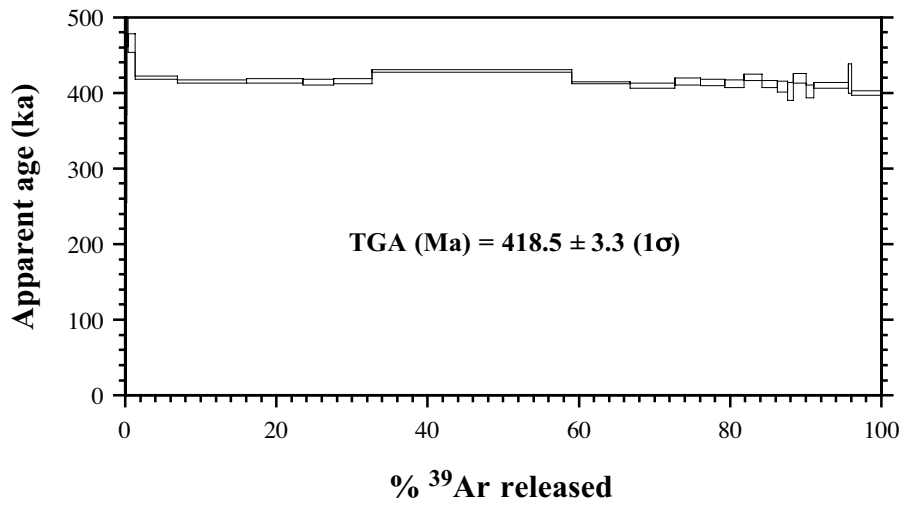
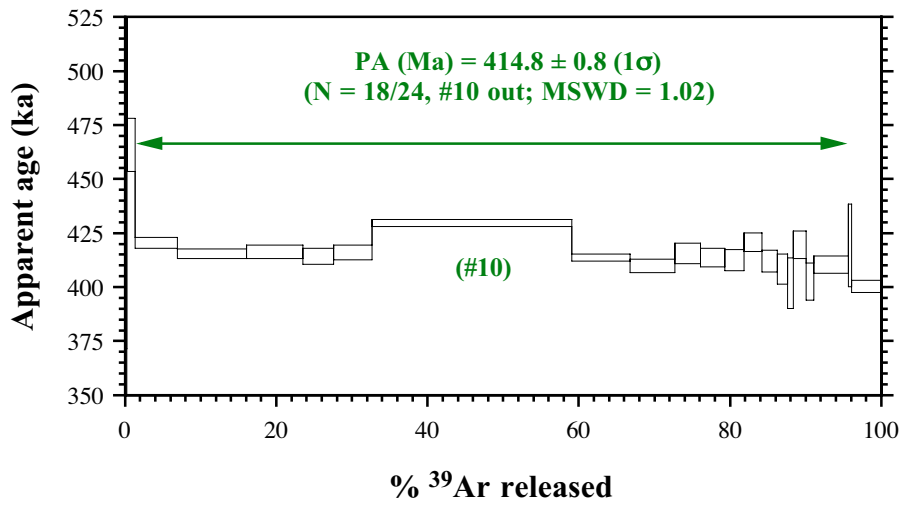
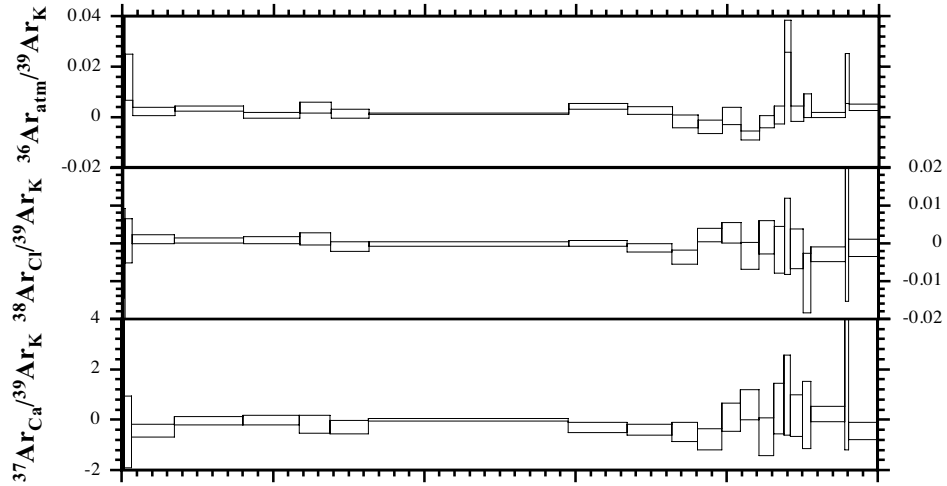
### N81.MS3 (SC-16-18, bio)



### N105.MS3 (SC-16-31 mus)

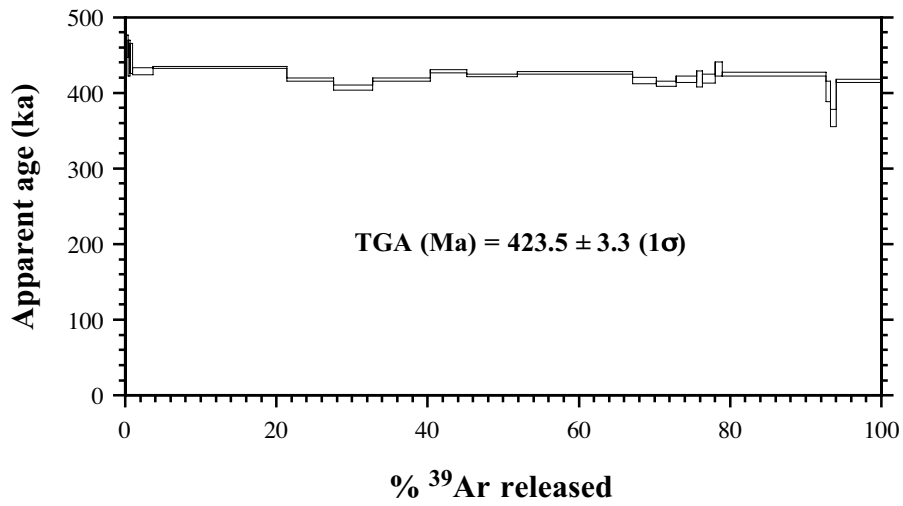
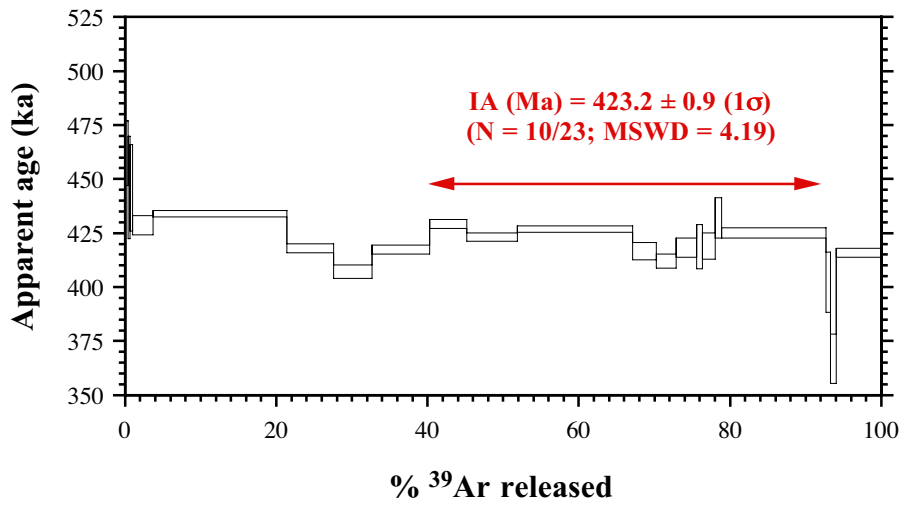
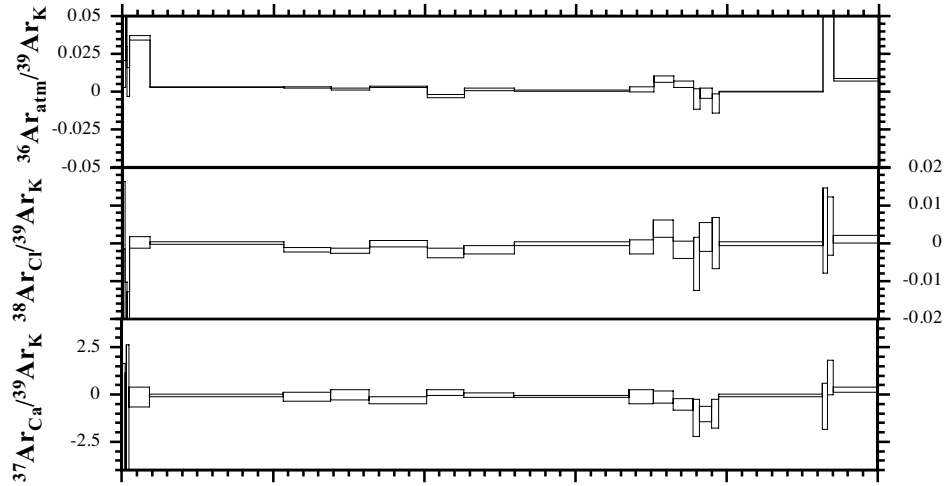


**N106.MS3 (SC-16-67 mus)**

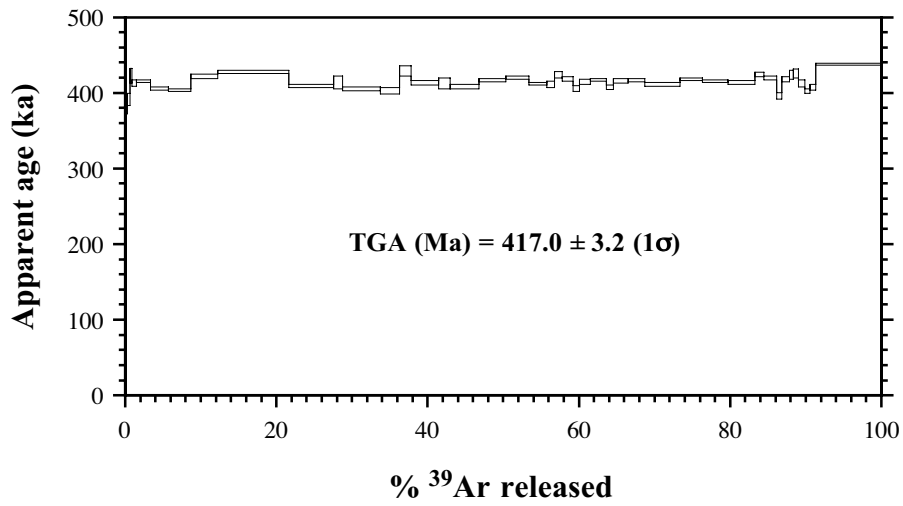
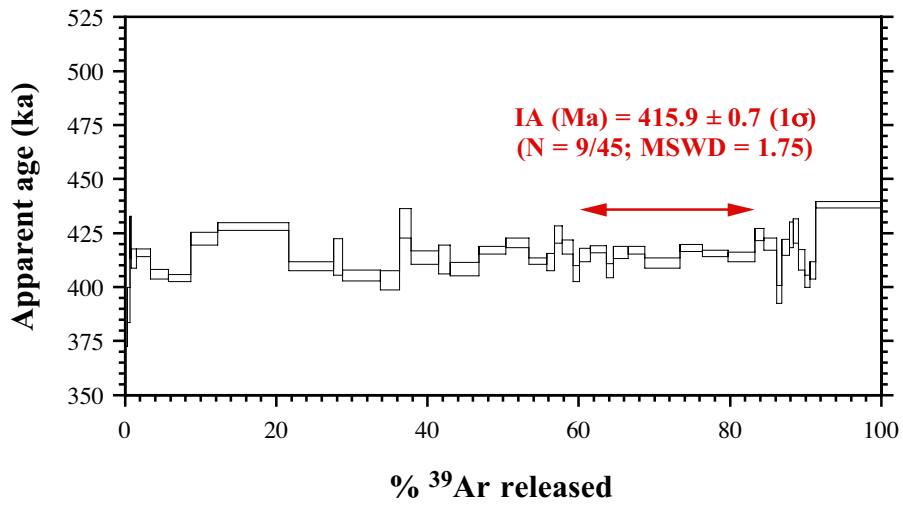
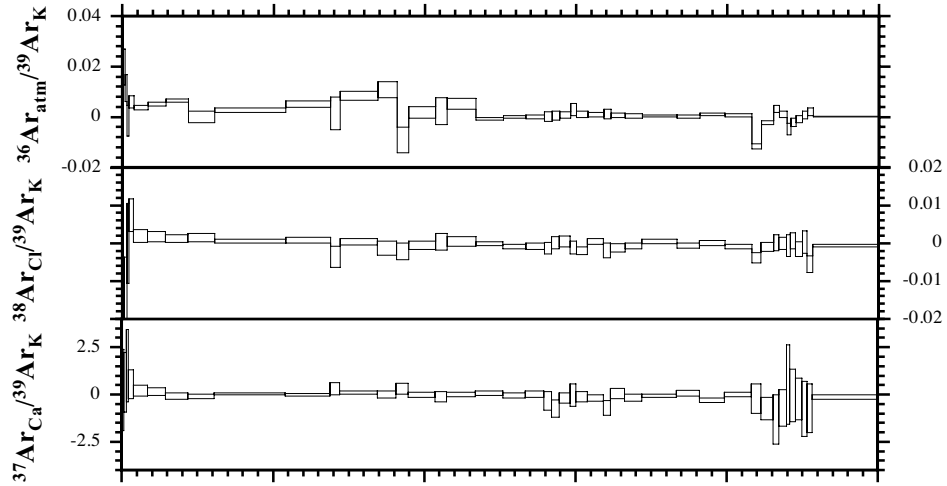




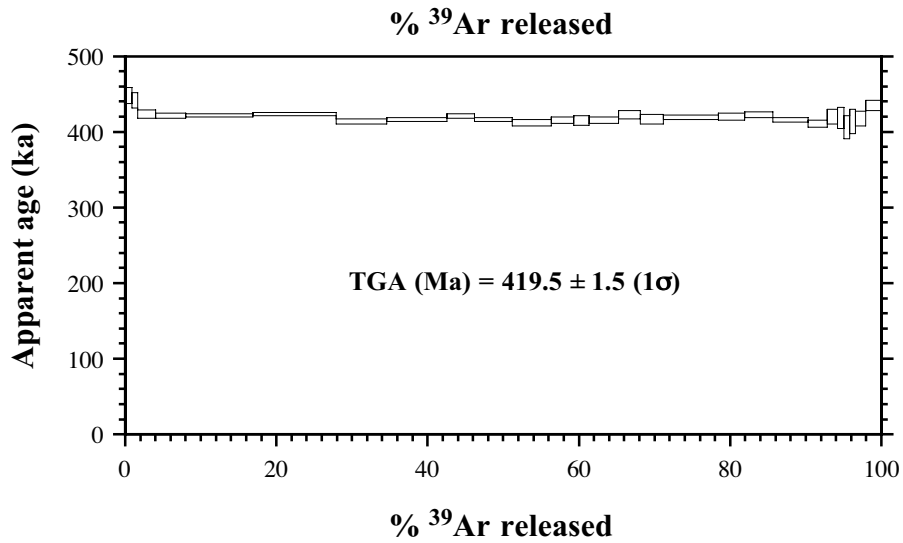
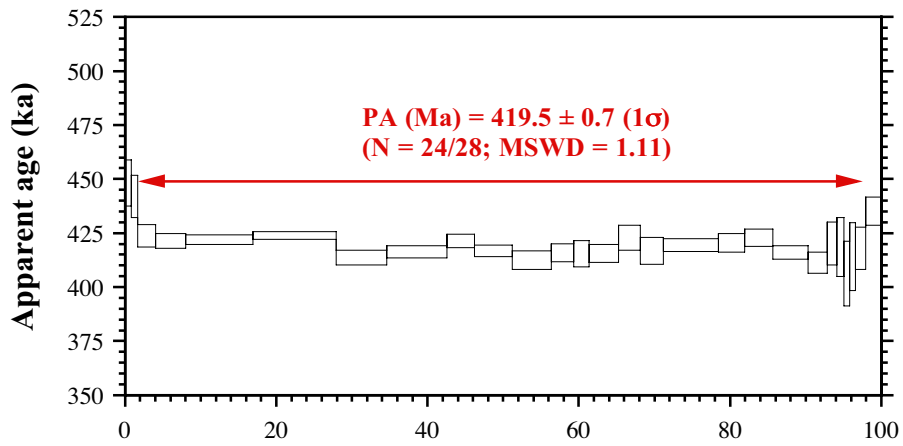
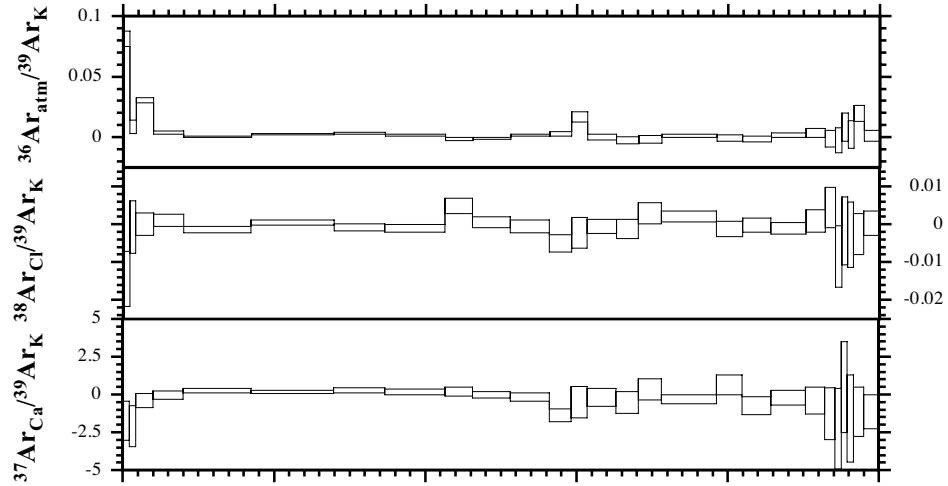
### N107.MS3 (SC-16-70 mus)



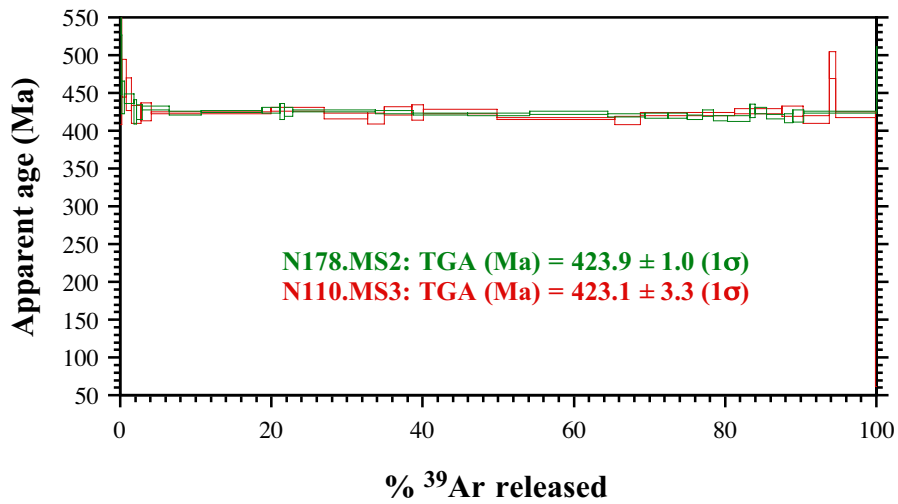
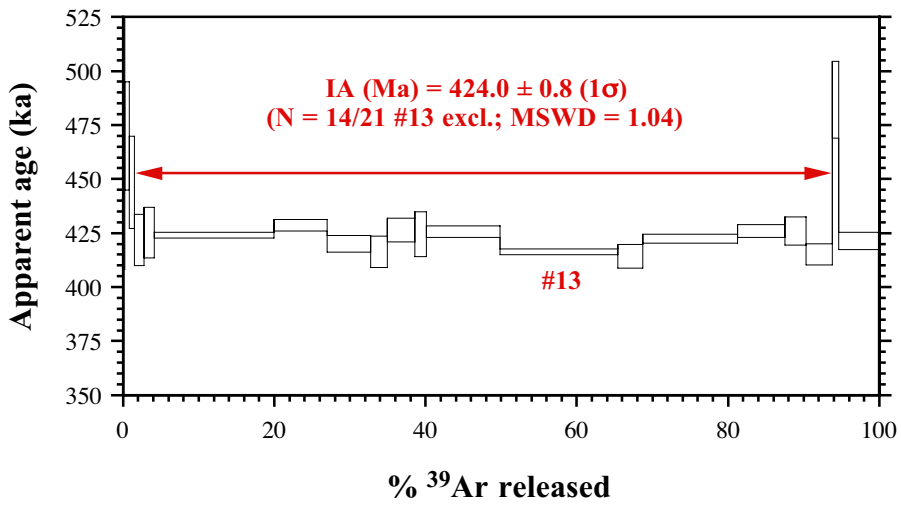
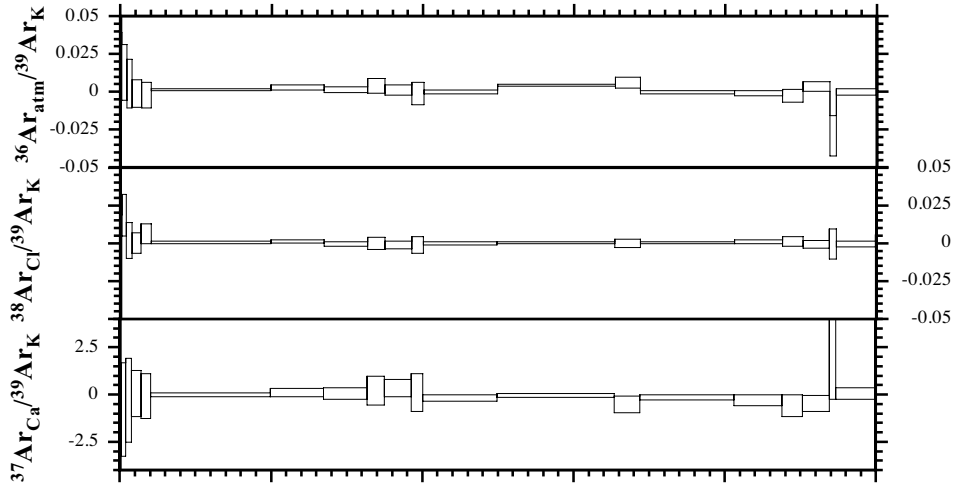
**N108.MS3 (SC-16-73 mus)**



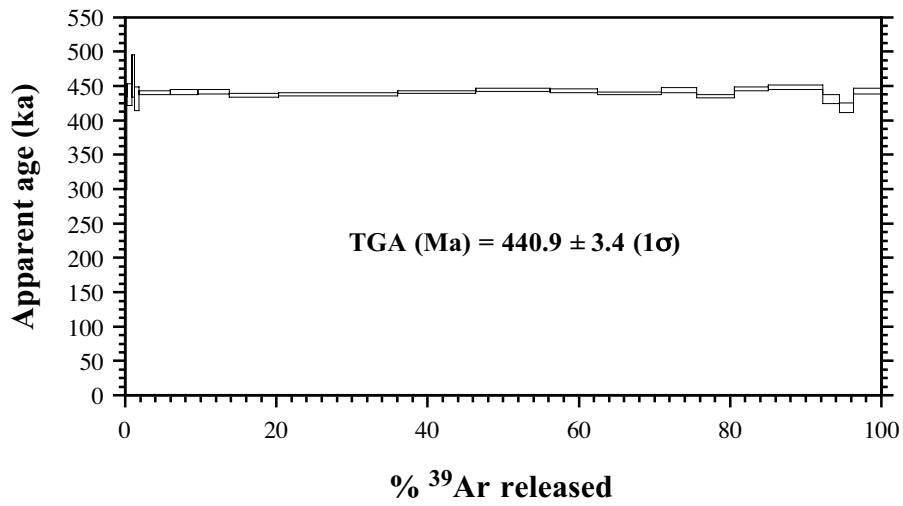
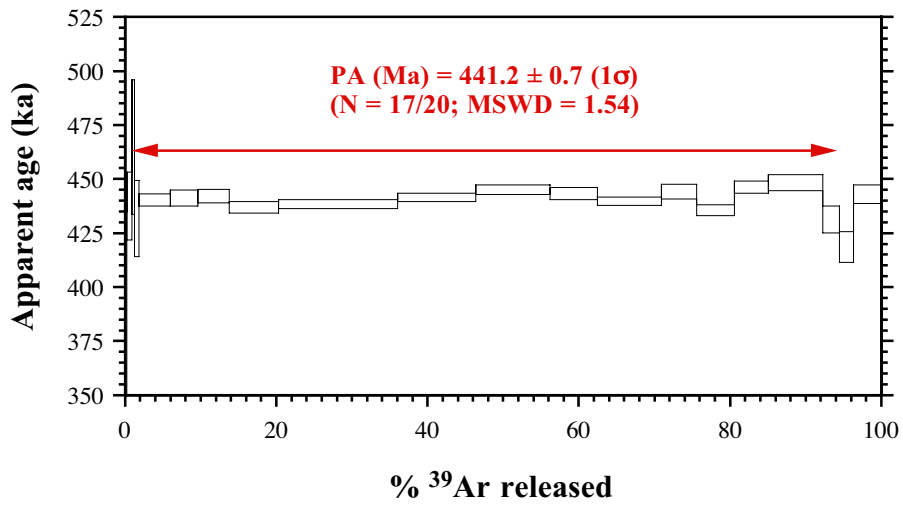
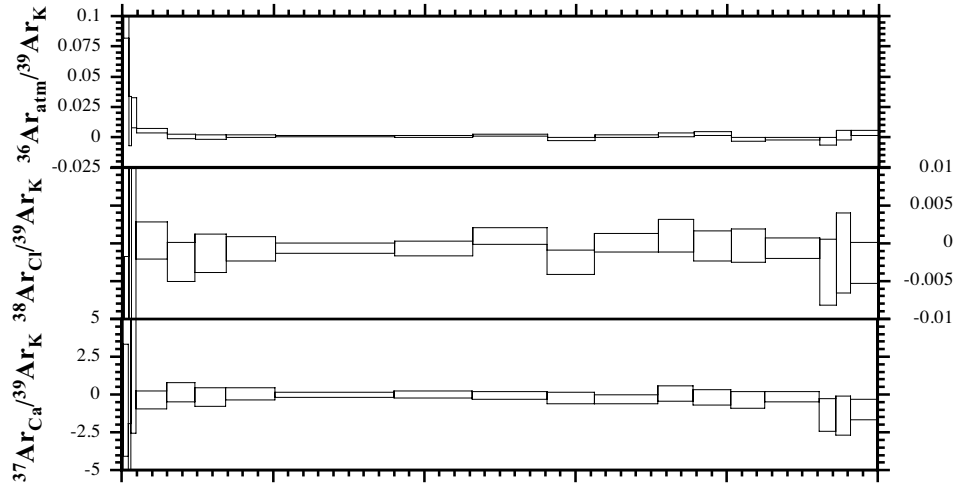
### N109.MS3 (SC-16-78 mus)



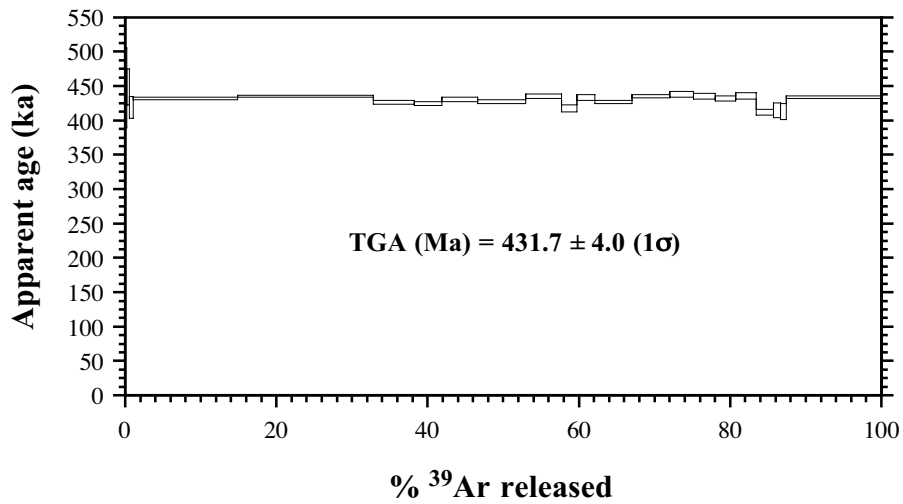
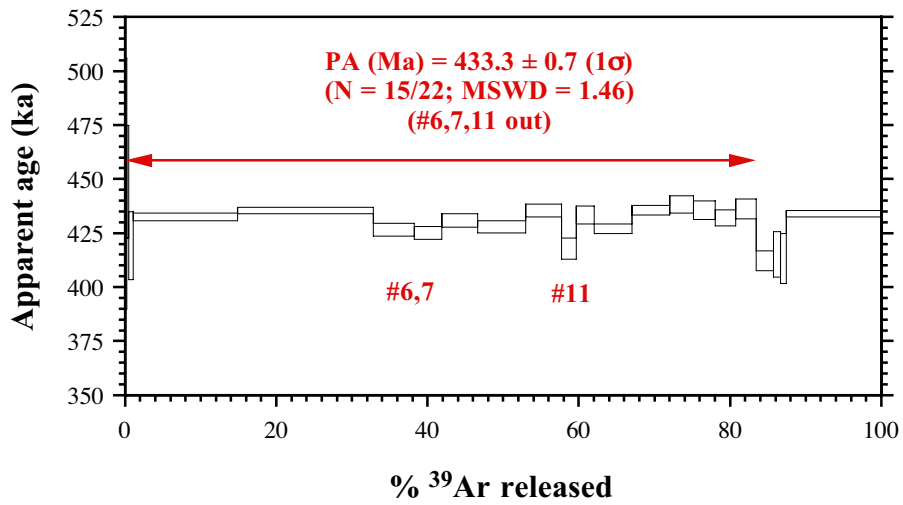
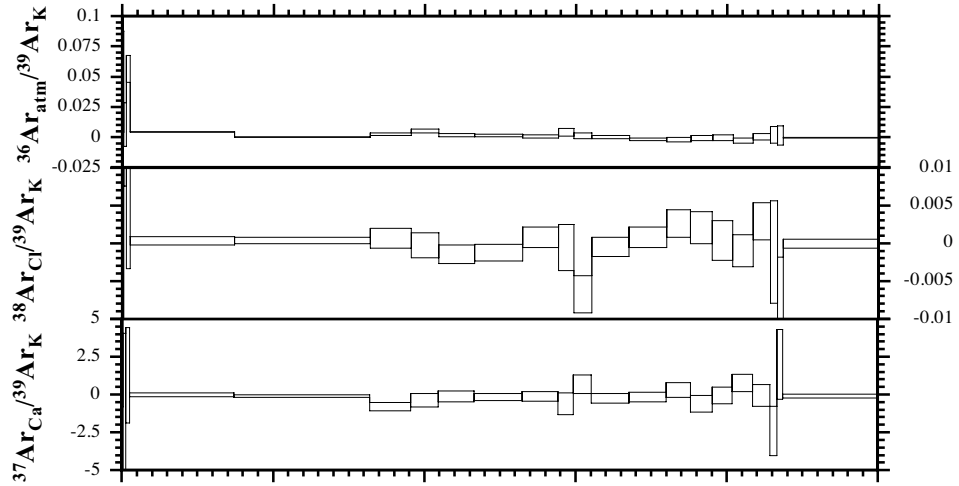
**N110.MS3 (SC-16-134 mus)**



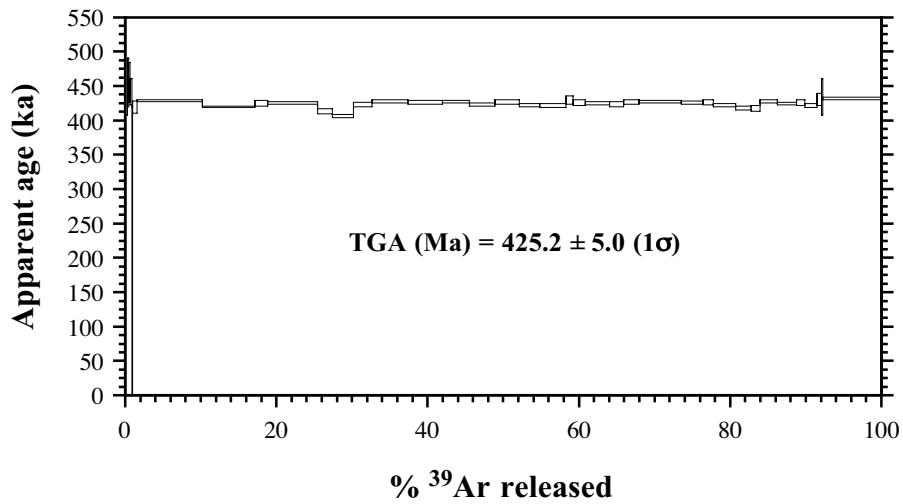
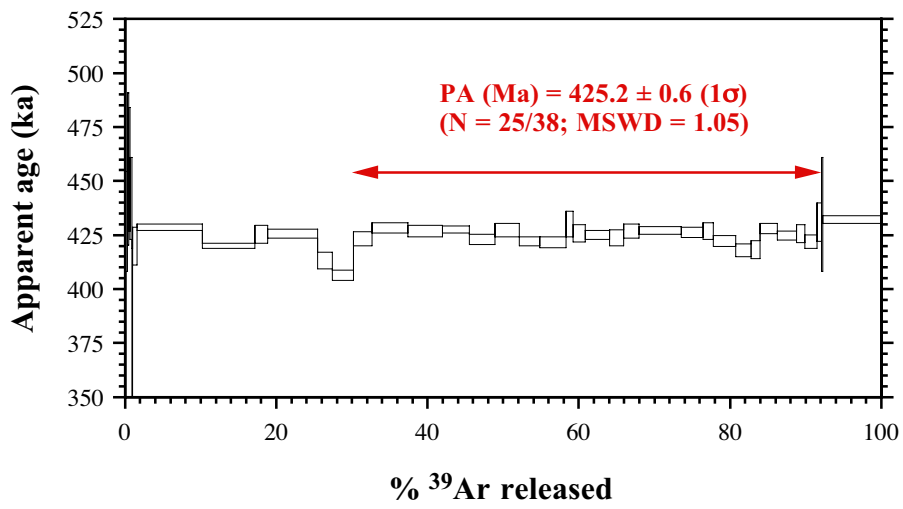
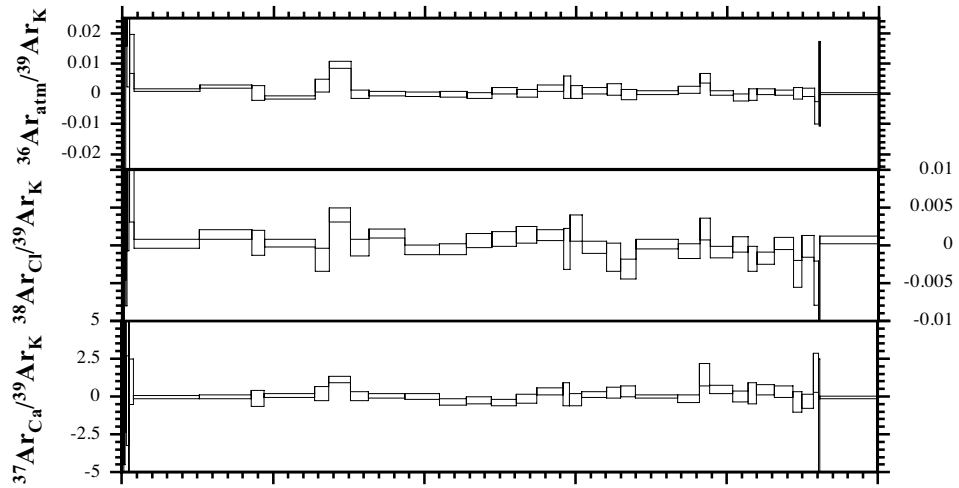
### N111.MS3 (SC-16-66 mus)



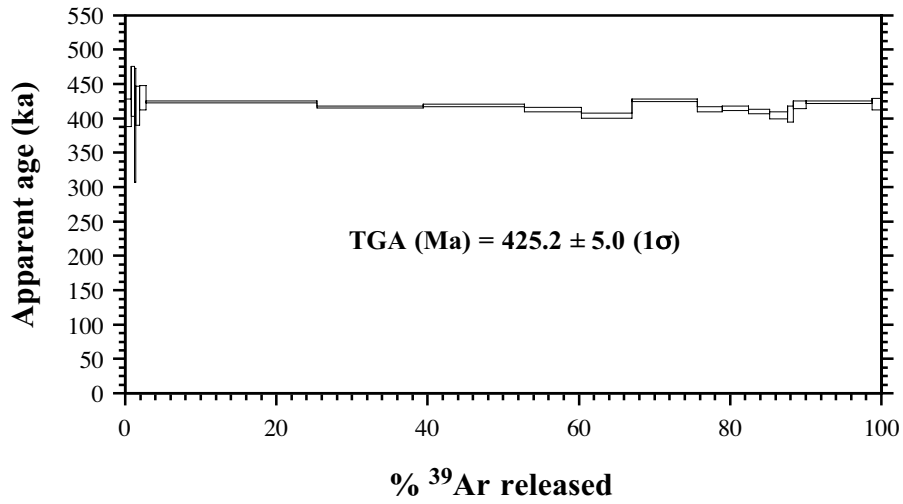
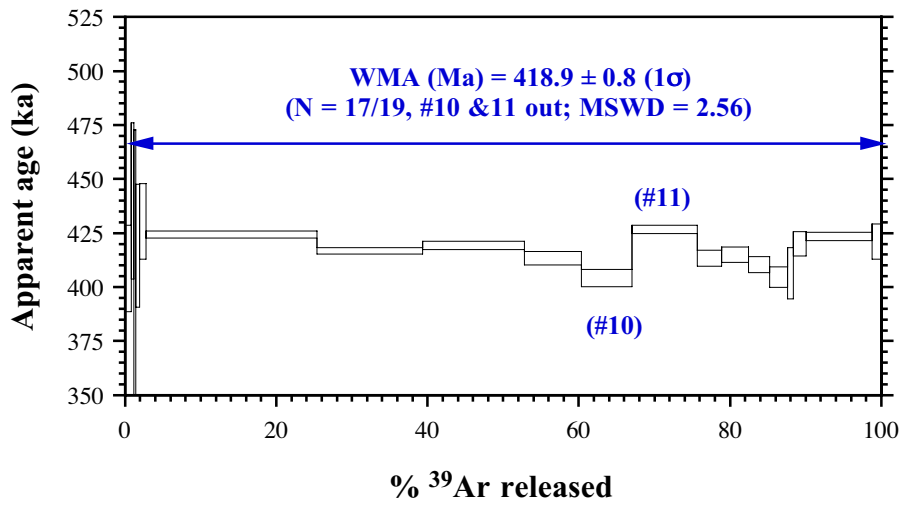
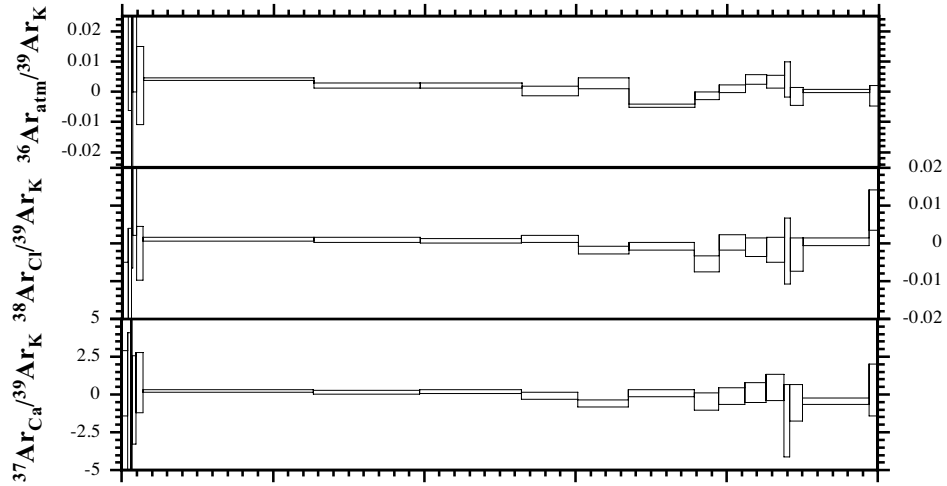
### N112.MS3 (SC-16-69 mus)



### N113.MS3 (SC-16-74 mus)

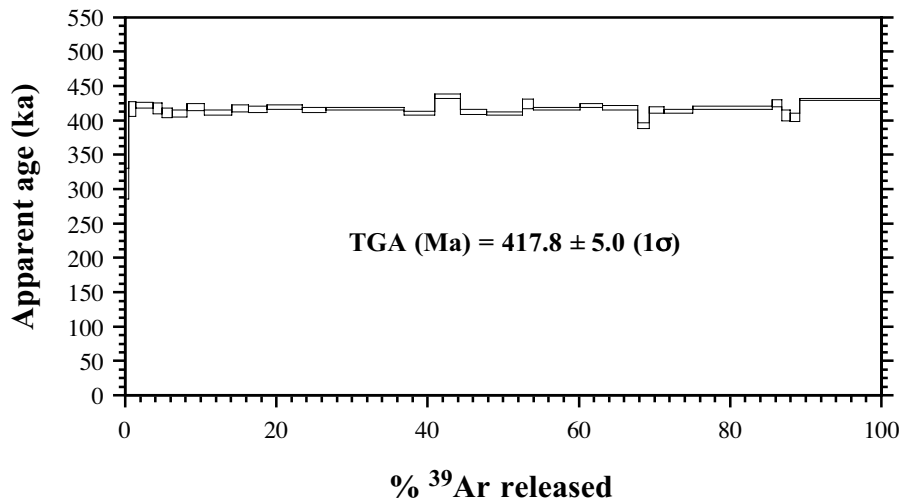
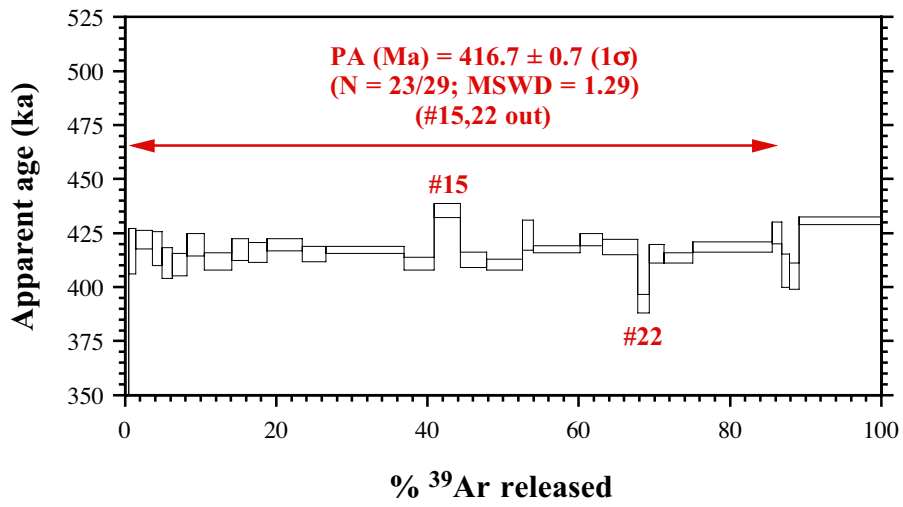
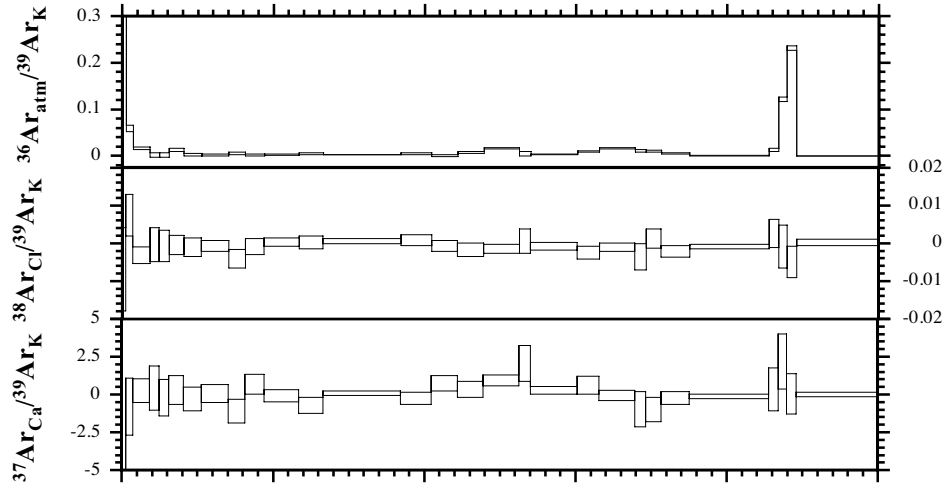


**N114.MS3 (SC-16-72 mus)**

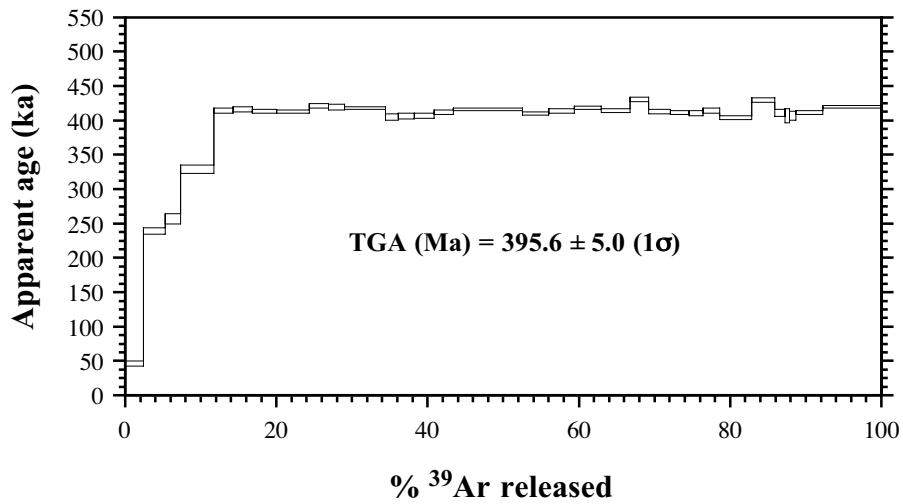
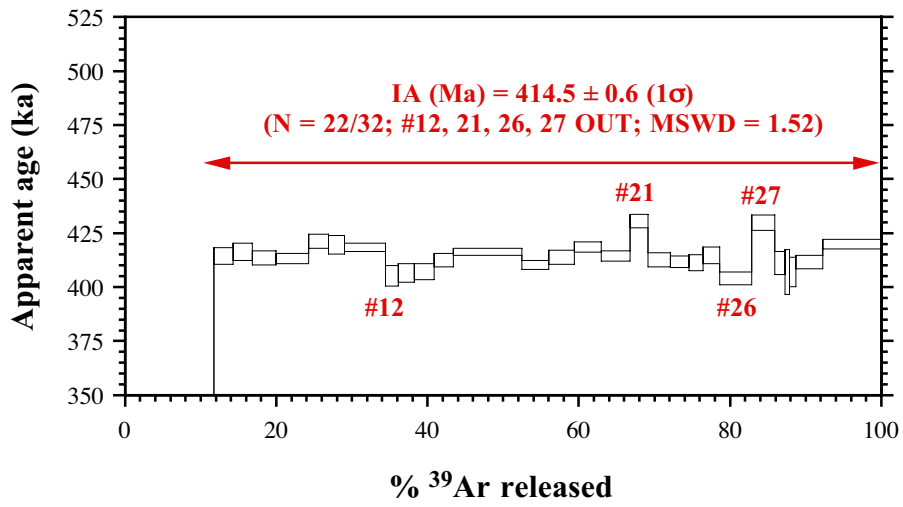
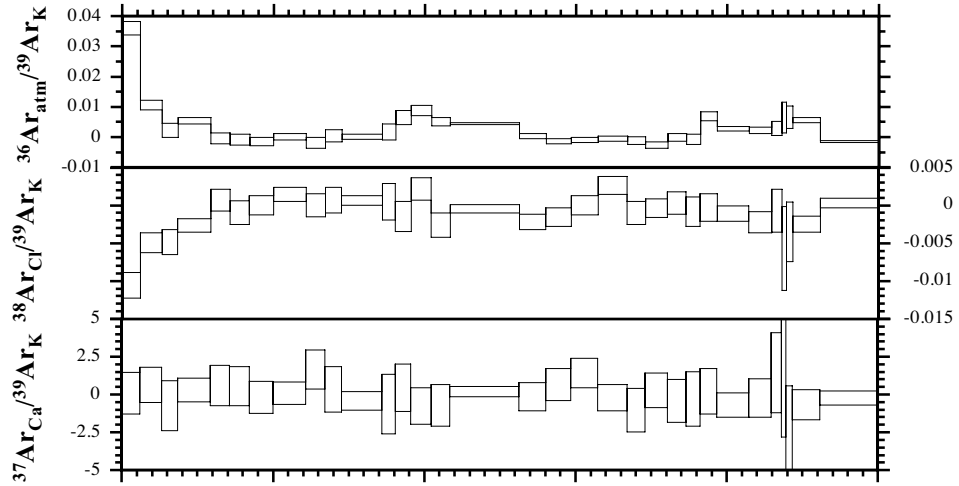




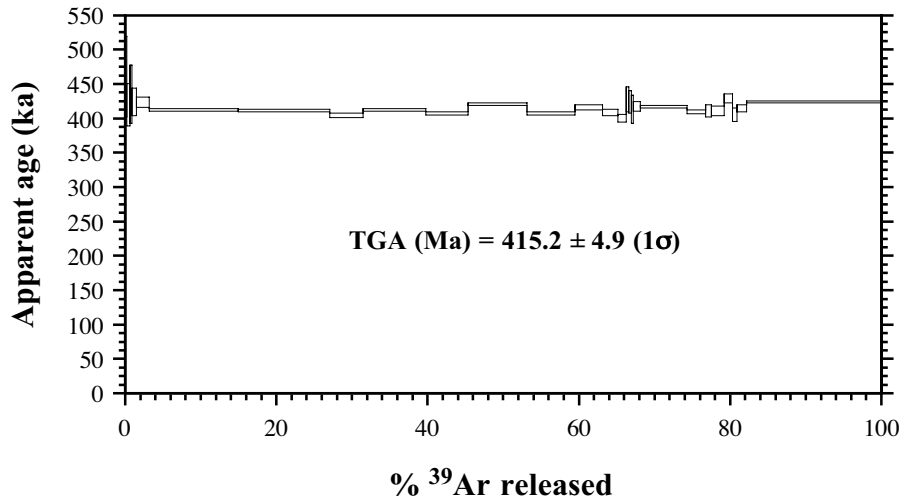
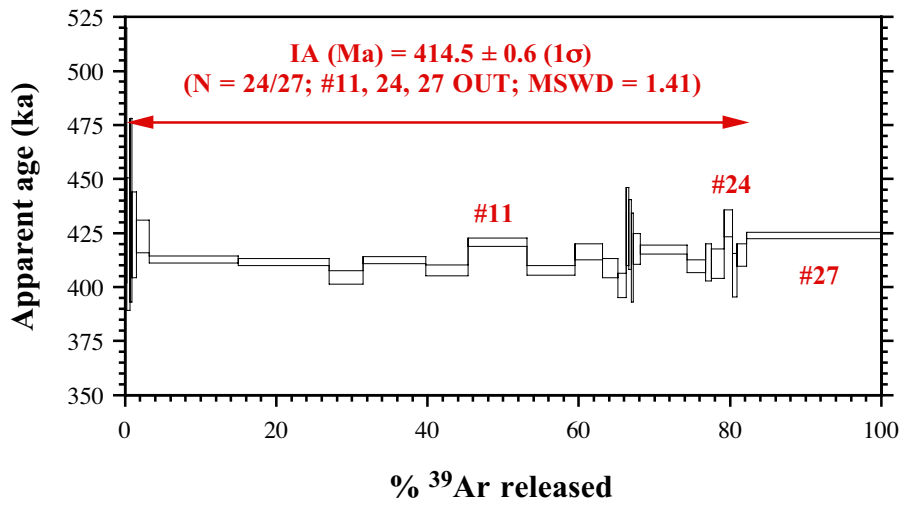
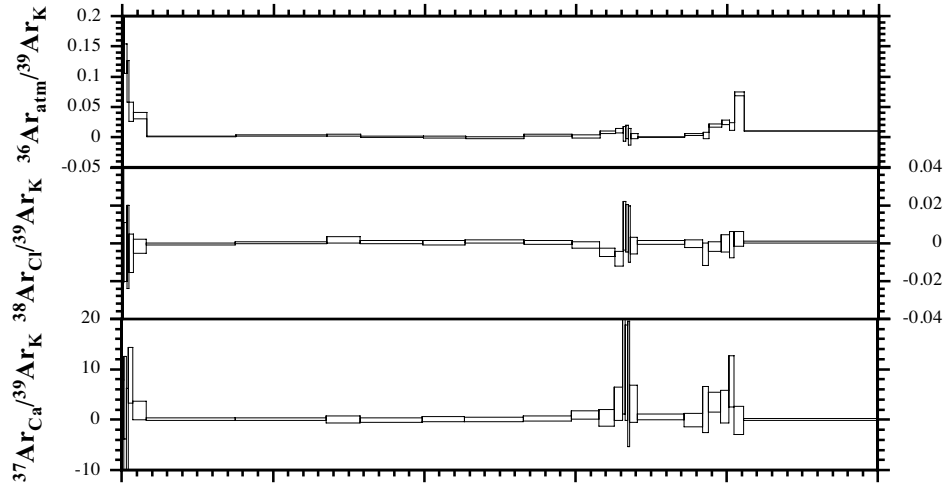
### N115.MS3 (SC-16-77 mus)



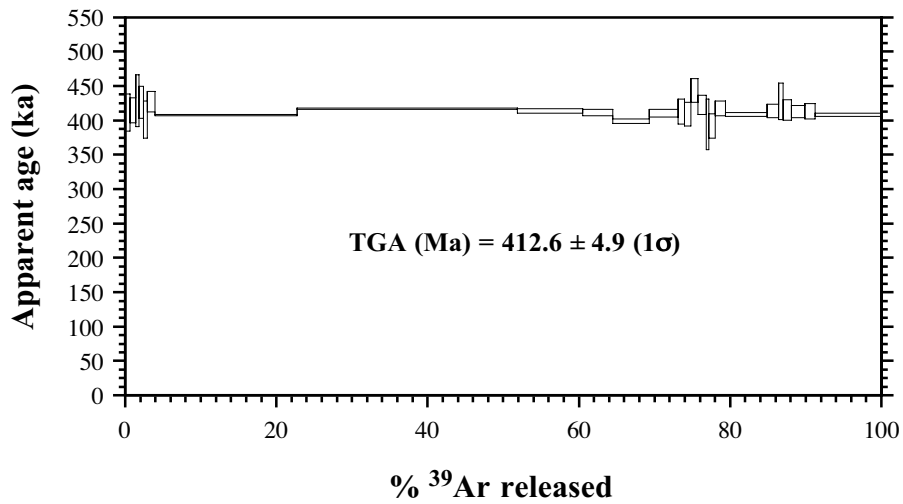
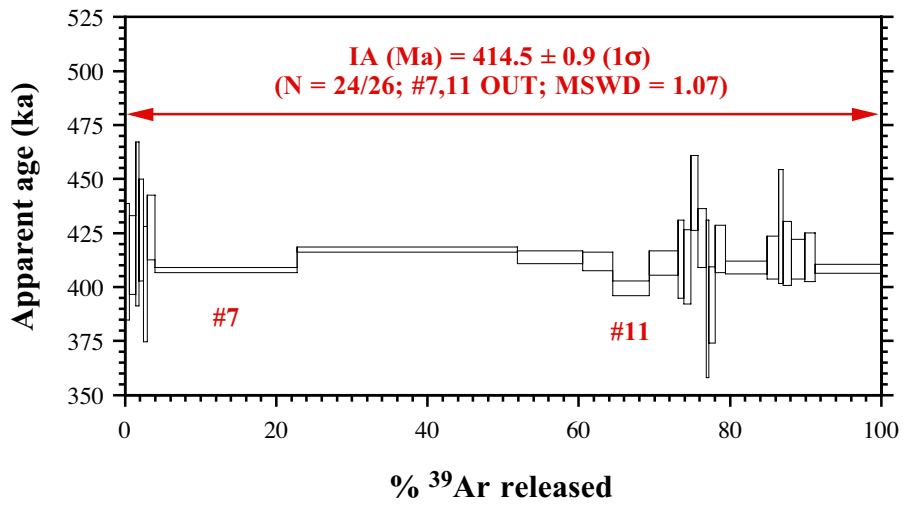
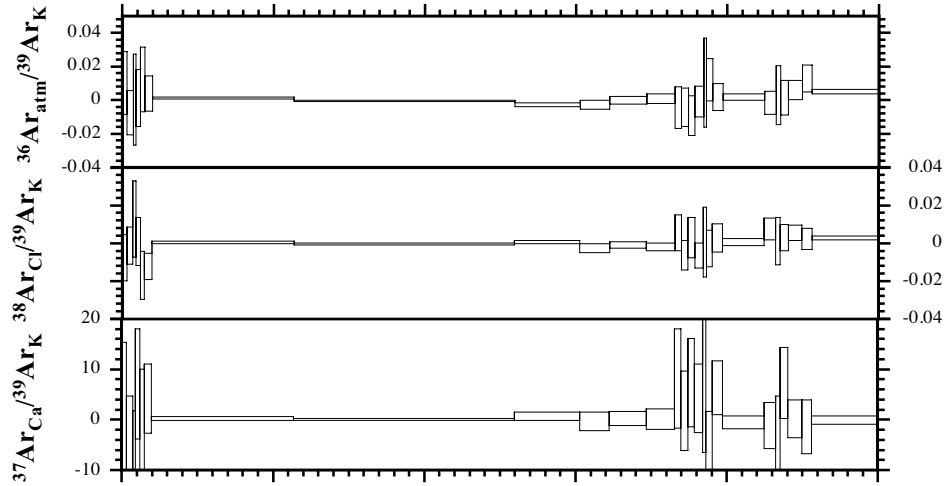
### N118.MS3 (SC-16-22 mus)



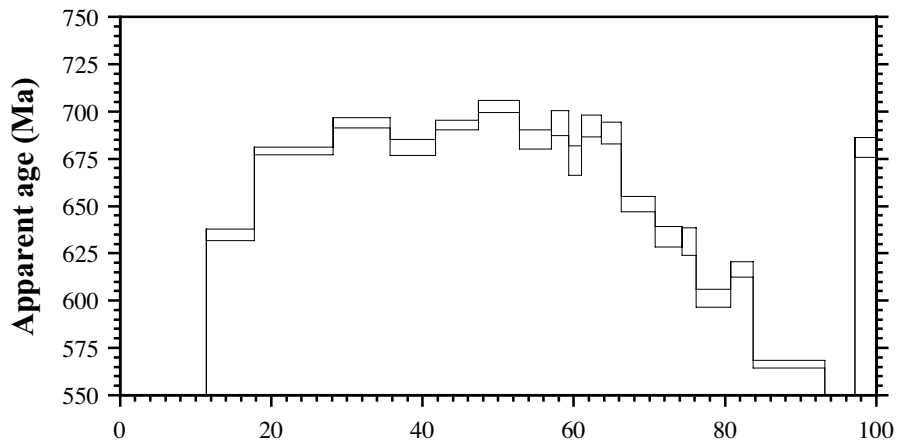
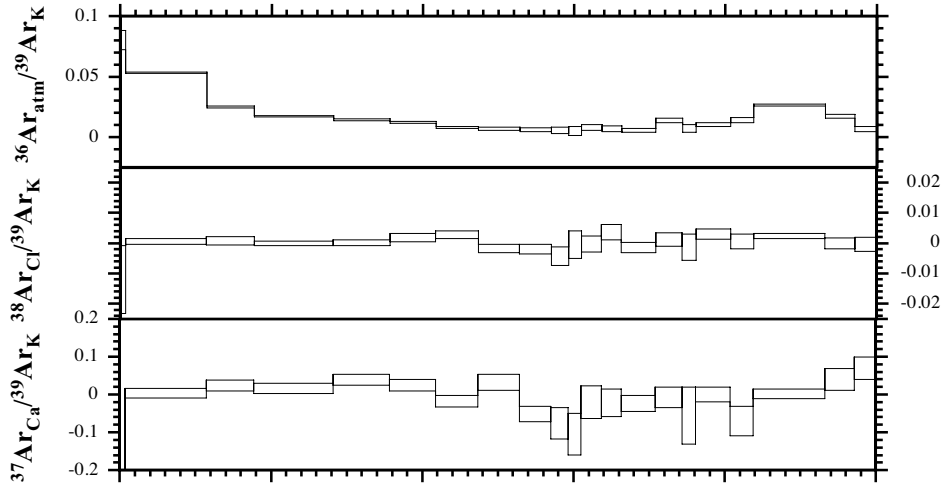
### N119.MS3 (SC-16-27 mus)



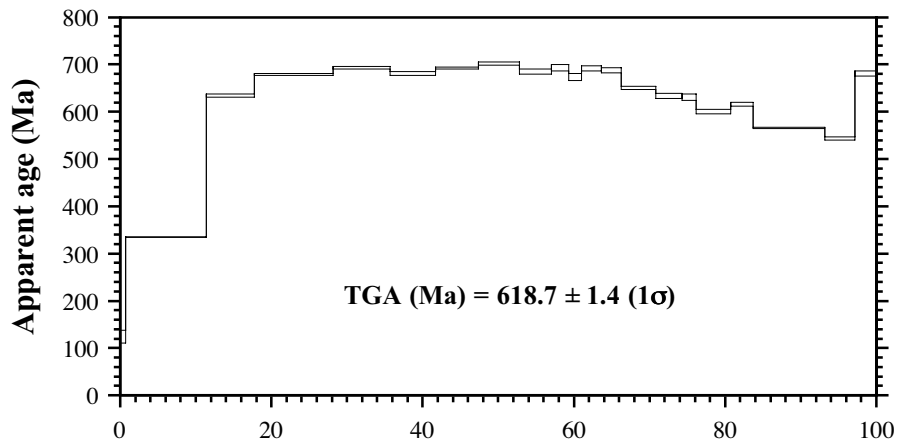
### N120.MS3 (SC-16-26 mus)



N175.MS2 (SC-16-98, bio)

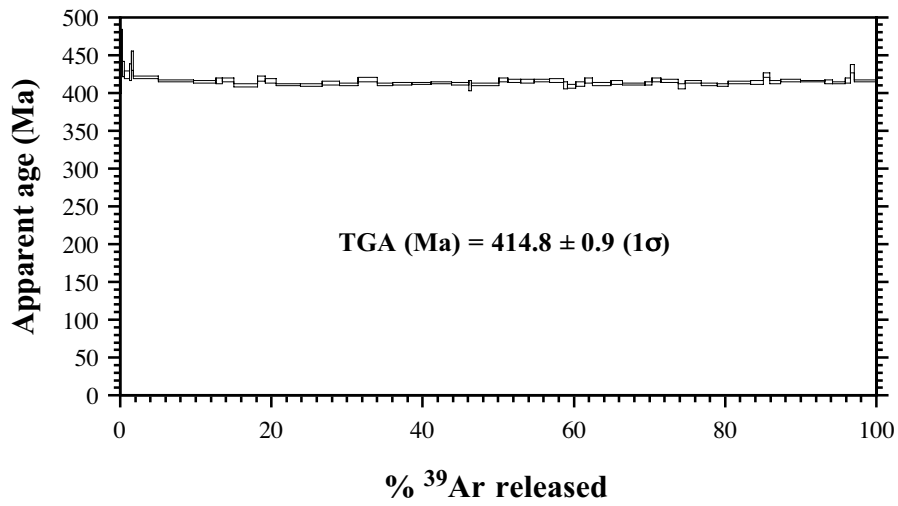
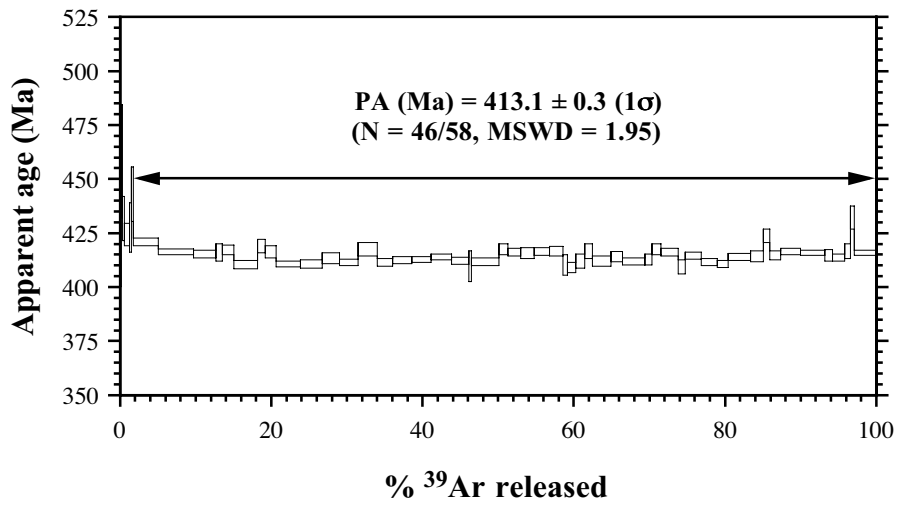
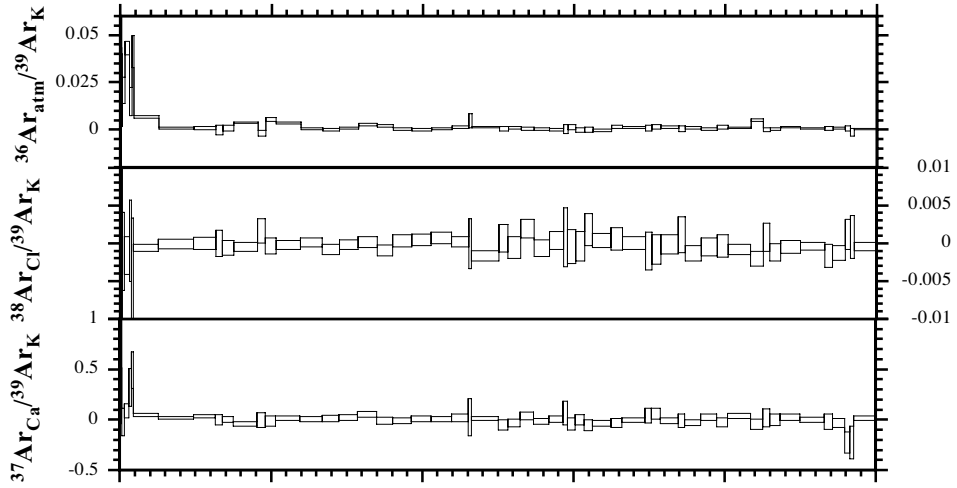


%  $^{39}\text{Ar}$  released

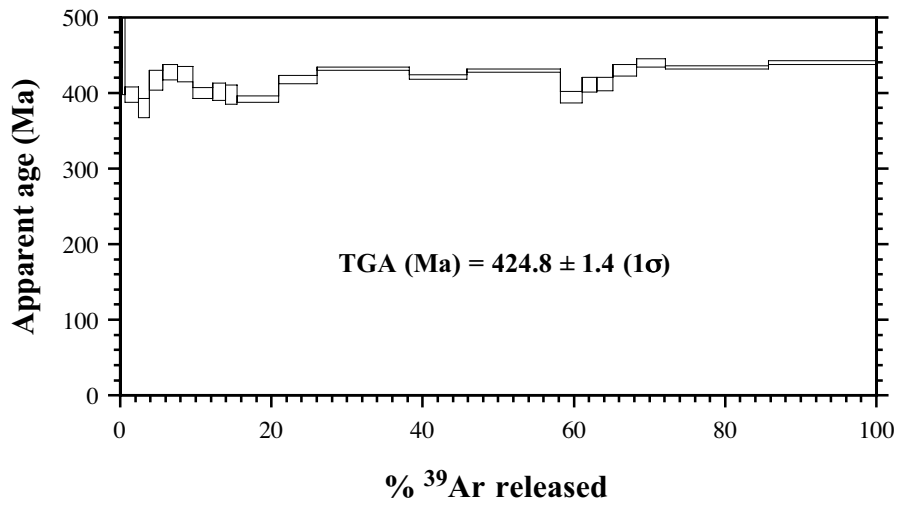
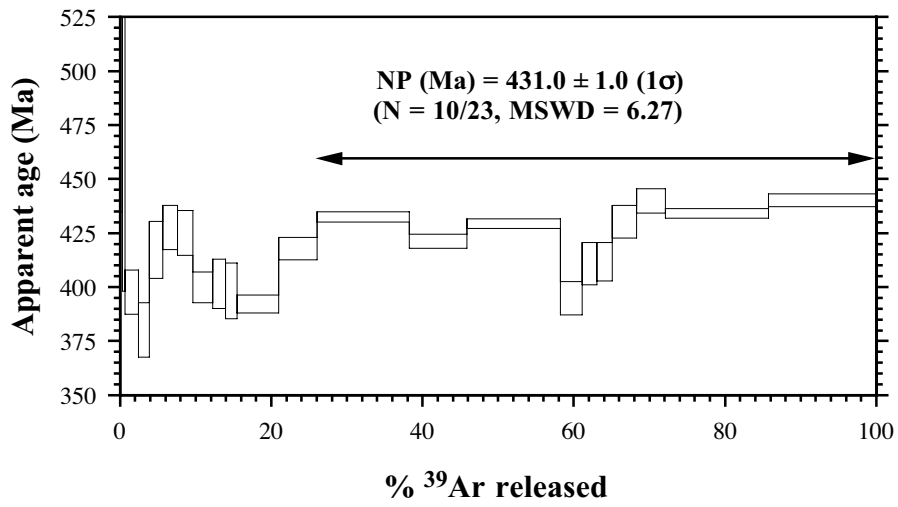
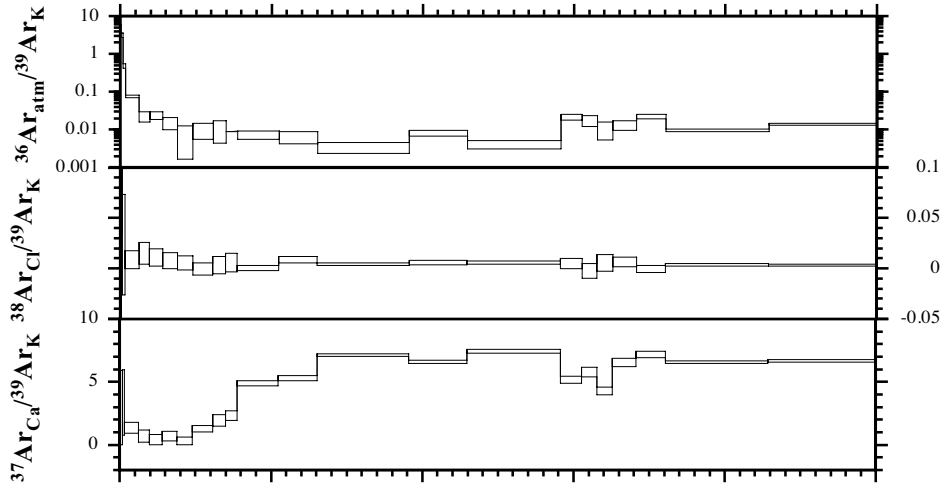


%  $^{39}\text{Ar}$  released

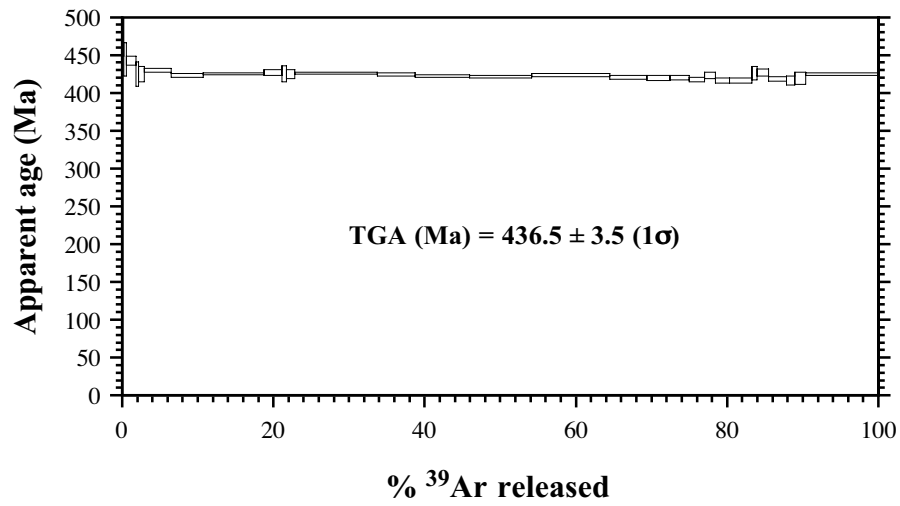
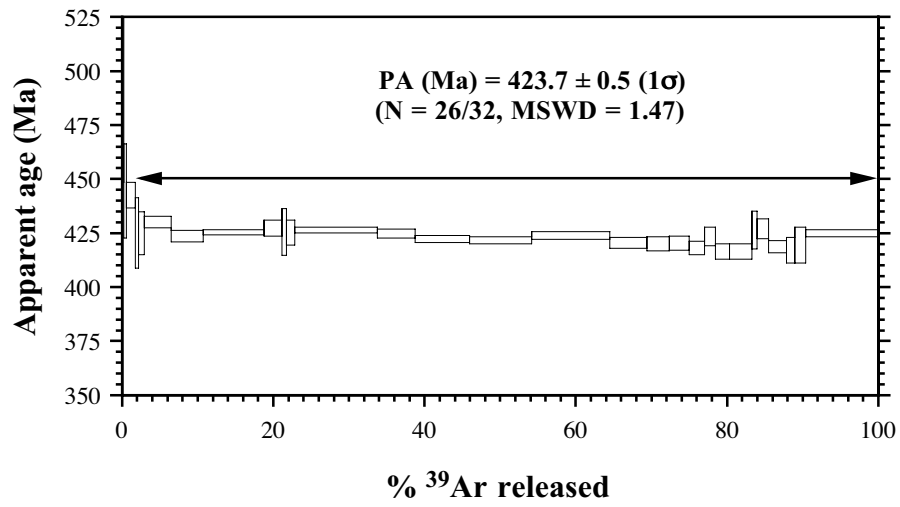
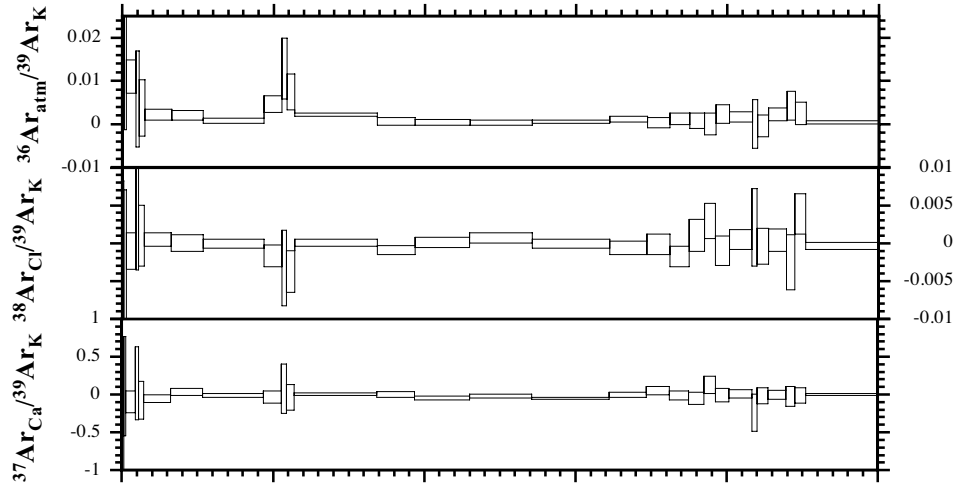
**N176.MS2 (SC-16-98, mus)**



N177.MS2 (SC-16-71, amph)

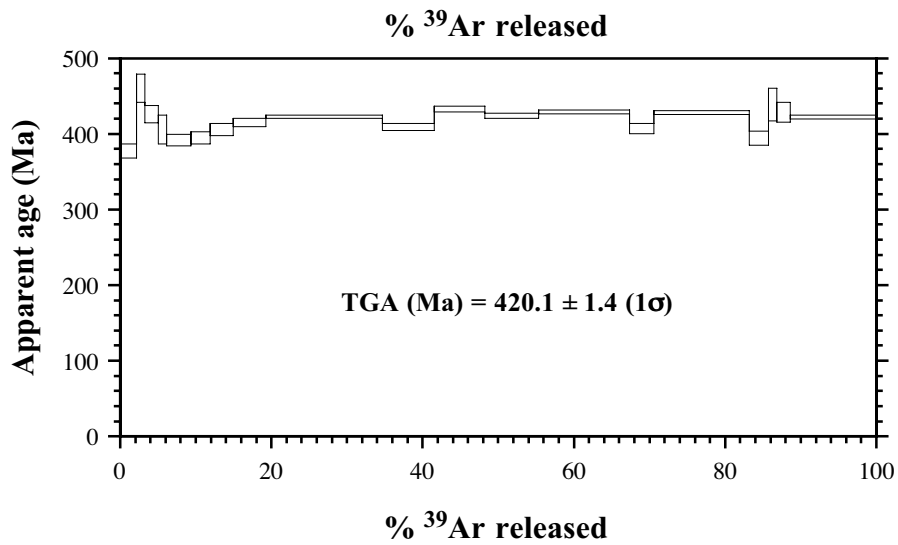
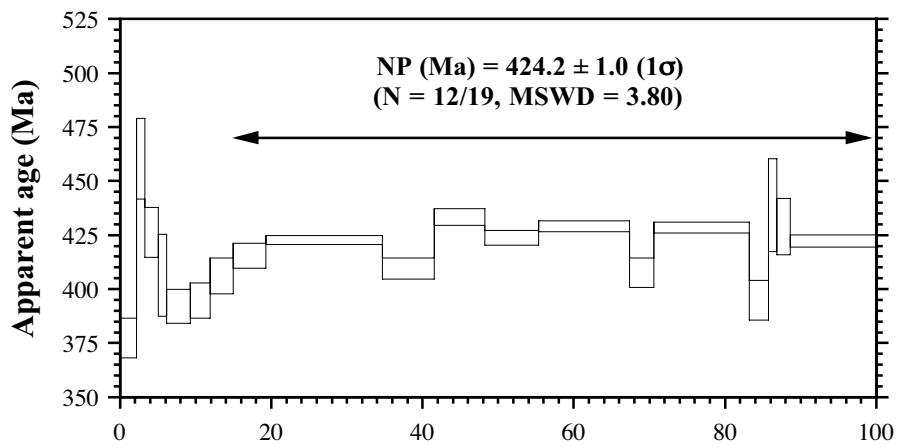
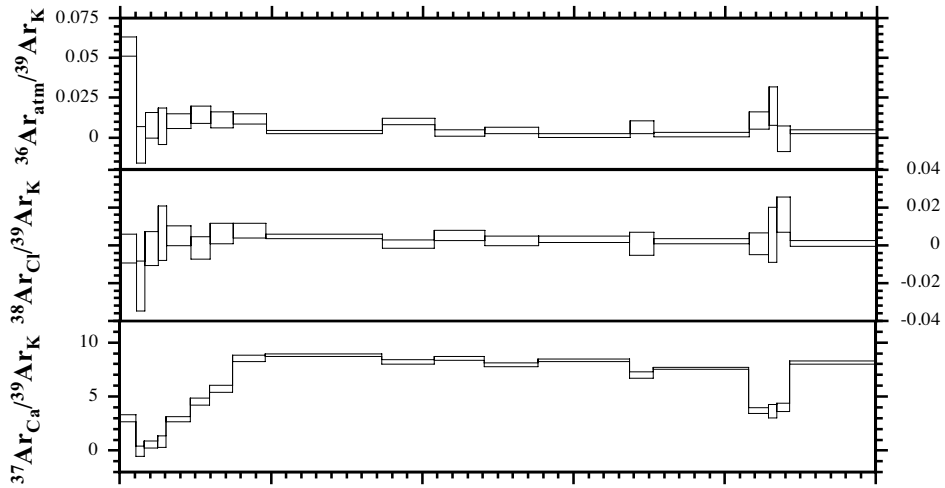


**N178.MS2 (SC-16-134, mus)**

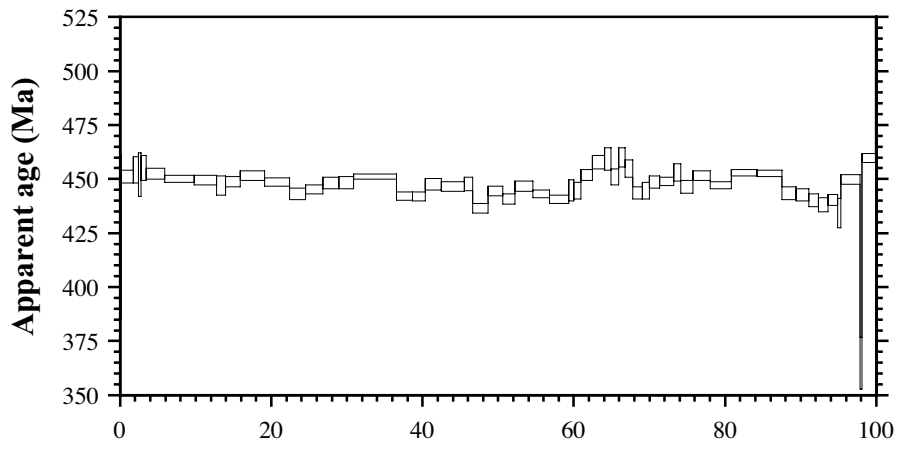
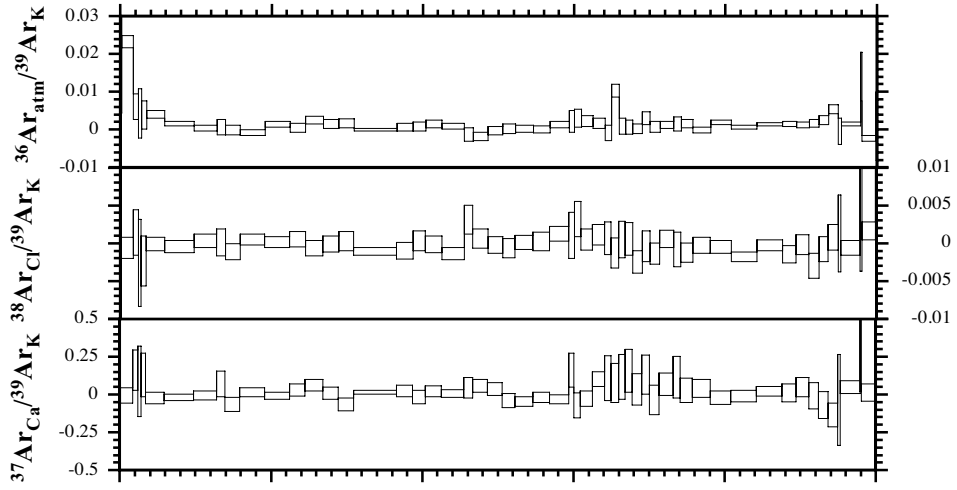




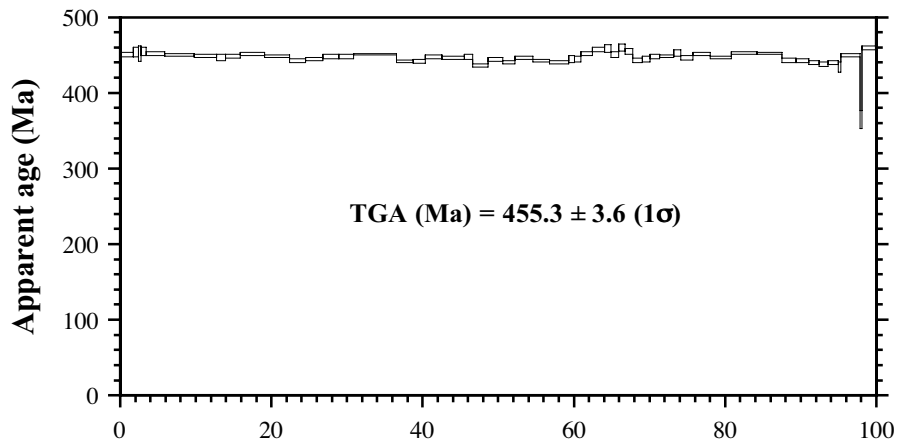
**N179.MS2 (SC-16-71, amph)**



N180.MS2 (SC-16-57, mus)

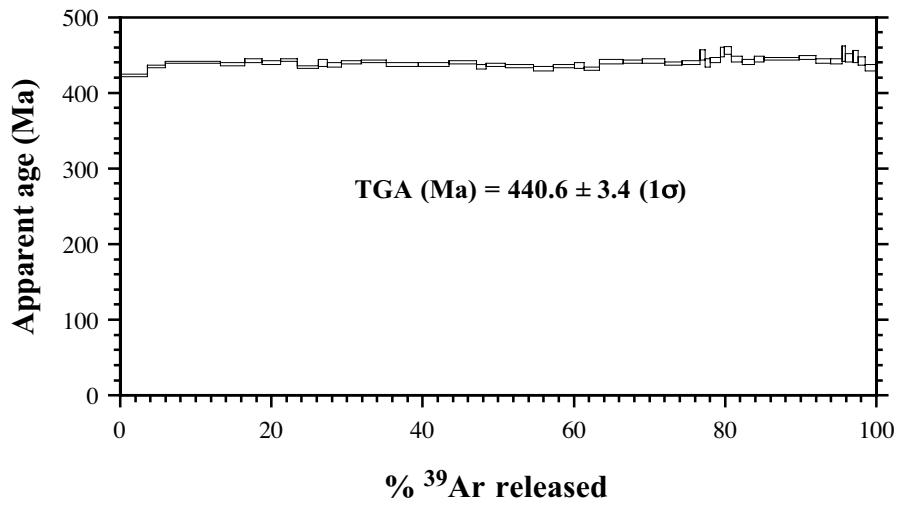
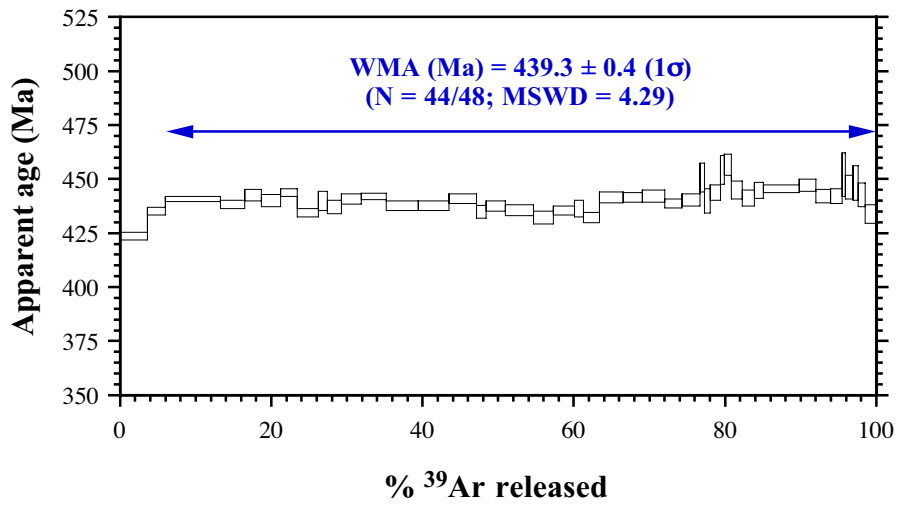
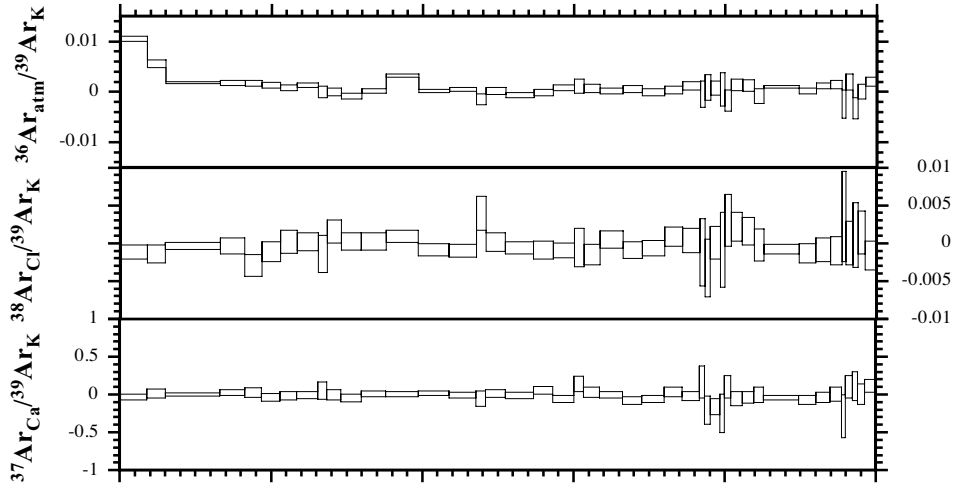


%  $^{39}\text{Ar}$  released

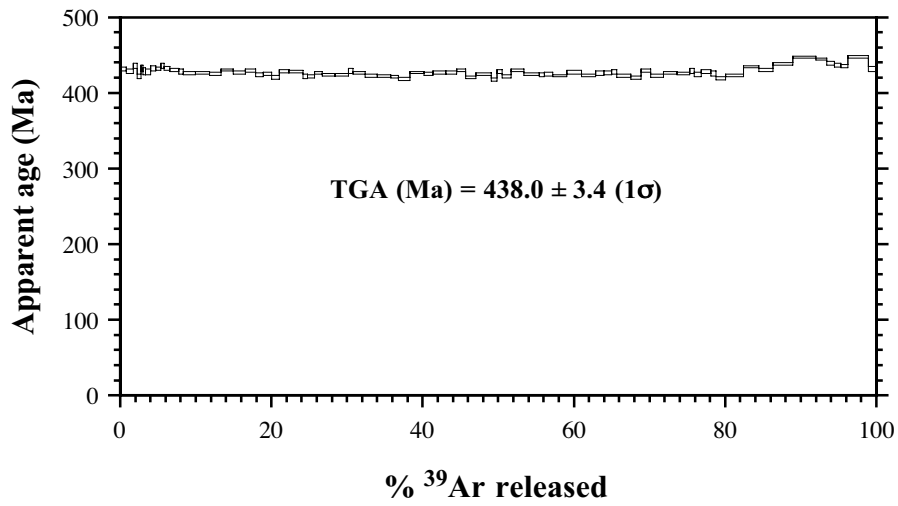
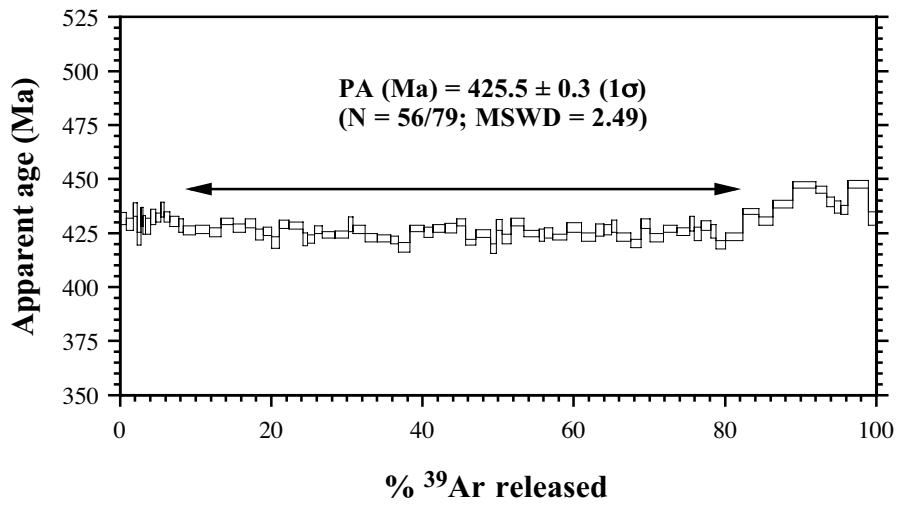
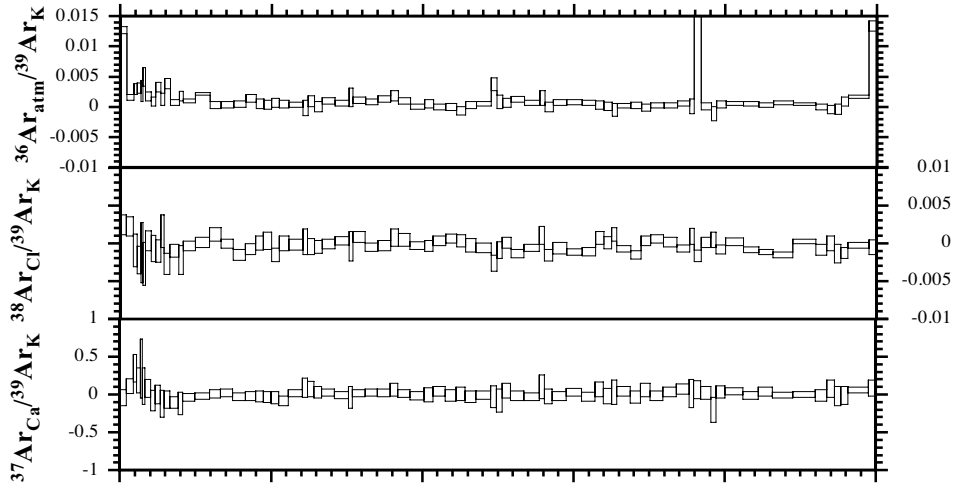


%  $^{39}\text{Ar}$  released

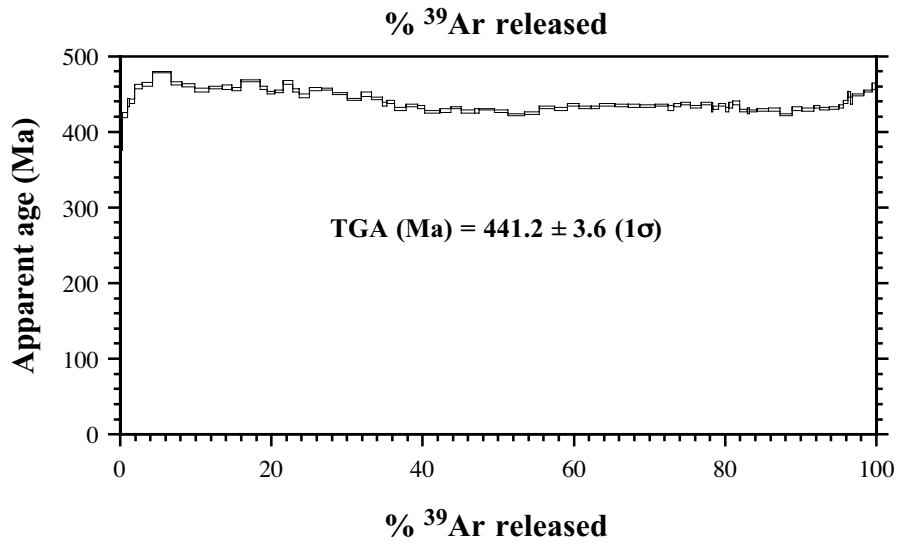
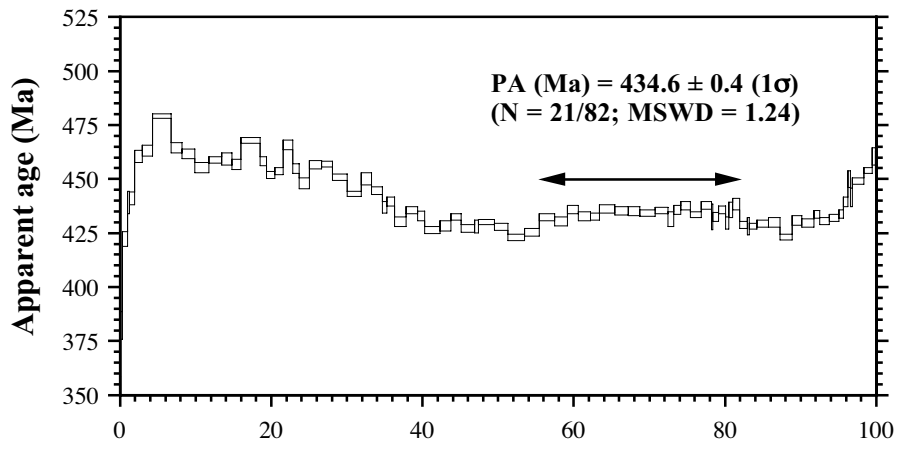
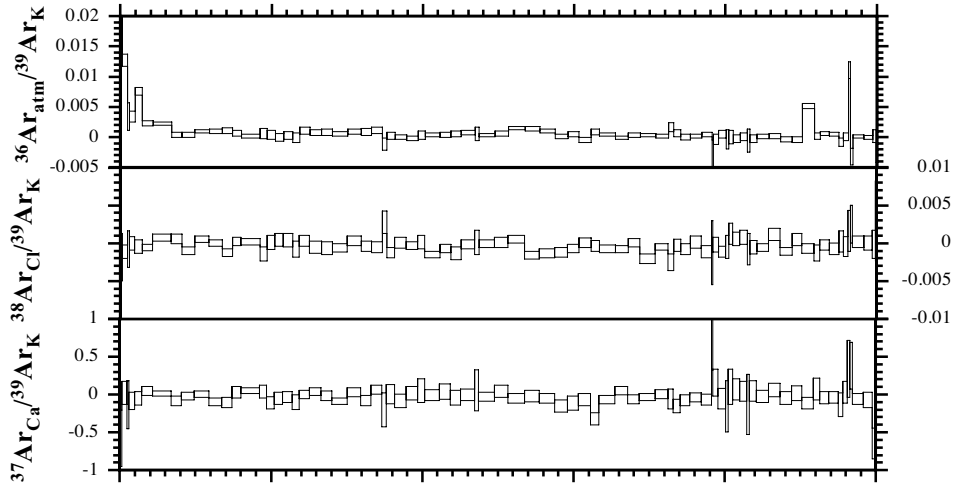
### N181.MS2 (SC-16-110 bio)



**N182.MS2 (SC-15-37 mus)**



**N183.MS2 (SC-15-16 mus)**



Step #	$^{39}\text{ArK}$ (V)	$^{36}\text{Ar}_{\text{amu}}/^{39}\text{ArK}$ ( $\pm 1\sigma$ )	$^{37}\text{ArCl}/^{39}\text{ArK}$ ( $\pm 1\sigma$ )	$^{38}\text{ArCl}/^{39}\text{ArK}$ ( $\pm 1\sigma$ )	$^{40}\text{Ar}^*$	$^{40}\text{Ar}^*/^{39}\text{ArK}$ ( $\pm 1\sigma$ )	Age (Ma) ( $\pm 1\sigma$ )
N77.MS3		J = .2646E-02 $\pm$ .5694E-05					
<b>Total</b>	1.15E-03	1.31E-03 $\pm$ 1.11E-04	1.96E-05 $\pm$ 4.54E-03	7.27E-05 $\pm$ 1.92E-04	99.6	98.02 $\pm$ 0.12	416.0 $\pm$ 0.9
N78.MS3		J = .2647E-02 $\pm$ .5698E-05					
<b>Total</b>	6.80E-04	1.72E-03 $\pm$ 4.43E-04	-5.39E-04 $\pm$ 7.96E-03	2.77E-04 $\pm$ 3.42E-04	99.5	97.21 $\pm$ 0.21	413.0 $\pm$ 1.1
N79.MS3		J = .2649E-02 $\pm$ .5705E-05					
<b>Total</b>	6.05E-04	3.06E-03 $\pm$ 4.32E-04	-2.04E-03 $\pm$ 1.52E-02	8.92E-04 $\pm$ 4.23E-04	99.1	98.08 $\pm$ 0.22	416.6 $\pm$ 1.2
N80.MS3		J = .2651E-02 $\pm$ .5714E-05					
<b>Total</b>	6.57E-04	4.24E-03 $\pm$ 2.20E-04	-7.06E-03 $\pm$ 1.15E-02	-6.21E-04 $\pm$ 3.40E-04	98.7	97.31 $\pm$ 0.16	414.0 $\pm$ 1.0
N81.MS3		J = .2653E-02 $\pm$ .5723E-05					
<b>Total</b>	3.76E-04	1.14E-03 $\pm$ 5.77E-04	2.49E-02 $\pm$ 1.84E-02	1.04E-03 $\pm$ 4.94E-04	99.7	97.94 $\pm$ 0.26	416.7 $\pm$ 1.3
N110.MS3		J = .2654E-02 $\pm$ .2259E-04					
<b>Total</b>	6.68E-04	1.86E-03 $\pm$ 5.24E-04	-6.94E-02 $\pm$ 7.35E-02	4.16E-04 $\pm$ 4.08E-04	99.5	99.58 $\pm$ 0.23	423.1 $\pm$ 3.3
N178.MS2		J = .2658E-02 $\pm$ .5742E-05					
<b>Total</b>	1.19E-03	1.48E-03 $\pm$ 2.38E-04	-6.39E-03 $\pm$ 9.85E-03	-1.49E-04 $\pm$ 2.21E-04	99.6	99.67 $\pm$ 0.14	423.9 $\pm$ 1.0
N176.MS2		J = .2660E-02 $\pm$ .5751E-05					
<b>Total</b>	2.91E-03	1.98E-03 $\pm$ 1.20E-04	7.77E-03 $\pm$ 5.01E-03	-2.03E-04 $\pm$ 1.48E-04	99.4	97.19 $\pm$ 0.08	414.8 $\pm$ 0.9
N175.MS2		J = .2662E-02 $\pm$ .5760E-05					
<b>Total</b>	8.65E-04	1.86E-02 $\pm$ 2.85E-04	-3.04E-03 $\pm$ 4.90E-03	4.99E-04 $\pm$ 3.54E-04	96.6	153.70 $\pm$ 0.23	618.7 $\pm$ 1.4
N183.MS2		J = .2663E-02 $\pm$ .2274E-04					
<b>Total</b>	4.94E-03	9.93E-04 $\pm$ 5.53E-05	-2.57E-02 $\pm$ 1.00E-02	-2.88E-04 $\pm$ 8.25E-05	99.7	104.00 $\pm$ 0.06	441.2 $\pm$ 3.4
N182.MS2		J = .2746E-02 $\pm$ .2417E-04					
<b>Total</b>	4.46E-03	1.34E-03 $\pm$ 6.53E-05	1.12E-02 $\pm$ 8.71E-03	-2.90E-04 $\pm$ 8.83E-05	99.6	100.10 $\pm$ 0.06	438.0 $\pm$ 3.4

N1181.MS2	J = .2666E-02 ± .2279E-04																			
<b>Total</b>	1,83E-03	1,91E-03	±	1,11E-04	-1,33E-02	±	9,13E-03	1,87E-03	±	2,08E-04	99,5	103,80	±	0,11	440,6	±	3,4			
N1180.MS2	J = .2746E-02 ± .2417E-04																			
<b>Total</b>	2,56E-03	1,57E-03	±	1,54E-04	1,70E-02	±	7,66E-03	-1,46E-04	±	1,70E-04	99,6	104,50	±	0,09	455,3	±	3,6			
N1118.MS3	J = .2666E-02 ± .3516E-04																			
<b>Total</b>	1,17E-03	2,71E-03	±	2,20E-04	3,62E-02	±	1,94E-01	-8,63E-04	±	2,24E-04	99,1	91,95	±	0,18	395,6	±	4,7			
N1120.MS3	J = .2661E-02 ± .3507E-04																			
<b>Total</b>	4,55E-04	9,73E-04	±	5,37E-04	4,12E-01	±	3,66E-01	2,34E-04	±	4,34E-04	99,7	96,57	±	0,24	412,6	±	4,9			
N1119.MS3	J = .2660E-02 ± .3504E-04																			
<b>Total</b>	1,06E-03	7,64E-03	±	3,62E-04	5,65E-01	±	1,71E-01	2,38E-04	±	2,94E-04	97,7	97,29	±	0,17	415,2	±	4,9			
N1109.MS3	J = .2657E-02 ± .9221E-05																			
<b>Total</b>	5,94E-04	3,30E-03	±	3,93E-04	-1,47E-01	±	9,62E-02	-2,46E-04	±	3,86E-04	99,0	98,51	±	0,21	419,5	±	1,5			
N1115.MS3	J = .2655E-02 ± .3495E-04																			
<b>Total</b>	9,06E-04	1,33E-02	±	3,16E-04	4,67E-02	±	9,38E-02	-5,63E-04	±	3,00E-04	96,2	98,16	±	0,17	417,8	±	5,0			
N1116.MS3	J = .2654E-02 ± .3494E-04																			
<b>Total</b>	9,94E-04	3,47E-03	±	3,09E-04	1,83E-02	±	8,76E-02	2,91E-04	±	3,07E-04	99,0	98,98	±	0,16	420,8	±	5,0			
N1113.MS3	J = .2654E-02 ± .3494E-04																			
<b>Total</b>	1,57E-03	1,36E-03	±	2,05E-04	8,56E-02	±	4,92E-02	2,81E-04	±	1,71E-04	99,6	100,10	±	0,12	425,2	±	5,0			
N1114.MS3	J = .2654E-02 ± .3494E-04																			
<b>Total</b>	6,70E-04	2,79E-03	±	3,84E-04	1,74E-02	±	8,00E-02	2,05E-04	±	3,30E-04	99,2	98,47	±	0,21	418,8	±	5,0			
N1107.MS3	J = .2654E-02 ± .2259E-04																			
<b>Total</b>	8,13E-04	5,18E-03	±	2,28E-04	-1,31E-01	±	5,36E-02	-3,83E-04	±	2,61E-04	98,5	99,68	±	0,18	423,5	±	3,3			

N112.MS3	J = .2656E-02 ± .2729E-04																			
<b>Total</b>	7,54E-04	1,60E-03	±	2,85E-04	-8,42E-02	±	7,40E-02	1,48E-04	±	2,99E-04	99,5	101,80	±	0,17	431,7	±	4,0			
N105.MS3	J = .2658E-02 ± .2265E-04																			
<b>Total</b>	2,77E-03	7,17E-03	±	1,11E-04	-5,33E-02	±	2,18E-02	2,98E-04	±	1,47E-04	97,9	96,98	±	0,08	413,7	±	3,2			
N106.MS3	J = .2660E-02 ± .2269E-04																			
<b>Total</b>	6,26E-04	2,87E-03	±	3,66E-04	-1,19E-01	±	6,82E-02	-2,61E-04	±	3,75E-04	99,1	98,13	±	0,21	418,5	±	3,3			
N111.MS3	J = .2663E-02 ± .2274E-04																			
<b>Total</b>	6,17E-04	2,17E-03	±	3,36E-04	-1,99E-01	±	1,09E-01	-9,56E-04	±	4,48E-04	99,4	104,00	±	0,20	440,9	±	3,4			
N108.MS3	J = .2666E-02 ± .2278E-04																			
<b>Total</b>	1,97E-03	2,05E-03	±	2,76E-04	-3,68E-02	±	4,05E-02	-1,45E-04	±	1,82E-04	99,4	97,56	±	0,13	417,0	±	3,2			
N177.MS2	J = .2673E-02 ± .5805E-05																			
<b>Total</b>	3,20E-04	2,20E-02	±	5,50E-04	5,73E+00	±	4,51E-02	5,26E-03	±	7,50E-04	93,9	99,32	±	0,29	424,8	±	1,4			
N179.MS2	J = .2673E-02 ± .5805E-05																			
<b>Total</b>	3,34E-04	6,34E-03	±	6,03E-04	7,25E+00	±	4,64E-02	2,99E-03	±	7,34E-04	98,1	98,10	±	0,29	420,1	±	1,4			



Step #	<sup>39</sup> ArK (V)	<sup>36</sup> Ar <sub>atm</sub> / <sup>39</sup> ArK (± 1σ)	<sup>37</sup> Ar <sub>atm</sub> / <sup>39</sup> ArK (± 1σ)	<sup>38</sup> Ar <sub>atm</sub> / <sup>39</sup> ArK (± 1σ)	% <sup>40</sup> Ar*	<sup>40</sup> Ar*/ <sup>39</sup> ArK (± 1σ)	Age (Ma) (± 1σ)			
N77.MS3										
		J = .2646E-02 ± .5694E-05								
# 1	5.66E-06	6.62E-02 ±	6.62E-03	-8.71E-02 ±	2.27E-01	-2.86E-03 ±	7.59E-03	81.5	86.24 ± 2.75	370.8 ± 10.7
# 2	4.69E-06	-3.64E-03 ±	8.11E-03	-1.80E-02 ±	2.80E-01	2.35E-03 ±	8.91E-03	101.0	108.50 ± 3.54	455.4 ± 13.1
# 3	2.15E-05	1.75E-02 ±	1.69E-03	-3.59E-02 ±	5.94E-02	-1.35E-04 ±	2.18E-03	95.0	98.72 ± 0.98	418.6 ± 3.7
# 4	1.30E-04	2.17E-03 ±	2.90E-04	7.21E-03 ±	1.03E-02	-1.28E-04 ±	4.49E-04	99.4	98.63 ± 0.36	418.3 ± 1.4
# 5	1.22E-04	-8.95E-05 ±	2.97E-04	-7.79E-03 ±	1.06E-02	1.57E-04 ±	4.63E-04	100.0	98.26 ± 0.32	416.9 ± 1.2
# 6	1.24E-04	-1.14E-04 ±	2.93E-04	5.32E-03 ±	1.07E-02	-6.93E-04 ±	5.61E-04	100.0	98.66 ± 0.28	418.4 ± 1.1
# 7	1.53E-04	8.10E-04 ±	2.65E-04	1.10E-02 ±	9.14E-03	6.49E-04 ±	3.59E-04	99.8	97.51 ± 0.41	414.1 ± 1.6
# 8	5.15E-05	1.38E-03 ±	7.21E-04	1.24E-02 ±	2.53E-02	-1.06E-04 ±	1.15E-03	99.6	97.70 ± 0.46	414.8 ± 1.7
# 9	1.04E-04	4.04E-04 ±	2.42E-04	9.29E-03 ±	1.22E-02	4.62E-04 ±	4.97E-04	99.9	96.79 ± 0.32	411.3 ± 1.2
# 10	9.10E-05	2.49E-03 ±	2.72E-04	-9.06E-03 ±	1.44E-02	8.27E-04 ±	6.63E-04	99.3	97.55 ± 0.47	414.2 ± 1.8
# 11	1.96E-05	-3.98E-03 ±	1.15E-03	-7.45E-02 ±	6.34E-02	-4.77E-03 ±	2.32E-03	101.2	98.75 ± 1.07	418.8 ± 4.1
# 12	2.50E-05	-1.38E-03 ±	8.88E-04	-1.51E-02 ±	5.42E-02	7.70E-04 ±	1.84E-03	100.4	99.16 ± 0.74	420.3 ± 2.8
# 13	1.50E-04	5.15E-04 ±	1.76E-04	-1.25E-03 ±	8.41E-03	-6.48E-05 ±	5.69E-04	99.9	98.48 ± 0.37	417.8 ± 1.4
# 14	1.66E-05	3.30E-03 ±	1.65E-03	-1.14E-01 ±	7.81E-02	-5.92E-04 ±	2.52E-03	99.0	98.15 ± 1.04	416.5 ± 3.9
# 15	1.83E-05	-1.32E-04 ±	1.38E-03	1.94E-02 ±	7.06E-02	3.38E-03 ±	2.46E-03	100.0	99.48 ± 1.07	421.5 ± 4.0
# 16	1.11E-04	3.08E-04 ±	2.25E-04	1.68E-02 ±	1.16E-02	-9.17E-05 ±	5.28E-04	99.9	97.41 ± 0.36	413.7 ± 1.4
<b>Total</b>	1.15E-03	1.31E-03 ±	1.11E-04	1.96E-05 ±	4.54E-03	7.27E-05 ±	1.92E-04	99.6	98.02 ± 0.12	416.0 ± 0.9
N78.MS3										
		J = 2647E-02 ± .5698E-05								
# 1	2.27E-06	6.16E-02 ±	2.78E-02	-2.54E-01 ±	4.58E-01	-4.08E-03 ±	1.78E-02	66.1	35.54 ± 8.49	162.2 ± 37.1
# 2	7.09E-06	1.61E-02 ±	8.80E-03	1.15E-02 ±	1.44E-01	8.52E-03 ±	5.83E-03	93.4	66.84 ± 2.92	293.9 ± 11.8
# 3	5.47E-06	-1.18E-03 ±	1.16E-02	1.71E-01 ±	2.02E-01	-6.14E-03 ±	7.43E-03	100.4	89.72 ± 4.10	384.4 ± 15.8
# 4	8.87E-06	2.32E-03 ±	6.96E-03	1.29E-01 ±	1.26E-01	-3.81E-04 ±	5.15E-03	99.3	99.43 ± 2.65	421.5 ± 10.0
# 5	9.87E-06	1.60E-04 ±	6.37E-03	8.57E-02 ±	1.08E-01	-6.03E-04 ±	4.61E-03	100.0	102.00 ± 2.39	431.3 ± 9.0
# 6	8.79E-06	-7.72E-03 ±	7.32E-03	8.93E-02 ±	1.26E-01	-7.19E-03 ±	4.72E-03	102.2	103.70 ± 2.84	437.6 ± 10.6
# 7	1.35E-04	2.10E-03 ±	4.75E-04	8.70E-03 ±	9.26E-03	3.38E-04 ±	5.38E-04	99.4	100.40 ± 0.51	425.1 ± 1.9
# 8	7.58E-05	3.47E-03 ±	8.30E-04	-1.40E-02 ±	1.36E-02	5.45E-04 ±	7.03E-04	99.0	96.94 ± 0.50	412.0 ± 1.9
# 9	3.16E-05	6.39E-03 ±	2.01E-03	-5.60E-02 ±	3.23E-02	-1.97E-03 ±	1.67E-03	98.1	97.04 ± 0.89	412.4 ± 3.4
# 11	1.36E-05	-7.99E-03 ±	4.52E-03	1.36E-01 ±	8.43E-02	9.23E-04 ±	3.45E-03	102.4	99.44 ± 1.65	421.5 ± 6.3
# 12	1.97E-05	-1.65E-03 ±	3.19E-03	-8.47E-03 ±	5.85E-02	-1.40E-03 ±	2.62E-03	100.5	98.71 ± 1.51	418.7 ± 5.7
# 13	6.90E-05	-2.09E-04 ±	9.05E-04	9.71E-03 ±	1.65E-02	4.68E-04 ±	6.61E-04	100.1	97.90 ± 0.54	415.7 ± 2.1
# 14	4.26E-05	-2.80E-04 ±	1.46E-03	6.45E-03 ±	2.83E-02	-6.36E-05 ±	1.04E-03	100.1	97.05 ± 0.72	412.5 ± 2.8
# 15	3.46E-05	4.08E-04 ±	1.82E-03	5.12E-03 ±	3.50E-02	-6.13E-05 ±	1.45E-03	99.9	97.13 ± 0.85	412.7 ± 3.2
# 16	4.80E-05	4.23E-04 ±	1.30E-03	-2.23E-02 ±	2.23E-02	9.10E-05 ±	1.14E-03	99.9	99.29 ± 0.63	421.0 ± 2.4
# 17	3.46E-05	6.98E-04 ±	1.81E-03	-1.18E-02 ±	3.19E-02	-2.67E-04 ±	1.35E-03	99.8	97.30 ± 0.80	413.4 ± 3.0
# 18	1.90E-05	3.08E-03 ±	3.37E-03	-8.56E-02 ±	5.63E-02	-1.82E-04 ±	2.23E-03	99.1	95.46 ± 1.42	406.4 ± 5.4
# 19	1.43E-05	4.90E-03 ±	4.38E-03	-3.98E-02 ±	7.92E-02	-5.44E-05 ±	2.88E-03	98.5	94.91 ± 1.87	404.3 ± 7.1
# 20	3.53E-05	2.15E-03 ±	1.74E-03	-1.81E-02 ±	3.30E-02	1.71E-03 ±	1.68E-03	99.3	95.50 ± 0.88	406.6 ± 3.3
# 21	3.79E-05	1.78E-03 ±	1.63E-03	-5.73E-02 ±	3.01E-02	8.51E-04 ±	1.56E-03	99.5	97.12 ± 0.82	412.7 ± 3.1
# 22	4.42E-06	1.46E-02 ±	1.45E-02	-1.70E-01 ±	2.76E-01	1.55E-03 ±	9.48E-03	93.0	57.54 ± 4.64	255.7 ± 19.2
# 23	4.12E-06	3.67E-04 ±	1.51E-02	3.57E-01 ±	2.87E-01	2.18E-02 ±	1.05E-02	99.9	85.69 ± 5.34	368.8 ± 20.8
# 24	1.79E-05	-4.65E-04 ±	3.52E-03	5.77E-02 ±	6.79E-02	1.47E-03 ±	2.23E-03	100.1	98.12 ± 1.39	416.5 ± 5.3
<b>Total</b>	6.80E-04	1.72E-03 ±	4.43E-04	-5.39E-04 ±	7.96E-03	2.77E-04 ±	3.42E-04	99.5	97.21 ± 0.21	413.0 ± 1.1
N79.MS3										
		J = 2649E-02 ± .5705E-05								
# 1	1.19E-07	-2.94E-02 ±	3.44E-01	9.15E+00 ±	1.38E+01	2.44E-02 ±	3.13E-01	112.8	76.27 ± 124.60	331.9 ± 495.4
# 2	6.92E-06	8.32E-02 ±	6.38E-03	-2.76E-01 ±	2.11E-01	3.84E-03 ±	6.04E-03	77.3	83.82 ± 2.34	361.7 ± 9.1
# 3	7.80E-06	2.24E-03 ±	5.24E-03	-1.00E-01 ±	1.69E-01	5.85E-03 ±	5.20E-03	99.3	96.65 ± 2.31	411.2 ± 8.8
# 4	2.01E-05	4.29E-03 ±	2.19E-03	-7.34E-02 ±	6.92E-02	2.00E-03 ±	2.23E-03	98.8	99.95 ± 1.07	423.7 ± 4.0
# 5	1.45E-05	2.30E-03 ±	2.79E-03	6.90E-02 ±	1.00E-01	-4.94E-04 ±	2.65E-03	99.3	99.03 ± 1.25	420.2 ± 4.7
# 6	3.70E-05	4.80E-04 ±	1.15E-03	3.87E-03 ±	3.65E-02	1.24E-03 ±	1.24E-03	99.9	99.91 ± 0.72	423.5 ± 2.7
# 7	3.76E-05	7.84E-04 ±	1.12E-03	3.18E-02 ±	3.89E-02	3.05E-03 ±	1.47E-03	99.8	99.07 ± 0.68	420.4 ± 2.6
# 8	3.62E-05	1.88E-03 ±	1.17E-03	-1.33E-02 ±	3.87E-02	-1.30E-03 ±	1.18E-03	99.4	97.27 ± 0.72	413.5 ± 2.7
# 9	2.20E-05	4.05E-03 ±	1.99E-03	1.63E-01 ±	6.90E-02	-2.29E-04 ±	1.81E-03	98.8	98.67 ± 0.95	418.8 ± 3.6
# 10	1.97E-05	3.63E-03 ±	2.08E-03	-1.61E-02 ±	6.95E-02	1.46E-04 ±	2.06E-03	98.9	97.39 ± 1.24	414.0 ± 4.7
# 11	2.00E-05	2.65E-03 ±	2.09E-03	2.37E-02 ±	7.50E-02	-6.04E-05 ±	2.32E-03	99.2	97.88 ± 1.40	415.9 ± 5.3
# 14	3.84E-06	-1.26E-03 ±	1.05E-02	-8.45E-02 ±	3.65E-01	-1.04E-02 ±	9.91E-03	100.3	108.90 ± 5.09	457.3 ± 18.9
# 15	4.57E-06	-7.99E-04 ±	9.07E-03	-2.96E-01 ±	3.02E-01	-1.39E-02 ±	8.43E-03	100.2	99.23 ± 3.74	421.0 ± 14.1
# 16	8.87E-06	-1.64E-04 ±	4.63E-03	-6.36E-02 ±	1.64E-01	-1.31E-03 ±	4.62E-03	100.0	98.40 ± 2.13	417.8 ± 8.1
# 17	6.38E-06	-8.94E-03 ±	6.55E-03	3.57E-01 ±	2.38E-01	1.07E-02 ±	6.40E-03	102.6	102.30 ± 2.87	432.7 ± 10.8
# 18	9.89E-06	1.80E-03 ±	4.25E-03	2.08E-02 ±	1.46E-01	-4.53E-03 ±	3.94E-03	99.5	99.78 ± 1.83	423.1 ± 6.9
# 19	6.57E-06	-1.11E-02 ±	6.32E-03	2.30E-02 ±	2.25E-01	-3.89E-03 ±	5.47E-03	103.3	102.00 ± 2.57	431.5 ± 9.7
# 20	1.38E-05	3.57E-04 ±	3.08E-03	5.31E-02 ±	1.12E-01	5.93E-05 ±	2.74E-03	99.9	98.12 ± 1.39	416.7 ± 5.3
# 21	1.04E-05	-1.51E-03 ±	3.83E-03	-7.41E-02 ±	1.39E-01	1.48E-03 ±	3.55E-03	100.5	97.52 ± 1.79	414.5 ± 6.8
# 22	4.38E-06	-4.92E-03 ±	9.91E-03	4.59E-01 ±	3.45E-01	3.06E-03 ±	9.16E-03	101.5	97.75 ± 4.48	415.4 ± 17.0
# 23	7.12E-06	2.09E-03 ±	5.81E-03	3.90E-02 ±	1.96E-01	1.97E-03 ±	5.42E-03	99.4	101.80 ± 2.64	430.8 ± 9.9
# 24	5.86E-06	-9.60E-04 ±	7.09E-03	3.18E-01 ±	2.62E-01	3.43E-03 ±	7.13E-03	100.3	96.02 ± 2.93	408.8 ± 11.2
# 25	1.29E-05	6.18E-03 ±	3.17E-03	-3.52E-02 ±	1.14E-01	3.16E-03 ±	3.19E-03	98.2	98.50 ± 1.37	418.2 ± 5.2
# 26	1.32E-05	1.60E-03 ±	3.35E-03	-4.32E-02 ±	1.17E-01	-2.69E-03 ±	3.22E-03	99.5	98.98 ± 1.51	420.0 ± 5.7
# 27	1.31E-05	2.30E-03 ±	3.15E-03	-5.64E-02 ±	1.10E-01	-2.34E-03 ±	3.29E-03	99.3	97.49 ± 1.75	414.4 ± 6.7
# 28	6.97E-06	3.68E-03 ±	5.88E-03	1.03E-01 ±	2.08E-01	7.23E-03 ±	6.34E-03	98.9	97.04 ± 2.78	412.7 ± 10.6
# 29	1.16E-05	6.05E-03 ±	3.83E-03	-9.86E-02 ±	1.31E-01	2.81E-03 ±	3.64E-03	98.2	98.65 ± 1.98	418.8 ± 7.5
# 30	4.75E-06	1.26E-02 ±	9.15E-03	-4.18E-01 ±	2.97E-01	5.57E-03 ±	8.05E-03	96.4	98.91 ± 3.70	419.8 ± 14.0
# 31	1.48E-05	2.20E-03 ±	2.95E-03	-1.94E-03 ±	1.00E-01	1.62E-03 ±	2.48E-03	99.3	97.64 ± 1.39	415.0 ± 5.3
# 32	1.39E-05	3.37E-03 ±	2.98E-03	-5.71E-02 ±	1.02E-01	2.58E-04 ±	2.83E-03	99.0	94.84 ± 1.41	404.3 ± 5.4
# 33	2.02E-05	3.50E-03 ±	2.00E-03	4.10E-02 ±	7.59E-02	5.41E-03 ±	2.20E-03	99.0	97.13 ± 1.09	413.0 ± 4.1
# 34	1.32E-05	6.41E-03 ±	3.21E-03	-5.52E-02 ±	1.13E-01	6.40E-03 ±	2.99E-03	98.1	95.70 ± 1.39	407.6 ± 5.3
# 35	2.15E-05	-3.48E-04 ±	1.95E-03	-4.80E-02 ±	6.55E-02	-2.73E-03 ±	1.88E-03	100.1	99.11 ± 1.10	420.5 ± 4.2
# 36	1.34E-05	-9.21E-04 ±	3.17E-03	-7.77E-02 ±	1.11E-01	3.27E-03 ±	2.98E-03	100.3	96.68 ± 1.77	411.3 ± 6.7
# 37	1.59E-05	1.24E-04 ±	2.60E-03	3.50E-02 ±	1.13E-01	1.59E-03 ±	2.41E-03	100.0	98.25 ± 1.37	417.2 ± 5.2
# 38	5.37E-05	6.32E-04 ±	7.49E-04	-3.79E-03 ±	2.78E-02	3.72E-04 ±	7.94E-04	99.8	97.92 ± 0.49	416.0 ± 1.8
# 39	1.35E-05	4.26E-03 ±	3.04E-03	-1.06E-02 ±	1.11E-01	2.71E-03 ±	2.88E-03	98.7	97.27 ± 1.79	413.5 ± 6.8
# 40	2.55E-05	1.21E-02 ±	1.63E-03	9.91E-03 ±	6.05E-02	-1.81E-03 ±	1.44E-03	96.5	97.94 ± 1.02	416.1 ± 3.9
# 41	3.34E-05	1.52E-03 ±	1.23E-03	-5.20E-02 ±	4.29E-02	1.46E-03 ±	1.31E-03	99.5	97.21 ± 0.76	413.3 ± 2.9
<b>Total</b>	6.05E-04	3.06E-03 ±	4.32E-04	-2.04E-03 ±						

# 15	1,14E-05	-8,72E-04	± 2,93E-03	1,90E-01	± 1,55E-01	1,36E-03	± 4,53E-03	100,3	99,38 ± 1,31	421,9 ± 5,0
# 16	5,27E-06	-4,78E-03	± 6,62E-03	-2,96E-01	± 3,07E-01	-6,38E-03	± 8,17E-03	101,5	97,93 ± 2,72	416,4 ± 10,3
# 17	6,69E-06	-3,54E-04	± 4,99E-03	-2,47E-02	± 2,45E-01	2,22E-05	± 6,84E-03	100,1	93,38 ± 2,51	399,0 ± 9,6
# 18	1,22E-05	2,32E-04	± 2,75E-03	2,62E-02	± 1,39E-01	-1,58E-03	± 3,60E-03	99,9	95,38 ± 1,34	406,6 ± 5,1
# 19	2,30E-05	1,32E-03	± 1,52E-03	-5,27E-02	± 7,31E-02	-4,54E-04	± 1,90E-03	99,6	99,18 ± 1,04	421,1 ± 3,9
# 20	5,04E-06	5,81E-03	± 7,16E-03	1,96E-01	± 3,13E-01	-8,86E-03	± 8,39E-03	98,3	97,20 ± 3,34	413,6 ± 12,7
# 21	3,14E-06	2,53E-02	± 1,26E-02	-1,40E-01	± 5,18E-01	-1,68E-02	± 1,31E-02	92,5	91,78 ± 5,15	392,8 ± 19,8
# 22	9,74E-07	-4,07E-02	± 3,44E-02	-3,69E-01	± 1,71E+00	-4,70E-02	± 4,29E-02	114,9	92,49 ± 13,49	395,6 ± 51,8
<b>Total</b>	6,57E-04	4,24E-03	± 2,20E-04	-7,06E-03	± 1,15E-02	-6,21E-04	± 3,40E-04	98,7	97,31 ± 0,16	414,0 ± 1,0

N81.MS3 J = 2653E-02 ± 5723E-05

# 1	7,99E-07	1,45E-01	± 4,93E-02	2,47E+00	± 9,02E-01	2,03E-02	± 2,56E-02	50,1	42,79 ± 15,30	194,0 ± 65,8
# 2	1,06E-05	4,23E-03	± 3,49E-03	1,71E-01	± 7,63E-02	4,81E-03	± 3,62E-03	98,1	65,55 ± 1,24	289,3 ± 5,1
# 3	6,45E-06	-2,50E-03	± 5,65E-03	4,45E-01	± 1,19E-01	6,24E-03	± 3,25E-03	100,8	95,82 ± 2,14	408,6 ± 8,2
# 4	1,49E-05	-4,34E-04	± 2,44E-03	1,12E-01	± 5,58E-02	2,24E-03	± 2,03E-03	100,1	100,10 ± 1,27	425,1 ± 4,8
# 5	7,78E-06	2,01E-03	± 4,63E-03	-4,27E-02	± 8,84E-02	-4,53E-03	± 2,74E-03	99,4	98,56 ± 2,58	419,1 ± 9,8
# 6	5,29E-06	1,22E-02	± 6,99E-03	3,58E-02	± 1,57E-01	-9,95E-03	± 4,39E-03	96,3	94,09 ± 2,83	402,0 ± 10,8
# 7	7,18E-06	5,39E-03	± 5,06E-03	-1,10E-01	± 9,54E-02	-3,48E-03	± 2,82E-03	98,4	98,32 ± 1,93	418,1 ± 7,3
# 8	2,35E-05	2,51E-03	± 1,49E-03	-2,69E-02	± 4,93E-02	-7,12E-04	± 1,82E-03	99,3	98,23 ± 0,89	417,8 ± 3,4
# 9	1,36E-05	3,39E-03	± 2,67E-03	1,27E-01	± 4,71E-02	-2,96E-04	± 2,43E-03	99,0	95,82 ± 1,05	408,6 ± 4,0
# 10	1,94E-05	1,26E-03	± 1,87E-03	2,92E-02	± 5,00E-02	1,69E-03	± 1,42E-03	99,6	99,22 ± 0,87	421,6 ± 3,3
# 11	1,19E-05	2,69E-03	± 3,10E-03	1,98E-01	± 7,36E-02	5,86E-04	± 1,79E-03	99,2	97,44 ± 1,35	414,8 ± 5,1
# 12	2,29E-05	2,56E-03	± 1,70E-03	4,77E-02	± 3,18E-02	-1,07E-04	± 1,10E-03	99,2	96,67 ± 0,89	411,9 ± 3,4
# 13	6,53E-06	-6,57E-03	± 5,78E-03	9,94E-02	± 1,00E-01	-5,55E-03	± 3,35E-03	102,0	97,36 ± 2,14	414,5 ± 8,1
# 14	4,04E-06	-6,32E-03	± 9,54E-03	-9,23E-02	± 3,21E-01	-2,78E-03	± 8,82E-03	101,9	102,80 ± 3,87	435,0 ± 14,6
# 15	5,80E-06	-1,49E-04	± 6,62E-03	1,02E-01	± 2,68E-01	-2,36E-03	± 6,18E-03	100,0	101,30 ± 2,73	429,4 ± 10,3
# 16	9,28E-06	2,76E-03	± 4,46E-03	-3,23E-02	± 1,42E-01	-3,04E-03	± 3,95E-03	99,2	98,07 ± 1,78	417,2 ± 6,8
# 17	7,98E-06	3,64E-04	± 4,84E-03	-4,46E-02	± 1,76E-01	-1,73E-03	± 4,28E-03	99,9	102,60 ± 2,21	434,2 ± 8,3
# 18	1,04E-05	-1,73E-03	± 3,93E-03	1,07E-01	± 1,34E-01	-4,94E-03	± 3,18E-03	100,5	97,77 ± 1,88	416,1 ± 7,1
# 19	4,16E-06	6,00E-03	± 9,15E-03	4,94E-01	± 3,83E-01	3,44E-03	± 8,18E-03	98,2	96,92 ± 3,63	412,8 ± 13,8
# 20	6,04E-06	-4,46E-03	± 6,50E-03	7,35E-03	± 2,62E-01	3,49E-03	± 5,40E-03	101,3	103,00 ± 2,74	435,7 ± 10,3
# 21	2,29E-06	-4,99E-03	± 1,74E-02	-7,12E-01	± 6,35E-01	8,65E-03	± 1,58E-02	101,6	95,01 ± 6,09	405,6 ± 23,3
# 22	4,45E-06	-2,04E-03	± 8,52E-03	3,96E-02	± 3,65E-01	-2,67E-03	± 7,36E-03	100,6	104,10 ± 3,32	439,8 ± 12,4
# 23	6,34E-06	8,13E-04	± 6,28E-03	-1,82E-02	± 2,33E-01	3,36E-03	± 5,20E-03	99,8	102,90 ± 2,85	435,6 ± 10,7
# 24	6,25E-06	1,44E-03	± 6,41E-03	-1,04E-01	± 2,13E-01	2,58E-04	± 5,41E-03	99,6	102,20 ± 2,42	432,8 ± 9,1
# 25	1,38E-05	1,75E-03	± 2,74E-03	1,55E-02	± 1,00E-01	5,12E-04	± 2,46E-03	99,5	102,60 ± 1,10	434,5 ± 4,2
# 26	1,61E-05	-1,01E-03	± 2,41E-03	-7,48E-02	± 9,24E-02	5,16E-03	± 2,41E-03	100,3	100,00 ± 1,07	424,5 ± 4,0
# 27	3,59E-05	-3,19E-05	± 1,14E-03	4,23E-03	± 3,62E-02	3,40E-03	± 1,19E-03	100,0	98,25 ± 0,77	417,9 ± 2,9
# 28	4,72E-05	8,91E-04	± 8,08E-04	2,26E-02	± 3,30E-02	2,52E-03	± 9,38E-04	99,7	100,00 ± 0,61	424,6 ± 2,3
# 29	7,58E-06	-1,86E-03	± 5,13E-03	-3,79E-02	± 1,76E-01	5,18E-03	± 4,66E-03	100,6	99,74 ± 2,48	423,5 ± 9,4
# 30	1,95E-05	6,43E-04	± 2,04E-03	2,53E-02	± 7,16E-02	4,03E-03	± 1,82E-03	99,8	98,12 ± 0,85	417,4 ± 3,2
# 31	1,07E-05	2,77E-03	± 3,60E-03	7,25E-03	± 1,24E-01	-4,72E-03	± 3,04E-03	99,2	96,76 ± 1,72	412,2 ± 6,6
# 32	6,93E-06	-8,49E-03	± 5,67E-03	-1,16E-01	± 2,07E-01	4,97E-03	± 5,53E-03	102,5	101,40 ± 2,08	429,8 ± 7,8
<b>Total</b>	3,76E-04	1,14E-03	± 5,77E-04	2,49E-02	± 1,84E-02	1,04E-03	± 4,94E-04	99,7	97,94 ± 0,26	416,7 ± 1,3

N110.MS3 J = 2654E-02 ± 2259E-04

# 1	1,07E-06	1,12E-01	± 7,26E-02	-2,95E+00	± 9,99E+00	-3,23E-02	± 5,14E-02	78,4	120,10 ± 25,02	499,2 ± 90,9
# 2	4,11E-06	1,30E-02	± 1,84E-02	-7,77E-01	± 2,48E+00	1,86E-02	± 1,38E-02	96,7	112,20 ± 6,75	470,1 ± 24,9
# 3	4,76E-06	5,62E-03	± 1,59E-02	-2,88E-01	± 2,21E+00	1,99E-03	± 1,19E-02	98,5	106,40 ± 5,70	448,6 ± 21,3
# 4	8,43E-06	-8,80E-04	± 9,16E-03	8,12E-02	± 1,22E+00	3,34E-04	± 6,76E-03	100,3	99,25 ± 3,15	421,9 ± 11,9
# 5	8,78E-06	-2,02E-03	± 8,65E-03	-6,46E-02	± 1,18E+00	6,39E-03	± 6,45E-03	100,6	100,20 ± 3,10	425,4 ± 11,7
# 6	1,06E-04	1,47E-03	± 7,21E-04	1,08E-02	± 1,00E-01	7,05E-04	± 6,55E-04	99,6	99,83 ± 0,35	424,1 ± 1,3
# 7	4,68E-05	3,17E-03	± 1,62E-03	1,35E-01	± 2,22E-01	1,40E-03	± 1,21E-03	99,1	101,10 ± 0,70	428,8 ± 2,6
# 8	3,85E-05	1,53E-03	± 1,99E-03	6,68E-02	± 2,91E-01	-4,89E-04	± 1,52E-03	99,5	98,81 ± 1,00	420,2 ± 3,8
# 9	1,52E-05	4,14E-03	± 5,01E-03	2,23E-01	± 7,58E-01	9,22E-05	± 4,05E-03	98,8	97,80 ± 1,90	416,4 ± 7,2
# 10	2,39E-05	1,37E-03	± 3,27E-03	3,64E-01	± 4,47E-01	-8,36E-04	± 2,47E-03	99,6	100,50 ± 1,45	426,5 ± 5,5
# 11	1,04E-05	-9,89E-04	± 7,26E-03	1,24E-01	± 1,01E+00	-9,80E-04	± 5,47E-03	100,3	99,96 ± 2,71	424,6 ± 10,3
# 12	6,52E-05	1,56E-04	± 1,17E-03	-1,63E-01	± 1,59E-01	-3,59E-05	± 1,01E-03	100,0	100,30 ± 0,75	425,8 ± 2,8
# 13	1,04E-04	4,52E-03	± 7,52E-04	-4,84E-02	± 1,01E-01	4,24E-04	± 6,02E-04	98,7	97,83 ± 0,37	416,5 ± 1,4
# 14	2,24E-05	6,24E-03	± 3,41E-03	-5,07E-01	± 4,46E-01	1,99E-04	± 2,67E-03	98,1	97,26 ± 1,45	414,3 ± 5,5
# 15	8,32E-05	-1,54E-04	± 9,48E-04	-1,43E-01	± 1,30E-01	4,95E-04	± 8,08E-04	100,0	99,45 ± 0,54	422,6 ± 2,1
# 16	4,23E-05	-8,01E-04	± 1,79E-03	-2,95E-01	± 2,84E-01	1,05E-03	± 1,37E-03	100,2	100,40 ± 0,80	426,2 ± 3,0
# 17	1,83E-05	-2,55E-03	± 4,16E-03	-5,77E-01	± 5,63E-01	1,28E-03	± 3,13E-03	100,8	100,40 ± 1,73	426,2 ± 6,5
# 18	2,36E-05	3,58E-03	± 3,21E-03	-4,54E-01	± 4,29E-01	-5,45E-04	± 2,45E-03	98,9	97,53 ± 1,29	415,3 ± 4,9
# 19	5,66E-06	-2,88E-02	± 1,34E-02	1,92E+00	± 2,15E+00	-4,16E-04	± 9,88E-03	107,9	116,70 ± 4,88	486,8 ± 17,9
# 20	3,50E-05	-2,32E-05	± 2,16E-03	5,39E-02	± 3,06E-01	-3,51E-04	± 1,79E-03	100,0	99,15 ± 1,05	421,5 ± 4,0
# 21	9,26E-07	1,85E-01	± 8,46E-02	-2,45E+00	± 1,17E+01	-5,61E-02	± 6,20E-02	41,0	37,85 ± 25,33	172,7 ± 110,2
<b>Total</b>	6,68E-04	1,86E-03	± 5,24E-04	-6,94E-02	± 7,35E-02	4,16E-04	± 4,08E-04	99,5	99,58 ± 0,23	423,1 ± 3,3

N178.MS2 J = 2658E-02 ± 5742E-05

# 1	3,86E-09	-3,31E+00	± 9,36E+01	7,91E+02	± 2,21E+04	-4,68E+00	± 1,31E+02	279,6	1522 ± 42800	2919 ± 40680
# 2	6,18E-07	-7,55E-02	± 8,89E-02	-3,92E-01	± 3,68E+00	-1,55E-02	± 5,35E-02	114,2	179,70 ± 43,20	704,3 ± 140,2
# 3	1,97E-06	3,80E-02	± 2,72E-02	-3,27E-01	± 1,09E+00	-1,18E-02	± 2,01E-02	91,2	116,90 ± 10,78	487,9 ± 39,4
# 4	3,45E-06	1,44E-02	± 1,55E-02	1,14E-01	± 6,57E-01	-3,34E-03	± 1,04E-02	96,1	105,10 ± 5,82	444,5 ± 21,8
# 5	1,48E-05	1,11E-02	± 3,86E-03	-9,43E-02	± 1,46E-01	-9,91E-04	± 2,43E-03	97,0	104,70 ± 1,60	442,7 ± 6,0
# 6	4,84E-06	5,92E-03	± 1,11E-02	1,53E-01	± 4,82E-01	3,85E-03	± 7,30E-03	98,3	100,00 ± 4,30	425,2 ± 16,3
# 7	8,79E-06	3,86E-03	± 6,54E-03	-7,01E-02	± 2,50E-01	1,06E-03	± 4,02E-03	98,9	99,99 ± 2,61	425,1 ± 9,9
# 8	4,26E-05	2,25E-03	± 1,26E-03	-5,28E-02	± 5,24E-02	5,21E-04	± 9,01E-04	99,4	101,30 ± 0,71	430,3 ± 2,7
# 9	5,01E-05	2,09E-03	± 1,12E-03	4,06E-02	± 4,52E-02	5,16E-05	± 1,10E-03	99,4	99,65 ± 0,67	423,8 ± 2,6
# 10	9,65E-05	8,99E-04	± 5,57E-04	-9,11E-03	± 2,40E-02	-8,35E-06	± 5,68E-04	99,7	100,10 ± 0,35	425,5 ± 1,3
# 11	2,82E-05	4,70E-03	± 1,92E-03	-2,87E-02	± 7,85E-02	-1,63E-03	± 1,48E-03	98,6	100,60 ± 0,98	427,5 ± 3,7
# 12	7,62E-06	1,29E-02	± 7,05E-03	7,95E-02	± 3,24E-01	-3,27E-03	± 5,01E-03	96,3	100,10 ± 2,84	425,6 ± 10,8
# 13	1,30E-05	7,53E-03	± 4,19E-03	-3,28E-02	± 1,71E-01	-3,67E-03	± 2,75E-03	97,8	100,00 ± 1,53	425,3 ± 5,8
# 14	1,30E-04	2,26E-03	± 4,12E-04	5,87E-03	± 1,65E-02	1,07E-04	± 4,30E-04	99,3	100,40 ± 0,36	426,6 ± 1,4
# 15	5,96E-05	7,00E-04	± 9,17E-04	6,04E-03	± 3,64E-02	-8,79E-04	± 5,99E-04	99,8	99,93 ± 0,52	424,9 ± 2,0
# 16	8,67E-05	5,27E-04	± 6,34E-04	-3,88E-02	± 2,51E-02	1,42E-0				

# 1	5.76E-08	-1,61E+00	± 3,78E+00	-4,01E+01	± 9,38E+01	-3,58E-01	± 1,12E+00	8135,0	482 ± 1130	1489 ± 2374
# 2	8.59E-07	2,19E-01	± 8,26E-02	-8,76E-01	± 1,47E+00	6,42E-02	± 5,58E-02	62,1	106,20 ± 27,47	448,7 ± 102,8
# 3	2.83E-06	6,67E-02	± 2,33E-02	5,15E-01	± 5,52E-01	3,16E-03	± 1,64E-02	83,8	101,60 ± 8,33	431,7 ± 31,5
# 4	3.38E-06	2,09E-02	± 1,92E-02	9,39E-01	± 4,21E-01	-2,08E-03	± 1,35E-02	94,6	108,80 ± 7,03	458,4 ± 26,2
# 5	8.86E-06	2,10E-02	± 6,98E-03	-1,99E-02	± 1,36E-01	-1,06E-03	± 5,15E-03	94,3	101,70 ± 2,69	431,8 ± 10,2
# 6	1.84E-05	4,33E-02	± 3,53E-03	9,37E-02	± 7,06E-02	-1,57E-03	± 2,49E-03	88,6	99,76 ± 1,38	424,6 ± 5,2
# 7	8.22E-06	1,52E-02	± 7,46E-03	3,25E-01	± 1,88E-01	3,57E-04	± 5,38E-03	95,7	100,60 ± 3,01	427,7 ± 11,4
# 8	7.59E-06	4,14E-02	± 8,41E-03	4,96E-01	± 1,82E-01	-3,40E-03	± 6,74E-03	89,5	104,70 ± 3,33	443,1 ± 12,5
# 9	9.62E-05	6,90E-03	± 6,81E-04	5,14E-02	± 1,72E-02	-5,63E-04	± 4,82E-04	98,0	98,81 ± 0,45	421,0 ± 1,7
# 10	1.35E-04	1,02E-03	± 4,53E-04	2,20E-02	± 1,01E-02	-5,85E-05	± 6,28E-04	99,7	97,63 ± 0,35	416,5 ± 1,3
# 11	8.49E-05	1,01E-03	± 7,46E-04	3,85E-02	± 1,42E-02	-6,18E-06	± 7,88E-04	99,7	97,35 ± 0,45	415,4 ± 1,7
# 12	2.59E-05	-7,70E-05	± 2,44E-03	2,41E-04	± 5,01E-02	2,74E-05	± 1,72E-03	100,0	97,57 ± 1,05	416,3 ± 4,0
# 13	4.34E-05	9,62E-04	± 1,41E-03	4,08E-03	± 2,73E-02	-5,79E-04	± 9,56E-04	99,7	97,88 ± 0,61	417,4 ± 2,3
# 14	9.16E-05	3,83E-03	± 4,80E-04	-4,00E-02	± 2,34E-02	-4,83E-04	± 5,86E-04	98,8	96,05 ± 0,49	410,5 ± 1,9
# 15	3.03E-05	-1,77E-03	± 1,45E-03	-6,46E-04	± 7,21E-02	1,69E-03	± 1,62E-03	100,5	98,34 ± 0,80	419,2 ± 3,1
# 16	4.00E-05	5,45E-03	± 1,09E-03	-1,17E-02	± 5,20E-02	-3,41E-04	± 1,04E-03	98,4	97,64 ± 0,72	416,5 ± 2,8
# 17	9.44E-05	3,54E-03	± 4,87E-04	1,81E-02	± 2,15E-02	-1,76E-04	± 5,79E-04	98,9	96,17 ± 0,33	410,9 ± 1,3
# 18	8.42E-05	6,24E-04	± 5,11E-04	9,56E-03	± 2,52E-02	1,42E-04	± 5,54E-04	99,8	96,15 ± 0,53	410,8 ± 2,0
# 19	6.50E-05	1,64E-04	± 6,44E-04	1,53E-02	± 3,16E-02	-7,81E-04	± 6,72E-04	100,0	96,87 ± 0,65	413,6 ± 2,5
# 20	7.25E-05	9,81E-04	± 6,20E-04	2,56E-02	± 2,80E-02	-1,13E-04	± 6,34E-04	99,7	96,37 ± 0,40	411,7 ± 1,5
# 21	7.30E-05	2,72E-03	± 6,56E-04	5,66E-02	± 3,09E-02	2,10E-04	± 7,37E-04	99,2	97,94 ± 0,81	417,7 ± 3,1
# 22	6.08E-05	2,18E-03	± 7,28E-04	-7,37E-03	± 3,65E-02	-8,95E-04	± 7,39E-04	99,3	96,36 ± 0,46	411,6 ± 1,8
# 23	7.21E-05	4,01E-04	± 5,97E-04	-5,71E-03	± 3,03E-02	3,48E-04	± 7,92E-04	99,9	96,62 ± 0,39	412,6 ± 1,5
# 24	7.54E-05	1,82E-04	± 6,22E-04	1,11E-02	± 2,69E-02	4,74E-04	± 7,43E-04	99,9	96,69 ± 0,30	412,9 ± 1,2
# 25	7.87E-05	6,54E-04	± 5,51E-04	8,78E-03	± 2,63E-02	7,00E-04	± 7,58E-04	99,8	97,00 ± 0,35	414,1 ± 1,3
# 26	6.51E-05	1,32E-03	± 6,47E-04	2,15E-02	± 3,63E-02	2,20E-04	± 6,51E-04	99,6	96,54 ± 0,41	412,3 ± 1,6
# 27	1.15E-05	4,91E-03	± 3,71E-03	2,86E-02	± 1,84E-01	-3,56E-05	± 3,32E-03	98,5	95,91 ± 1,87	409,9 ± 7,1
# 28	1.05E-04	1,45E-03	± 3,63E-04	1,77E-02	± 1,82E-02	-1,62E-03	± 6,56E-04	99,6	96,40 ± 0,47	411,8 ± 1,8
# 29	3.50E-05	6,38E-04	± 1,12E-03	-4,72E-02	± 5,22E-02	7,15E-04	± 1,82E-03	99,8	97,93 ± 0,66	417,6 ± 2,5
# 30	4.87E-05	1,13E-03	± 7,83E-04	-2,76E-02	± 3,64E-02	-5,42E-04	± 1,41E-03	99,7	97,55 ± 0,48	416,2 ± 1,8
# 31	5.05E-05	6,00E-04	± 8,21E-04	4,12E-02	± 3,83E-02	1,97E-03	± 1,24E-03	99,8	97,49 ± 0,69	415,9 ± 2,6
# 32	5.96E-05	3,37E-04	± 6,73E-04	-1,15E-02	± 2,95E-02	-6,05E-04	± 1,11E-03	99,9	97,67 ± 0,50	416,6 ± 1,9
# 33	5.37E-05	3,51E-05	± 7,71E-04	7,29E-03	± 3,26E-02	4,11E-04	± 1,20E-03	100,0	97,70 ± 0,61	416,8 ± 2,3
# 34	1.63E-05	4,69E-04	± 2,33E-03	7,05E-02	± 1,17E-01	8,50E-04	± 3,90E-03	99,9	96,02 ± 1,24	410,3 ± 4,7
# 35	3,10E-05	1,39E-03	± 1,29E-03	-4,00E-02	± 5,98E-02	-4,29E-04	± 2,26E-03	99,6	95,72 ± 0,61	409,2 ± 2,3
# 36	3,42E-05	-1,17E-04	± 1,17E-03	1,87E-03	± 5,25E-02	-3,48E-04	± 1,93E-03	100,0	96,52 ± 0,84	412,2 ± 3,2
# 37	3,11E-05	4,53E-05	± 1,36E-03	-4,94E-02	± 5,46E-02	1,85E-03	± 2,11E-03	100,0	97,72 ± 0,90	416,8 ± 3,4
# 38	7,14E-05	-1,86E-04	± 5,92E-04	-3,15E-02	± 2,85E-02	4,11E-04	± 9,16E-04	100,1	96,47 ± 0,63	412,1 ± 2,4
# 39	4,30E-05	1,53E-03	± 9,09E-04	-2,77E-02	± 4,28E-02	5,97E-04	± 1,47E-03	99,5	97,03 ± 0,60	414,2 ± 2,3
# 40	8,78E-05	1,36E-03	± 4,87E-04	-8,91E-04	± 2,00E-02	9,03E-05	± 8,38E-04	99,6	96,48 ± 0,42	412,1 ± 1,6
# 41	2,53E-05	1,01E-03	± 1,54E-03	4,45E-02	± 7,12E-02	-1,02E-03	± 2,50E-03	99,7	96,70 ± 0,64	412,9 ± 2,4
# 42	3,43E-05	1,58E-03	± 1,20E-03	6,31E-02	± 5,54E-02	-7,83E-04	± 1,92E-03	99,5	97,95 ± 0,67	417,7 ± 2,5
# 43	6,77E-05	1,46E-03	± 6,86E-04	-6,77E-03	± 2,58E-02	-9,38E-05	± 1,29E-03	99,6	97,57 ± 0,48	416,2 ± 1,8
# 44	2,58E-05	5,80E-04	± 1,60E-03	-6,03E-03	± 6,46E-02	1,15E-03	± 2,37E-03	99,8	95,81 ± 0,88	409,5 ± 3,4
# 45	6,13E-05	1,01E-03	± 6,28E-04	-2,61E-02	± 2,99E-02	-1,30E-03	± 1,03E-03	99,7	97,17 ± 0,42	414,7 ± 1,6
# 46	6,21E-05	3,12E-04	± 6,50E-04	2,90E-02	± 3,04E-02	-4,67E-04	± 1,17E-03	99,9	96,37 ± 0,43	411,7 ± 1,6
# 47	4,20E-05	1,47E-03	± 9,98E-04	-2,22E-02	± 4,20E-02	-3,18E-04	± 1,49E-03	99,6	96,18 ± 0,45	410,9 ± 1,7
# 48	8,73E-05	1,12E-03	± 3,11E-04	4,00E-02	± 2,71E-02	-7,98E-04	± 6,49E-04	99,7	97,00 ± 0,42	414,1 ± 1,6
# 49	4,81E-05	5,18E-03	± 7,20E-04	-4,36E-02	± 4,96E-02	-2,02E-03	± 1,01E-03	98,5	97,10 ± 0,64	414,4 ± 2,5
# 50	2,56E-05	1,49E-04	± 9,81E-04	2,31E-02	± 8,96E-02	8,25E-04	± 1,87E-03	100,0	99,55 ± 0,81	423,8 ± 3,1
# 51	4,02E-05	4,20E-04	± 6,27E-04	4,36E-04	± 5,72E-02	-1,16E-03	± 1,16E-03	99,9	97,21 ± 0,56	414,9 ± 2,1
# 52	7,69E-05	1,57E-03	± 3,22E-04	2,86E-02	± 3,02E-02	-4,61E-04	± 8,71E-04	99,5	97,67 ± 0,41	416,6 ± 1,6
# 53	9,35E-05	7,44E-04	± 2,97E-04	1,91E-03	± 2,39E-02	-3,58E-04	± 5,31E-04	99,8	97,47 ± 0,31	415,9 ± 1,2
# 54	3,05E-05	7,55E-04	± 9,92E-04	-1,74E-02	± 7,58E-02	-1,65E-03	± 1,54E-03	99,8	97,18 ± 0,69	414,8 ± 2,6
# 55	4,75E-05	1,03E-03	± 5,90E-04	-3,01E-02	± 4,57E-02	-1,28E-03	± 9,78E-04	99,7	96,93 ± 0,41	413,8 ± 1,6
# 56	2,04E-05	8,42E-04	± 1,30E-03	-2,23E-01	± 1,05E-01	1,21E-03	± 2,02E-03	99,8	97,72 ± 0,89	416,8 ± 3,4
# 57	1,41E-05	-1,28E-03	± 1,92E-03	-2,21E-01	± 1,61E-01	8,68E-04	± 2,87E-03	100,4	101,80 ± 1,41	432,3 ± 5,3
# 58	8,74E-05	5,41E-04	± 2,97E-04	1,88E-02	± 2,49E-02	-4,10E-04	± 5,18E-04	99,8	97,50 ± 0,32	416,0 ± 1,2
<b>Total</b>	<b>2,91E-03</b>	<b>1,98E-03</b>	<b>± 1,20E-04</b>	<b>7,77E-03</b>	<b>± 5,01E-03</b>	<b>-2,03E-04</b>	<b>± 1,48E-04</b>	<b>99,4</b>	<b>97,19 ± 0,08</b>	<b>414,8 ± 0,9</b>

N175.MS2

J = 2662E-02 ± 5760E-05

# 1	1,05E-07	1,39E-01	± 4,37E-01	-2,38E+01	± 2,94E+01	-1,90E-01	± 5,95E-01	-2415,0	-40 ± 161	-201 ± 865
# 2	5,60E-06	8,05E-02	± 7,97E-03	-3,41E-01	± 1,33E-01	-1,19E-02	± 1,13E-02	53,2	27,00 ± 3,02	125,2 ± 13,5
# 3	9,27E-05	5,37E-02	± 5,76E-04	4,02E-03	± 1,24E-02	6,19E-04	± 9,45E-04	82,9	76,78 ± 0,33	335,5 ± 1,3
# 4	5,44E-05	2,52E-02	± 8,53E-04	2,48E-02	± 1,48E-02	8,67E-04	± 1,30E-03	95,5	158,40 ± 0,91	634,9 ± 3,1
# 6	9,04E-05	1,75E-02	± 5,23E-04	1,72E-02	± 1,33E-02	3,31E-05	± 7,47E-04	97,1	171,80 ± 0,63	679,3 ± 2,1
# 7	6,48E-05	1,45E-02	± 7,31E-04	3,98E-02	± 1,37E-02	2,65E-04	± 9,79E-04	97,6	176,30 ± 0,84	694,2 ± 2,7
# 8	5,24E-05	1,26E-02	± 8,02E-04	2,53E-02	± 1,47E-02	1,93E-03	± 1,37E-03	97,9	172,30 ± 1,27	681,1 ± 4,2
# 9	4,87E-05	8,34E-03	± 8,88E-04	-1,71E-02	± 1,57E-02	2,90E-03	± 1,32E-03	98,6	176,00 ± 0,79	693,1 ± 2,6
# 10	4,72E-05	7,15E-03	± 1,19E-03	3,30E-02	± 2,16E-02	-1,60E-03	± 1,35E-03	98,8	178,90 ± 1,03	702,8 ± 3,3
# 11	3,62E-05	6,27E-03	± 1,53E-03	-5,12E-02	± 2,03E-02	-1,94E-03	± 1,60E-03	98,9	173,60 ± 1,59	685,4 ± 5,2
# 12	1,97E-05	5,98E-03	± 2,68E-03	-7,60E-02	± 4,15E-02	-4,19E-03	± 3,05E-03	99,0	176,30 ± 1,98	694,1 ± 6,5
# 13	1,47E-05	5,36E-03	± 3,58E-03	-1,04E-01	± 5,55E-02	-3,72E-04	± 4,46E-03	99,1	170,20 ± 2,32	674,3 ± 7,7
# 14	2,30E-05	8,48E-03	± 2,42E-03	-1,92E-02	± 4,37E-02	-2,60E-04	± 2,66E-03	98,6	175,80 ± 1,73	692,5 ± 5,7
# 15	2,28E-05	7,25E-03	± 2,50E-03	-2,17E-02	± 3,64E-02	3,70E-03	± 2,52E-03	98,8	174,60 ± 1,77	688,7 ± 5,8
# 16	3,89E-05	5,96E-03	± 1,41E-03	-2,22E-02	± 2,13E-02	-1,34E-03	± 1,64E-03	98,9	163,30 ± 1,18	651,2 ± 3,9
# 17	3,05E-05	1,43E-02	± 1,85E-03	-6,81E-03	± 2,70E-02	1,32E-03	± 2,25E-03	97,4	158,20 ± 1,58	633,9 ± 5,3
# 18	1,59E-05	7,53E-03	± 3,36E-03	-5,49E-02	± 7,58E-02	-1,22E-03	± 4,39E-03	98,6	157,40 ± 2,16	631,5 ± 7,3
# 19	3,96E-05	1,06E-02	± 1,47E-03	1,27E-03	± 1,98E-02	3,12E-03	± 1,67E-03	97,9	148,60 ± 1,38	601,4 ± 4,8
# 20	2,60E-05	1,44E-02	± 2,16E-03	-6,89E-02	± 3,86E-02	7,14E-04	± 2,43E-03	97,3	153,10 ± 1,21	616,6 ± 4,1
# 21	8,18E-05	2,70E-02	± 7,96E-04	2,88E-03	± 1,28E-02	2,50E-03	± 8,16E-04	94,6	138,60 ± 0,57	566,5 ± 2,0
# 22	3,42E-05	1,73E-02	± 1,61E-03	4,03E-02	± 2,85E-02	-2,91E-05	± 1,82E-03	96,3	132,30 ± 0,97	544,3 ± 3,4
# 23	2,50E-05	6,87E-03	± 2,20E-03	7,04E-02	± 3,04E-02	-3,22E-04	± 2,34E-03	98,8	172,30 ± 1,61	

# 20	6,13E-05	3,17E-04	± 6,05E-04	-3,03E-02	± 7,09E-02	4,39E-04	± 8,64E-04	99,9	110,70	± 0,63	466,0	± 2,3
# 21	4,40E-05	-3,69E-05	± 8,38E-04	-9,76E-02	± 9,94E-02	-7,43E-04	± 1,08E-03	100,0	107,70	± 0,62	455,0	± 2,3
# 22	6,73E-05	1,09E-03	± 5,84E-04	5,59E-03	± 5,67E-02	3,66E-04	± 7,00E-04	99,7	105,90	± 0,67	448,1	± 2,5
# 23	7,71E-05	8,36E-04	± 4,83E-04	4,43E-02	± 5,14E-02	-4,71E-04	± 8,02E-04	99,8	108,20	± 0,52	456,8	± 1,9
# 24	7,06E-05	8,22E-04	± 5,20E-04	-1,43E-02	± 6,23E-02	-6,07E-04	± 8,58E-04	99,8	108,30	± 0,36	457,0	± 1,3
# 25	9,89E-05	5,87E-04	± 3,93E-04	-8,62E-02	± 4,34E-02	-5,62E-04	± 5,26E-04	99,8	106,60	± 0,43	451,0	± 1,6
# 26	8,90E-05	1,01E-03	± 4,28E-04	3,16E-02	± 5,91E-02	3,67E-04	± 6,35E-04	99,7	104,60	± 0,33	443,3	± 1,2
# 27	6,81E-05	9,36E-04	± 5,69E-04	-7,33E-02	± 6,82E-02	-3,57E-04	± 6,62E-04	99,7	106,50	± 0,74	450,3	± 2,8
# 28	7,02E-05	1,14E-03	± 5,32E-04	6,94E-02	± 6,15E-02	-5,08E-04	± 7,22E-04	99,7	105,00	± 0,44	444,7	± 1,7
# 29	2,90E-05	-1,14E-03	± 1,00E-03	-2,00E-01	± 2,26E-01	2,81E-03	± 1,44E-03	100,3	102,90	± 0,71	437,1	± 2,7
# 30	5,20E-05	2,97E-04	± 5,55E-04	1,06E-02	± 1,28E-01	-1,20E-03	± 7,04E-04	99,9	103,60	± 0,54	439,8	± 2,0
# 31	7,54E-05	4,36E-05	± 3,90E-04	-7,85E-02	± 8,84E-02	1,05E-04	± 7,41E-04	100,0	101,20	± 0,59	430,5	± 2,2
# 32	7,65E-05	-1,54E-04	± 3,89E-04	1,82E-02	± 8,88E-02	-2,81E-04	± 5,31E-04	100,0	102,60	± 0,46	435,7	± 1,7
# 33	4,51E-05	4,26E-04	± 6,88E-04	5,77E-02	± 1,57E-01	1,94E-04	± 8,56E-04	99,9	101,90	± 0,61	433,0	± 2,3
# 34	9,86E-05	4,19E-04	± 2,89E-04	-3,56E-03	± 6,82E-02	-1,44E-03	± 4,02E-04	99,9	100,10	± 0,45	426,5	± 1,7
# 35	7,04E-05	4,35E-04	± 4,23E-04	4,28E-02	± 1,01E-01	-6,55E-04	± 5,60E-04	99,9	100,60	± 0,62	428,4	± 2,3
# 36	6,76E-05	6,43E-04	± 4,80E-04	-3,85E-02	± 9,94E-02	-1,28E-03	± 8,67E-04	99,8	101,70	± 0,37	432,6	± 1,4
# 37	8,89E-05	8,05E-04	± 4,07E-04	2,95E-03	± 7,46E-02	-1,21E-04	± 5,62E-04	99,8	100,30	± 0,48	427,2	± 1,8
# 38	2,66E-05	5,90E-04	± 1,07E-03	5,99E-02	± 2,69E-01	1,68E-04	± 1,60E-03	99,8	100,60	± 0,77	428,1	± 2,9
# 39	1,05E-04	3,48E-04	± 2,76E-04	-2,52E-02	± 6,32E-02	-1,56E-05	± 4,94E-04	99,9	101,10	± 0,32	430,2	± 1,2
# 40	8,69E-05	6,35E-04	± 4,08E-04	4,33E-02	± 8,06E-02	1,16E-04	± 6,77E-04	99,8	100,50	± 0,42	428,0	± 1,6
# 41	1,09E-04	1,55E-03	± 2,79E-04	-4,41E-02	± 6,23E-02	6,03E-04	± 5,13E-04	99,5	99,27	± 0,39	423,2	± 1,5
# 42	9,55E-05	1,44E-03	± 3,27E-04	-1,62E-02	± 7,50E-02	-1,58E-03	± 4,99E-04	99,6	99,88	± 0,44	425,5	± 1,7
# 43	1,02E-04	1,07E-03	± 2,97E-04	-4,40E-02	± 6,50E-02	-1,29E-03	± 5,58E-04	99,7	101,70	± 0,43	432,5	± 1,6
# 44	8,30E-05	1,31E-04	± 3,58E-04	-1,49E-01	± 7,85E-02	-1,15E-03	± 6,29E-04	100,0	101,20	± 0,52	430,5	± 2,0
# 45	7,19E-05	5,28E-04	± 4,30E-04	-1,09E-01	± 9,35E-02	-6,49E-04	± 5,30E-04	99,9	102,70	± 0,50	436,0	± 1,9
# 46	7,96E-05	-4,33E-04	± 4,11E-04	-6,46E-02	± 8,23E-02	1,05E-04	± 6,00E-04	100,1	101,80	± 0,55	432,8	± 2,1
# 48	5,49E-05	9,16E-04	± 4,87E-04	-3,18E-01	± 7,85E-02	-3,19E-04	± 7,01E-04	99,7	101,80	± 0,43	432,7	± 1,6
# 49	1,04E-04	4,97E-04	± 2,52E-04	-6,53E-02	± 5,33E-02	-7,43E-04	± 5,07E-04	99,9	102,70	± 0,50	436,3	± 1,9
# 50	8,50E-05	-2,03E-05	± 2,87E-04	5,76E-02	± 5,58E-02	-7,42E-04	± 5,05E-04	100,0	102,50	± 0,51	435,5	± 1,9
# 51	7,62E-05	4,06E-04	± 3,44E-04	-5,94E-02	± 5,63E-02	1,11E-04	± 5,36E-04	99,9	102,40	± 0,55	435,2	± 2,1
# 52	1,01E-04	3,93E-04	± 2,31E-04	-2,99E-02	± 4,78E-02	-2,01E-03	± 6,74E-04	99,9	102,30	± 0,40	434,5	± 1,5
# 53	8,38E-05	2,37E-04	± 2,98E-04	1,01E-02	± 5,86E-02	-4,43E-04	± 4,32E-04	99,9	102,50	± 0,39	435,6	± 1,5
# 54	3,61E-05	1,69E-03	± 7,14E-04	-5,46E-02	± 1,31E-01	-2,47E-03	± 1,10E-03	99,5	101,50	± 0,91	431,7	± 3,4
# 55	4,60E-05	6,86E-04	± 6,06E-04	-1,48E-01	± 8,90E-02	-2,40E-04	± 8,34E-04	99,8	102,60	± 0,56	435,8	± 2,1
# 56	6,13E-05	4,04E-05	± 4,54E-04	-7,15E-02	± 7,25E-02	-7,72E-04	± 7,28E-04	100,0	103,10	± 0,52	437,7	± 1,9
# 57	7,43E-05	2,19E-04	± 3,31E-04	-3,09E-02	± 6,05E-02	1,99E-04	± 7,96E-04	99,9	102,00	± 0,37	433,6	± 1,4
# 58	6,61E-05	4,92E-04	± 3,79E-04	-6,01E-02	± 7,14E-02	-1,07E-03	± 7,91E-04	99,9	103,20	± 0,49	438,0	± 1,8
# 59	8,91E-06	-3,82E-03	± 3,43E-03	1,06E+00	± 7,31E-01	-1,20E-03	± 4,21E-03	101,1	101,70	± 1,57	432,6	± 5,9
# 60	3,61E-05	-2,86E-04	± 8,50E-04	1,61E-01	± 1,79E-01	-1,64E-04	± 9,52E-04	100,1	101,80	± 0,57	432,7	± 2,1
# 61	4,71E-05	5,26E-04	± 6,11E-04	-4,87E-02	± 1,34E-01	-1,07E-03	± 7,02E-04	99,9	102,70	± 0,48	436,0	± 1,8
# 62	1,92E-05	-3,17E-04	± 1,61E-03	-1,54E-01	± 3,39E-01	-4,55E-04	± 1,51E-03	100,1	101,00	± 0,71	429,8	± 2,7
# 63	2,78E-05	3,94E-05	± 1,10E-03	1,06E-01	± 2,36E-01	1,28E-03	± 1,38E-03	100,0	102,60	± 0,96	435,8	± 3,6
# 64	4,45E-05	-2,29E-04	± 6,39E-04	6,96E-02	± 1,41E-01	5,92E-04	± 8,76E-04	100,1	103,30	± 0,71	438,6	± 2,7
# 65	4,83E-05	1,01E-04	± 6,34E-04	4,54E-02	± 1,32E-01	8,41E-04	± 9,08E-04	100,0	100,80	± 0,45	428,9	± 1,7
# 66	1,59E-05	-5,10E-04	± 1,86E-03	-1,25E-01	± 4,00E-01	-7,27E-04	± 2,07E-03	100,2	100,60	± 1,03	428,3	± 3,9
# 67	4,79E-05	-1,89E-04	± 6,19E-04	5,37E-02	± 1,35E-01	-4,87E-04	± 9,00E-04	100,1	100,60	± 0,34	428,3	± 1,3
# 68	7,69E-05	1,29E-04	± 3,76E-04	-2,24E-02	± 8,01E-02	-5,20E-04	± 4,92E-04	100,0	100,90	± 0,43	429,6	± 1,6
# 69	7,50E-05	2,11E-04	± 4,34E-04	6,21E-02	± 8,65E-02	1,20E-03	± 7,97E-04	99,9	101,10	± 0,54	430,1	± 2,1
# 70	7,73E-05	-2,98E-04	± 3,84E-04	-4,47E-02	± 8,34E-02	-1,03E-03	± 4,90E-04	100,1	99,28	± 0,36	423,3	± 1,4
# 71	6,45E-05	-3,22E-04	± 4,63E-04	2,20E-02	± 9,56E-02	5,34E-04	± 7,72E-04	100,1	101,30	± 0,62	431,0	± 2,3
# 72	7,89E-05	5,20E-03	± 4,60E-04	-1,13E-01	± 7,67E-02	-6,67E-04	± 6,34E-04	98,5	101,00	± 0,49	429,7	± 1,9
# 73	3,91E-05	2,41E-04	± 5,10E-04	7,90E-02	± 1,44E-01	-1,27E-03	± 1,05E-03	99,9	102,10	± 0,50	433,8	± 1,9
# 74	6,02E-05	6,33E-04	± 3,20E-04	-3,66E-02	± 7,97E-02	-2,27E-04	± 6,86E-04	99,8	101,30	± 0,42	430,8	± 1,6
# 75	6,27E-05	5,72E-04	± 3,16E-04	-3,66E-02	± 7,61E-02	-6,94E-04	± 7,86E-04	99,8	101,60	± 0,42	432,1	± 1,6
# 76	2,90E-05	-7,77E-04	± 6,74E-04	-1,28E-01	± 1,57E-01	2,66E-04	± 1,43E-03	100,2	102,10	± 0,51	433,9	± 1,9
# 77	3,06E-05	9,54E-05	± 6,55E-04	3,23E-02	± 1,45E-01	-4,00E-04	± 1,32E-03	100,0	103,60	± 0,55	439,6	± 2,1
# 78	1,54E-05	1,11E-02	± 1,35E-03	3,42E-01	± 3,76E-01	1,67E-03	± 2,69E-03	97,0	106,40	± 1,04	450,2	± 3,9
# 79	1,48E-05	-3,12E-03	± 1,37E-03	3,84E-01	± 3,11E-01	2,59E-03	± 2,50E-03	100,9	104,20	± 1,16	441,7	± 4,4
# 80	7,31E-05	1,35E-04	± 2,55E-04	-5,57E-02	± 7,10E-02	2,30E-04	± 7,55E-04	100,0	106,20	± 0,41	449,3	± 1,5
# 81	5,58E-05	2,01E-05	± 3,22E-04	-6,77E-02	± 9,92E-02	9,18E-05	± 9,29E-04	100,0	107,50	± 0,38	454,1	± 1,4
# 82	2,12E-05	2,44E-04	± 1,05E-03	-6,41E-01	± 2,05E-01	-8,43E-05	± 1,86E-03	99,9	109,20	± 1,08	460,7	± 4,0
# 83	7,17E-06	-6,49E-03	± 2,36E-03	-1,13E+00	± 6,60E-01	3,01E-03	± 5,30E-03	101,8	108,50	± 1,40	457,9	± 5,2
<b>Total</b>	<b>4,94E-03</b>	<b>9,93E-04</b>	<b>± 5,53E-05</b>	<b>-2,57E-02</b>	<b>± 1,00E-02</b>	<b>-2,88E-04</b>	<b>± 8,25E-05</b>	<b>99,7</b>	<b>104,00</b>	<b>± 0,06</b>	<b>441,2</b>	<b>± 3,4</b>

N182.MS2

J = 2746E-02 ± 2417E-04

# 1	2,52E-08	-5,48E+00	± 1,52E+01	-2,96E+01	± 1,76E+02	1,98E+00	± 5,74E+00	15,6	-300	± 922	-2898	± 22080
# 2	7,53E-08	5,41E-02	± 3,06E-01	-4,39E+01	± 6,80E+01	5,92E-01	± 8,37E-01	89,3	133,90	± 157,80	550,4	± 559,1
# 3	3,48E-05	1,27E-02	± 5,66E-04	-3,61E-02	± 1,07E-01	2,50E-03	± 1,30E-03	96,4	101,50	± 0,71	431,9	± 2,7
# 4	4,16E-05	1,61E-03	± 4,65E-04	1,16E-01	± 9,98E-02	2,27E-03	± 1,26E-03	99,5	100,80	± 0,74	429,1	± 2,8
# 5	2,07E-05	3,01E-03	± 8,71E-04	3,53E-01	± 1,84E-01	-9,25E-04	± 2,18E-03	99,1	102,60	± 0,82	436,1	± 3,1
# 6	2,36E-05	3,12E-03	± 8,55E-04	1,90E-01	± 1,65E-01	-2,20E-03	± 1,84E-03	99,1	99,02	± 0,75	422,5	± 2,9
# 7	1,08E-05	2,68E-03	± 1,77E-03	3,47E-01	± 3,87E-01	-1,22E-03	± 3,96E-03	99,2	101,70	± 1,18	432,7	± 4,4
# 8	1,51E-05	5,01E-03	± 1,55E-03	1,14E-01	± 2,40E-01	-2,66E-03	± 2,84E-03	98,6	100,70	± 1,15	428,9	± 4,4
# 9	3,27E-05	1,77E-03	± 7,33E-04	8,59E-02	± 1,16E-01	3,33E-04	± 1,33E-03	99,5	100,60	± 0,97	428,3	± 3,7
# 10	2,75E-05	9,54E-04	± 7,23E-04	-7,56E-02	± 1,34E-01	-6,59E-04	± 1,72E-03	99,7	101,70	± 0,95	432,7	± 3,6
# 11	3,03E-05	3,30E-03	± 7,69E-04	4,81E-03	± 1,26E-01	-9,98E-04	± 1,45E-03	99,1	101,60	± 0,53	432,3	± 2,0
# 12	2,11E-05	1,27E-03	± 9,96E-04	-1,16E-01	± 1,77							

# 40	7.28E-05	2,34E-05	± 4,96E-04	4,51E-02	± 6,50E-02	3,40E-04	± 6,51E-04	100,0	100,30	± 0,47	427,2	± 1,8
# 41	6.57E-05	3,11E-05	± 5,65E-04	-8,66E-03	± 7,64E-02	6,51E-04	± 6,06E-04	100,0	100,30	± 0,58	427,5	± 2,2
# 42	5.22E-05	-5,48E-04	± 6,86E-04	1,13E-02	± 9,06E-02	3,86E-04	± 8,05E-04	100,2	101,00	± 0,46	430,1	± 1,7
# 43	6.16E-05	3,32E-04	± 6,05E-04	-2,87E-02	± 7,65E-02	-2,47E-04	± 9,14E-04	99,9	98,61	± 0,38	420,9	± 1,4
# 44	8.83E-05	5,73E-04	± 3,91E-04	-1,84E-03	± 5,54E-02	-5,74E-04	± 5,99E-04	99,8	99,67	± 0,46	424,9	± 1,8
# 45	3.38E-05	3,80E-03	± 1,09E-03	-2,46E-02	± 1,46E-01	-2,60E-03	± 1,04E-03	98,9	97,86	± 0,62	418,0	± 2,3
# 46	3.28E-05	8,57E-04	± 1,11E-03	-7,55E-02	± 1,53E-01	-8,62E-04	± 1,10E-03	99,8	100,70	± 0,66	428,9	± 2,5
# 47	5.12E-05	7,21E-04	± 6,96E-04	5,55E-02	± 9,78E-02	1,39E-04	± 7,14E-04	99,8	99,04	± 0,59	422,5	± 2,2
# 48	7.68E-05	1,31E-03	± 4,56E-04	-1,49E-02	± 6,40E-02	-1,33E-03	± 5,33E-04	99,6	101,10	± 0,45	430,2	± 1,7
# 49	9.09E-05	6,94E-04	± 4,04E-04	-2,41E-02	± 5,17E-02	-5,73E-04	± 4,42E-04	99,8	99,68	± 0,39	425,0	± 1,5
# 50	3.08E-05	1,51E-03	± 1,22E-03	1,08E-01	± 1,57E-01	1,09E-03	± 1,21E-03	99,6	99,48	± 0,72	424,2	± 2,8
# 51	4.78E-05	8,32E-05	± 7,92E-04	-2,31E-02	± 9,63E-02	-1,56E-03	± 7,86E-04	100,0	99,75	± 0,66	425,2	± 2,5
# 52	8.14E-05	7,76E-04	± 4,41E-04	-1,35E-02	± 5,91E-02	-5,97E-04	± 7,41E-04	99,8	99,23	± 0,36	423,3	± 1,4
# 53	9.00E-05	8,42E-04	± 4,00E-04	3,64E-02	± 5,23E-02	-1,13E-03	± 4,28E-04	99,8	100,40	± 0,57	427,8	± 2,2
# 54	8.07E-05	6,85E-04	± 4,14E-04	-2,54E-02	± 5,88E-02	-1,09E-03	± 5,41E-04	99,8	99,27	± 0,51	423,4	± 1,9
# 55	4.89E-05	3,75E-04	± 6,91E-04	7,05E-02	± 9,95E-02	7,60E-04	± 8,65E-04	99,9	100,10	± 0,73	426,6	± 2,8
# 56	4.62E-05	1,06E-04	± 6,77E-04	-1,98E-02	± 1,01E-01	8,65E-05	± 8,29E-04	100,0	100,10	± 0,64	426,7	± 2,4
# 57	3.14E-05	-4,60E-04	± 1,03E-03	3,62E-02	± 1,59E-01	1,22E-03	± 8,91E-04	100,1	100,60	± 0,75	428,4	± 2,8
# 58	8.10E-05	2,53E-04	± 3,90E-04	4,58E-02	± 6,18E-02	-7,17E-04	± 4,21E-04	99,9	99,23	± 0,52	423,3	± 2,0
# 59	6.03E-05	3,23E-04	± 5,28E-04	-3,01E-02	± 7,91E-02	-1,53E-03	± 5,50E-04	99,9	98,47	± 0,49	420,4	± 1,9
# 60	5.51E-05	-6,80E-05	± 5,81E-04	6,48E-02	± 8,86E-02	3,68E-04	± 6,48E-04	100,0	100,90	± 0,55	429,5	± 2,1
# 61	7.74E-05	2,96E-04	± 4,08E-04	-1,17E-02	± 6,29E-02	6,07E-04	± 5,71E-04	99,9	99,17	± 0,47	423,0	± 1,8
# 62	7.93E-05	3,00E-04	± 4,10E-04	4,09E-02	± 6,21E-02	1,81E-04	± 6,42E-04	99,9	100,30	± 0,43	427,2	± 1,6
# 63	7.43E-05	5,92E-04	± 4,36E-04	7,35E-02	± 6,81E-02	-6,48E-04	± 4,87E-04	99,8	99,89	± 0,44	425,8	± 1,7
# 64	2.64E-05	1,73E-04	± 1,24E-03	1,50E-02	± 1,88E-01	9,75E-04	± 1,07E-03	100,0	100,80	± 0,90	429,4	± 3,4
# 65	4.10E-05	4,25E-02	± 9,10E-04	6,54E-02	± 1,19E-01	-1,64E-03	± 7,72E-04	88,8	99,65	± 0,81	424,8	± 3,1
# 66	5.95E-05	1,36E-04	± 5,58E-04	2,41E-02	± 8,69E-02	1,33E-04	± 6,88E-04	100,0	100,60	± 0,59	428,6	± 2,3
# 67	2.92E-05	-1,07E-03	± 1,18E-03	-1,96E-01	± 1,63E-01	4,86E-04	± 1,05E-03	100,3	99,92	± 0,84	425,9	± 3,2
# 68	5.62E-05	5,03E-04	± 5,93E-04	3,77E-02	± 8,26E-02	-8,06E-04	± 5,99E-04	99,9	98,29	± 0,53	419,7	± 2,0
# 69	1.04E-04	6,08E-04	± 3,17E-04	4,68E-02	± 4,68E-02	2,00E-04	± 5,00E-04	99,8	99,28	± 0,45	423,4	± 1,7
# 70	9.08E-05	5,81E-04	± 3,53E-04	-8,55E-03	± 5,23E-02	-8,38E-04	± 3,68E-04	99,8	99,35	± 0,35	435,2	± 1,4
# 71	8.46E-05	3,17E-04	± 3,65E-04	4,47E-02	± 5,87E-02	-1,12E-03	± 3,69E-04	99,9	98,22	± 0,50	430,8	± 1,9
# 72	1.17E-04	7,40E-04	± 2,85E-04	-5,95E-03	± 3,97E-02	-1,49E-03	± 4,07E-04	99,8	100,20	± 0,47	438,5	± 1,8
# 73	1.34E-04	5,06E-04	± 2,48E-04	3,75E-03	± 3,68E-02	2,69E-04	± 2,86E-04	99,9	102,50	± 0,37	447,4	± 1,4
# 74	6.62E-05	-3,71E-06	± 4,75E-04	-8,50E-03	± 7,51E-02	-8,11E-04	± 6,96E-04	100,0	101,90	± 0,42	445,1	± 1,6
# 75	4.45E-05	-3,61E-04	± 7,06E-04	7,95E-02	± 1,12E-01	5,11E-05	± 9,82E-04	100,1	100,50	± 0,60	439,6	± 2,3
# 76	3.80E-05	-3,15E-04	± 8,22E-04	-1,60E-02	± 1,25E-01	-1,37E-03	± 1,24E-03	100,1	99,86	± 0,69	437,2	± 2,7
# 77	4.17E-05	9,53E-04	± 7,74E-04	-7,62E-03	± 1,17E-01	-1,25E-03	± 6,90E-04	99,7	99,51	± 0,53	435,8	± 2,1
# 78	1.22E-04	1,74E-03	± 2,73E-04	6,35E-02	± 4,12E-02	-2,40E-04	± 3,65E-04	99,5	102,60	± 0,43	447,7	± 1,7
# 79	4.73E-05	1,35E-02	± 8,46E-04	8,97E-02	± 1,09E-01	-4,75E-04	± 9,75E-04	96,1	98,51	± 0,83	431,9	± 3,2
Total	4,46E-03	1,34E-03	± 6,53E-05	1,12E-02	± 8,71E-03	-2,90E-04	± 8,83E-05	99,6	100,10	± 0,06	438,0	± 3,4

N181.MS2

J = 2666E-02 ± 2279E-04

# 1	-1,47E-07	-4,64E-01	± 2,54E-01	1,19E+01	± 1,63E+01	1,12E-01	± 3,38E-01	-1222,0	127	± 74	525	± 266
# 2	5,29E-07	1,02E-01	± 5,52E-02	-8,28E-01	± 4,31E+00	-1,33E-01	± 9,15E-02	63,8	52,89	± 16,53	238,0	± 69,7
# 3	6,36E-05	1,06E-02	± 5,47E-04	-2,67E-02	± 3,82E-02	-1,12E-03	± 9,02E-04	97,0	99,31	± 0,48	423,8	± 1,8
# 4	4,39E-05	5,62E-03	± 7,49E-04	1,74E-02	± 5,78E-02	-1,35E-03	± 1,19E-03	98,4	102,40	± 0,49	435,4	± 1,8
# 5	1,31E-04	1,83E-03	± 2,01E-04	4,79E-03	± 1,71E-02	-3,08E-04	± 4,53E-04	99,5	103,80	± 0,33	440,9	± 1,2
# 6	5,94E-05	1,83E-03	± 5,05E-04	3,06E-02	± 4,05E-02	-3,25E-04	± 1,02E-03	99,5	103,20	± 0,47	438,4	± 1,8
# 7	4,00E-05	1,74E-03	± 6,32E-04	3,02E-02	± 6,19E-02	-2,89E-03	± 1,45E-03	99,5	104,30	± 0,73	442,8	± 2,7
# 8	4,47E-05	1,37E-03	± 5,74E-04	-3,51E-02	± 5,01E-02	-1,11E-03	± 1,30E-03	99,6	103,70	± 0,75	440,3	± 2,8
# 9	4,01E-05	8,83E-04	± 6,00E-04	-1,36E-02	± 5,62E-02	2,48E-04	± 1,55E-03	99,8	104,70	± 0,48	444,0	± 1,8
# 10	5,03E-05	1,36E-03	± 4,78E-04	-3,88E-03	± 4,44E-02	2,47E-04	± 1,20E-03	99,6	102,10	± 0,50	434,5	± 1,9
# 11	2,20E-05	-5,75E-06	± 1,15E-03	5,48E-02	± 1,17E-01	-1,38E-03	± 2,46E-03	100,0	103,60	± 1,20	440,1	± 4,5
# 12	3,36E-05	6,52E-05	± 7,62E-04	-2,24E-04	± 6,79E-02	1,57E-03	± 1,51E-03	100,0	102,90	± 0,81	437,2	± 3,1
# 13	4,82E-05	-7,53E-04	± 5,69E-04	-4,10E-02	± 4,95E-02	2,69E-04	± 1,18E-03	100,2	103,80	± 0,61	440,9	± 2,3
# 14	5,93E-05	2,70E-04	± 4,48E-04	1,29E-02	± 4,05E-02	3,06E-04	± 1,15E-03	99,9	104,20	± 0,38	442,1	± 1,4
# 15	7,74E-05	3,25E-03	± 3,48E-04	8,60E-03	± 3,07E-02	9,50E-04	± 8,22E-04	99,1	103,00	± 0,59	437,8	± 2,2
# 16	7,37E-05	2,38E-04	± 3,60E-04	2,26E-02	± 3,02E-02	-8,44E-04	± 7,90E-04	99,9	103,00	± 0,59	437,9	± 2,2
# 17	6,48E-05	5,37E-04	± 4,33E-04	-2,25E-03	± 3,79E-02	-9,42E-04	± 8,68E-04	99,9	103,90	± 0,59	441,1	± 2,2
# 18	2,34E-05	-1,41E-03	± 1,09E-03	-5,07E-02	± 1,01E-01	4,03E-03	± 2,24E-03	100,4	102,30	± 0,82	435,0	± 3,1
# 19	-1,22E-07	-9,44E-04	± 2,54E-01	2,16E+01	± 2,11E+01	-4,33E-02	± 4,32E-01	99,2	-33,33	± 92,17	-167,9	± 486,5
# 20	4,65E-05	2,78E-04	± 6,92E-04	1,55E-02	± 5,00E-02	1,58E-04	± 1,23E-03	99,9	103,00	± 0,62	437,6	± 2,3
# 21	6,76E-05	-6,04E-04	± 5,01E-04	-7,75E-03	± 3,99E-02	-5,94E-04	± 8,16E-04	100,2	102,50	± 0,67	435,8	± 2,5
# 22	4,67E-05	-1,06E-04	± 6,67E-04	5,98E-02	± 5,38E-02	-8,89E-04	± 1,17E-03	100,0	101,60	± 0,76	432,3	± 2,9
# 23	5,05E-05	8,76E-04	± 6,13E-04	-5,49E-02	± 4,71E-02	-9,11E-04	± 1,00E-03	99,8	102,40	± 0,53	435,6	± 2,0
# 24	2,28E-05	1,17E-03	± 1,36E-03	1,45E-01	± 1,03E-01	-5,42E-04	± 2,55E-03	99,7	102,70	± 1,00	436,5	± 3,8
# 25	3,81E-05	6,93E-04	± 8,15E-04	3,31E-02	± 6,75E-02	-1,47E-03	± 1,35E-03	99,8	101,60	± 0,60	432,3	± 2,3
# 26	5,56E-05	2,39E-04	± 5,96E-04	-2,31E-03	± 4,23E-02	5,21E-04	± 1,18E-03	99,9	104,00	± 0,70	441,7	± 2,6
# 27	4,61E-05	6,21E-04	± 7,14E-04	-7,27E-02	± 5,12E-02	-8,83E-04	± 1,13E-03	99,8	104,10	± 0,62	441,7	± 2,3
# 28	5,36E-05	-2,02E-05	± 6,49E-04	-5,59E-02	± 4,48E-02	-6,05E-04	± 9,95E-04	100,0	104,20	± 0,75	442,3	± 2,8
# 29	4,27E-05	4,53E-04	± 7,81E-04	3,93E-02	± 6,02E-02	9,06E-04	± 1,29E-03	99,9	103,30	± 0,55	438,9	± 2,1
# 30	4,21E-05	1,23E-03	± 7,83E-04	-1,80E-02	± 5,97E-02	3,97E-04	± 1,63E-03	99,7	103,70	± 0,72	440,5	± 2,7
# 31	1,17E-05	-4,21E-04	± 2,60E-03	1,71E-01	± 2,11E-01	-1,15E-03	± 4,43E-03	100,1	106,50	± 1,80	450,8	± 6,7
# 32	1,35E-05	9,08E-04	± 2,53E-03	-2,04E-01	± 1,88E-01	-3,24E-03	± 3,80E-03	99,7	103,60	± 1,49	440,0	± 5,6
# 33	1,79E-05	6,48E-02	± 1,68E-03	-5,79E-01	± 1,23E-01	2,21E-01	± 2,87E-03	86,9	127,60	± 0,89	528,2	± 3,2
# 34	2,36E-05	8,20E-04	± 1,39E-03	-1,53E-01	± 1,05E-01	1,19E-04	± 2,15E-03	99,8	104,60	± 0,97	443,8	± 3,6
# 35	1,03E-05	5,49E-04	± 3,30E-03	-2,43E-01	± 2,52E-01	-8,43E-04	± 4,95E-03	99,9	107,40	± 1,77		

# 12	4.97E-05	-2.27E-05	± 1.21E-03	-6.43E-02	± 4.59E-02	-1.09E-03	± 1.07E-03	100.0	106.00 ± 0.65	448.9 ± 2.4
# 13	8.32E-05	-6.61E-04	± 7.37E-04	1.60E-02	± 2.93E-02	5.13E-04	± 7.17E-04	100.2	106.70 ± 0.58	451.7 ± 2.2
# 14	8.48E-05	1.47E-03	± 7.74E-04	-6.61E-03	± 2.47E-02	2.17E-04	± 7.12E-04	99.6	105.90 ± 0.50	448.7 ± 1.9
# 15	5.30E-05	5.73E-04	± 1.19E-03	3.26E-02	± 4.03E-02	5.36E-04	± 1.01E-03	99.8	104.40 ± 0.70	443.2 ± 2.7
# 16	5.94E-05	2.55E-03	± 1.03E-03	6.31E-02	± 3.77E-02	-6.35E-04	± 1.01E-03	99.3	105.00 ± 0.57	445.4 ± 2.1
# 17	5.36E-05	1.56E-03	± 1.13E-03	9.46E-03	± 4.06E-02	-6.51E-05	± 1.08E-03	99.6	105.80 ± 0.71	448.4 ± 2.7
# 18	5.04E-05	1.79E-03	± 1.22E-03	-6.42E-02	± 4.23E-02	3.03E-04	± 1.25E-03	99.5	105.80 ± 0.71	448.5 ± 2.7
# 19	1.46E-04	5.70E-05	± 3.81E-04	1.63E-02	± 1.35E-02	-1.07E-03	± 5.13E-04	100.0	106.60 ± 0.32	451.4 ± 1.2
# 20	5.44E-05	7.97E-04	± 1.01E-03	2.57E-02	± 3.81E-02	-9.34E-04	± 1.10E-03	99.8	104.20 ± 0.52	442.2 ± 1.9
# 21	4.25E-05	8.93E-04	± 1.22E-03	-1.51E-02	± 4.47E-02	3.51E-04	± 1.35E-03	99.8	104.10 ± 0.59	442.1 ± 2.2
# 22	5.52E-05	1.56E-03	± 9.76E-04	2.49E-02	± 3.62E-02	-1.03E-04	± 1.08E-03	99.6	105.70 ± 0.73	447.8 ± 2.7
# 23	7.65E-05	9.33E-04	± 7.34E-04	9.33E-03	± 2.58E-02	-1.33E-03	± 8.19E-04	99.7	105.40 ± 0.55	446.7 ± 2.1
# 24	2.93E-05	-1.27E-03	± 1.81E-03	4.80E-02	± 6.77E-02	3.15E-03	± 1.91E-03	100.4	105.70 ± 0.84	448.0 ± 3.1
# 25	5.11E-05	-1.67E-03	± 1.07E-03	5.83E-02	± 4.20E-02	6.35E-04	± 1.29E-03	100.5	102.70 ± 0.60	436.6 ± 2.3
# 26	4.99E-05	-2.09E-04	± 1.13E-03	3.69E-02	± 4.28E-02	-1.97E-04	± 1.10E-03	100.1	104.80 ± 0.59	444.7 ± 2.2
# 27	4.24E-05	3.15E-04	± 1.23E-03	-3.71E-02	± 4.57E-02	-6.17E-04	± 1.31E-03	99.9	103.80 ± 0.63	440.9 ± 2.4
# 28	6.02E-05	3.42E-04	± 9.69E-04	-4.43E-02	± 3.18E-02	1.67E-04	± 9.46E-04	99.9	105.40 ± 0.61	446.8 ± 2.3
# 29	5.68E-05	1.44E-04	± 9.97E-04	-1.58E-02	± 3.48E-02	2.67E-04	± 1.22E-03	100.0	104.40 ± 0.49	443.2 ± 1.8
# 30	6.46E-05	1.42E-03	± 8.56E-04	-2.74E-02	± 2.97E-02	1.30E-03	± 9.56E-04	99.6	103.80 ± 0.54	440.8 ± 2.0
# 31	1.80E-05	2.27E-03	± 2.92E-03	1.64E-01	± 1.13E-01	1.09E-03	± 3.02E-03	99.4	104.90 ± 1.31	445.0 ± 4.9
# 32	2.28E-05	3.15E-03	± 2.34E-03	-7.04E-02	± 8.19E-02	3.22E-03	± 2.32E-03	99.1	104.80 ± 1.01	444.8 ± 3.8
# 33	3.95E-05	2.35E-03	± 1.39E-03	-2.54E-02	± 4.94E-02	5.38E-04	± 1.40E-03	99.3	103.70 ± 0.61	452.0 ± 2.4
# 34	4.07E-05	1.78E-03	± 1.40E-03	1.04E-01	± 5.01E-02	1.18E-03	± 1.37E-03	99.5	105.20 ± 0.80	457.9 ± 3.1
# 35	2.19E-05	-8.47E-04	± 2.03E-03	1.12E-01	± 1.48E-01	6.64E-04	± 2.17E-03	100.2	105.60 ± 1.33	459.4 ± 5.1
# 36	2.59E-05	1.05E-02	± 1.68E-03	7.91E-02	± 1.29E-01	-1.26E-03	± 2.01E-03	97.1	103.50 ± 0.99	451.1 ± 3.8
# 37	2.17E-05	1.02E-03	± 2.10E-03	1.19E-01	± 1.49E-01	5.52E-04	± 2.43E-03	99.7	105.80 ± 1.17	460.1 ± 4.5
# 38	2.48E-05	6.80E-04	± 1.87E-03	1.59E-01	± 1.43E-01	6.31E-04	± 2.16E-03	99.8	104.50 ± 1.01	455.0 ± 3.9
# 39	3.27E-05	3.24E-04	± 1.31E-03	3.66E-02	± 1.03E-01	-2.45E-03	± 1.47E-03	99.9	101.50 ± 0.73	443.6 ± 2.8
# 40	2.58E-05	3.13E-03	± 1.69E-03	1.33E-01	± 1.28E-01	-3.64E-04	± 2.06E-03	99.1	101.80 ± 0.99	444.7 ± 3.8
# 41	3.34E-05	8.13E-04	± 1.36E-03	-3.30E-02	± 9.68E-02	-1.33E-03	± 1.38E-03	99.8	102.90 ± 0.76	448.8 ± 2.9
# 42	4.72E-05	1.31E-03	± 9.46E-04	6.96E-02	± 7.35E-02	5.99E-04	± 1.17E-03	99.6	102.90 ± 0.51	449.0 ± 2.0
# 43	2.44E-05	1.52E-03	± 1.85E-03	1.16E-01	± 1.37E-01	-7.61E-04	± 2.28E-03	99.6	104.00 ± 1.02	453.2 ± 3.9
# 44	4.04E-05	1.67E-03	± 1.04E-03	2.84E-02	± 8.05E-02	-1.24E-03	± 1.27E-03	99.5	102.30 ± 0.75	446.6 ± 2.9
# 45	6.01E-05	-6.10E-05	± 7.29E-04	4.21E-02	± 6.05E-02	-2.10E-04	± 1.05E-03	100.0	103.60 ± 0.58	451.8 ± 2.2
# 46	7.02E-05	1.95E-03	± 6.06E-04	-1.85E-02	± 4.59E-02	-4.73E-04	± 8.31E-04	99.4	102.40 ± 0.41	447.2 ± 1.6
# 47	8.65E-05	7.26E-04	± 5.16E-04	-6.82E-03	± 3.79E-02	-1.76E-03	± 6.35E-04	99.8	103.90 ± 0.38	453.0 ± 1.5
# 48	8.64E-05	1.51E-03	± 3.80E-04	2.41E-02	± 3.16E-02	-2.33E-04	± 6.92E-04	99.6	103.90 ± 0.36	452.8 ± 1.4
# 49	4.70E-05	1.62E-03	± 7.18E-04	1.36E-02	± 6.04E-02	-1.39E-03	± 1.13E-03	99.5	101.50 ± 0.75	443.6 ± 2.9
# 50	4.38E-05	1.36E-03	± 7.36E-04	5.01E-02	± 6.32E-02	-1.65E-04	± 1.34E-03	99.6	101.30 ± 0.72	442.8 ± 2.8
# 51	3.29E-05	1.71E-03	± 9.85E-04	-7.39E-03	± 8.61E-02	-2.95E-03	± 1.68E-03	99.5	100.70 ± 0.74	440.4 ± 2.9
# 52	3.17E-05	2.60E-03	± 1.14E-03	-6.71E-02	± 8.81E-02	-7.29E-04	± 1.62E-03	99.2	100.10 ± 0.84	438.3 ± 3.3
# 53	3.32E-05	5.49E-03	± 1.19E-03	-1.32E-01	± 7.97E-02	8.01E-04	± 1.71E-03	98.4	100.70 ± 0.66	440.5 ± 2.5
# 54	9.82E-06	-3.35E-04	± 3.46E-03	-3.36E-02	± 3.01E-01	1.35E-03	± 5.10E-03	100.1	99.15 ± 1.74	434.5 ± 6.8
# 55	6.57E-05	1.57E-03	± 4.85E-04	5.22E-02	± 4.23E-02	-5.79E-04	± 9.89E-04	99.6	103.10 ± 0.56	449.9 ± 2.2
# 57	5.21E-06	1.42E-02	± 6.43E-03	5.69E-01	± 5.46E-01	5.82E-03	± 9.49E-03	95.1	81.64 ± 2.99	364.9 ± 12.1
# 58	4.67E-05	-2.23E-03	± 7.17E-04	1.58E-02	± 5.72E-02	1.67E-03	± 1.15E-03	100.6	105.70 ± 0.56	459.9 ± 2.2
# 59	3.71E-06	9.69E-04	± 9.10E-03	3.84E-01	± 7.68E-01	4.01E-02	± 1.48E-02	99.8	125.30 ± 4.93	533.3 ± 18.2
<b>Total</b>	<b>2.56E-03</b>	<b>1.57E-03</b>	<b>± 1.54E-04</b>	<b>1.70E-02</b>	<b>± 7.66E-03</b>	<b>-1.46E-04</b>	<b>± 1.70E-04</b>	<b>99.6</b>	<b>104.50 ± 0.09</b>	<b>455.3 ± 3.6</b>

N118.MS3 J = 2666E-02 ± 3516E-04

# 1	2.73E-05	3.61E-02	± 2.26E-03	1.00E-01	± 1.39E+00	-1.05E-02	± 1.66E-03	48.1	9.87 ± 0.80	46.9 ± 3.7
# 2	3.36E-05	1.08E-02	± 1.63E-03	6.66E-01	± 1.16E+00	-4.90E-03	± 1.34E-03	94.4	53.33 ± 1.14	239.8 ± 4.8
# 3	2.44E-05	2.39E-03	± 2.26E-03	-7.19E-01	± 1.63E+00	-4.80E-03	± 1.66E-03	98.8	57.37 ± 1.79	256.8 ± 7.5
# 4	5.09E-05	5.51E-03	± 1.09E-03	3.23E-01	± 7.94E-01	-2.64E-03	± 8.95E-04	97.9	75.08 ± 1.56	329.2 ± 6.3
# 6	2.96E-05	-3.67E-04	± 1.82E-03	6.18E-01	± 1.34E+00	7.41E-04	± 1.43E-03	100.1	96.89 ± 0.99	414.5 ± 3.8
# 7	3.02E-05	-6.19E-04	± 1.80E-03	5.68E-01	± 1.30E+00	-9.50E-04	± 1.56E-03	100.2	97.39 ± 1.02	416.5 ± 3.9
# 8	3.67E-05	-1.35E-03	± 1.48E-03	-1.66E-01	± 1.04E+00	5.62E-05	± 1.24E-03	100.4	96.67 ± 0.83	413.7 ± 3.2
# 9	5.04E-05	2.14E-04	± 1.06E-03	1.16E-01	± 7.49E-01	1.50E-03	± 9.33E-04	99.9	96.59 ± 0.63	413.4 ± 2.4
# 10	2.99E-05	-1.84E-03	± 1.83E-03	1.68E+00	± 1.29E+00	3.86E-05	± 1.55E-03	100.6	98.69 ± 0.87	421.4 ± 3.3
# 11	2.53E-05	5.55E-04	± 2.11E-03	3.54E-01	± 1.51E+00	7.24E-04	± 1.68E-03	99.8	98.23 ± 1.11	419.7 ± 4.2
# 12	6.28E-05	3.14E-04	± 8.63E-04	-4.11E-01	± 6.12E-01	6.83E-04	± 6.53E-04	99.9	97.93 ± 0.50	418.5 ± 1.9
# 13	2.02E-05	1.84E-03	± 2.71E-03	-6.10E-01	± 1.96E+00	5.10E-04	± 2.41E-03	99.4	94.52 ± 1.22	405.4 ± 4.7
# 14	2.41E-05	6.59E-03	± 2.26E-03	4.65E-01	± 1.58E+00	-1.41E-03	± 1.97E-03	98.0	94.83 ± 1.12	406.6 ± 4.3
# 15	3.12E-05	8.89E-03	± 1.77E-03	-7.47E-01	± 1.21E+00	2.22E-03	± 1.50E-03	97.3	95.02 ± 0.97	407.4 ± 3.7
# 16	2.19E-05	5.17E-03	± 1.33E-03	-6.94E-01	± 1.36E+00	-2.59E-03	± 1.59E-03	98.4	96.40 ± 0.84	412.6 ± 3.2
# 17	1.06E-04	4.52E-03	± 3.40E-04	2.13E-01	± 3.58E-01	-4.30E-04	± 5.45E-04	98.7	97.41 ± 0.41	416.5 ± 1.6
# 18	4.11E-05	4.04E-04	± 8.76E-04	-1.30E-01	± 9.38E-01	-2.16E-03	± 1.04E-03	99.9	95.82 ± 0.55	410.4 ± 2.1
# 19	3.92E-05	-1.25E-03	± 9.23E-04	6.77E-01	± 1.05E+00	-1.53E-03	± 1.22E-03	100.4	96.74 ± 0.87	414.0 ± 3.3
# 20	4.13E-05	-8.47E-04	± 9.00E-04	1.44E+00	± 9.61E-01	3.82E-05	± 1.26E-03	100.3	97.98 ± 0.59	418.7 ± 2.3
# 21	4.51E-05	-4.14E-04	± 8.11E-04	-1.86E-01	± 8.73E-01	2.67E-03	± 1.19E-03	100.1	96.90 ± 0.63	414.6 ± 2.4
# 22	2.80E-05	-1.09E-03	± 1.29E-03	-1.01E+00	± 1.43E+00	-9.81E-04	± 1.53E-03	100.3	101.20 ± 0.81	430.8 ± 3.1
# 23	3.44E-05	-2.47E-03	± 1.11E-03	2.99E-01	± 1.14E+00	-3.09E-04	± 1.22E-03	100.8	96.44 ± 0.86	412.8 ± 3.3
# 24	2.84E-05	3.79E-05	± 1.27E-03	-3.89E-01	± 1.42E+00	3.80E-04	± 1.49E-03	100.0	96.18 ± 0.69	411.8 ± 2.6
# 25	2.17E-05	-6.32E-04	± 1.69E-03	-2.63E-01	± 1.80E+00	-7.88E-04	± 1.95E-03	100.2	96.04 ± 0.98	411.3 ± 3.7
# 26	2.60E-05	7.09E-03	± 1.46E-03	2.29E-01	± 1.50E+00	-2.63E-04	± 1.84E-03	97.9	96.98 ± 1.01	414.9 ± 3.9
# 27	4.93E-05	2.81E-03	± 7.64E-04	-6.65E-01	± 8.14E-01	-1.02E-03	± 1.01E-03	99.1	94.19 ± 0.75	404.2 ± 2.9
# 28	3.51E-05	2.37E-03	± 1.07E-03	-2.07E-01	± 1.29E+00	-2.16E-03	± 1.39E-03	99.3	100.90 ± 0.93	429.9 ± 3.5
# 29	1.58E-05	2.97E-03	± 2.39E-03	1.47E+00	± 2.66E+00	-6.88E-04	± 2.82E-03	99.1	96.05 ± 1.40	411.3 ± 5.4
# 30	6.92E-06	6.59E-03	± 5.18E-03	3.81E+00	± 6.60E+00	-5.67E-03	± 5.56E-03	98.0	94.96 ± 2.68	407.2 ± 10.3
# 31	9.66E-06	6.70E-03	± 3.77E-03	-3.75E+00	± 4.34E+00	-3.45E-03	± 3.95E-03	98.0	94.95 ± 1.78	407.1 ± 6.8
# 32	4.23E-05	5.67E-03	± 8.67E-04	-6.37E-01	± 9.95E-01	-2.43E-03	± 1.07E-03	98.3	96.13 ± 0.80	411.6 ± 3.1
# 33	9.04E-05	-1.36E-03	± 4.05E-04	-2.06E-01	± 4.66E-01	3.36E-04	± 6.33E-04	100.4	98.32 ± 0.55	420.0 ± 2.1
<b>Total</b>	<b>1.17E-03</b>	<b>2.71E-03</b>	<b>± 2.20E-04</b>	<b>3.62E-02</b>	<b>± 1.94E-01</b>	<b>-8.63E-04</b>	<b>± 2.2</b>			

# 21	6.94E-06	-1.44E-03	±	6.91E-03	-1.11E+00	±	4.60E+00	7.58E-03	±	5.81E-03	100.4	96.88 ± 2.61	413.8 ± 9.9
# 22	2.67E-06	3.23E-03	±	1.76E-02	-6.67E+00	±	1.15E+01	1.31E-03	±	1.26E-02	99.1	100.60 ± 6.94	428.1 ± 26.3
# 23	4.77E-06	1.71E-03	±	1.02E-02	7.37E+00	±	7.04E+00	3.18E-03	±	7.00E-03	99.5	97.38 ± 3.88	415.7 ± 14.8
# 24	8.33E-06	6.21E-03	±	5.72E-03	2.69E-01	±	3.75E+00	5.65E-03	±	4.00E-03	98.1	96.69 ± 2.41	413.1 ± 9.2
# 25	5.89E-06	1.30E-02	±	7.99E-03	-1.36E+00	±	5.32E+00	2.48E-03	±	5.67E-03	96.2	96.91 ± 2.93	413.9 ± 11.2
# 26	4.02E-05	5.24E-03	±	1.24E-03	3.26E-03	±	8.02E-01	3.06E-03	±	1.02E-03	98.4	95.52 ± 0.56	408.6 ± 2.1
<b>Total</b>	<b>4.55E-04</b>	<b>9.73E-04</b>	<b>±</b>	<b>5.37E-04</b>	<b>4.12E-01</b>	<b>±</b>	<b>3.66E-01</b>	<b>2.34E-04</b>	<b>±</b>	<b>4.34E-04</b>	<b>99.7</b>	<b>96.57 ± 0.24</b>	<b>412.6 ± 4.9</b>
N119.MS3 J = 2660E-02 ± .3504E-04													
# 1	2.05E-06	4.28E-01	±	5.44E-02	-7.35E+00	±	1.53E+01	1.05E-02	±	3.11E-02	46.4	109.50 ± 15.85	461.0 ± 58.9
# 2	4.04E-06	1.30E-01	±	2.45E-02	4.40E+00	±	8.21E+00	-4.45E-03	±	1.56E-02	71.9	98.55 ± 8.05	420.0 ± 30.6
# 3	2.84E-06	9.26E-02	±	3.44E-02	-4.88E+00	±	1.11E+01	-1.64E-03	±	2.20E-02	79.0	102.70 ± 11.29	435.7 ± 42.6
# 4	6.11E-06	4.23E-02	±	1.59E-02	8.93E+00	±	5.53E+00	-5.13E-03	±	1.01E-02	88.9	99.70 ± 5.25	424.3 ± 19.9
# 5	1.86E-05	3.59E-02	±	5.23E-03	1.94E+00	±	1.84E+00	-1.44E-03	±	3.58E-03	90.4	99.51 ± 1.97	423.6 ± 7.5
# 7	1.25E-04	1.61E-03	±	7.72E-04	1.64E-01	±	2.67E-01	-3.26E-04	±	5.42E-04	99.5	96.68 ± 0.42	412.9 ± 1.6
# 8	1.28E-04	3.38E-03	±	7.50E-04	1.65E-01	±	2.79E-01	4.32E-04	±	5.82E-04	99.0	96.37 ± 0.45	411.7 ± 1.7
# 9	4.74E-05	3.78E-03	±	2.04E-03	8.21E-02	±	6.93E-01	2.03E-03	±	1.66E-03	98.8	94.53 ± 0.82	404.6 ± 3.1
# 10	8.81E-05	7.34E-04	±	1.10E-03	-3.23E-02	±	4.38E-01	8.18E-04	±	8.41E-04	99.8	96.62 ± 0.44	412.6 ± 1.7
# 11	5.95E-05	2.61E-04	±	1.63E-03	1.58E-01	±	5.31E-01	4.43E-04	±	1.19E-03	99.9	95.39 ± 0.66	407.9 ± 2.5
# 12	8.24E-05	-4.79E-04	±	1.18E-03	1.03E-01	±	4.07E-01	1.12E-03	±	8.58E-04	100.1	98.78 ± 0.51	420.9 ± 1.9
# 13	6.76E-05	3.79E-03	±	1.42E-03	3.21E-01	±	4.72E-01	6.13E-04	±	1.01E-03	98.8	95.37 ± 0.59	407.9 ± 2.3
# 14	3.92E-05	2.00E-03	±	2.47E-03	1.03E+00	±	8.10E-01	-8.12E-04	±	1.77E-03	99.4	97.65 ± 0.93	416.5 ± 3.6
# 15	2.16E-05	8.41E-03	±	1.95E-03	3.94E-01	±	1.67E+00	-4.77E-03	±	2.14E-03	97.5	95.65 ± 1.15	408.9 ± 4.4
# 16	1.15E-05	1.11E-02	±	3.64E-03	3.25E+00	±	3.33E+00	-7.97E-03	±	3.91E-03	96.6	93.54 ± 1.46	400.8 ± 5.6
# 17	3.46E-06	6.18E-03	±	1.21E-02	1.12E+01	±	1.00E+01	9.41E-03	±	1.30E-02	98.2	100.70 ± 4.77	428.1 ± 18.1
# 18	3.66E-06	9.03E-03	±	1.15E-02	9.39E+00	±	9.50E+00	7.98E-03	±	1.24E-02	97.4	99.71 ± 4.29	424.4 ± 16.3
# 19	2.96E-06	1.40E-03	±	1.40E-02	7.16E+00	±	1.24E+01	5.00E-03	±	1.48E-02	99.6	96.93 ± 5.38	413.8 ± 20.5
# 20	1.01E-05	1.91E-03	±	4.22E-03	3.23E+00	±	3.69E+00	-1.03E-03	±	4.36E-03	99.4	97.97 ± 1.83	417.8 ± 7.0
# 21	6.60E-05	5.49E-04	±	6.81E-04	6.24E-01	±	5.28E-01	5.15E-04	±	1.05E-03	99.8	97.91 ± 0.54	417.5 ± 2.1
# 22	2.60E-05	4.56E-03	±	1.61E-03	-5.31E-02	±	1.32E+00	-7.85E-05	±	2.06E-03	98.6	95.87 ± 0.79	409.8 ± 3.0
# 23	8.11E-06	2.95E-03	±	5.14E-03	2.10E+00	±	4.53E+00	-5.66E-03	±	5.87E-03	99.1	96.33 ± 2.25	411.5 ± 8.6
# 24	1.78E-05	1.96E-02	±	2.59E-03	3.60E+00	±	1.97E+00	-1.61E-03	±	2.60E-03	94.3	96.22 ± 1.78	411.1 ± 6.8
# 25	1.13E-05	2.48E-02	±	3.87E-03	2.68E+00	±	3.21E+00	-9.14E-05	±	4.57E-03	93.3	101.10 ± 1.66	429.6 ± 6.3
# 26	6.95E-06	1.82E-02	±	6.18E-03	7.73E+00	±	5.08E+00	-5.28E-04	±	7.00E-03	94.6	94.81 ± 2.62	405.7 ± 10.0
# 27	1.35E-05	7.21E-02	±	3.45E-03	-5.13E-02	±	2.82E+00	2.42E-03	±	3.84E-03	82.0	97.26 ± 1.36	415.1 ± 5.2
# 28	1.90E-04	1.08E-02	±	2.59E-04	1.19E-01	±	2.08E-01	7.65E-04	±	3.55E-04	96.9	99.61 ± 0.36	424.0 ± 1.4
<b>Total</b>	<b>1.06E-03</b>	<b>7.64E-03</b>	<b>±</b>	<b>3.62E-04</b>	<b>5.65E-01</b>	<b>±</b>	<b>1.71E-01</b>	<b>2.38E-04</b>	<b>±</b>	<b>2.94E-04</b>	<b>97.7</b>	<b>97.29 ± 0.17</b>	<b>415.2 ± 4.9</b>
N109.MS3 J = 2657E-02 ± .9221E-05													
# 1	2.03E-07	1.77E-01	±	1.63E-01	-6.05E+00	±	2.91E+01	-1.79E-01	±	1.79E-01	60.4	79.45 ± 53.71	345.6 ± 212.6
# 2	4.63E-06	8.18E-02	±	6.35E-03	-1.70E+00	±	1.28E+00	-1.44E-02	±	7.32E-03	81.5	106.20 ± 2.85	448.3 ± 10.7
# 3	4.95E-06	8.80E-03	±	5.44E-03	-2.07E+00	±	1.34E+00	-6.76E-04	±	6.94E-03	97.6	104.50 ± 2.61	442.1 ± 9.8
# 4	1.39E-05	3.08E-02	±	2.14E-03	-3.68E-01	±	4.58E-01	1.25E-04	±	2.95E-03	91.6	99.70 ± 1.37	424.0 ± 5.2
# 5	2.36E-05	4.13E-03	±	1.23E-03	-1.03E-02	±	2.78E-01	1.08E-03	±	1.61E-03	98.8	99.06 ± 0.86	421.5 ± 3.3
# 6	5.29E-05	6.82E-04	±	5.53E-04	2.92E-01	±	1.44E-01	-1.29E-03	±	8.72E-04	99.8	99.24 ± 0.57	422.2 ± 2.2
# 7	6.51E-05	2.70E-03	±	4.10E-04	1.92E-01	±	1.06E-01	5.83E-04	±	6.63E-04	99.2	99.71 ± 0.46	424.0 ± 1.8
# 8	4.01E-05	3.39E-03	±	7.00E-04	2.98E-01	±	1.52E-01	-7.42E-04	±	9.46E-04	99.0	97.03 ± 0.90	413.8 ± 3.4
# 9	4.73E-05	1.77E-03	±	6.93E-04	1.83E-01	±	1.84E-01	-9.33E-04	±	9.85E-04	99.5	97.77 ± 0.72	416.6 ± 2.8
# 10	2.17E-05	-1.49E-03	±	1.31E-03	2.14E-01	±	3.04E-01	4.97E-03	±	2.01E-03	100.4	99.04 ± 0.79	421.5 ± 3.0
# 11	2.95E-05	-7.45E-04	±	1.04E-03	-1.14E-02	±	2.15E-01	6.35E-04	±	1.49E-03	100.2	97.84 ± 0.70	416.9 ± 2.6
# 12	3.07E-05	1.94E-03	±	9.74E-04	-1.54E-01	±	2.79E-01	-4.57E-04	±	1.67E-03	99.4	96.67 ± 1.12	412.5 ± 4.3
# 13	1.74E-05	2.85E-03	±	1.91E-03	-1.35E+00	±	4.33E-01	-4.93E-03	±	2.25E-03	99.1	97.60 ± 1.07	416.0 ± 4.1
# 14	1.23E-05	1.70E-02	±	4.45E-03	-4.74E-01	±	1.03E+00	-2.21E-03	±	4.09E-03	95.1	97.46 ± 1.59	415.5 ± 6.1
# 15	2.28E-05	1.79E-04	±	2.31E-03	-1.73E-01	±	5.89E-01	-4.60E-04	±	1.89E-03	100.0	97.53 ± 1.07	415.7 ± 4.1
# 16	1.73E-05	-2.35E-03	±	3.10E-03	-5.23E-01	±	7.21E-01	-1.20E-03	±	2.56E-03	100.7	99.45 ± 1.49	423.0 ± 5.7
# 17	1.82E-05	-1.59E-03	±	3.02E-03	3.66E-01	±	7.12E-01	2.98E-03	±	2.73E-03	100.5	97.86 ± 1.62	417.0 ± 6.2
# 18	4.32E-05	1.38E-03	±	1.24E-03	-2.88E-01	±	2.90E-01	2.20E-03	±	1.46E-03	99.6	98.52 ± 0.76	419.5 ± 2.9
# 19	2.04E-05	-3.99E-04	±	2.64E-03	6.39E-01	±	6.55E-01	-1.13E-03	±	2.02E-03	100.1	98.81 ± 1.16	420.6 ± 4.4
# 20	2.25E-05	-1.13E-03	±	2.36E-03	-7.18E-01	±	5.79E-01	-1.25E-04	±	1.88E-03	100.3	99.45 ± 1.09	423.0 ± 4.1
# 21	2.74E-05	1.92E-03	±	2.00E-03	-1.79E-01	±	4.90E-01	-9.11E-04	±	1.52E-03	99.4	97.65 ± 0.80	416.2 ± 3.0
# 22	1.51E-05	3.80E-03	±	3.64E-03	-3.73E-01	±	8.79E-01	9.89E-04	±	2.92E-03	98.9	96.36 ± 1.30	411.3 ± 4.9
# 23	7.85E-06	-1.06E-03	±	6.73E-03	-1.25E+00	±	1.71E+00	4.47E-03	±	5.34E-03	100.3	98.74 ± 2.61	420.3 ± 9.9
# 24	5.20E-06	-2.20E-03	±	1.02E-02	-2.25E+00	±	2.65E+00	-8.48E-03	±	8.12E-03	100.7	98.35 ± 3.58	418.8 ± 13.6
# 25	4.56E-06	8.60E-03	±	1.15E-02	5.05E-01	±	3.00E+00	-1.68E-03	±	8.96E-03	97.4	95.12 ± 3.91	406.5 ± 15.0
# 26	4.66E-06	2.55E-03	±	1.15E-02	-1.55E+00	±	2.88E+00	-2.68E-03	±	8.70E-03	99.2	97.14 ± 4.14	414.2 ± 15.8
# 27	8.14E-06	2.00E-02	±	6.51E-03	-1.13E+00	±	1.64E+00	-2.48E-03	±	5.44E-03	94.3	98.17 ± 2.59	418.1 ± 9.9
# 28	1.24E-05	1.43E-03	±	4.31E-03	-1.11E+00	±	1.13E+00	3.69E-04	±	3.24E-03	99.6	102.70 ± 1.74	435.3 ± 6.5
<b>Total</b>	<b>5.94E-04</b>	<b>3.30E-03</b>	<b>±</b>	<b>3.93E-04</b>	<b>-1.47E-01</b>	<b>±</b>	<b>9.62E-02</b>	<b>-2.46E-04</b>	<b>±</b>	<b>3.86E-04</b>	<b>99.0</b>	<b>98.51 ± 0.21</b>	<b>419.5 ± 1.5</b>
N115.MS3 J = 2655E-02 ± .3495E-04													
# 1	4.10E-06	7.32E-01	±	2.73E-02	-1.36E+01	±	3.93E+00	-6.75E-03	±	1.10E-02	24.5	70.23 ± 5.51	308.4 ± 22.2
# 2	8.39E-06	5.96E-02	±	7.28E-03	-7.96E-01	±	1.89E+00	7.45E-03	±	5.50E-03	84.8	97.88 ± 2.78	416.7 ± 10.6
# 3	2.02E-05	1.71E-02	±	2.94E-03	2.96E-01	±	7.84E-01	-3.09E-03	±	2.22E-03	95.2	99.32 ± 1.14	422.2 ± 4.3
# 4	1.12E-05	2.11E-03	±	5.22E-03	4.53E-01	±	1.46E+00	-3.06E-04	±	4.45E-03	99.4	98.22 ± 2.07	418.0 ± 7.9
# 5	1.21E-05	1.81E-03	±	4.89E-03	-1.88E-01	±	1.23E+00	-7.07E-04	±	4.14E-03	99.5	96.45 ± 1.89	411.3 ± 7.2
# 6	1.77E-05	1.34E-02	±	3.35E-03	3.26E-01	±	9.52E-01	-4.03E-04	±	2.50E-03	96.1	96.24 ± 1.36	410.5 ± 5.2
# 7	2.09E-05	2.46E-03	±	2.85E-03	-2.63E-01	±	7.84E-01	-9.79E-04	±	2.43E-03	99.3	98.67 ± 1.33	419.7 ± 5.1
# 8	3.26E-05	2.54E-03	±	1.81E-03	8.41E-02	±	5.87E-01	-6.49E-04	±	1.39E-03	99.2	96.65 ± 1.03	412.0 ± 3.9
# 9	1.98E-05	5.39E-03	±	3.01E-03	-1.07E+00	±	7.91E-01	-3.97E-03	±	2.47E-03	98.4	98.09 ± 1.36	417.5 ± 5.1
# 10	2.28E-05	2.36E-03	±	2.60E-03	6.96E-01	±	6.71E-01	-7.47E-04	±	2.11E-03	99.3	97.73 ± 1.22	416.2 ± 4.6
# 11	4.16E-05	3.19E-03	±	1.46E-03	-								

# 4	4,17E-05	1,84E-03	±	1,84E-03	-1,33E-01	±	4,57E-01	8,44E-04	±	9,29E-04	99,5	100,40	±	0,79	426,3	±	3,0
# 5	1,04E-04	2,22E-03	±	7,50E-04	-8,74E-02	±	2,03E-01	-5,21E-04	±	5,27E-04	99,4	99,63	±	0,37	423,3	±	1,4
# 6	1,16E-04	6,36E-03	±	6,81E-04	-1,30E-02	±	1,71E-01	8,37E-04	±	4,63E-04	98,1	98,28	±	0,39	418,2	±	1,5
# 7	3,41E-05	3,95E-03	±	2,27E-03	-6,60E-01	±	6,01E-01	1,90E-03	±	1,10E-03	98,8	98,86	±	1,06	420,4	±	4,0
# 8	9,39E-05	3,79E-04	±	8,21E-04	3,01E-01	±	2,11E-01	5,42E-04	±	6,03E-04	99,9	100,70	±	0,67	427,4	±	2,5
# 9	1,00E-04	1,77E-03	±	7,86E-04	1,69E-01	±	1,93E-01	1,56E-03	±	5,53E-04	99,5	99,39	±	0,46	422,4	±	1,7
# 10	7,51E-05	2,43E-03	±	6,89E-04	-1,19E-01	±	2,17E-01	8,51E-04	±	9,96E-04	99,3	100,70	±	0,45	427,4	±	1,7
# 11	4,07E-05	8,55E-04	±	1,26E-03	3,09E-01	±	4,13E-01	2,27E-04	±	1,69E-03	99,8	99,69	±	0,70	423,5	±	2,7
# 12	1,57E-05	1,29E-03	±	3,22E-03	8,39E-01	±	1,01E+00	-1,35E-03	±	4,30E-03	99,6	98,16	±	1,46	417,7	±	5,6
# 13	1,34E-05	5,72E-03	±	3,86E-03	4,02E-01	±	1,20E+00	-1,56E-03	±	5,25E-03	98,3	95,53	±	1,61	407,7	±	6,1
# 14	2,03E-05	3,70E-03	±	2,53E-03	-2,58E-01	±	7,95E-01	-1,53E-03	±	3,28E-03	98,9	95,64	±	1,03	408,1	±	3,9
# 15	4,08E-05	1,28E-03	±	1,26E-03	2,61E-01	±	4,93E-01	-3,80E-04	±	1,72E-03	99,6	98,66	±	0,79	419,6	±	3,0
# 17	5,78E-05	1,75E-03	±	8,72E-04	2,93E-01	±	2,98E-01	1,92E-03	±	1,30E-03	99,5	98,60	±	0,49	419,4	±	1,9
# 18	2,32E-05	1,41E-03	±	2,27E-03	5,52E-01	±	6,59E-01	3,74E-04	±	2,96E-03	99,6	96,12	±	1,01	410,0	±	3,8
# 19	2,58E-05	-1,20E-03	±	1,96E-03	4,15E-01	±	6,57E-01	1,36E-03	±	2,73E-03	100,4	98,45	±	0,98	418,8	±	3,7
# 20	1,91E-05	2,97E-03	±	2,75E-03	-4,43E-01	±	8,11E-01	2,44E-03	±	3,50E-03	99,1	96,22	±	1,16	410,3	±	4,4
# 21	2,21E-05	5,68E-04	±	2,34E-03	-5,92E-01	±	7,35E-01	-9,49E-04	±	3,04E-03	99,8	99,64	±	0,95	423,3	±	3,6
# 22	2,20E-05	5,45E-03	±	2,35E-03	1,60E-01	±	7,59E-01	-6,15E-04	±	3,18E-03	98,4	97,47	±	1,19	415,1	±	4,5
# 23	8,89E-06	8,46E-03	±	5,77E-03	-1,21E+00	±	1,73E+00	-5,44E-03	±	7,91E-03	97,4	92,16	±	2,32	394,8	±	8,9
# 24	1,23E-05	5,48E-03	±	4,28E-03	1,24E+00	±	1,34E+00	-7,18E-03	±	5,61E-03	98,3	95,29	±	1,65	406,8	±	6,3
# 25	6,40E-05	1,79E-03	±	7,90E-04	-2,87E-01	±	2,55E-01	-2,04E-03	±	1,12E-03	99,5	98,22	±	0,57	418,0	±	2,2
<b>Total</b>	9,94E-04	3,47E-03	±	3,09E-04	1,83E-02	±	8,76E-02	2,91E-04	±	3,07E-04	99,0	98,98	±	0,16	420,8	±	5,0

N113.MS3

J = 2654E-02 ± 3494E-04

# 1	3,94E-06	1,05E-01	±	1,71E-02	-4,05E+00	±	3,48E+00	-1,10E-02	±	9,15E-03	76,7	101,80	±	6,12	431,3	±	23,1
# 2	2,41E-06	5,29E-04	±	2,56E-02	1,29E+00	±	5,78E+00	9,77E-03	±	1,44E-02	99,9	108,30	±	9,48	455,8	±	35,3
# 3	3,05E-06	3,65E-02	±	2,06E-02	2,47E+00	±	4,80E+00	4,19E-03	±	1,22E-02	90,9	108,30	±	7,69	455,7	±	28,6
# 4	4,54E-06	1,63E-02	±	1,39E-02	-2,51E-01	±	2,98E+00	7,11E-03	±	7,80E-03	95,6	104,60	±	5,07	442,0	±	19,0
# 5	3,10E-07	1,27E-01	±	2,11E-01	-2,59E+01	±	4,42E+01	1,68E-01	±	1,25E-01	45,4	31,27	±	62,24	143,8	±	275,1
# 6	9,72E-06	1,33E-02	±	6,40E-03	1,00E+00	±	1,49E+00	6,98E-03	±	3,91E-03	96,2	98,81	±	2,31	420,1	±	8,8
# 7	1,36E-04	1,31E-03	±	4,65E-04	-1,86E-02	±	9,85E-02	1,98E-04	±	5,86E-04	99,6	101,10	±	0,39	428,7	±	1,5
# 8	1,09E-04	2,48E-03	±	5,78E-04	9,28E-03	±	1,21E-01	1,45E-03	±	6,64E-04	99,3	98,82	±	0,28	420,2	±	1,1
# 9	2,65E-05	3,17E-04	±	2,46E-03	-9,23E-02	±	5,28E-01	3,73E-04	±	1,67E-03	99,9	100,30	±	1,12	425,6	±	4,2
# 10	1,05E-04	-1,09E-03	±	6,07E-04	8,85E-02	±	1,31E-01	2,86E-04	±	5,08E-04	100,3	100,30	±	0,56	425,8	±	2,1
# 11	2,95E-05	2,81E-03	±	2,19E-03	2,15E-01	±	4,73E-01	-1,89E-03	±	1,52E-03	99,2	97,01	±	1,00	413,3	±	3,8
# 12	4,49E-05	9,64E-03	±	1,20E-03	1,14E+00	±	2,17E-01	4,02E-03	±	9,22E-04	97,1	95,26	±	0,64	406,6	±	2,4
# 14	3,80E-05	-6,76E-05	±	1,39E-03	4,47E-02	±	3,09E-01	-2,46E-04	±	1,10E-03	100,0	99,67	±	0,85	423,4	±	3,2
# 15	7,50E-05	8,67E-05	±	7,16E-04	6,09E-02	±	1,64E-01	1,58E-03	±	6,05E-04	100,0	101,00	±	0,64	428,4	±	2,4
# 16	7,18E-05	-1,12E-04	±	7,30E-04	2,68E-02	±	1,97E-01	-5,52E-04	±	6,40E-04	100,0	100,60	±	0,73	427,0	±	2,7
# 17	5,63E-05	-3,30E-05	±	9,50E-04	-3,21E-01	±	2,17E-01	-4,81E-04	±	7,06E-04	100,0	100,80	±	0,45	427,7	±	1,7
# 18	5,22E-05	-4,66E-04	±	9,99E-04	-2,25E-01	±	2,27E-01	6,63E-04	±	9,37E-04	100,1	99,62	±	0,61	423,2	±	2,3
# 19	5,12E-05	1,13E-03	±	1,04E-03	-3,72E-01	±	2,16E-01	8,93E-04	±	9,70E-04	99,7	100,70	±	0,82	427,4	±	3,1
# 20	4,26E-05	2,18E-04	±	1,26E-03	-1,41E-01	±	3,01E-01	1,42E-03	±	1,11E-03	99,9	99,39	±	0,56	422,3	±	2,1
# 21	5,49E-05	2,02E-03	±	1,02E-03	3,57E-01	±	2,25E-01	1,37E-03	±	7,56E-04	99,4	99,29	±	0,65	421,9	±	2,5
# 22	1,41E-05	2,24E-03	±	3,75E-03	1,54E-01	±	7,60E-01	-4,46E-04	±	2,71E-03	99,4	101,50	±	1,56	430,2	±	5,9
# 23	2,48E-05	6,23E-04	±	2,15E-03	-1,80E-01	±	3,91E-01	2,29E-03	±	1,72E-03	99,8	100,40	±	1,06	426,0	±	4,0
# 24	5,12E-05	1,05E-03	±	1,03E-03	1,49E-01	±	2,04E-01	-1,99E-04	±	8,01E-04	99,7	100,10	±	0,57	425,2	±	2,2
# 25	2,93E-05	1,52E-03	±	1,87E-03	2,82E-01	±	3,44E-01	-1,58E-03	±	1,86E-03	99,6	99,78	±	0,97	423,8	±	3,7
# 26	3,16E-05	-1,84E-04	±	1,69E-03	3,61E-01	±	3,77E-01	-3,11E-03	±	1,34E-03	100,1	100,60	±	0,85	427,0	±	3,2
# 27	8,75E-05	4,13E-04	±	6,21E-04	3,74E-02	±	1,09E-01	1,94E-04	±	6,61E-04	99,9	100,70	±	0,48	427,3	±	1,8
# 28	4,52E-05	1,51E-03	±	1,17E-03	-1,20E-01	±	2,48E-01	-7,38E-04	±	9,68E-04	99,6	100,40	±	0,63	426,3	±	2,4
# 29	2,12E-05	5,23E-03	±	1,67E-03	1,47E+00	±	7,29E-01	2,21E-03	±	1,44E-03	98,5	100,60	±	1,02	427,0	±	3,9
# 30	4,72E-05	4,14E-04	±	7,52E-04	4,94E-01	±	2,59E-01	-8,97E-04	±	7,57E-04	99,9	99,41	±	0,62	422,4	±	2,4
# 31	3,19E-05	-1,16E-03	±	1,19E-03	3,17E-02	±	3,72E-01	1,36E-04	±	9,91E-04	100,3	98,31	±	0,78	418,2	±	3,0
# 32	1,85E-05	-2,06E-04	±	1,96E-03	2,40E-01	±	7,08E-01	-1,76E-03	±	1,65E-03	100,1	98,33	±	1,10	418,3	±	4,2
# 33	3,64E-05	7,67E-04	±	9,65E-04	4,64E-01	±	3,37E-01	-1,65E-03	±	8,03E-04	99,7	100,90	±	0,63	428,1	±	2,4
# 34	3,90E-05	4,98E-04	±	9,06E-04	3,50E-01	±	3,80E-01	2,46E-04	±	7,95E-04	99,9	100,10	±	0,58	424,9	±	2,2
# 35	1,83E-05	2,64E-04	±	1,91E-03	-3,45E-01	±	6,74E-01	-3,75E-03	±	1,80E-03	99,9	100,30	±	1,09	425,9	±	4,1
# 36	2,49E-05	6,06E-04	±	1,39E-03	-2,85E-01	±	4,61E-01	-7,83E-05	±	1,43E-03	99,8	99,35	±	0,83	422,2	±	3,1
# 37	9,59E-06	-6,28E-03	±	3,72E-03	1,59E+00	±	1,28E+00	-4,99E-03	±	2,93E-03	101,9	101,70	±	2,34	431,1	±	8,8
# 38	2,48E-06	3,43E-03	±	1,39E-02	-2,49E+00	±	5,00E+00	-3,46E-02	±	1,03E-02	99,0	102,70	±	7,02	434,7	±	26,4
# 39	1,22E-04	1,09E-04	±	2,88E-04	-4,63E-02	±	9,61E-02	7,18E-04	±	4,90E-04	100,0	102,00	±	0,47	432,3	±	1,8
<b>Total</b>	1,57E-03	1,36E-03	±	2,05E-04	8,56E-02	±	4,92E-02	2,81E-04	±	1,71E-04	99,6	100,10	±	0,12	425,2	±	5,0

N114.MS3

J = 2654E-02 ± 3494E-04

# 1	4,94E-06	1,26E-01	±	1,59E-02	7,52E-01	±	2,15E+00	-1,36E-02	±	8,61E-03	72,0	95,83	±	5,25	408,8	±	20,0
# 2	2,80E-06	2,10E-02	±	2,70E-02	-6,00E-01	±	4,70E+00	-1,14E-02	±	1,55E-02	94,4	104,10	±	9,66	440,0	±	36,2
# 3	1,16E-06	6,77E-03	±	6,53E-02	-3,88E+00	±	9,27E+00	2,84E-02	±	3,49E-02	97,9	91,03	±	21,40	390,4	±	82,5
# 4	3,47E-06	2,19E-02	±	2,18E-02	-3,46E-01	±	2,91E+00	1,39E-02	±	1,17E-02	93,8	98,56	±	7,48	419,2	±	28,4
# 5	5,91E-06	2,18E-03	±	1,29E-02	8,01E-01	±	1,99E+00	-2,62E-03	±	7,12E-03	99,4	101,60	±	4,62	430,6	±	17,4
# 6	1,51E-04	4,30E-03	±	5,09E-04	2,50E-01	±	8,59E-02	1,09E-03	±	5,43E-04	98,7	99,95	±				



# 19	7,45E-06	-7,36E-03	±	6,38E-03	-9,96E-01	±	7,58E-01	6,74E-05	±	6,77E-03	102,2	102,00	±	2,49	432,2	±	9,4
# 20	1,12E-04	2,98E-04	±	4,00E-04	-2,13E-02	±	6,67E-02	-7,47E-06	±	5,04E-04	99,9	100,10	±	0,63	425,1	±	2,4
# 21	5,15E-06	2,30E-01	±	1,07E-02	-6,01E-01	±	1,23E+00	3,40E-03	±	1,13E-02	58,1	94,15	±	3,61	402,4	±	13,8
# 22	6,10E-06	6,00E-02	±	7,85E-03	9,16E-01	±	9,16E-01	4,57E-03	±	7,72E-03	82,8	84,99	±	2,91	367,0	±	11,4
# 23	4,87E-05	8,06E-03	±	9,56E-04	2,76E-01	±	1,30E-01	1,16E-03	±	1,02E-03	97,6	97,70	±	0,54	416,0	±	2,0
<b>Total</b>	<b>8,13E-04</b>	<b>5,18E-03</b>	±	<b>2,28E-04</b>	<b>-1,31E-01</b>	±	<b>5,36E-02</b>	<b>-3,83E-04</b>	±	<b>2,61E-04</b>	<b>98,5</b>	<b>99,68</b>	±	<b>0,18</b>	<b>423,5</b>	±	<b>3,3</b>

N112.MS3

J = 2656E-02 ± 2729E-04

# 1	1,09E-06	4,60E-02	±	4,17E-02	1,01E+01	±	1,09E+01	1,59E-02	±	3,92E-02	88,6	106,10	±	15,53	448,0	±	58,1
# 2	2,51E-06	1,07E-02	±	1,81E-02	-4,46E-01	±	4,52E+00	2,49E-02	±	1,73E-02	97,1	106,40	±	7,00	449,0	±	26,1
# 3	3,99E-06	5,65E-02	±	1,12E-02	1,29E+00	±	3,17E+00	7,75E-03	±	1,10E-02	85,5	98,49	±	4,13	419,2	±	15,7
# 4	1,04E-04	4,61E-03	±	4,33E-04	7,98E-04	±	1,34E-01	3,46E-04	±	5,69E-04	98,7	102,00	±	0,50	432,6	±	1,9
# 5	1,35E-04	2,51E-04	±	3,37E-04	-7,18E-02	±	8,62E-02	3,64E-04	±	4,29E-04	99,9	102,80	±	0,37	435,6	±	1,4
# 6	4,08E-05	2,83E-03	±	1,12E-03	-7,81E-01	±	2,72E-01	7,30E-04	±	1,31E-03	99,2	100,50	±	0,79	426,8	±	3,0
# 7	2,74E-05	5,54E-03	±	1,66E-03	-3,50E-01	±	4,32E-01	-2,45E-04	±	1,68E-03	98,4	100,00	±	0,78	425,1	±	3,0
# 8	3,56E-05	1,79E-03	±	1,26E-03	-9,73E-02	±	3,64E-01	-1,43E-03	±	1,24E-03	99,5	101,60	±	0,82	430,9	±	3,1
# 9	4,80E-05	1,48E-03	±	9,70E-04	-1,43E-01	±	2,42E-01	-1,18E-03	±	1,10E-03	99,6	100,80	±	0,72	428,0	±	2,7
# 10	3,57E-05	8,78E-04	±	1,30E-03	-1,20E-01	±	3,22E-01	8,17E-04	±	1,32E-03	99,8	102,80	±	0,81	435,6	±	3,0
# 11	1,53E-05	4,43E-03	±	3,09E-03	-5,78E-01	±	7,22E-01	-5,13E-04	±	3,05E-03	98,7	98,17	±	1,26	418,0	±	4,8
# 12	1,79E-05	1,33E-03	±	2,51E-03	6,86E-01	±	6,17E-01	-6,74E-03	±	2,46E-03	99,6	102,20	±	1,10	433,4	±	4,2
# 13	3,76E-05	3,00E-04	±	1,21E-03	-2,17E-01	±	3,12E-01	-4,11E-04	±	1,27E-03	99,9	100,60	±	0,59	427,1	±	2,2
# 14	3,72E-05	-1,48E-03	±	1,22E-03	-1,63E-01	±	3,21E-01	8,06E-04	±	1,33E-03	100,4	102,80	±	0,60	435,7	±	2,3
# 15	2,41E-05	-1,81E-03	±	1,94E-03	3,27E-01	±	4,86E-01	2,66E-03	±	1,82E-03	100,5	103,60	±	1,05	438,4	±	4,0
# 16	2,16E-05	-4,57E-04	±	2,16E-03	-5,85E-01	±	5,35E-01	2,11E-03	±	2,12E-03	100,1	102,90	±	1,13	435,7	±	4,3
# 17	2,04E-05	-1,38E-04	±	2,29E-03	-3,68E-02	±	5,59E-01	3,83E-04	±	2,61E-03	100,0	101,90	±	0,97	432,1	±	3,7
# 18	2,02E-05	-2,71E-03	±	2,20E-03	7,82E-01	±	5,75E-01	-9,33E-04	±	2,10E-03	100,8	103,00	±	1,24	436,3	±	4,7
# 19	1,73E-05	4,88E-04	±	2,75E-03	-3,73E-02	±	7,21E-01	2,94E-03	±	2,47E-03	99,9	96,67	±	1,18	412,3	±	4,5
# 20	6,98E-06	2,25E-03	±	6,74E-03	-2,40E+00	±	1,62E+00	-1,11E-03	±	6,75E-03	99,3	97,47	±	2,78	415,3	±	10,6
# 21	6,00E-06	1,68E-03	±	8,13E-03	2,02E+00	±	2,31E+00	-8,60E-03	±	6,76E-03	99,5	96,95	±	3,01	413,4	±	11,5
# 22	9,51E-05	-1,73E-04	±	4,68E-04	-7,58E-02	±	1,17E-01	-5,34E-05	±	5,91E-04	100,0	102,40	±	0,43	434,1	±	1,6
<b>Total</b>	<b>7,54E-04</b>	<b>1,60E-03</b>	±	<b>2,85E-04</b>	<b>-8,42E-02</b>	±	<b>7,40E-02</b>	<b>1,48E-04</b>	±	<b>2,99E-04</b>	<b>99,5</b>	<b>101,80</b>	±	<b>0,17</b>	<b>431,7</b>	±	<b>4,0</b>

N105.MS3

J = 2658E-02 ± 2265E-04

# 1	5,05E-08	-5,84E-01	±	7,91E-01	-1,74E+02	±	1,61E+02	5,30E-01	±	9,13E-01	24,2	-55	±	199	-285	±	1116
# 2	3,33E-06	1,44E+00	±	5,23E-02	-1,33E+00	±	1,42E+00	2,66E-02	±	1,69E-02	18,5	96,52	±	5,69	412,0	±	21,7
# 3	2,49E-06	6,36E-02	±	1,36E-02	9,53E-01	±	2,14E+00	-8,30E-03	±	1,70E-02	82,3	87,21	±	4,53	376,1	±	17,6
# 4	4,06E-05	6,36E-02	±	1,00E-03	-3,13E-02	±	1,13E-01	4,03E-03	±	1,21E-03	84,2	99,75	±	0,54	424,3	±	2,0
# 5	6,07E-05	2,24E-02	±	7,39E-04	-6,05E-02	±	9,30E-02	6,17E-04	±	1,06E-03	93,7	98,51	±	0,43	419,6	±	1,6
# 6	5,66E-05	2,08E-02	±	6,45E-04	2,77E-01	±	9,79E-02	3,88E-04	±	8,76E-04	94,1	98,38	±	0,55	419,1	±	2,1
# 7	3,15E-05	2,21E-02	±	1,05E-03	-1,07E-01	±	1,32E-01	-7,92E-04	±	1,41E-03	93,6	96,12	±	0,56	410,5	±	2,1
# 8	1,17E-04	2,19E-02	±	3,75E-04	8,63E-02	±	5,35E-02	1,56E-03	±	6,20E-04	93,7	96,67	±	0,36	412,6	±	1,4
# 9	1,00E-04	5,34E-03	±	3,94E-04	4,57E-03	±	4,54E-02	3,76E-04	±	6,62E-04	98,4	97,47	±	0,45	415,6	±	1,7
# 10	1,52E-04	8,82E-03	±	2,60E-04	9,06E-02	±	2,76E-02	-5,98E-04	±	4,02E-04	97,4	97,19	±	0,30	414,6	±	1,1
# 11	8,11E-05	3,19E-03	±	4,37E-04	8,05E-02	±	6,64E-02	1,12E-03	±	7,36E-04	99,0	95,74	±	0,50	409,0	±	1,9
# 12	9,58E-05	5,00E-03	±	3,92E-04	1,26E-01	±	5,52E-02	-5,54E-04	±	5,66E-04	98,5	95,69	±	0,45	408,8	±	1,7
# 13	8,05E-05	2,64E-03	±	4,56E-04	3,97E-02	±	6,26E-02	9,83E-04	±	9,78E-04	99,2	96,13	±	0,58	410,5	±	2,2
# 15	1,23E-04	-5,08E-04	±	3,58E-04	1,03E-01	±	1,18E-01	3,70E-05	±	5,05E-04	100,2	97,27	±	0,36	414,9	±	1,4
# 16	1,17E-04	4,61E-04	±	3,95E-04	-3,09E-02	±	1,24E-01	-6,73E-04	±	3,84E-04	99,9	97,45	±	0,36	415,6	±	1,4
# 17	9,65E-05	9,05E-04	±	4,54E-04	2,71E-02	±	1,46E-01	-5,52E-04	±	4,52E-04	99,7	97,81	±	0,33	416,9	±	1,3
# 18	6,13E-05	1,43E-03	±	7,03E-04	4,57E-02	±	2,32E-01	3,60E-04	±	9,60E-04	99,6	97,24	±	0,59	414,8	±	2,3
# 19	3,95E-05	1,12E-03	±	1,11E-03	-3,59E-02	±	3,65E-01	3,51E-04	±	1,12E-03	99,7	96,05	±	0,73	410,2	±	2,8
# 20	9,79E-05	2,65E-04	±	4,42E-04	1,06E-01	±	1,44E-01	-6,57E-04	±	6,26E-04	99,9	96,68	±	0,44	412,6	±	1,7
# 21	1,22E-04	2,22E-04	±	3,64E-04	2,28E-02	±	1,17E-01	2,67E-04	±	4,68E-04	99,9	97,23	±	0,24	414,7	±	0,9
# 22	1,02E-04	2,25E-03	±	4,26E-04	2,90E-02	±	1,40E-01	1,10E-03	±	6,09E-04	99,3	96,62	±	0,43	412,4	±	1,7
# 23	8,30E-05	5,48E-04	±	5,44E-04	-1,54E-01	±	1,72E-01	-4,67E-04	±	5,41E-04	99,8	96,82	±	0,42	413,1	±	1,6
# 24	6,96E-05	1,14E-03	±	6,36E-04	-6,22E-01	±	2,04E-01	1,11E-03	±	6,04E-04	99,7	96,50	±	0,46	411,9	±	1,7
# 25	4,74E-05	1,69E-02	±	1,05E-03	-1,36E+00	±	2,94E-01	1,72E-03	±	1,08E-03	94,9	91,98	±	0,43	394,6	±	1,6
# 26	5,59E-05	1,49E-02	±	2,50E-03	-2,09E-01	±	2,53E-01	5,56E-04	±	1,46E-03	95,4	91,32	±	0,85	392,0	±	3,3
# 27	4,51E-05	3,69E-03	±	1,07E-03	2,49E-02	±	1,65E-01	1,42E-03	±	1,78E-03	98,9	96,40	±	0,57	411,5	±	2,2
# 28	5,28E-05	8,41E-04	±	8,45E-04	-2,25E-01	±	1,23E-01	3,98E-04	±	1,75E-03	99,8	98,77	±	0,48	420,6	±	1,8
# 29	4,12E-05	-1,69E-03	±	1,05E-03	1,61E-02	±	1,81E-01	1,28E-04	±	2,01E-03	100,5	97,98	±	0,85	417,6	±	3,2
# 30	5,04E-05	4,55E-04	±	8,20E-04	-6,28E-02	±	1,56E-01	-6,37E-04	±	1,55E-03	99,9	98,50	±	0,72	419,6	±	2,7
# 31	2,32E-05	3,37E-03	±	1,95E-03	1,74E-01	±	3,34E-01	-2,03E-03	±	3,32E-03	99,0	97,38	±	1,28	415,3	±	4,9
# 32	3,80E-05	-1,79E-03	±	1,20E-03	-3,00E-01	±	1,77E-01	3,93E-04	±	2,19E-03	100,5	98,33	±	0,84	418,9	±	3,2
# 33	4,00E-05	1,08E-03	±	1,20E-03	-1,73E-01	±	1,83E-01	-4,22E-04	±	1,90E-03	99,7	97,92	±	0,87	417,3	±	3,3
# 34	5,20E-05	3,84E-03	±	7,73E-04	-6,73E-01	±	1,24E-01	1,97E-03	±	1,01E-03	98,8	96,23	±	0,49	410,9	±	1,9
# 35	2,68E-05	2,22E-03	±	1,40E-03	-3,29E-01	±	2,51E-01	-7,54E-04	±	1,50E-03	99,3	97,29	±	0,65	414,9	±	2,5
# 36	3,45E-05	5,47E-03	±	1,16E-03	-1,24E-01	±	1,93E-01	4,31E-03	±	1,18E-03	98,3	95,60	±	0,69	408,5	±	2,6
# 37	7,80E-05	1,60E-03	±	4,97E-04	-7,15E-02	±	8,38E-02	-4,08E-04	±	5,75E-04	99,5	98,34	±	0,37	418,9	±	1,4
# 38	5,57E-05	1,92E-03	±	7,26E-04	-1,73E-01	±	1,13E-01	-8,49E-04	±	6,42E-04	99,4	97,14	±	0,59	414,3	±	2,3
# 39	6,11E-05	5,03E-04	±	6,09E-04	-1,76E-01												

N111.MS3		J = 2663E-02 ± 2274E-04															
# 1	9.38E-07	2.04E-01	±	5.37E-02	-5.28E+00	±	1.58E+01	-1.11E-01	±	6.32E-02	58.5	84.88	±	17.18	367.7	±	67.3
# 2	4.13E-06	9.37E-02	±	1.15E-02	-3.54E-01	±	3.69E+00	-1.58E-02	±	1.41E-02	78.8	103.10	±	4.16	437.6	±	15.7
# 3	2.21E-06	1.37E-02	±	2.04E-02	-8.64E+00	±	6.73E+00	-9.64E-03	±	2.72E-02	96.5	110.40	±	8.38	464.9	±	31.1
# 4	3.81E-06	2.05E-02	±	1.26E-02	1.41E+00	±	3.95E+00	-5.27E-03	±	1.54E-02	94.4	101.60	±	4.65	431.9	±	17.6
# 5	2.54E-05	5.67E-03	±	1.79E-03	-3.33E-01	±	5.95E-01	3.73E-04	±	2.47E-03	98.4	103.80	±	0.76	440.5	±	2.9
# 6	2.29E-05	9.53E-04	±	1.96E-03	1.82E-01	±	6.33E-01	-2.45E-03	±	2.56E-03	99.7	104.10	±	0.99	441.5	±	3.7
# 7	2.53E-05	4.57E-04	±	1.78E-03	-1.51E-01	±	6.03E-01	-1.29E-03	±	2.55E-03	99.9	104.30	±	0.84	442.3	±	3.1
# 8	4.03E-05	1.07E-03	±	1.14E-03	5.16E-02	±	4.00E-01	-6.89E-04	±	1.60E-03	99.7	102.90	±	0.73	437.0	±	2.7
# 9	9.70E-05	1.05E-03	±	4.67E-04	2.08E-02	±	1.67E-01	-6.17E-04	±	6.63E-04	99.7	103.30	±	0.56	438.5	±	2.1
# 10	6.39E-05	9.63E-04	±	7.44E-04	2.18E-02	±	2.30E-01	-6.34E-04	±	9.80E-04	99.7	104.10	±	0.53	441.6	±	2.0
# 11	6.07E-05	1.87E-03	±	7.35E-04	-3.89E-02	±	2.49E-01	9.78E-04	±	1.09E-03	99.5	105.10	±	0.62	445.2	±	2.3
# 12	3.87E-05	-1.09E-03	±	1.30E-03	-2.14E-01	±	3.70E-01	-2.48E-03	±	1.62E-03	100.3	104.60	±	0.78	443.4	±	2.9
# 13	5.21E-05	1.05E-03	±	8.70E-04	-2.89E-01	±	2.85E-01	1.13E-04	±	1.24E-03	99.7	103.70	±	0.52	439.9	±	2.0
# 14	2.88E-05	2.26E-03	±	1.65E-03	7.60E-02	±	5.17E-01	1.04E-03	±	2.19E-03	99.4	104.90	±	0.90	444.3	±	3.4
# 15	3.07E-05	3.18E-03	±	1.54E-03	-1.73E-01	±	4.95E-01	-3.43E-04	±	1.98E-03	99.1	102.60	±	0.65	435.8	±	2.5
# 16	2.78E-05	-1.38E-03	±	1.67E-03	-3.46E-01	±	5.40E-01	-2.96E-04	±	2.22E-03	100.4	105.40	±	0.74	446.3	±	2.8
# 17	4.43E-05	-1.01E-03	±	1.08E-03	-1.16E-01	±	3.30E-01	-5.96E-04	±	1.36E-03	100.3	106.00	±	0.97	448.5	±	3.6
# 18	1.37E-05	-3.04E-03	±	3.29E-03	-1.31E+00	±	1.08E+00	-3.81E-03	±	4.34E-03	100.9	101.50	±	1.64	431.5	±	6.2
# 19	1.17E-05	1.72E-03	±	4.03E-03	-1.37E+00	±	1.27E+00	-1.29E-03	±	5.29E-03	99.5	98.07	±	1.84	418.7	±	7.0
# 20	2.29E-05	3.75E-03	±	1.97E-03	-9.72E-01	±	6.75E-01	-2.57E-03	±	2.70E-03	99.0	104.50	±	1.16	443.2	±	4.3
<b>Total</b>	6.17E-04	2.17E-03	±	3.36E-04	-1.99E-01	±	1.09E-01	-9.56E-04	±	4.48E-04	99.4	104.00	±	0.20	440.9	±	3.4

N108.MS3		J = 2666E-02 ± 2278E-04															
# 1	-9.97E-08	6.68E-01	±	5.57E-01	-1.50E+02	±	1.45E+02	-1.65E-01	±	5.36E-01	-6272.0	-194	±	164	-1317	±	1633
# 2	7.84E-07	6.70E-02	±	4.40E-02	1.29E+01	±	1.21E+01	-4.17E-02	±	6.79E-02	77.8	69.31	±	14.73	305.8	±	59.8
# 3	4.33E-06	2.00E-02	±	7.01E-03	2.60E-01	±	2.14E+00	-2.38E-02	±	1.25E-02	93.8	88.85	±	2.78	383.5	±	10.8
# 4	5.95E-06	1.16E-02	±	5.34E-03	6.67E-01	±	1.57E+00	-1.26E-02	±	9.10E-03	96.4	91.00	±	2.11	391.8	±	8.2
# 5	4.97E-06	-1.45E-03	±	6.07E-03	1.54E+00	±	1.91E+00	5.03E-05	±	1.06E-02	100.4	99.18	±	2.54	423.2	±	9.7
# 6	1.30E-05	6.10E-03	±	2.46E-03	5.63E-01	±	7.72E-01	7.50E-03	±	4.29E-03	98.2	96.60	±	1.18	413.4	±	4.5
# 7	3.69E-05	3.77E-03	±	8.37E-04	2.22E-01	±	2.74E-01	2.04E-03	±	1.67E-03	98.9	97.28	±	0.47	416.0	±	1.8
# 8	4.66E-05	5.29E-03	±	7.45E-04	1.64E-01	±	2.13E-01	1.78E-03	±	1.31E-03	98.4	94.73	±	0.57	406.2	±	2.2
# 9	5.83E-05	6.65E-03	±	6.13E-04	-5.69E-02	±	1.68E-01	1.27E-03	±	1.01E-03	98.0	94.23	±	0.42	404.3	±	1.6
# 10	6.94E-05	1.63E-04	±	2.31E-03	-8.44E-02	±	1.24E-01	1.61E-03	±	1.12E-03	100.0	99.00	±	0.79	422.5	±	3.0
# 11	1.85E-04	2.93E-03	±	8.65E-04	5.20E-02	±	4.20E-02	6.20E-04	±	4.95E-04	99.2	100.50	±	0.48	428.1	±	1.8
# 12	1.17E-04	5.23E-03	±	1.38E-03	-2.24E-04	±	6.69E-02	8.49E-04	±	7.79E-04	98.4	95.67	±	0.54	409.8	±	2.1
# 13	2.49E-05	1.61E-03	±	6.44E-03	3.20E-01	±	3.23E-01	-3.55E-03	±	2.82E-03	99.5	96.82	±	2.21	414.2	±	8.4
# 14	9.84E-05	8.55E-03	±	1.67E-03	1.28E-01	±	8.85E-02	4.57E-04	±	8.10E-04	97.4	94.53	±	0.66	405.4	±	2.5
# 15	4.96E-05	1.10E-02	±	3.28E-03	1.86E-02	±	1.71E-01	-1.24E-03	±	1.83E-03	96.7	93.95	±	1.17	403.2	±	4.5
# 16	3.09E-05	-8.98E-03	±	5.20E-03	3.17E-01	±	2.95E-01	-2.12E-03	±	2.24E-03	102.7	100.90	±	1.81	429.7	±	6.9
# 17	7.03E-05	1.89E-03	±	2.29E-03	3.35E-03	±	1.23E-01	-4.95E-04	±	1.11E-03	99.4	96.71	±	0.84	413.8	±	3.2
# 18	3.03E-05	2.39E-03	±	5.30E-03	-1.08E-01	±	2.71E-01	4.51E-04	±	2.26E-03	99.3	96.48	±	1.79	412.9	±	6.8
# 20	7.53E-05	5.36E-03	±	2.14E-03	2.84E-02	±	1.12E-01	5.13E-04	±	1.26E-03	98.4	95.35	±	0.81	408.6	±	3.1
# 21	7.10E-05	-5.28E-04	±	5.45E-04	8.29E-02	±	1.26E-01	-1.94E-05	±	5.26E-04	100.2	97.61	±	0.51	417.2	±	1.9
# 22	5.94E-05	1.70E-04	±	6.04E-04	-2.77E-02	±	1.40E-01	-7.75E-04	±	5.99E-04	100.0	98.50	±	0.57	420.6	±	2.2
# 23	4.79E-05	1.49E-04	±	7.48E-04	2.98E-02	±	1.80E-01	-7.28E-04	±	7.81E-04	100.0	96.28	±	0.42	412.2	±	1.6
# 24	1.98E-05	3.18E-04	±	1.86E-03	-3.14E-01	±	4.91E-01	-1.22E-03	±	1.46E-03	99.9	96.15	±	1.01	411.7	±	3.9
# 25	2.01E-05	6.41E-04	±	1.83E-03	-7.28E-01	±	4.67E-01	2.67E-04	±	1.61E-03	99.8	99.52	±	1.06	424.5	±	4.0
# 26	2.85E-05	9.53E-04	±	1.27E-03	-1.71E-01	±	2.76E-01	5.18E-04	±	1.47E-03	99.7	98.00	±	0.85	418.7	±	3.2
# 27	1.57E-05	3.14E-03	±	2.38E-03	-1.75E-02	±	5.79E-01	-1.06E-03	±	1.77E-03	99.0	94.78	±	0.97	406.4	±	3.7
# 28	2.94E-05	1.19E-03	±	1.27E-03	-9.94E-02	±	2.57E-01	-1.91E-03	±	9.54E-04	99.6	97.03	±	0.83	415.0	±	3.2
# 29	4.16E-05	1.07E-03	±	9.21E-04	-1.60E-01	±	1.77E-01	5.52E-04	±	6.99E-04	99.7	97.74	±	0.41	417.7	±	1.6
# 30	1.87E-05	1.32E-03	±	1.98E-03	-6.95E-01	±	3.98E-01	-1.85E-03	±	1.92E-03	99.6	95.15	±	0.87	407.8	±	3.3
# 31	3.74E-05	7.48E-04	±	9.51E-04	7.55E-02	±	2.81E-01	-1.20E-03	±	1.08E-03	99.8	97.31	±	0.74	416.1	±	2.8
# 32	4.44E-05	5.15E-04	±	8.68E-04	-1.65E-01	±	1.88E-01	-6.18E-04	±	7.46E-04	99.8	97.61	±	0.51	417.2	±	1.9
# 33	9.07E-05	4.46E-04	±	4.14E-04	-5.24E-02	±	9.01E-02	5.65E-04	±	5.79E-04	99.9	96.08	±	0.62	411.4	±	2.4
# 34	5.98E-05	2.37E-04	±	6.04E-04	9.26E-02	±	1.61E-01	-5.28E-04	±	6.42E-04	99.9	97.89	±	0.44	418.3	±	1.7
# 35	6.56E-05	1.14E-03	±	5.75E-04	-2.90E-01	±	1.17E-01	5.43E-05	±	6.66E-04	99.7	97.25	±	0.39	415.8	±	1.5
# 36	7.02E-05	8.07E-04	±	5.41E-04	1.75E-02	±	1.17E-01	-8.56E-04	±	5.77E-04	99.8	96.82	±	0.56	414.2	±	2.2
# 37	2.39E-05	-1.15E-02	±	9.07E-04	-2.02E-01	±	7.94E-01	-3.77E-03	±	1.31E-03	103.5	99.53	±	0.73	424.6	±	2.8
# 38	3.27E-05	-2.09E-03	±	7.68E-04	-7.23E-01	±	5.81E-01	-8.54E-04	±	1.20E-03	100.6	98.35	±	0.74	420.0	±	2.8
# 39	1.48E-05	3.30E-03	±	1.34E-03	-1.31E+00	±	1.29E+00	2.03E-04	±	2.05E-03	99.0	92.27	±	1.08	396.7	±	4.2
# 40	1.95E-05	1.16E-03	±	1.20E-03	-6.91E-01	±	9.68E-01	3.95E-05	±	1.67E-03	99.7	97.93	±	0.96	418.5	±	3.7
# 41	9.82E-06	-4.65E-03	±	2.29E-03	5.44E-01	±	2.09E+00	-5.21E-04	±	2.88E-03	101.4	99.45	±	1.55	424.2	±	5.9
# 42	1.36E-05	-1.94E-03	±	1.64E-03	-2.93E-02	±	1.38E+00	7.16E-04	±	2.09E-03	100.6	99.95	±	1.48	426.1	±	5.6
# 43	1.71E-05	-7.12E-04	±	1.39E-03	-2.16E-01	±	1.11E+00	-1.48E-03	±	1.99E-03	100.2	96.46	±	1.26	412.8	±	4.8
# 44	1.30E-05	1.87E-04	±	1.57E-03	-7.37E-01	±	1.45E+00	3.96E-04	±	2.90E-03	99.7	93.88	±	0.75	402.9	±	2.9
# 45	1.47E-05	2.21E-03	±	1.44E-03	-7.10E-01	±	1.27E+00	-5.45E-03	±	2.16E-03	99.3	95.19	±	1.03	408.0	±	4.0
# 46	1.72E-04	2.09E-04	±	1.40E-04	-1.16E-01	±	1.13E-01	-6.05E-04	±	3.12E-04	99.9	103.10	±	0.39	438.2	±	1.5
<b>Total</b>	1.97E-03	2.05E-03	±	2.76E-04	-3.68E-02	±	4.05E-02	-1.45E-04	±	1.82E-04	99.4	97.56	±	0.13	417.0	±	3.2

N177.MS2		J = 2673E-02 ± 5									
----------	--	------------------	--	--	--	--	--	--	--	--	--

# 7	1,01E-05	1,13E-02	±	4,98E-03	5,72E+00	±	3,25E-01	6,38E-03	±	5,48E-03	96,6	94,48 ± 2,14	406,2 ± 8,2
# 8	1,45E-05	1,18E-02	±	3,24E-03	8,54E+00	±	2,99E-01	7,76E-03	±	3,83E-03	96,5	96,90 ± 1,52	415,5 ± 5,8
# 9	5,13E-05	3,75E-03	±	9,51E-04	8,85E+00	±	1,11E-01	4,94E-03	±	1,20E-03	98,9	98,80 ± 0,53	422,8 ± 2,0
# 10	2,31E-05	1,02E-02	±	1,97E-03	8,26E+00	±	2,09E-01	7,79E-04	±	2,27E-03	96,9	95,35 ± 1,28	409,6 ± 4,9
# 11	2,22E-05	3,11E-03	±	2,12E-03	8,57E+00	±	1,90E-01	5,49E-03	±	2,71E-03	99,1	101,60 ± 1,02	433,5 ± 3,9
# 12	2,37E-05	4,68E-03	±	1,86E-03	7,97E+00	±	1,70E-01	2,56E-03	±	2,52E-03	98,6	99,12 ± 0,90	424,0 ± 3,4
# 13	4,02E-05	1,35E-03	±	1,15E-03	8,37E+00	±	1,22E-01	3,24E-03	±	1,62E-03	99,6	100,50 ± 0,65	429,3 ± 2,5
# 14	1,06E-05	6,73E-03	±	4,03E-03	7,00E+00	±	2,92E-01	8,24E-04	±	6,14E-03	98,0	94,82 ± 1,76	407,6 ± 6,8
# 15	4,20E-05	2,05E-03	±	1,22E-03	7,66E+00	±	8,26E-02	2,23E-03	±	1,34E-03	99,4	100,30 ± 0,65	428,5 ± 2,5
# 16	8,67E-06	1,10E-02	±	5,42E-03	3,73E+00	±	2,38E-01	9,07E-04	±	5,73E-03	96,6	91,55 ± 2,37	394,9 ± 9,2
# 17	3,63E-06	1,98E-02	±	1,21E-02	3,67E+00	±	6,04E-01	5,73E-03	±	1,45E-02	94,6	103,10 ± 5,68	439,0 ± 21,5
# 18	5,84E-06	-5,75E-04	±	8,14E-03	4,02E+00	±	3,87E-01	1,63E-02	±	9,41E-03	100,2	100,50 ± 3,42	429,1 ± 13,0
# 19	3,82E-05	3,97E-03	±	1,15E-03	8,18E+00	±	1,42E-01	1,13E-03	±	1,50E-03	98,8	98,71 ± 0,70	422,4 ± 2,7
<b>Total</b>	3,34E-04	6,34E-03	±	6,03E-04	7,25E+00	±	4,64E-02	2,99E-03	±	7,34E-04	98,1	98,10 ± 0,29	420,1 ± 1,4

## U-Pb zircon, SIMS

TABLE 1: Analyses des zircons

Analyses	Teneurs (ppm)				Rapports isotopiques				Ages (Ma)						
	U	Th	Pb		7/5	±	6/8	±	Corr.	7/6	±	7/5	±	6/8	±
Z16-45-1@1	20	6	10		12,96	0,03	0,57	0,02	0,62	0,17	0,03	2677	32	2891	49
Z16-45-1@2	49	75	22		12,12	0,04	0,53	0,03	0,87	0,17	0,02	2614	33	2747	70
Z16-45-5@1	2519	1171	113		0,36	0,01	0,05	0,01	0,77	0,05	0,01	313	4	329	3
Z16-45-5@2	2496	312	48		0,09	0,07	0,02	0,01	0,16	0,03	0,07	89	6	143	2
Z16-45-4@1	702	157	247		11,01	0,01	0,41	0,01	0,92	0,20	0,01	2524	12	2210	23
Z16-45-4@2	35	38	17		12,23	0,03	0,55	0,02	0,62	0,16	0,02	2622	29	2841	45
Z16-45-9@1	249	231	92		8,07	0,02	0,43	0,02	0,72	0,14	0,02	2239	20	2300	31
Z16-45-9@2	58	75	26		11,51	0,02	0,53	0,02	0,75	0,16	0,01	2566	19	2749	35
Z16-45-8@1	76	154	34		12,32	0,04	0,53	0,02	0,55	0,17	0,03	2629	37	2735	49
Z16-45-8@2	51	72	23		10,98	0,03	0,53	0,02	0,85	0,15	0,02	2522	26	2733	53
Z16-19-27@1	85	44	34		11,75	0,01	0,47	0,01	0,99	0,18	0,00	2585	10	2486	23
Z16-19-27@2	55	14	13		4,19	0,02	0,28	0,02	0,94	0,11	0,01	1672	17	1615	27
Z16-19-26@1	27	13	11		10,92	0,02	0,45	0,01	0,72	0,18	0,01	2516	15	2389	23
Z16-19-26@2	31	10	11		8,34	0,02	0,39	0,02	0,81	0,15	0,01	2268	17	2138	28
Z16-19-23@1	286	20	73		4,41	0,01	0,30	0,01	0,96	0,11	0,00	1715	11	1678	18
Z16-19-23@2	38	33	8		3,58	0,02	0,26	0,01	0,72	0,10	0,01	1546	13	1472	15
Z16-19-4@1	47	42	21		13,58	0,01	0,51	0,01	0,89	0,19	0,01	2721	14	2650	29
Z16-19-4@2	95	3	27		5,06	0,01	0,33	0,01	0,92	0,11	0,01	1830	12	1815	21

TABLE 1: Analyses des zircons

Analyses	Teneurs (ppm)				Rapports isotopiques				Ages (Ma)						
	U	Th	Pb		7/5	±	6/8	±	Corr.	7/6	±	7/5	±	6/8	±
Z16-19-2@1	69	17	25		9,64	0,02	0,42	0,01	0,90	0,17	0,01	2401	15	2259	28
Z16-19-2@2	45	5	15		8,31	0,02	0,39	0,01	0,60	0,15	0,02	2266	21	2123	25
Z16-19-2@3	23	6	6		4,24	0,03	0,30	0,02	0,55	0,10	0,03	1682	26	1716	27
Z16-19-1@1	68	1	19		4,94	0,02	0,32	0,01	0,71	0,11	0,01	1810	15	1812	20
Z16-19-9@2	37	14	10		4,28	0,02	0,31	0,01	0,71	0,10	0,01	1690	17	1733	23
Z16-19-20@1	521	144	120		3,87	0,03	0,27	0,03	0,96	0,10	0,01	1607	23	1529	38
Z16-19-20@2	221	15	53		5,11	0,01	0,28	0,01	0,79	0,13	0,01	1837	12	1581	16
Z16-19-20@3	14	7	2		3,97	0,07	0,21	0,03	0,43	0,14	0,06	1628	53	1206	32
Z16-19-28@1	32	20	16		14,65	0,03	0,56	0,02	0,77	0,19	0,02	2793	29	2862	55
Z16-19-28@2	103	1	24		4,12	0,02	0,28	0,02	0,81	0,11	0,01	1658	16	1570	22
Z16-19-28@3	130	10	33		4,38	0,02	0,29	0,02	0,86	0,11	0,01	1709	20	1655	30
Z16-19-28@4	50	10	15		5,31	0,02	0,34	0,01	0,65	0,11	0,02	1871	19	1899	24
Z16-26-3@2	1382	15	83		0,51	0,02	0,07	0,02	0,96	0,05	0,00	421	6	438	7
Z16-26-3@3	3047	94	181		0,11	0,04	0,07	0,01	0,25	0,01	0,04	106	4	430	4
Z16-26-10@2	1413	10	89		0,56	0,05	0,07	0,05	0,99	0,06	0,01	453	17	458	20
Z16-26-23@1	460	52	61		1,62	0,03	0,15	0,03	0,98	0,08	0,01	977	21	925	29
Z16-26-3@1	403	87	56		1,57	0,04	0,16	0,03	0,95	0,07	0,01	958	22	960	30
Z16-26-8@2	33	34	6		2,16	0,04	0,20	0,02	0,42	0,08	0,04	1167	27	1156	17

TABLE 1: Analyses des zircons

Analyses	Teneurs (ppm)				Rapports isotopiques				Ages (Ma)						
	U	Th	Pb		7/5	±	6/8	±	Corr.	7/6	±	7/5	±	6/8	±
Z16-26-16@3	203	78	35		2,10	0,01	0,20	0,01	0,66	0,08	0,01	1148	10	1183	10
Z16-26-8@1	32	26	6		2,14	0,04	0,20	0,02	0,51	0,08	0,02	1161	24	1190	19
Z16-26-16@2	212	84	38		2,20	0,01	0,21	0,01	0,77	0,08	0,01	1182	10	1215	13
Z16-26-23@2	767	20	141		2,46	0,03	0,21	0,03	0,96	0,08	0,01	1260	19	1247	29
Z16-26-16@1	39	13	8		2,73	0,03	0,24	0,02	0,57	0,08	0,02	1337	22	1369	21
Z16-26-10@1	1575	210	416		4,59	0,03	0,31	0,03	1,00	0,11	0,00	1748	22	1730	41
Z16-26-11@1	89	21	28		5,28	0,02	0,36	0,02	0,75	0,11	0,02	1866	20	1982	30
Z16-26-7@3	282	69	113		11,79	0,01	0,47	0,01	0,93	0,18	0,00	2588	11	2465	23
Z16-26-7@2	58	6	23		12,58	0,02	0,47	0,02	0,95	0,19	0,01	2648	17	2489	36
Z15-15-18@1	3872	5205	139		0,42	0,18	0,04	0,03	0,18	0,07	0,18	355	54	264	8
Z15-15-28@2	1278	1738	56		0,37	0,10	0,05	0,04	0,35	0,05	0,09	321	27	318	11
Z15-15-30@2	1653	2393	75		0,32	0,14	0,05	0,02	0,11	0,04	0,14	281	34	330	5
Z15-15-8@1	1294	1262	69		0,43	0,11	0,06	0,01	0,09	0,05	0,11	366	35	390	4
Z15-15-22@2	542	210	29		0,49	0,02	0,06	0,01	0,50	0,06	0,02	403	6	395	3
Z15-15-9@1	1285	690	70		0,42	0,15	0,06	0,01	0,08	0,05	0,15	354	43	398	5
Z15-15-21@2	14252	4985	781		0,47	0,04	0,06	0,00	0,10	0,05	0,04	391	13	399	2
Z15-15-18@2	882	503	49		0,49	0,01	0,06	0,01	0,51	0,06	0,01	405	4	400	2
Z15-15-14@2	1415	667	79		0,49	0,05	0,06	0,01	0,15	0,05	0,05	405	16	405	3

TABLE 1: Analyses des zircons

Analyses	Teneurs (ppm)			Rapports isotopiques					Ages (Ma)					
	U	Th	Pb	7/5	±	6/8	±	Corr.	7/6	±	7/5	±	6/8	±
Z15-15-28@1	769	215	44	0,50	0,02	0,07	0,01	0,26	0,05	0,02	409	7	415	2
Z15-15-17@1	428	873	25	0,52	0,08	0,07	0,01	0,11	0,06	0,08	427	27	419	4
Z15-15-12@1	897	386	52	0,48	0,13	0,07	0,01	0,11	0,05	0,12	401	41	425	6
Z15-15-17@2	699	584	41	0,47	0,26	0,07	0,02	0,09	0,05	0,26	389	82	427	10
Z15-15-4@1	1056	694	63	0,53	0,01	0,07	0,01	0,64	0,06	0,01	430	5	431	4
Z15-15-8@2	1556	2001	93	0,44	0,64	0,07	0,06	0,09	0,05	0,63	370	180	434	24
Z15-15-10@2	3295	3127	202	0,46	0,13	0,07	0,03	0,21	0,05	0,13	383	41	444	12
Z15-15-15@2	1274	742	78	0,55	0,01	0,07	0,01	0,90	0,06	0,00	446	2	446	3
Z15-15-11@1	2471	3083	156	0,55	0,01	0,07	0,01	0,75	0,05	0,01	445	5	458	4
Z15-15-34@2	905	561	59	0,61	0,01	0,08	0,01	0,89	0,06	0,00	482	4	470	4
Z15-15-32@1	3077	6628	200	0,58	0,01	0,08	0,00	0,58	0,06	0,00	463	2	471	1
Z15-15-23@2	2214	1444	145	0,58	0,01	0,08	0,00	0,40	0,06	0,01	465	3	475	2
Z15-15-11@2	2673	8347	178	0,59	0,02	0,08	0,02	0,90	0,05	0,01	469	8	482	9
Z15-15-10@1	6171	7682	416	0,52	0,15	0,08	0,01	0,10	0,05	0,15	424	50	487	7
Z15-15-32@2	4974	18822	345	0,61	0,01	0,08	0,00	0,26	0,05	0,01	481	6	501	2
Z15-15-13@2	244	186	24	1,30	0,03	0,11	0,03	0,90	0,08	0,01	847	19	695	20
Z15-15-30@3	902	726	110	1,35	0,01	0,14	0,00	0,69	0,07	0,00	867	3	855	3
Z15-15-2@1	979	178	123	0,90	0,48	0,15	0,09	0,19	0,04	0,47	652	207	878	75



TABLE 1: Analyses des zircons

Analyses	Teneurs (ppm)				Rapports isotopiques				Ages (Ma)					
	U	Th	Pb	7/5	±	6/8	±	Corr.	7/6	±	7/5	±	6/8	±
Z15-15-14@1	818	953	103	2,01	0,14	0,15	0,02	0,12	0,10	0,14	1118	90	885	14
Z15-15-30@4	1289	986	165	1,41	0,01	0,15	0,00	0,86	0,07	0,00	893	3	897	4
Z15-15-7@1	2095	454	302	1,90	0,07	0,17	0,02	0,36	0,08	0,06	1083	43	1000	22
Z15-15-30@1	8	4	1	2,77	0,12	0,18	0,03	0,21	0,11	0,12	1346	89	1089	26
Z15-15-3@2	456	118	74	2,80	0,01	0,19	0,00	0,48	0,11	0,01	1356	6	1114	4
Z15-15-3@1	206	64	34	2,68	0,02	0,19	0,01	0,59	0,10	0,02	1323	15	1125	12
Z15-15-2@2	327	141	54	2,01	0,01	0,19	0,00	0,69	0,08	0,00	1119	4	1128	4
Z15-15-34@1	127	53	21	2,09	0,01	0,20	0,01	0,68	0,08	0,01	1146	6	1151	6
Z15-15-22@1	159	128	31	2,71	0,01	0,23	0,01	0,76	0,09	0,00	1331	5	1319	6
Z15-15-21@1	51	61	10	2,69	0,02	0,23	0,01	0,44	0,08	0,01	1326	11	1334	8
Z15-15-23@1	204	57	44	3,22	0,01	0,25	0,01	0,72	0,09	0,00	1463	5	1430	6
Z15-15-15@1	419	280	90	5,57	0,01	0,25	0,01	0,88	0,16	0,00	1911	9	1436	12
Z15-15-6@2	885	336	197	3,64	0,00	0,26	0,00	0,70	0,10	0,00	1558	4	1483	5
Z15-15-6@1	824	681	204	4,24	0,00	0,29	0,00	0,95	0,11	0,00	1682	3	1635	5
Z15-15-5@1	261	139	66	5,55	0,01	0,29	0,01	0,64	0,14	0,01	1908	9	1662	10
Z15-15-29@1	642	404	183	5,04	0,00	0,33	0,00	0,82	0,11	0,00	1826	4	1842	6
Z15-15-28@4	539	26	181	8,25	0,01	0,39	0,01	0,93	0,15	0,00	2259	6	2129	12
Z15-15-28@4	539	26	181	8,25	0,01	0,39	0,01	0,93	0,15	0,00	2259	6	2129	12

TABLE 1: Analyses des zircons

Analyses	Teneurs (ppm)				Rapports isotopiques				Ages (Ma)					
	U	Th	Pb	7/5	±	6/8	±	Corr.	7/6	±	7/5	±	6/8	±
Z15-15-28@3	90	100	35	10,38	0,01	0,45	0,00	0,73	0,17	0,00	2469	5	2410	8
Z15-15-28@3	90	100	35	10,38	0,01	0,45	0,00	0,73	0,17	0,00	2469	5	2410	8
Z15-15-13@1	277	284	123	12,32	0,04	0,52	0,03	0,76	0,17	0,02	2629	33	2691	59
Z15-15-33@2	178983	296148	183742	29,49	0,28	1,19	0,12	0,44	0,18	0,25	3470	245	5068	424
Z15-19-1@1	241	173	94	10,30	0,01	0,46	0,00	0,88	0,16	0,00	2462	5	2423	10
Z15-19-1@2	1995	328	443	3,89	0,00	0,26	0,00	0,87	0,11	0,00	1612	4	1482	5
Z15-19-2@1	443	357	167	9,68	0,01	0,44	0,01	0,97	0,16	0,00	2405	5	2349	11
Z15-19-2@2	1419	234	418	5,46	0,00	0,34	0,00	0,96	0,12	0,00	1894	4	1900	7
Z15-19-4@1	231	176	60	4,86	0,00	0,30	0,00	0,91	0,12	0,00	1796	4	1700	6
Z15-19-5@1	44	23	17	10,32	0,02	0,45	0,01	0,70	0,16	0,01	2464	15	2415	23
Z15-19-10@1	233	48	42	3,49	0,01	0,21	0,01	0,80	0,12	0,00	1524	6	1216	7
Z15-19-10@2	5195	345	731	1,96	0,00	0,16	0,00	0,96	0,09	0,00	1102	2	978	3
Z15-19-11@1	105	84	44	11,23	0,01	0,49	0,00	0,75	0,17	0,00	2542	6	2555	10
Z15-19-12@1	56	32	22	10,18	0,01	0,45	0,01	0,95	0,16	0,00	2451	13	2384	27
Z15-19-13@1	53	31	20	9,90	0,01	0,43	0,00	0,55	0,17	0,01	2426	8	2325	9
Z15-19-15@1	85	68	28	8,38	0,01	0,39	0,01	0,69	0,16	0,01	2273	7	2101	9
Z15-19-15@2	106	59	40	9,76	0,01	0,44	0,01	0,87	0,16	0,00	2412	7	2356	14

TABLE 1: Analyses des zircons

Analyses	Teneurs (ppm)			Rapports isotopiques				Ages (Ma)						
	U	Th	Pb	7/5	±	6/8	±	Corr.	7/6	±	7/5	±	6/8	±
Z15-19-16@1	131	138	53	10,43	0,01	0,47	0,01	0,94	0,16	0,00	2474	9	2469	19
Z15-19-16@2	406	62	115	5,24	0,01	0,33	0,01	0,95	0,12	0,00	1860	5	1833	9
Z15-19-7@1	171	140	67	10,38	0,01	0,46	0,01	0,98	0,16	0,00	2469	5	2427	11
Z15-19-7@2	712	128	151	3,81	0,00	0,25	0,00	0,77	0,11	0,00	1594	3	1421	4
Z15-19-8@1	218	143	69	7,90	0,00	0,37	0,00	0,87	0,16	0,00	2219	4	2026	7
Z15-19-8@2	1143	5	307	4,89	0,00	0,31	0,00	0,95	0,11	0,00	1800	3	1753	6
Z15-19-9@1	96	53	29	7,27	0,01	0,35	0,01	0,63	0,15	0,01	2145	11	1930	13
Z15-19-9@2	522	14	152	5,47	0,00	0,34	0,00	0,96	0,12	0,00	1896	4	1885	8
Z15-19-30@1	112	83	32	6,85	0,01	0,34	0,01	0,79	0,15	0,01	2093	13	1872	19
Z15-19-31@1	180	149	72	10,63	0,01	0,47	0,00	0,76	0,17	0,00	2491	5	2466	8
Z15-19-29@1	57	37	22	10,15	0,01	0,45	0,01	0,93	0,16	0,00	2448	10	2405	21
Z15-19-28@1	204	93	83	10,91	0,00	0,47	0,00	0,74	0,17	0,00	2516	4	2499	7
Z15-19-28@2	98	85	40	11,11	0,01	0,48	0,01	0,83	0,17	0,00	2533	6	2527	12
Z15-19-33@1	43	22	15	8,17	0,02	0,40	0,01	0,46	0,15	0,01	2250	14	2156	13
Z15-19-34@1	82	92	34	11,08	0,01	0,48	0,01	0,88	0,17	0,00	2529	6	2520	11
Z15-19-34@2	62	60	25	10,80	0,01	0,47	0,01	0,88	0,17	0,00	2506	7	2473	14
Z15-19-36@1	366	65	64	2,74	0,01	0,20	0,01	0,89	0,10	0,00	1340	4	1190	6
Z15-19-42@1	66	66	26	10,75	0,01	0,47	0,01	0,72	0,17	0,01	2502	8	2478	13

TABLE 1: Analyses des zircons

Analyses	Teneurs (ppm)			Rapports isotopiques					Ages (Ma)					
	U	Th	Pb	7/5	±	6/8	±	Corr.	7/6	±	7/5	±	6/8	±
Z15-19-41@1	75	84	29	10,24	0,01	0,45	0,01	0,96	0,17	0,00	2456	7	2388	15
Z15-19-40@1	66	74	28	11,01	0,01	0,48	0,01	0,60	0,17	0,01	2524	9	2536	12
Z15-19-17@1	110	82	42	9,97	0,01	0,44	0,01	0,75	0,16	0,01	2432	8	2361	13
Z15-19-17@2	317	52	88	5,12	0,01	0,32	0,00	0,66	0,11	0,00	1840	5	1806	6
Z15-19-18@1	119	59	47	10,11	0,02	0,46	0,01	0,80	0,16	0,01	2445	16	2434	29
Z15-19-20@1	81	69	28	8,84	0,01	0,41	0,01	0,89	0,16	0,01	2322	12	2198	22
Z15-19-22@1	287	74	74	4,96	0,01	0,30	0,01	0,95	0,12	0,00	1813	12	1690	21
Z15-19-23@1	73	41	30	10,99	0,01	0,48	0,01	0,74	0,17	0,01	2522	8	2526	14
Z15-19-24@1	2688	43	676	4,48	0,00	0,29	0,00	0,98	0,11	0,00	1728	4	1654	7
Z15-19-25@1	101	78	40	10,48	0,01	0,46	0,01	0,82	0,17	0,00	2478	6	2443	11
Z15-19-25@2	245	75	73	5,51	0,00	0,35	0,00	0,85	0,12	0,00	1903	3	1916	5
Z15-41-36@2	128	53	7	0,48	0,27	0,06	0,03	0,11	0,05	0,27	400	86	401	11
Z15-41-36@1	831	119	106	1,44	0,03	0,15	0,01	0,18	0,07	0,03	906	21	895	5
Z15-41-27@2	77	47	5	0,42	0,14	0,07	0,02	0,13	0,04	0,14	356	41	435	7
Z15-41-26@2	70	44	4	0,62	0,13	0,07	0,02	0,15	0,06	0,13	488	51	460	9
Z15-41-38@1	1598	967	410	4,09	0,00	0,30	0,00	0,91	0,10	0,00	1653	3	1685	4
Z15-41-38@2	91	41	6	0,66	0,08	0,08	0,02	0,23	0,06	0,08	516	31	514	9
Z15-41-35@1	189	193	11	0,52	0,05	0,07	0,01	0,19	0,05	0,05	422	16	436	4

TABLE 1: Analyses des zircons

Analyses	Teneurs (ppm)			Rapports isotopiques					Ages (Ma)					
	U	Th	Pb	7/5	±	6/8	±	Corr.	7/6	±	7/5	±	6/8	±
Z15-41-35@2	118	91	7	0,51	0,07	0,07	0,02	0,27	0,05	0,07	420	25	432	8
Z15-41-01@2	226	127	13	0,55	0,05	0,07	0,04	0,73	0,06	0,04	446	19	430	16
Z15-4101@1	129	97	8	0,54	0,07	0,07	0,01	0,18	0,06	0,07	435	25	427	5
Z15-41-02@2	115	51	7	0,53	0,27	0,07	0,03	0,11	0,06	0,27	435	91	437	12
Z15-41-02@1	307	77	86	5,02	0,02	0,33	0,01	0,32	0,11	0,01	1822	13	1827	8
Z15-41-05@2	111	45	7	0,57	0,35	0,07	0,03	0,09	0,06	0,35	461	122	433	13
Z15-41-06@2	108	44	10	1,03	0,13	0,11	0,02	0,18	0,07	0,13	719	64	690	15
Z15-41-06@1	1266	265	197	2,11	0,01	0,18	0,00	0,32	0,08	0,01	1152	8	1074	4
Z15-41-15@2	61	30	4	0,43	0,31	0,07	0,03	0,08	0,04	0,31	363	90	436	11
Z15-41-14@2	86	53	5	0,56	0,17	0,07	0,02	0,11	0,06	0,17	449	59	444	8
Z15-41-16@1	184	57	28	1,74	0,03	0,18	0,01	0,31	0,07	0,03	1023	19	1065	9
Z15-41-16@2	652	144	96	1,71	0,01	0,17	0,00	0,31	0,07	0,01	1013	6	1016	3
Z15-41-20@1	143	105	22	1,84	0,03	0,18	0,00	0,15	0,08	0,03	1059	21	1051	5
Z15-41-20@2	111	51	7	0,39	0,52	0,08	0,05	0,10	0,04	0,51	335	138	486	25
Z15-41-10@1	365	122	69	2,71	0,01	0,22	0,01	0,79	0,09	0,01	1331	8	1274	10
Z15-41-03@1	180	154	11	0,56	0,14	0,07	0,02	0,13	0,06	0,14	450	49	436	7
Z15-41-04@2	85	37	5	0,56	0,20	0,07	0,03	0,13	0,06	0,20	449	69	439	11
Z15-41-11@2	89	51	6	0,47	0,32	0,08	0,03	0,08	0,04	0,32	392	100	486	12

TABLE 1: Analyses des zircons

Analyses	Teneurs (ppm)				Rapports isotopiques				Ages (Ma)						
	U	Th	Pb		7/5	±	6/8	±	Corr.	7/6	±	7/5	±	6/8	±
Z15-41-09@2	188	131	50		4,52	0,09	0,31	0,01	0,14	0,11	0,08	1735	69	1733	18
Z15-41-09@1	115	59	20		2,76	0,04	0,20	0,02	0,56	0,10	0,03	1345	27	1192	22
Z15-41-18@1	1300	511	211		2,01	0,00	0,19	0,00	0,70	0,08	0,00	1120	3	1114	3
Z15-41-18@2	101	44	7		0,70	0,19	0,08	0,02	0,12	0,07	0,19	541	78	484	10
Z15-41-19@1	252	84	65		4,56	0,01	0,30	0,01	0,67	0,11	0,01	1742	9	1699	11
Z15-41-19@2	91	41	5		0,52	0,31	0,07	0,03	0,09	0,06	0,31	425	102	425	11
Z15-41-21@1	87	66	18		3,09	0,12	0,24	0,02	0,16	0,09	0,12	1430	86	1387	23
Z15-41-22@2	106	45	6		0,44	0,42	0,07	0,05	0,13	0,05	0,41	371	122	439	22
Z15-41-22@1	188	133	48		4,20	0,01	0,30	0,01	0,49	0,10	0,01	1673	11	1685	10
Z15-41-24@1	790	1561	79		1,04	0,02	0,12	0,01	0,34	0,06	0,02	724	9	711	4
Z15-41-24@2	277	117	17		0,54	0,17	0,07	0,01	0,08	0,06	0,17	437	59	434	6
Z15-41-37@2	145	131	9		0,66	0,16	0,07	0,02	0,15	0,07	0,16	516	64	449	11
Z15-41-37@1	123	80	7		0,57	0,17	0,07	0,02	0,11	0,06	0,17	458	62	429	8
Z15-41-33@1	144	141	9		0,49	0,11	0,07	0,01	0,11	0,05	0,11	403	36	437	5
Z15-41-33@2	59	27	4		0,53	0,26	0,07	0,03	0,13	0,06	0,25	432	86	434	14
Z15-41-41@1	138	109	8		0,42	0,19	0,07	0,02	0,08	0,04	0,19	353	55	424	6
Z15-41-41@2	84	49	5		0,47	0,59	0,07	0,04	0,08	0,05	0,58	389	174	422	18
Z15-41-40@1	183	188	11		0,51	0,07	0,07	0,01	0,19	0,05	0,07	418	23	445	5

TABLE 1: Analyses des zircons

Analyses	Teneurs (ppm)				Rapports isotopiques					Ages (Ma)					
	U	Th	Pb		7/5	±	6/8	±	Corr.	7/6	±	7/5	±	6/8	±
Z15-41-40@2	105	45	6		0,49	0,26	0,07	0,03	0,12	0,05	0,26	404	83	414	13
Z15-41-17@1	129	99	8		0,47	0,10	0,07	0,01	0,14	0,05	0,10	395	31	437	6
Z15-41-17@2	122	62	8		0,56	0,12	0,07	0,01	0,12	0,06	0,12	452	44	460	6
Z15-41-30@1	244	180	59		3,85	0,01	0,28	0,00	0,34	0,10	0,01	1604	11	1589	7
Z15-41-30@2	87	41	9		1,28	0,08	0,12	0,01	0,17	0,08	0,08	837	46	702	9
Z15-41-31@1	202	209	12		0,50	0,07	0,07	0,02	0,28	0,05	0,07	414	24	439	8
Z15-41-31@2	78	60	5		0,53	0,13	0,07	0,02	0,17	0,06	0,13	430	45	431	9
Z15-41-32@1	145	69	20		1,70	0,04	0,16	0,01	0,29	0,08	0,04	1010	26	957	11
Z15-45-2@2	3096	397	182		0,52	0,00	0,07	0,00	0,71	0,06	0,00	428	2	426	1
Z15-45-17@2	2457	85	149		0,54	0,00	0,07	0,00	0,91	0,06	0,00	436	2	439	2
Z15-45-2@1	243	137	23		1,50	0,01	0,11	0,01	0,61	0,10	0,01	928	5	680	3
Z15-45-17@1	282	97	47		2,09	0,01	0,19	0,00	0,55	0,08	0,01	1146	5	1142	4
Z15-45-1@1	1262	63	261		3,67	0,02	0,24	0,01	0,39	0,11	0,02	1564	19	1390	12
Z15-45-8@2	385	84	112		5,43	0,00	0,34	0,00	0,83	0,12	0,00	1890	4	1877	7
Z15-45-1@2	1616	31	477		5,44	0,00	0,34	0,00	0,90	0,11	0,00	1892	2	1903	4
Z15-45-16@1	302	159	98		6,95	0,01	0,38	0,01	0,74	0,13	0,01	2105	10	2062	14
Z15-45-14@1	287	123	99		8,70	0,01	0,40	0,01	0,97	0,16	0,00	2307	7	2168	13
Z15-45-15@1	270	294	102		10,04	0,00	0,44	0,00	0,89	0,17	0,00	2439	4	2344	8

TABLE 1: Analyses des zircons

Analyses	Teneurs (ppm)				Rapports isotopiques				Ages (Ma)					
	U	Th	Pb	7/5	±	6/8	±	Corr.	7/6	±	7/5	±	6/8	±
Z15-45-3@1	120	90	46	9,58	0,01	0,44	0,01	0,86	0,16	0,00	2395	9	2357	16
Z15-45-7@1	114	119	45	10,59	0,01	0,46	0,01	0,86	0,17	0,00	2488	7	2441	13
Z15-45-11@2	99	62	40	10,74	0,01	0,47	0,01	0,84	0,17	0,00	2501	7	2481	14
Z15-45-12@1	48	38	19	10,88	0,01	0,47	0,01	0,80	0,17	0,01	2513	9	2485	17
Z15-45-8@1	65	54	27	10,92	0,01	0,48	0,01	0,59	0,17	0,01	2516	9	2512	12
Z15-45-13@1	64	45	26	11,01	0,01	0,48	0,01	0,82	0,17	0,01	2524	9	2520	17
Z15-45-11@1	53	42	22	11,10	0,01	0,48	0,01	0,89	0,17	0,00	2531	6	2520	12
Z15-45-15@2	247	307	102	10,95	0,01	0,48	0,00	0,82	0,16	0,00	2519	5	2534	10
Z15-10-01@1	113	34	39	9,64	0,03	0,40	0,02	0,77	0,17	0,02	2401	29	2187	45
Z15-10-04@1	772	327	341	13,53	0,02	0,51	0,01	0,81	0,19	0,01	2717	15	2677	27
Z15-10-04@2	126	35	54	12,53	0,03	0,50	0,02	0,81	0,18	0,02	2645	28	2620	53
Z15-10-06@1	30	9	11	9,75	0,04	0,43	0,02	0,57	0,17	0,03	2411	38	2297	46
Z15-10-06@2	20	3	5	3,61	0,10	0,28	0,02	0,16	0,09	0,10	1553	78	1592	23
Z15-10-02@1	20	3	5	4,42	0,11	0,29	0,04	0,31	0,11	0,11	1716	89	1639	51
Z15-10-02@2	10	1	2	4,85	0,12	0,28	0,03	0,29	0,12	0,11	1793	95	1611	49
Z15-10-8@2	29	8	9	7,88	0,02	0,39	0,01	0,48	0,15	0,02	2218	21	2102	20
Z15-10-09@1	76	14	27	9,38	0,01	0,42	0,01	0,64	0,16	0,01	2376	13	2268	18
Z15-10-09@2	9	1	2	3,91	0,07	0,31	0,02	0,28	0,09	0,06	1617	53	1717	28



TABLE 1: Analyses des zircons

Analyses	Teneurs (ppm)			Rapports isotopiques					Ages (Ma)					
	U	Th	Pb	7/5	±	6/8	±	Corr.	7/6	±	7/5	±	6/8	±
Z15-10-11@1	31	6	11	9,69	0,03	0,42	0,02	0,59	0,17	0,02	2406	24	2273	29
Z15-10-11@2	102	17	45	13,50	0,01	0,51	0,01	0,61	0,19	0,01	2715	8	2661	12
Z15-10-16@1	46	11	10	3,95	0,02	0,26	0,01	0,56	0,11	0,02	1624	15	1499	14
Z15-10-16@2	18	3	4	4,49	0,11	0,28	0,03	0,24	0,12	0,10	1728	86	1593	36
Z15-10-30@1	64	91	22	8,95	0,02	0,40	0,01	0,70	0,16	0,01	2333	16	2172	23
Z15-10-30@2	41	45	15	9,82	0,02	0,42	0,01	0,53	0,17	0,01	2418	16	2250	17
Z15-10-32@1	155	212	56	9,48	0,01	0,42	0,01	0,65	0,16	0,01	2386	10	2280	13
Z15-10-32@2	161	60	56	9,14	0,01	0,41	0,01	0,54	0,16	0,01	2352	12	2204	13
Z15-10-25@1	286	140	94	8,77	0,02	0,38	0,02	0,78	0,17	0,01	2315	21	2098	33
Z15-10-25@2	271	193	107	11,89	0,02	0,46	0,01	0,69	0,19	0,01	2595	14	2434	21

Données des analyses des zircons. Les deux premiers nombres des "analyses" renvoient aux échantillons, le troisième au grain analysé, @1, @2 et @3 renvoient respectivement aux coeurs, bordures, et éventuellement (3) bordures externes analysées à la SIMS. 7/5, 6/8 et 7/6, et ± renvoient respectivement aux rapports  $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ ,  $^{206}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ ,  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  corrigés du plomb commun et à leurs incertitudes (1 sigma). Corr. est la corrélation des erreurs des deux rapports Pb/U pour le diagramme de Wetherill.

